

05
Физические свойства фрустрированного антиферромагнетика SmFeTiO_5 с нарушением однородности магнитной подсистемы

© Т.В. Дрокина, М.С. Молокеев, А.В. Шабанов, О.А. Баюков,
Ю.В. Князев, А.М. Ворotyнов, Д.А. Великанов

Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН,
Красноярск, Россия

E-mail: tvd@iph.krasn.ru

Поступила в Редакцию 14 марта 2026 г.

В окончательной редакции 15 апреля 2026 г.

Принята к публикации 20 апреля 2026 г.

Соединение SmFeTiO_5 получено методом твердофазного синтеза из исходных оксидов Fe_2O_3 , Sm_2O_3 и TiO_2 . Проведены структурные, резонансные, статические магнитные исследования. SmFeTiO_5 имеет ромбическую структуру с пространный группой $P6_{3m}$. Определены параметры элементарной ячейки, координаты атомов, их изотропные тепловые параметры, основные длины межатомных связей. Появление сверхтонкой структуры в мессбауэровских спектрах ниже температуры 45 К указывает на переход магнитной подсистемы SmFeTiO_5 из парамагнитного состояния в состояние с магнитным порядком. Получены температурные зависимости величин сверхтонких магнитных полей на ядрах железа в октаэдрических и пирамидальных кристаллографических позициях. В области температур с линейной зависимостью обратной магнитной восприимчивости от температуры ($T > 200$ К) SmFeTiO_5 является парамагнетиком с молярным значением эффективного магнитного момента $\mu_{\text{eff}} = 5.2 \mu_B$. При $T = 45$ К наблюдается аномалия на температурной зависимости магнитной восприимчивости, соответствующая антиферромагнитному переходу. При температурах ниже 39 К обнаружено, что магнитный момент зависит от термомагнитной предыстории образца.

Ключевые слова: неорганические соединения, кристаллическая структура, магнитные свойства, антиферромагнетизм, неупорядоченный магнетизм.

DOI: 10.61011/FTT.2026.04.63320.9446

1. Введение

В современной физике конденсированного состояния уделяется внимание исследованиям фрустрированных магнитных соединений, магнетизм которых определяется сложной „игрой“ конкурирующих обменных взаимодействий, приводящих к формированию разнообразных типов магнитного упорядочения [1–3]. Исследование материалов с магнитными фрустрациями представляет интерес, как для фундаментальной, так и прикладной физики [1,3].

К материалам с фрустрациями в спиновой системе можно отнести и соединение SmFeTiO_5 . С целью более полного изучения кристаллической структуры и магнитных свойств SmFeTiO_5 в настоящей работе представлены данные структурных, резонансных и магнитных исследований этого соединения.

2. Синтез образцов и техника эксперимента

Химическое соединение SmFeTiO_5 синтезировано реакцией в твердой фазе из смеси порошкообразных оксидов высокой чистоты (99.99 %, ГОСТ) Fe_2O_3 , Sm_2O_3 и TiO_2 , взятых в стехиометрической пропорции. Проведены четыре отжига при фиксированных температурах 1150–1250 °С. Длительность каждого отжига была 24 ч.

Химический и фазовый состав образцов контролировался методом рентгеноструктурного анализа.

Исследования химического состава, микроструктуры образцов проведены с помощью метода сканирующей электронной микроскопии на приборе Hitachi TM4000 Plus с рентгеновским детектором Bruker XFlash 630Hc (оборудование Красноярского регионального центра научно-исследовательского оборудования Федерального исследовательского центра „Красноярский научный центр СО РАН“).

Порошковая рентгенограмма SmFeTiO_5 была получена при комнатной температуре на дифрактометре Naoya DX-2700BH с линейным детектором. Рентгеновское излучение — $\text{CuK}\alpha$. Размер шага 2θ составлял 0.01° , время счета — 0.2 с на шаг.

Статические магнитные характеристики были измерены в интервале температур 4–300 К в двух режимах: охлаждение образца без магнитного поля (ZFC) и в постоянном магнитном поле (FC) на СКВИД-магнитометре оригинальной конструкции Института физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН [4]. Измерение температурной зависимости магнитного момента в интервале температур 300–400 К в магнитном поле до 15 кОе выполнено на автоматизированном вибрационном магнитометре.

Спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) измерены на спектрометре Bruker Elexsys E580 в X-диапазоне ($\nu = 9$ GHz) и интервале температур

Таблица 1. Результаты расчетного полуколичественного анализа элементов SmFeTiO_5 , выполненного с помощью программы Quantex 70, для областей 1 и 2, обозначенных на рис. 1

Область 1					
Элемент	Атомный номер	Масс. %	Атом. %	Абсолютная погрешность, %	Относительная погрешность, %
O	8	15	38	1	7
Fe	26	49	36	3	7
Ti	22	28	24	2	6
Sm	62	8	2	1	8
Область 2					
Элемент	Атомный номер	Масс. %	Атом. %	Абсолютная погрешность, %	Относительная погрешность, %
O	8	9	33	1	7
Ti	22	20	25	1	6
Fe	26	19	21	1	6
Sm	62	52	21	3	6

110–300 К. Запись спектров осуществлена при следующих параметрах: мощность СВЧ — 0.63 mW, амплитуда модуляции — 0.7 G, частота модуляции — 100 kHz, ширина развертки магнитного поля — 5 kG, время развертки — 40 с.

Спектры ядерного γ -резонанса регистрировались на спектрометре МС-1104Ем Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН в геометрии пропускания с радиоактивным источником $\text{Co}^{57}(\text{Rh})$ в диапазоне температур 4–300 К с использованием криостата CFSG-311-MESS на порошковых поглотителях массой 5–10 mg, покрывающей площадь 1 cm^2 , по естественному содержанию железа в обменном газе (ООО „Криотрейд“).

