

03,05

Мёссбауэровские исследования гексагональных изотропных поликристаллических ферритов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, полученных методом радиационно-термического спекания

© В.Г. Костишин¹, А.В. Труханов¹, А.А. Алексеев², С.В. Щербаков², И.М. Исаев¹, А.Ю. Мионович¹, М.А. Михайленко³, М.А. Сысоев¹, Г.А. Скорлупин¹, Г.М. Токин^{1,2}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования „Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“, Москва, Россия

² Акционерное общество „Научно-производственное предприятие „Исток“ им. А.И. Шокина“, Фрязино, Россия

³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: drvgkostishyn@mail.ru

Поступила в Редакцию 30 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 3 декабря 2024 г.

Принята к публикации 5 декабря 2024 г.

Гексагональный феррит стронция ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) широко используется в качестве постоянных магнитов и в СВЧ-электронике. Его функциональные характеристики зависят от технологии производства. В данной работе впервые применен метод радиационно-термического спекания (РТС) в пучке быстрых электронов на ускорителе ИЛУ-6 для получения образцов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Температура процесса варьировалась от 1200 до 1400°C, а время спекания — от 10 до 90 min. Фазовый состав и параметры кристаллической решетки образцов исследовались с методами мёссбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифракции. Мёссбауэровские спектры фиксировались на спектрометре MC1104E, а рентгеновские — на дифрактометре ДРОН-8. Плотность образцов определялась методом Архимеда на электронных весах UW620H. Результаты показали, что все образцы являются однофазными и имеют пространственную группу $R\bar{6}3/mmc$ (№ 194), что соответствует структуре гексагонального феррита. Оптимальные параметры для синтеза изотропных гексаферритов составляют 1250–1300°C и время спекания 30–60 min. Таким образом, РТС может служить альтернативной технологией для получения поликристаллического изотропного гексагонального феррита $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, демонстрируя высокую энергоэффективность и экономичность по сравнению с традиционными методами

Ключевые слова: радиационно-термическое спекание, изотропные поликристаллические гексагональные ферриты $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, кристаллическая структура, мёссбауэровская спектроскопия, элементарная ячейка, керамическая технология, быстрые электроны, электронный ускоритель.

DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59604.333

1. Введение

Гексагональный феррит стронция М-типа $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (SrM) имеет кристаллическую структуру, изоморфную магнетопломбиту $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ [1]. Вследствие различия в значениях ионных радиусов бария и стронция, замена первого иона на второй в кристаллической решетке гексагонального феррита приводит к увеличению константы магнитной кристаллографической анизотропии K_1 на 10% [2]. Кроме этого, гексаферриты SrM обладают лучшей технологичностью по сравнению с гексаферритами BaM [2].

Благодаря комплексу своих магнитных свойств и эксплуатационных параметров, феррит SrM нашел широкое применение в качестве постоянных магнитов [1,2], активных сред приборов СВЧ-электроники мм-диапазона длин волн [3] и в терагерцовой фотонике [4]. В научных и инженерных кругах не утихает также интерес к раз-

работке устройств СВЧ-электроники на основе толстых пленок гексагональных ферритов [5,6].

На сегодняшний день промышленным методом получения указанных материалов является керамическая технология [1,2,5]. Характерная технологическая схема получения изотропных поликристаллических гексагональных ферритов SrM при использовании керамической технологии представлена на рис. 1. Наряду с рядом общепризнанных преимуществ, керамическая технология обладает целым рядом недостатков. Основной из главных недостатков — высокая энергоемкость данной технологии.

Альтернативной технологией при получении гексаферритов SrM может стать технология радиационно-термического спекания (РТС), хорошо опробованная на целом ряде типов ферритов [7–9], включая гексаферрит бария BaM [7]. Отличие технологии РТС от традиционной керамической технологии (рис. 1) состоит в том, что

операцию термического спекания сырых заготовок заменяют на операцию спекания в пучке быстрых электронов в электронном ускорителе [7–9].

Целью настоящей работы являлось изучение возможности получения при использовании технологии РТС качественных изотропных гексаферритов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, а также изучение методом рентгеновской дифрактометрии и мёссбауэровской спектроскопии кристаллической и магнитной структуры полученных образцов.