3. Экспериментальные результаты исследования SmFeTiO_5 и их обсуждение

3.1. Результаты элементного картирования

Для подтверждения химического состава синтезированного соединения, используя электронный микроскоп, проведено картирование по химическим элементам, входящим в его состав. Результаты исследования представлены на рис. 1, 2 и в табл. 1. Морфология частиц в образце показана на рис. 1, где кружками обозначены области, произвольно выбранные для исследования химического состава. На рис. 2 представлены спектры характеристического рентгеновского излучения областей 1 и 2 (см. рис. 1). В табл. 1 содержатся результаты расчетного полуколичественного анализа элементов SmFeTiO_5 , выполненного с помощью программы Quantex 70 для спектрального сигнала от областей 1 и 2.

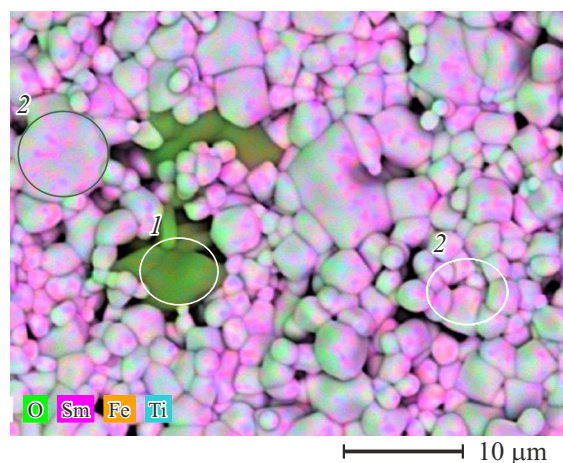


Рис. 1. Морфология частиц, наблюдаемая с помощью микрофотографии в образце SmFeTiO_5 . Обозначены области 1 и 2 в которых проводилось изучение химического состава.

Таким образом, информация о химическом составе синтезированных образцов SmFeTiO_5 подтверждена данными полуколичественного анализа, выполненного с помощью программы Quantex 70. Содержание химических элементов в образце согласуется с параметрами исходной шихты.

3.2. Результаты исследования кристаллической структуры

На рис. 3 показана порошковая рентгенограмма SmFeTiO_5 при комнатной температуре. Практически все рефлексы, кроме пиков малого количества примеси Fe_2TiO_5 (wt. $\sim 6.1(3)\%$), были сопоставлены ромбиче-

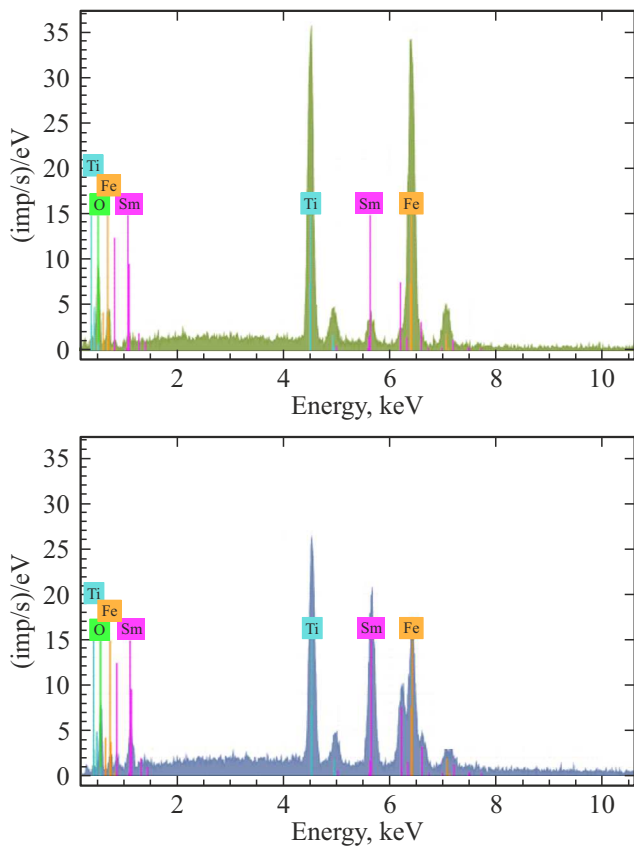


Рис. 2. Спектры характеристического рентгеновского излучения, полученные для областей 1 (верхний рисунок) и 2 (нижний рисунок) SmFeTiO_5 .

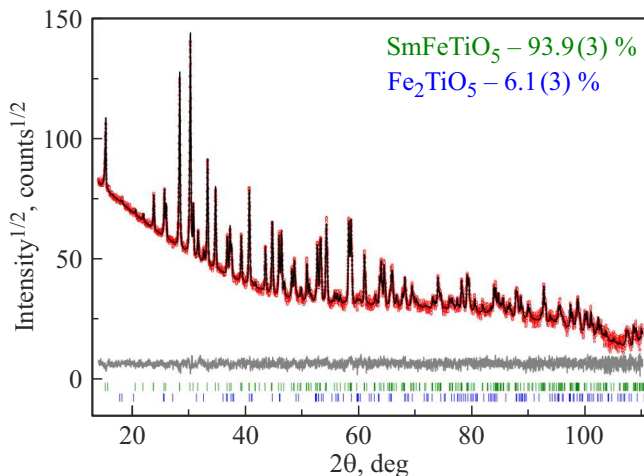


Рис. 3. Разностная рентгенограмма поликристаллического соединения SmFeTiO_5 при комнатной температуре.

ской ячейке ($Pbam$) с параметрами близкими к таковым у NdMn_2O_5 [5], поэтому структура последнего была использована в качестве исходной. Позиция иона Nd была замещена на ион самария, и позиции Mn были заселены ионами Fe/Ti с фиксированным соотношением согласно предполагаемой химической формуле.

Таблица 2. Основные параметры рентгеновского эксперимента и результаты уточнения кристаллической структуры SmFeTiO_5 при комнатной температуре

Параметр	Значение
Sp. Gr.	$Pbam$
a (Å)	7.49899(15)
b (Å)	8.67846(18)
c (Å)	5.82797(12)
V (Å ³)	379.282(14)
Z	4
2θ -interval, °	7–110
R_{wp} , %	5.15
R_p , %	3.55
χ^2	2.27
R_B , %	2.12

Примечание. a, b, c — параметры элементарной ячейки; V — объем ячейки; Z — количество формульных единиц в элементарной ячейке; 2θ — интервал измерения; факторы недостоверности: R_{wp} — весовой профильный, R_p — профильный, R_B — интегральный; χ^2 — качество подгонки.

Уточнение Ритвельда реализовано при помощи программы TOPAS 4.2 [6]. Уточнения были стабильными и дали низкие значения R -факторов (табл. 2 и рис. 3). Были определены координаты атомов в кристаллической структуре SmFeTiO_5 , заселенность позиций и тепловые параметры, результаты представлены в табл. 3. Параметры основных длин связей показаны в табл. 4. Структура соединения SmFeTiO_5 изображена на рис. 4.

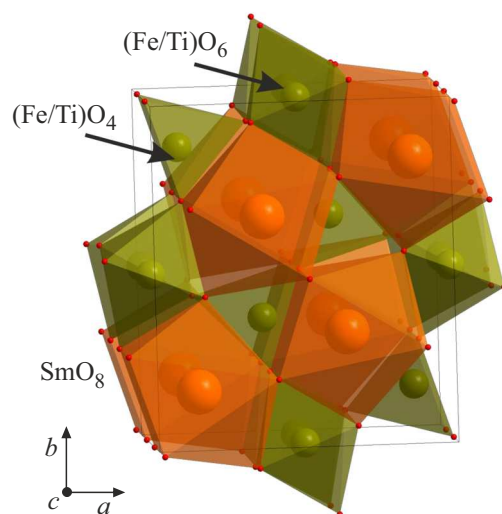


Рис. 4. Кристаллическая структура SmFeTiO_5 при комнатной температуре.

Таблица 3. Координаты атомов, изотропные тепловые параметры B_{iso} и заселенность позиций (O_{occ}) в кристаллической структуре SmFeTiO_5 при температуре $T = 300$ К

Atom	x/a	y/b	z/c	$B_{\text{iso}}, \text{\AA}^2$	O_{occ}
Sm	0.13649(17)	0.17037(17)	0	0.203(43)	1
Fe1	0.38476(44)	0.35356(42)	0.5	0.203(85)	0.5
Ti1	0.38476(44)	0.35356(42)	0.5	0.203(85)	0.5
Fe2	0	0.5	0.24942(69)	0.203(67)	0.5
Ti2	0	0.5	0.24942(69)	0.203(67)	0.5
O1	0	0	0.2879(21)	0.20(13)	1
O2	0.1662(15)	0.4430(11)	0	0.20(13)	1
O3	0.1522(19)	0.4226(11)	0.5	0.20(13)	1
O4	0.3904(11)	0.21030(82)	0.2501(10)	0.20(13)	1

Таблица 4. Основные длины связей (\AA) в кристаллической структуре SmFeTiO_5 при $T = 300$ К

Связь	Длина	Связь	Длина
Sm–O1	2.4594(84)	Sm–O2 ⁱ	2.466(10)
Sm–O2 ⁱⁱ	2.3764(96)	Sm–O4 ⁱⁱ	2.4228(75)
Sm–O4 ⁱⁱⁱ	2.5695(74)	Fe1–O1 ^{iv}	1.9722(81)
Fe1–O2 ⁱⁱ	3.4322(60)	Fe1–O3 ^v	1.844(14)
Fe1–O3 ^{vi}	3.125(12)	Fe1–O4 ^v	1.9153(68)
Ti1–O1 ^{iv}	1.9722(81)	Ti1–O2 ⁱⁱ	3.4322(60)
Ti1–O3 ^v	1.844(14)	Ti1–O3 ^{vi}	3.125(12)
Ti1–O4 ^v	1.9153(68)	Fe2–O2 ^{viii}	1.9776(80)
Fe2–O3 ^{viii}	1.9714(93)	Fe2–O4 ^{ix}	2.0016(73)
Ti2–O2 ^{vii}	1.9776(80)	Ti2–O3 ^{viii}	1.9714(93)
Ti2–O4 ^{ix}	2.0016(73)		

Примечание. Symmetry codes: (i) $-x + 1/2, y + 1/2, -z$; (ii) $x, y, -z$; (iii) $x + 1/2, -y + 1/2, -z$; (iv) $-x + 1/2, y + 1/2, -z + 1$; (v) $x, y, -z + 1$; (vi) $x + 1/2, -y + 1/2, -z + 1$; (vii) $-x, -y + 1, -z$; (viii) $-x, -y + 1, -z + 1$; (ix) $-x + 1/2, y + 1/2, z$.

Таким образом, из рентгеноструктурных данных следует, что при комнатной температуре ромбическая кристаллическая структура SmFeTiO_5 описывается пространственной группой $Pbam$, что находится в согласии с данными работы [7], где параметры элементарной ячейки $a = 7.50 \text{ \AA}$, $b = 8.69 \text{ \AA}$, $c = 5, 83 \text{ \AA}$.

Элементарная ячейка SmFeTiO_5 содержит четыре формульные единицы. В структуре имеются две неэквивалентные позиции катионов Fe, которые хаотично смешаны с катионами Ti, что приводит к образованию состояний с локальным нарушением зарядовой нейтральности.