2. Объекты и методы исследования

Исходные образцы готовились из оксида Fe_2O_3 марки ММ-2 (ТУ6-09-4816-80; содержание примесей SiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 и Na_2O составляет 0.01 wt.% для каждого соединения). В качестве сырья, содержащего стронций, был использован карбонат стронция кристаллический марки „Ч“ (чистота 99.0%) Исфагинского химического завода. Подготовка сырых заготовок осуществлялась в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

Использовались все операции, кроме операции термического спекания. Операция термического спекания в печи (обжига) была заменена на РТС. Замена обычного термического спекания на РТС в пучке быстрых электронов обусловлена существенно меньшей энергоемкостью последнего и более высоким качеством спекания [7–9].

РТС образцов проводилось с использованием быстрых электронов на линейном ускорителе ИЛУ-6 для радиационных технологий на энергию 2.5 MeV ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН [10]. Схема данного ускорителя представлена на рис. 2.

Ниже представлены основные характеристики ускорителя ИЛУ-6:

- максимальная энергия электронов — 2.5 MeV;
- рабочая частота резонатора — 117 MHz;
- импульсная мощность ВЧ генератора — до 2.5 MW;
- максимальный импульсный ток пучка — 450 mA;
- максимальный средний ток пучка — 8 mA;
- длительность импульса тока пучка — 0.5 ms;
- частота повторения импульсов — до 50 Hz;
- высота вакуумного бака ускорителя ИЛУ-6 вместе с ВЧ генератором — более 2 m;
- длина выпускного окна — 980 mm;
- ширина зоны облучения — 90 cm;
- выводимая в атмосферу мощность электронного пучка — до 16 kW.

Для спекания гексагональных ферритов в пучке быстрых электронов в работе была использована специально разработанная на кафедре Технологии Материалов Электроники университета МИСИС ячейка для РТС ферритовой керамики и ферритовых изделий [11].

Мёссбауэровские спектры объектов исследования регистрировались на спектрометре МС-1104Е с постоянным ускорением при комнатной температуре, источником γ -излучения служил Co^{57} в матрице хрома. Изомерный (химический) сдвиг рассчитывался относительно