В кристаллической структуре можно выделить цепочки октаэдров $(\text{Fe}/\text{Ti})\text{O}_6$, тянущиеся вдоль c -направления, и пирамиды $(\text{Fe}/\text{Ti})\text{O}_5$, соединенные общей вершиной и ребром, связывающие соседние цепочки. Катионы самария занимают пустоты, образованные октаэдрами и пирамидами.

3.3. Эффект Мессбауэра в SmFeTiO_5

Исследования с помощью ядерного γ -резонанса проведены на образцах SmFeTiO_5 с естественным содер-

Таблица 5. Мессбауэровские параметры SmFeTiO_5 при комнатной температуре: IS — изомерный химический сдвиг относительно $\alpha\text{-Fe}$, QS — квадрупольное расщепление, W — ширина линии поглощения, A — заселенность неэквивалентных позиций железа

$IS, \text{mm/s}$ ± 0.02	$QS, \text{mm/s}$ ± 0.04	$W, \text{mm/s}$ ± 0.04	$A, \%$ ± 5	Позиция
0.34	0.52	0.36	67	Fe^{3+} (6)
0.33	0.89	0.26	25	Fe^{3+} (5)
0.31	1.16	0.18	7	Fe_2TiO_5

жением железа. На рис. 5 и в табл. 5 представлены результаты мессбауэровского исследования соединения SmFeTiO_5 при комнатной температуре.

Распределение вероятности квадрупольных расщеплений $P(QS)$ (рис. 5, *b*) свидетельствует о том, что образец может содержать, по крайней мере, три неэквивалентные позиции железа. Модельный спектр, построенный с учетом этой информации, очень хорошо подгоняется к экспериментальному спектру. Результат подгонки представлен в табл. 5. Из анализа величин химических сдвигов и квадрупольных расщеплений следует, что за сигнал ответственные катионы трехвалентного железа Fe^{3+} , занимающие позиции с октаэдрической и пирамидальной координациями по кислороду. Малоинтенсивный дублет, 7%, может принадлежать примесной фазе Fe_2TiO_5 , что подтверждают рентгеновские исследования. Кроме того, согласно данным рентгеноструктурных исследований в одной и той же кристаллографической позиции соединения SmFeTiO_5 могут находиться катионы Fe^{3+} и Ti^{4+} . По данным нашего исследования катионы железа в SmFeTiO_5 предпочитают октаэдрические позиции (см. табл. 5). Отметим, что исследование, проведенное методом нейтронной дифракции [7], показало, что, например, в соединении NdCrTiO_5 катионы Cr^{3+} предпочитают позиции с октаэдрическим кислородным окружением, а в NdFeTiO_5 катионы Fe^{3+} и Ti^{4+} почти равномерно распределены по двум возможным позициям, иллюстрируя сложность построения кристаллической решетки при замещении катионов.

Эволюция мессбауэровского спектра SmFeTiO_5 при изменении температуры в диапазоне 4–50 К показана на рис. 6. Из данных измерений следует, что спектр поглощения γ -лучей при понижении температуры меняет характер. Появление сверхтонкого магнитного взаимодействия при понижении температуры указывает на наличие перехода магнитной подсистемы образца из парамагнитного состояния в состояние с магнитным порядком. Изменение спектра при понижении температуры было замечено ранее в образцах SmFeTiO_5 обогащенных ^{57}Fe [8]. Результаты наших мессбауэровских исследований качественно совпадают с результатами работы [8]. Однако есть расхождения в количественных данных: в работе [8] температура Нееля $T_N = 52.8 \text{ K}$, тогда как

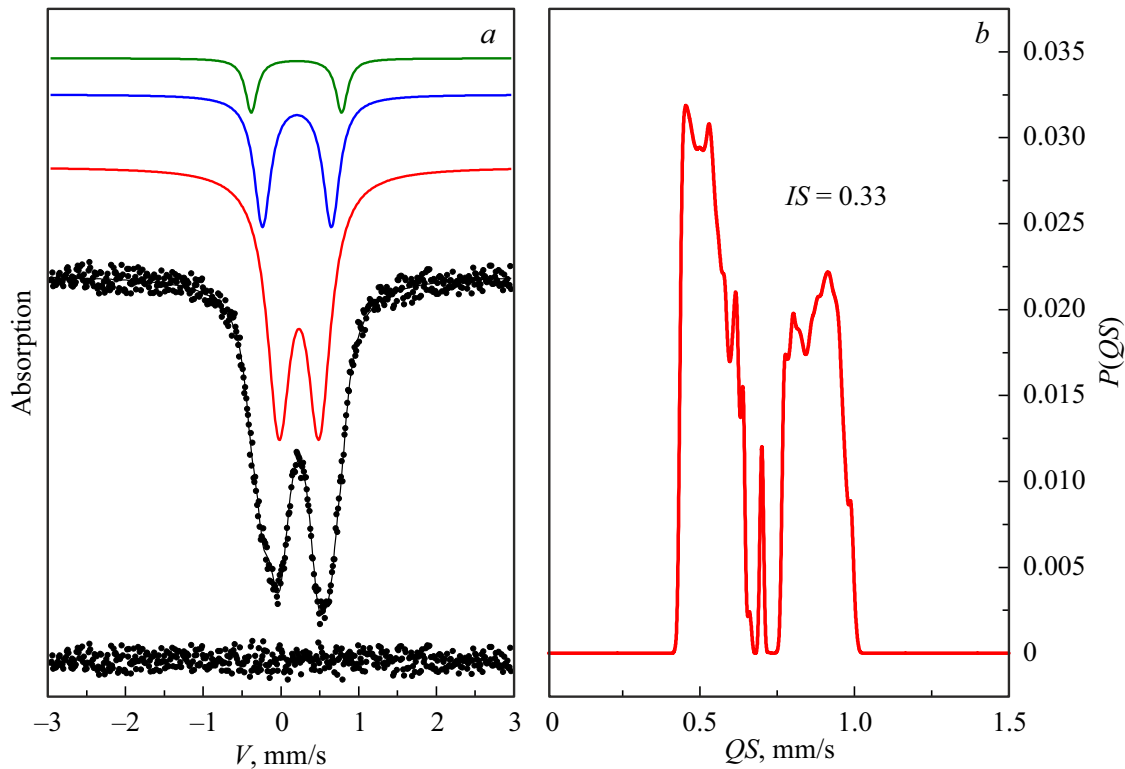


Рис. 5. *a* — Мессбауэровский спектр поглощения γ -лучей на ядрах железа ^{57}Fe (естественное содержание) в SmFeTiO_5 при комнатной температуре. Цветными линиями показаны компоненты спектра, параметры которых приведены в табл. 5. Внизу показана разность между вычисленным и экспериментальным спектрами (ошибка подгонки). *b* — распределение вероятности квадрупольных расщеплений в экспериментальном спектре.

в наших исследованиях $T_N = 45$ К, что подтверждено и описанными ниже экспериментальными данными.

На рис. 7 показана температурная зависимость сверхтонких полей на ядрах железа в октаэдрических и пирамидальных позициях SmFeTiO_5 . Данные мессбауэровского эксперимента свидетельствуют об отсутствии магнитного порядка при температуре выше 45 К.

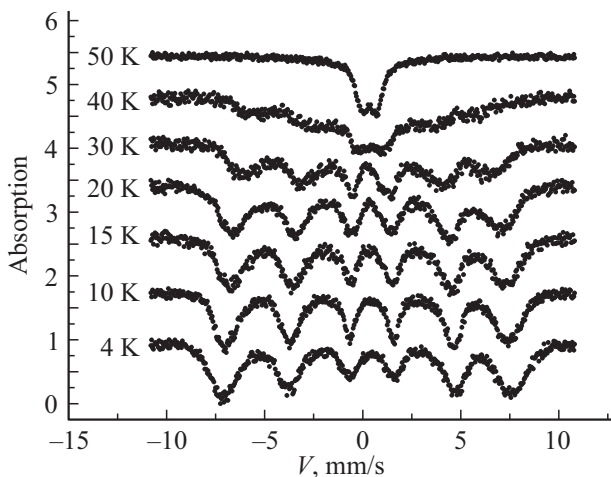


Рис. 6. Зависимость мессбауэровских спектров ядер ^{57}Fe от температуры в SmFeTiO_5 .

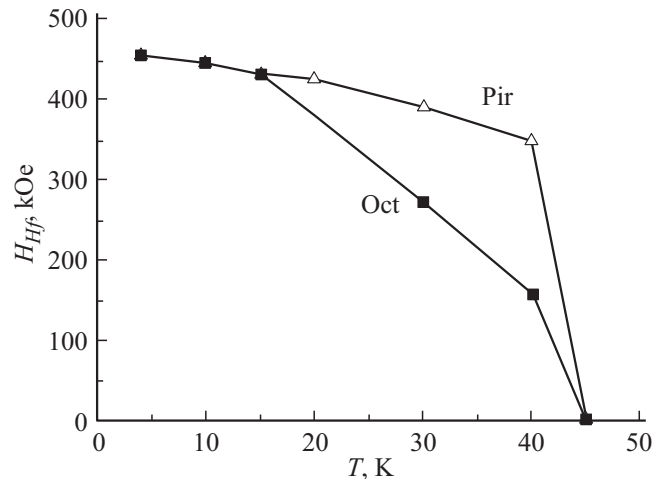


Рис. 7. Температурная зависимость сверхтонких магнитных полей H_{hf} на ядрах железа ^{57}Fe в октаэдрических (Oct) и пирамидальных (Pir) кристаллографических позициях SmFeTiO_5 .

3.4. Результаты исследования образца методом ЭПР

Температурные зависимости параметров электронного парамагнитного резонанса, измеренные в температурном диапазоне 113–300 К, показаны на рис. 8–12.

При комнатной температуре наблюдается одиночная линия сигнала ЭПР с параметрами: $\Delta H = 1677$ Oe, $H_{\text{res}} = 3392$ Oe, $g = 2.00$. При понижении температуры до $T \sim 150$ K линия уширяется, и становится видимой дополнительная линия, характеризующаяся слабой интенсивностью и параметрами: $\Delta H \sim 1000$ Oe, $H_{\text{res}} \sim 3332$ Oe, $g = 2.03$ (рис. 8). Последняя может принадлежать примесной фазе Fe_2TiO_5 (wt. $\sim 6.1(3)\%$). Температурные зависимости интенсивности линий магнитного резонанса представлены на рис. 9.

Температурная зависимость резонансного поля ЭПР-сигналов, наблюдаемых в образце SmFeTiO_5 , представлена на рис. 10. При температуре ниже 160 K резонансное поле основного сигнала уменьшается, а резонансное поле сигнала примесной фазы практически не зависит от температуры.

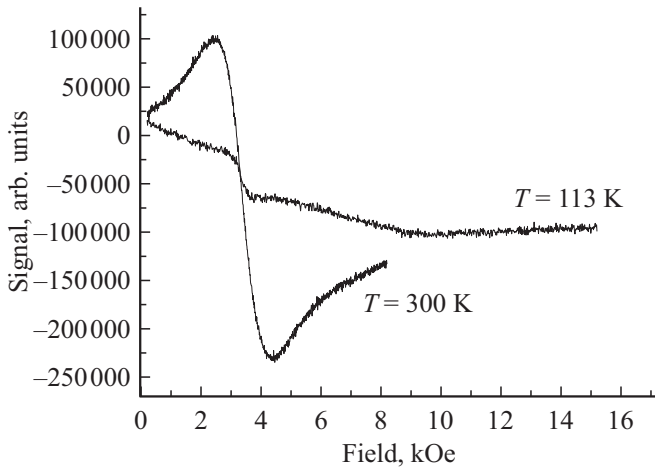


Рис. 8. Спектры электронного парамагнитного резонанса в поликристалле SmFeTiO_5 при температурах 113 и 300 K.