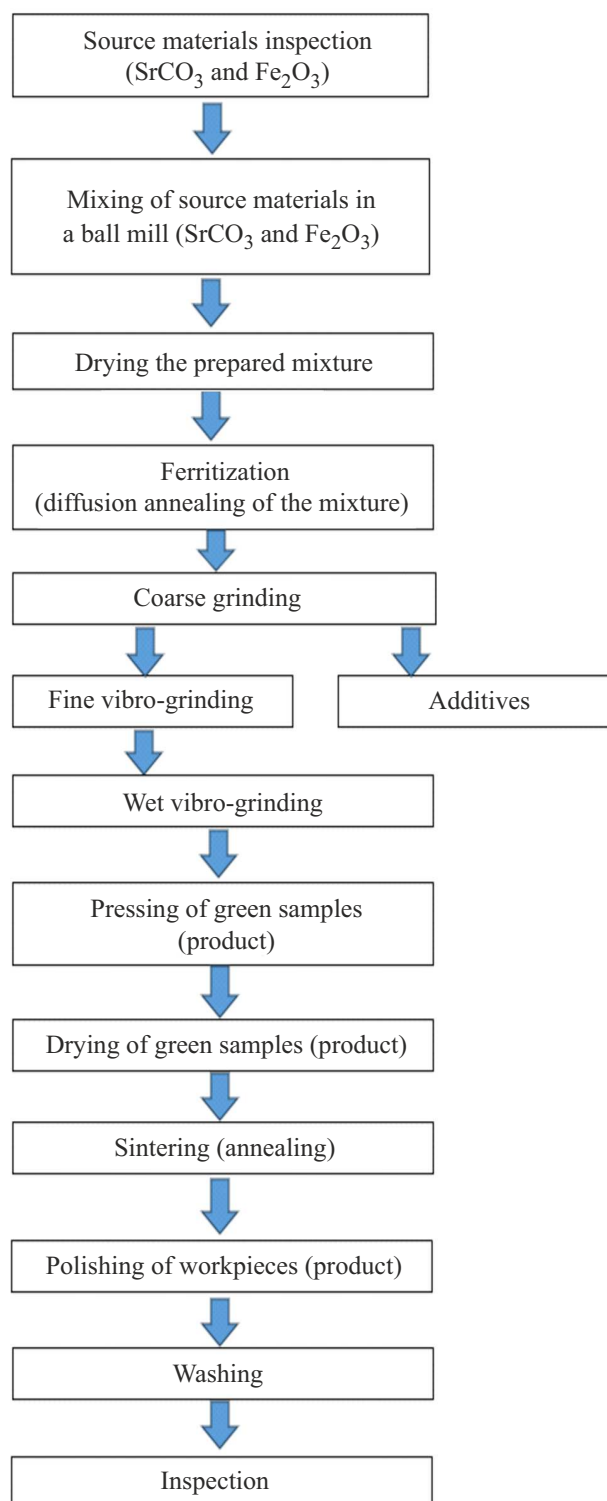


Рис. 1. Характерная технологическая схема получения изотропных поликристаллических гексагональных ферритов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ при использовании керамической технологии.

α -Fe. Для измерения использовались порошковые пробы из измельченных изотропных гексаферритов стронция. Математическая обработка спектров проводилась по программе „Univem Ms“.

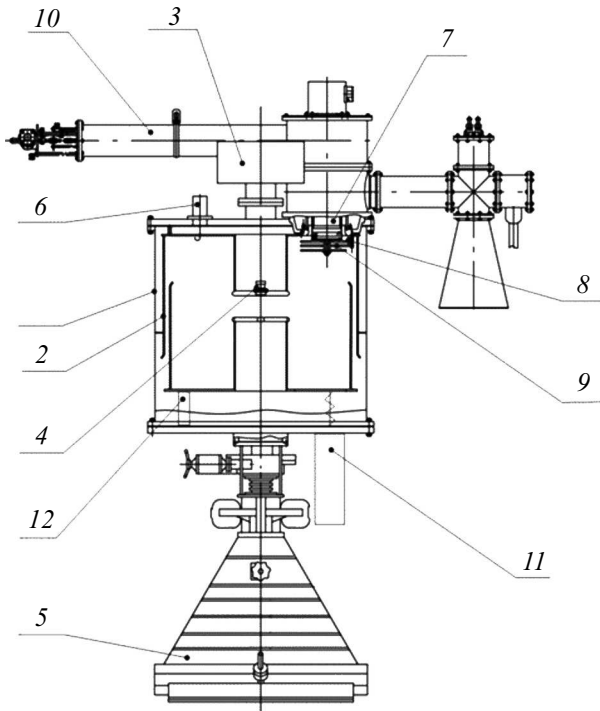


Рис. 2. Схема линейного ускорителя ИЛУ-6: 1 — вакуумный бак; 2 — резонатор; 3 — магниторазрядный насос типа НМД; 4 — инжектор электронов; 5 — выпускное устройство; 6 — измерительная петля; 7 — анод лампы ВЧ генератора; 8 — опора петли ввода ВЧ мощности; 9 — петля ввода ВЧ мощности; 10 — катодный шлейф; 11 — ввод напряжения смещения -7 кВ; 12 — опоры нижней половины резонатора.

Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ объектов исследования проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8 (производство: Россия, АО НПП „Буревестник“, г. Санкт-Петербург). При проведении рентгенофазового анализа использовалось CoK_{α_1} -излучение. Длина волны излучения $\lambda = 0.178897$ нм. Фокусировка осуществлялась по методу Брэгга–Брентано с двумя щелями Соллера. Измерения производились при комнатной температуре.

Оценка среднего размера (L_C) областей когерентного рассеяния для выявленных фаз всех изученных в работе образцов проводилась расчетным путем из параметров рентгеновских дифрактограмм с помощью формулы Дебая–Шеррера:

$$L_C = k\lambda/B \cos \theta, \quad (1)$$

где: L_C — средний размер области когерентного рассеяния, нм; k — константа, равная 0.89; B — полуширина дифракционной линии для угла отражения θ , соответствующего первому дифракционному максимуму из набора линий, присущих каждой из выявленных фаз, рад.; λ — длина волны рентгеновского CoK_{α_1} -излучения, нм; $\lambda = 0.178897$ нм.

Определение плотности объектов исследования в работе проводилось в соответствии с законом Архимеда

Таблица 1. Информация о полученных в настоящей работе методом РТС образцах $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

№ п/п	№ сырой заготовки	№ образца	Температура РТС, °С	Время РТС, min	Плотность g/cm^3
1.	8-п6	ГСИ_№8	1200	60	4.52
2.	9-п6	ГСИ_№9	1250	60	4.92
3.	11-п6	ГСИ_№11	1300	10	4.95
4.	12-п6	ГСИ_№12	1300	30	4.96
5.	10-п6	ГСИ_№10	1300	60	4.93
6.	13-п6	ГСИ_№13	1300	90	4.93
7.	14-п6	ГСИ_№14	1350	40	4.97
8.	30-п6	ГСИ_№30	1400	304	4.94

на электронных весах UW620H с приспособлением для измерения плотности. Плотность образца вычислялась по следующей формуле:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{W_a}{W_a - W_l} \right), \quad (2)$$

где: ρ — плотность образца, g/cm^3 ; ρ_0 — известная плотность жидкости, g/cm^3 ; W_a — вес образца на воздухе, г; W_l — вес образца в жидкости, г.

Рентгеновская плотность гексаферритов вычислялась по данным рентгеноструктурного анализа и составляет в среднем 5.1 g/cm^3 :

$$\rho_{\text{рент.}} = \frac{2M_A}{VN_A} = \frac{2M_A 2}{ca^2 3\sqrt{3}N_A}, \quad (3)$$

где: M_A — молекулярная масса гексаферрита; c, a — параметры элементарной ячейки гексаферрита; N_A — число Авогадро, V — объем элементарной ячейки.

В табл. 1 представлена информация о полученных в настоящей работе методом РТС образцах SrM.

3. Результаты и их обсуждение

Мессбауэровские спектры изученных образцов в зависимости от температуры синтеза и времени ($T^\circ\text{C}/\tau$, min: 1200/60; 1250/60; 1300/60; 1350/40) приведены на рис. 3.

Все образцы были разложены на 5 секстетов, соответствующих пяти позициям ионов Fe^{3+} в структуре гексаферрита типа М: 12k, 4f₁, 4f₂, 2a и 2b [12]. Полученные мессбауэровские параметры секстетов после их математической обработки, изомерный сдвиг (δ , mm/s), квадрупольное расщепление (Δ , mm/s), магнитные поля на ядрах Fe^{57} ($H_{\text{эф}}$, kOe), ширина резонансных линий (Γ , mm/s), угол Θ , (degree°) и площади секстетов (S , rel.%) приведены в табл. 2.

Мессбауэровский спектр образца 1400/10 на рис. 3 не показан, но в табл. 2 приведены его параметры. Из табл. 2 видно, что при всех режимах обработки, все ионы железа соответствуют валентности 3+, согласно значениям изомерного сдвига, при этом все параметры

Таблица 2. Параметры мёссбауэровских спектров изотропных гексаферритов SrFe₁₂O₁₉, полученных методом радиационно-термического спекания при различной температуре

Образец SrFe ₁₂ O ₁₉ , T °C/τ min	Компоненты спектра	δ, mm/s	Δ, mm/s	H _{эф} , kOe	S, %	Γ, mm/s	Θ, °
1200/60	C1(12k)	0.35	0.39	412	49.0	0.29	55.3
	C2(4f ₂)	0.37	0.30	517	16.2	0.25	
	C3(4f ₁)	0.26	0.17	491	20.5	0.28	
	C4(2a)	0.34	-0.03	508	7.2	0.22	
	C5(2b)	0.28	2.21	408	7.1	0.30	
1250/60	C1(12k)	0.35	0.40	412	49.4	0.30	55.1
	C2(4f ₂)	0.37	0.30	517	15.5	0.24	
	C3(4f ₁)	0.26	0.17	491	20.5	0.29	
	C4(2a)	0.35	-0.04	508	7.8	0.24	
	C5(2b)	0.28	2.22	408	6.8	0.29	
1300/60	C1(12k)	0.35	0.40	412	49.3	0.30	51.0
	C2(4f ₂)	0.37	0.32	518	15.9	0.25	
	C3(4f ₁)	0.26	0.17	492	20.6	0.29	
	C4(2a)	0.35	-0.04	507	7.8	0.26	
	C5(2b)	0.29	2.21	408	6.4	0.31	
1350/40	C1(12k)	0.35	0.40	412	49.1	0.30	49.3
	C2(4f ₂)	0.37	0.32	517	16.7	0.26	
	C3(4f ₁)	0.26	0.17	491	20.7	0.29	
	C4(2a)	0.35	-0.05	508	7.2	0.22	
	C5(2b)	0.298	2.22	408	6.3	0.29	
1400/10	C1(12k)	0.35	0.40	412	48.6	0.29	49.1
	C2(4f ₂)	0.37	0.31	517	16.4	0.25	
	C3(4f ₁)	0.26	0.17	491	21.4	0.28	
	C4(2a)	0.35	-0.03	507	7.8	0.23	
	C5(2b)	0.29	2.22	408	5.8	0.25	