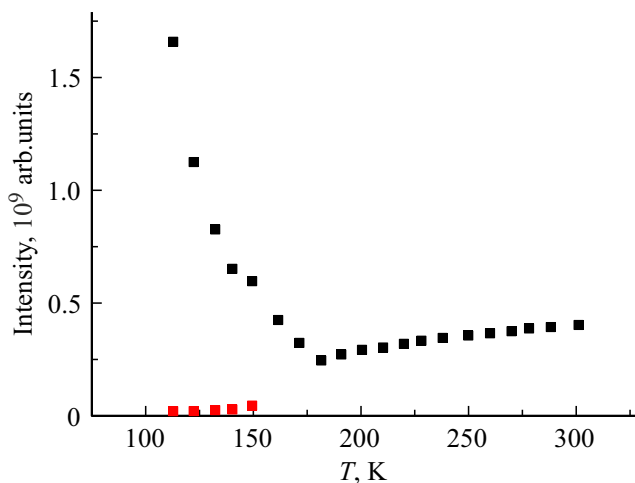


Рис. 9. Температурная зависимость интенсивностей линий магнитного резонанса в SmFeTiO_5 . Черные символы соответствуют основной фазе, красные символы — примесной фазе Fe_2TiO_5 .

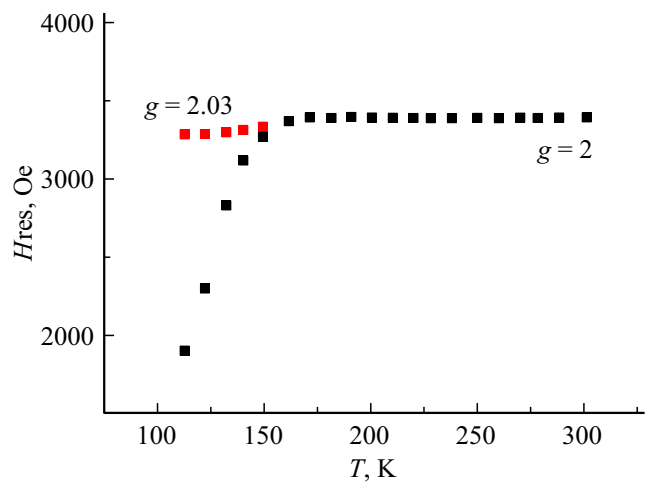


Рис. 10. Температурная зависимость резонансных полей H_{res} в SmFeTiO_5 . Черные символы — основная фаза, красные символы — примесная фаза.

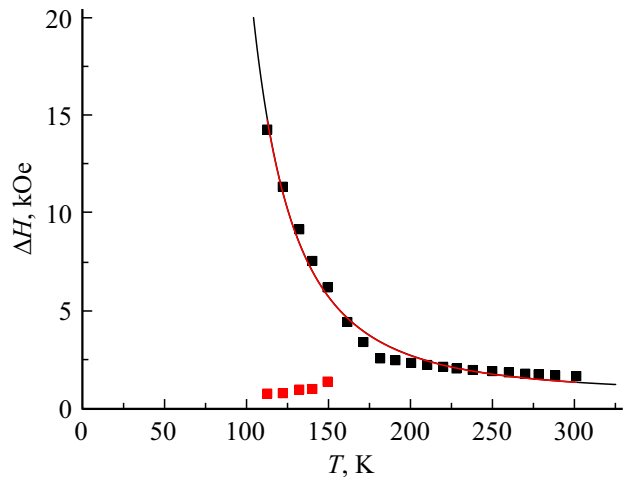


Рис. 11. Температурная зависимость ширин линий ΔH основной (черные символы) и примесной (красные символы) фаз в SmFeTiO_5 . Сплошная линия — подгоночная кривая.

Как показано на рис. 11, ширина линии основной фазы растет с уменьшением температуры (черные символы), а ширина линии примесной фазы (красные символы) практически не зависит от температуры.

Ширина линии основной фазы аппроксимирована подгоночной кривой $\Delta H_0 + A[(T - T_N)/T_N]^{-nq}$, где ΔH_0 — ширина линии при бесконечной температуре, T_N — температура магнитного упорядочения, n — критический индекс уширения. Полученная подгоночная кривая показана на рис. 11 (сплошная кривая), с параметрами: $\Delta H_0 = 782$ Oe, $T_N = 42$ K, $n = 2.46$. Значение критического индекса свидетельствует о трехмерном характере магнитной структуры SmFeTiO_5 . Значение температуры упорядочения $T_N = 42$ K близко к величине температуры Нееля, полученной из измерений спектров ядерного магнитного резонанса $T_N = 45$ K.

3.5. Результаты статических магнитных измерений

В формировании магнитных свойств химического соединения SmFeTiO_5 участвуют катионы железа Fe^{3+} , которые характеризуются высокоспиновым состоянием $S = 5/2$ (электронная конфигурация $3d^5$, орбитальный момент $L = 0$) и катионы самария Sm^{3+} ($S = 5/2$, $L = 5$, электронная конфигурация $4f^5$).

На рис. 12 показана температурная зависимость магнитного момента m образца SmFeTiO_5 массой 0.220 г при измерении в магнитном поле $H = 100$ Ое в интервале температур от 4 до 300 К. Кривая, характеризующая магнитные свойства образца, имеет форму типичную для антиферромагнетиков. Особенности поведения зависимости $m(T)$ при уменьшении температуры позволяют интерпретировать максимум при температуре 45 К как магнитный фазовый переход порядок–беспорядок.