Таблица 3. Параметры мёссбауэровских спектров изотропных гексаферритов SrFe₁₂O₁₉, полученных методом РТС при различных значениях времени спекания

Образец SrFe ₁₂ O ₁₉ , T °C/τ min	Компоненты спектра	δ, mm/s	Δ, mm/s	H _{эф} , kOe	S, %	Γ, mm/s	Θ, °
1300/10	C1(12k)	0.35	0.39	412	48.8	0.29	52.3
	C2(4f ₂)	0.37	0.31	517	16.2	0.24	
	C3(4f ₁)	0.26	0.18	491	20.9	0.28	
	C4(2a)	0.35	0.04	508	7.3	0.22	
	C5(2b)	0.29	2.22	407	6.8	0.28	
1300/30	C1(12k)	0.35	0.40	412	49.0	0.28	49.3
	C2(4f ₂)	0.37	0.32	517	16.5	0.24	
	C3(4f ₁)	0.26	0.18	492	20.9	0.27	
	C4(2a)	0.35	-0.02	508	7.8	0.23	
	C5(2b)	0.29	2.21	408	5.8	0.25	
1300/60	C1(12k)	0.35	0.40	412	49.3	0.30	51.0
	C2(4f ₂)	0.37	0.32	518	15.9	0.25	
	C3(4f ₁)	0.26	0.17	492	20.6	0.29	
	C4(2a)	0.35	-0.04	507	7.8	0.26	
	C5(2b)	0.29	2.21	408	6.4	0.31	
1300/90	C1(12k)	0.35	0.40	411	49.5	0.29	49.2
	C2(4f ₂)	0.37	0.31	517	17.0	0.25	
	C3(4f ₁)	0.26	0.17	491	20.6	0.28	
	C4(2a)	0.34	-0.03	508	7.2	0.22	
	C5(2b)	0.29	2.23	408	5.7	0.26	