Рис. 13 иллюстрирует температурную зависимость обратной магнитной восприимчивости $\chi^{-1}(T)$ при нагреве образца SmFeTiO_5 от 4 до 400 К. В интервале температур 200–400 К ход температурной зависимости обратной магнитной восприимчивости находится в соответствии с формулой Кюри–Вейсса и показывает значение асимптотической температуры Нееля $\theta = -187$ К. Отрицательное значение θ , определяемое как точка пересечения оси температур с асимптотой к кривой $\chi^{-1}(T)$ в области высоких температур, свидетельствует о преобладающей роли антиферромагнитных обменных взаимодействий между магнитными катионами. Соединение SmFeTiO_5 в области температур с линейной температурной зависимостью обратной магнитной восприимчивости ($T > 200$ К) является парамагнетиком с молярным значением эффективного магнитного момента $\mu_{\text{eff}}(\text{exp}) = 5.18 \mu\text{B}$. Расчетное значение

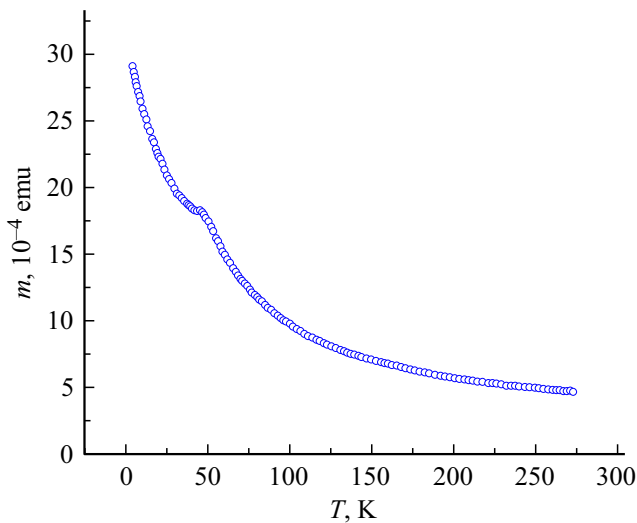


Рис. 12. Температурная зависимость магнитного момента m в SmFeTiO_5 , измеренная в магнитном поле $H = 100$ Ое. Масса образца $M = 0.220$ г.

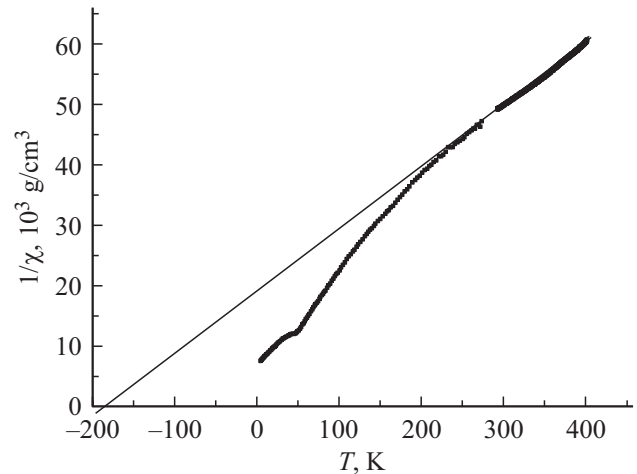


Рис. 13. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости χ^{-1} в SmFeTiO_5 . Масса образца $M = 0.220$ г. Асимптотическая температура Нееля $\theta = -187$ К.

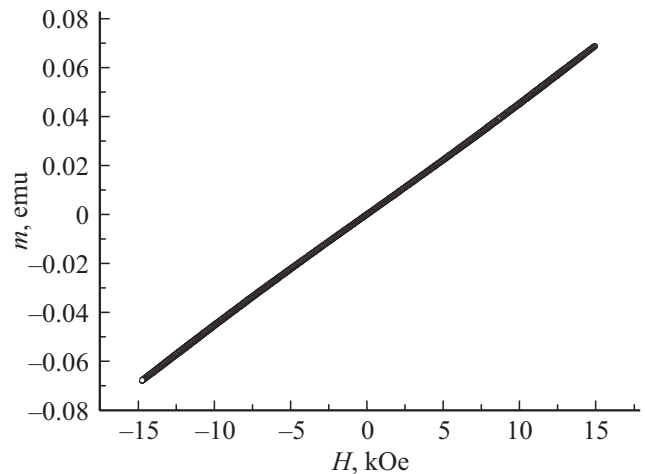


Рис. 14. Зависимость магнитного момента m от внешнего магнитного поля H в SmFeTiO_5 при комнатной температуре.

эффективного магнитного момента формульной единицы $\mu_{\text{eff}}(\text{cal}) = 5.97 \mu\text{B}$. Причины пониженных значений $\mu_{\text{eff}}(\text{exp})$ по сравнению с $\mu_{\text{eff}}(\text{cal})$, встречающихся в некоторых соединениях, рассмотрены в работах [9,10]. В нашем случае различие экспериментального и расчетного значений эффективного магнитного момента, вероятно, связано со структурными особенностями SmFeTiO_5 (разбавлением магнитных катионов железа Fe^{3+} диамагнитными катионами титана Ti^{4+}).

Рис. 14 иллюстрирует зависимость магнитного момента m от внешнего магнитного поля H при комнатной температуре в SmFeTiO_5 и свидетельствует об отсутствии магнитного гистерезиса.

Таким образом, при понижении температуры ниже температуры Нееля $T_N = 45$ К соединение SmFeTiO_5 переходит из парамагнитного состояния в состояние с дальним магнитным порядком, формирующимся преимуще-

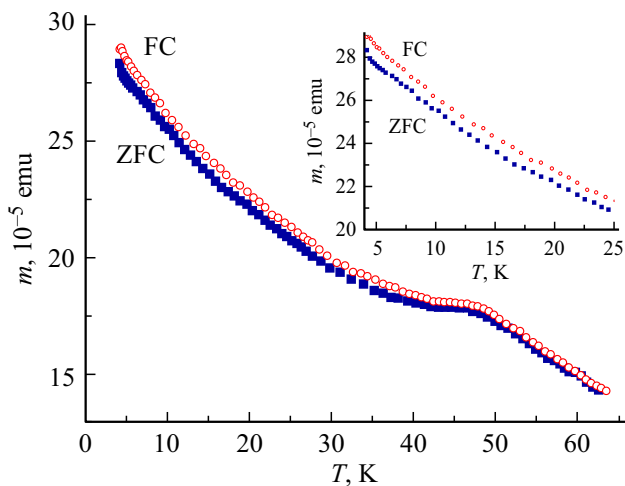


Рис. 15. Температурные зависимости магнитного момента m SmFeTiO_5 при охлаждении образца во внешнем магнитном поле $H = 10$ Oe (FC) и без поля (ZFC). Измерение проведено в магнитном поле $H = 10$ Oe. На вставке показан фрагмент рисунка с увеличенным масштабом.

щественно антиферромагнитным обменным взаимодействием между магнитными катионами, образуя, как показал анализ данных исследования методом ЭПР, трехмерную магнитную структуру. Отметим, что величины температуры разрушения дальнего магнитного порядка, определенные из мессбауэровских, ЭПР и статических магнитных измерений, совпадают.

Особенности кристаллической структуры существенно повлияли на магнитные свойства изучаемого соединения. При дальнейшем охлаждении образца SmFeTiO_5 ниже температуры $T_F = 39$ K наблюдается зависимость величины магнитного момента от термомагнитной предыстории образца. На рис. 15 показаны температурные зависимости магнитного момента m при различных условиях охлаждения образца: во внешнем магнитном поле $H = 10$ Oe (FC) и в отсутствии магнитного поля (ZFC). Измерение выполнено в магнитном поле $H = 10$ Oe.

Зависимость величины магнитного момента от термомагнитной предыстории образца в области низких температур, похожее на спин-стекольное замерзание, подтверждает наличие фрустраций в магнитной подсистеме SmFeTiO_5 . Отметим, что для этого материала характерно то, что температура замерзания T_F существенно меньше модуля асимптотической температуры Нееля θ . Оценка индекса магнитной фрустрации показывает значение $f \geq 4$.

Формирование магнитной структуры SmFeTiO_5 обусловлено сложной игрой конкурирующих обменных взаимодействий между атомными соседями. Присутствие немагнитных катионов титана в узлах катионов железа изменяет расстояние между магнитными катионами, нарушает однородность спиновой подсистемы, периодичность изменений обменного взаимодействия, приво-

дит к его ослаблению и образованию при понижении температуры неупорядоченного магнетизма.

4. Заключение

Соединение SmFeTiO_5 получено твердофазным синтезом из исходных оксидов Fe_2O_3 , Sm_2O_3 и TiO_2 . Информация о химическом составе синтезированных образцов подтверждена данными элементного картирования. Проведено исследование структурных, резонансных, статических магнитных свойств.

Кристаллическая структура SmFeTiO_5 при комнатной температуре описывается ромбической пространственной группой симметрии $Pbam$. Катионы железа Fe^{3+} занимают две кристаллографически неэквивалентные позиции, смешанные с катионами Ti^{4+} , причем катионы железа предпочитают октаэдрические позиции. Смешение катионов приводит к образованию состояний с локальным нарушением зарядовой нейтральности и разрушению однородности в подсистеме магнитных взаимодействий.

Таким образом из результатов исследований следует, что соединение SmFeTiO_5 является магнетиком с преимущественно антиферромагнитными обменными взаимодействиями. При температуре 45 K наблюдается антиферромагнитный переход, и при понижении температуры ниже 39 K проявляется спиновый беспорядок. Спины магнитных катионов соединения SmFeTiO_5 упорядочиваются при температуре ниже 45 K, образуя трехмерную магнитную структуру. При температуре ниже 39 K величина магнитного момента зависит от термомагнитной предыстории образца. Это характерно для неупорядоченного магнетизма и связано с присутствием нарушений структуры магнитных подрешеток катионов Fe^{3+} беспорядочным внедрением диамагнитных катионов Ti^{4+} , что приводит в области низких температур к усилению конкуренции обменных взаимодействий разного знака и величины и формированию фрустрированного магнитного состояния.

Благодарности

Авторы благодарят Красноярский региональный центр коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за предоставленное оборудование для исследования химического состава образцов с помощью электронной микроскопии, структурных свойств и измерений ЭПР характеристик.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.A. Mydosh. Rep. Prog. Phys. **78**, 052501 (2015).
- [2] A. Andreanov, J.T. Chalker, T.E. Saunders, D. Sherrington. Phys. Rev. B **81**, 014529 (2010).
- [3] H. T. Diep. Comptes. Rendus. Physique **26**, 225 (2025).
- [4] D.A. Velikanov. Inorg. Mater. Appl. Res. **11**, 4, 801 (2020).
- [5] I. Kagomiya, K. Kohn, T. Uchiyama. Ferroelectrics **280**, 1, 131 (2002).
- [6] Bruker AXS TOPAS V4: General profile and structure analysis software for powder diffraction data. — User's Manual. Bruker AXS. Germany, Karlsruhe (2008).
- [7] G. Buisson. J. Phys. Chem. Solids **31**, 1171 (1970).
- [8] P.J. Schurer, A.H. Morrish. Phys. Rev. B **16**, 3, 951 (1977).
- [9] M. Borgheresi, F. Di Benedetto, A. Caneschi, G. Pratesi, M. Romanelli, L. Sorace. Phys. Chem. Minerals **34**, 609 (2007).
- [10] J. Typek, G. Zolnierkiewicz, M. Bobrowska, N. Guskos, A. Blonska-Tabero. JMMM **382**, 71 (2015).

Редактор А.Н. Смирнов