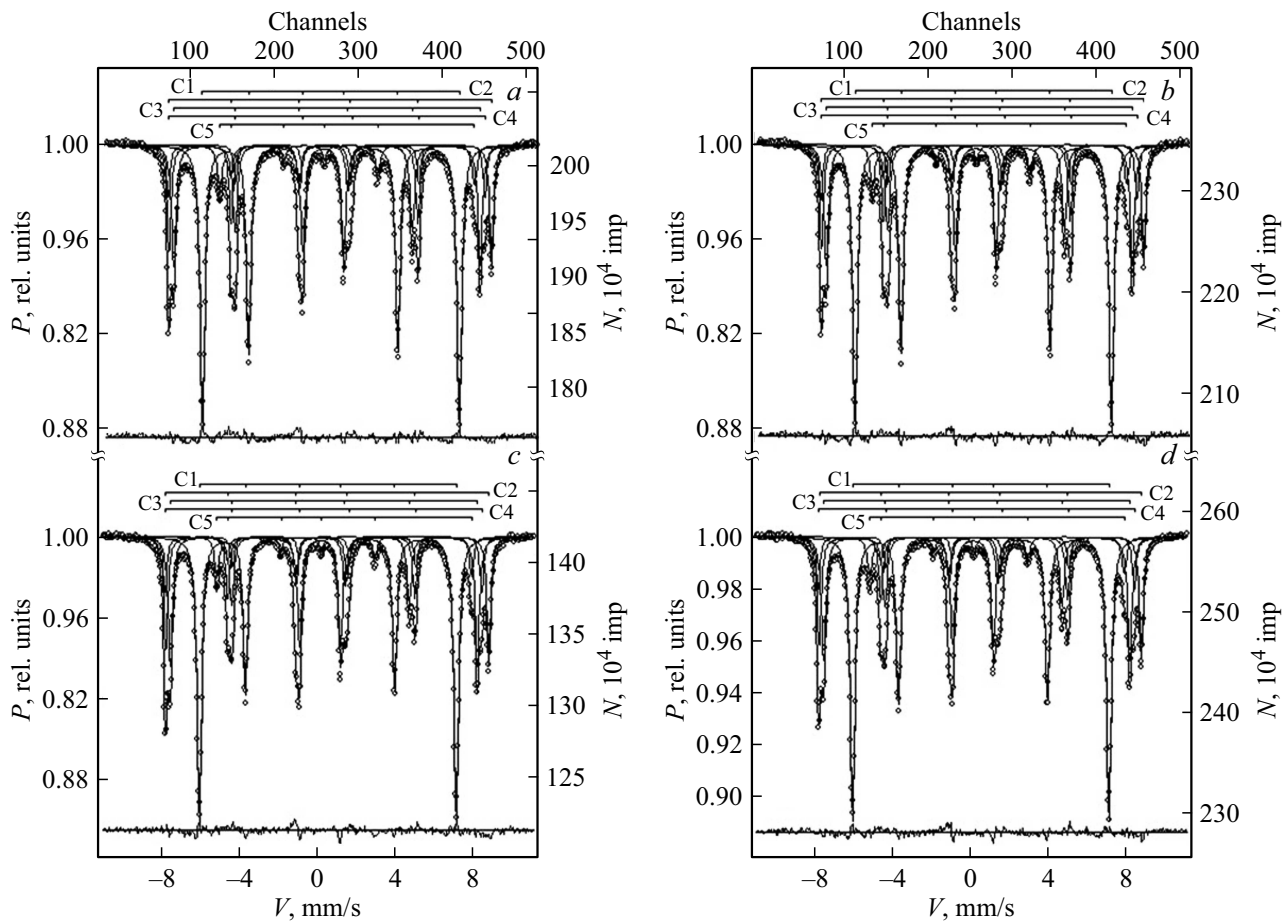


Рис. 3. Мессбауэровские спектры изотропных гексаферритов SrFe₁₂O₁₉, полученных методом радиационно-термического спекания при различных значениях температуры и времени спекания ($T^\circ C/\tau$, min): a — 1200/60; b — 1250/60; c — 1300/60; d — 1350/40.

Таблица 4. Разности площадей секстетов ΔS с противоположными направлениями магнитных моментов ионов Fe³⁺ 12k, 2a, 2b и 4f₁, 4f₂

T/τ	1200/60	1250/60	1300/60	1350/40	1400/30	1300/10	1300/30	1300/90
ΔS	26.6	28.0	27.0	30.2	24.4	24.4	25.2	24.4

лежат в пределах значений, характерных для ионов Fe³⁺ соответствующих координаций: 12k, 4f₂, 2a — октаэдры, 4f₁ — тетраэдр, и 2b — бипирамида [12]. Однако, некоторые параметры несколько отличаются от теоретических. Это касается площадей от ионов Fe(4f₁), всех образцов, которые в отдельных образцах достигают значений до 20.7 rel.% по сравнению с теоретическим 16.7 rel.%. Это можно объяснить большей вероятностью резонансного эффекта тетраэдрических ионов Fe³⁺, по сравнению с октаэдрическими, как это было объяснено в работе [13]. С другой стороны, можно отметить уменьшения угла Θ , при увеличении температуры. Это особенно проявляется с уменьшением времени синтеза (обр. 1350/40, 1400/10). Следовательно, при этих режимах за счет уменьшения угла Θ от 55° происходит увеличение магнитной текстуры образцов.

Для выяснения влияния непосредственно времени синтеза были зарегистрированы мессбауэровские спектры гексаферритов SrFe₁₂O₁₉, полученных по технологии РТС при температуре 1300°С и временах синтеза 10, 30, 60 и 90 min (рис. 4). В табл. 3 приведены параметры полученных мессбауэровских спектров.

Из приведенных данных видно, что при увеличении времени синтеза наблюдается уменьшение угла Θ , но четкой зависимости влияния на него нет. При этом наименьшее влияние на угол Θ происходит при времени синтеза 10 min (образец 1300/10).

Для сопоставления удельной намагниченности образцов с данными мессбауэровских измерений были рассчитаны разности площадей секстетов ΔS с противоположными направлениями магнитных моментов ионов Fe³⁺ 12k, 2a, 2b и 4f₁, 4f₂. Разности ΔS пропорциональны

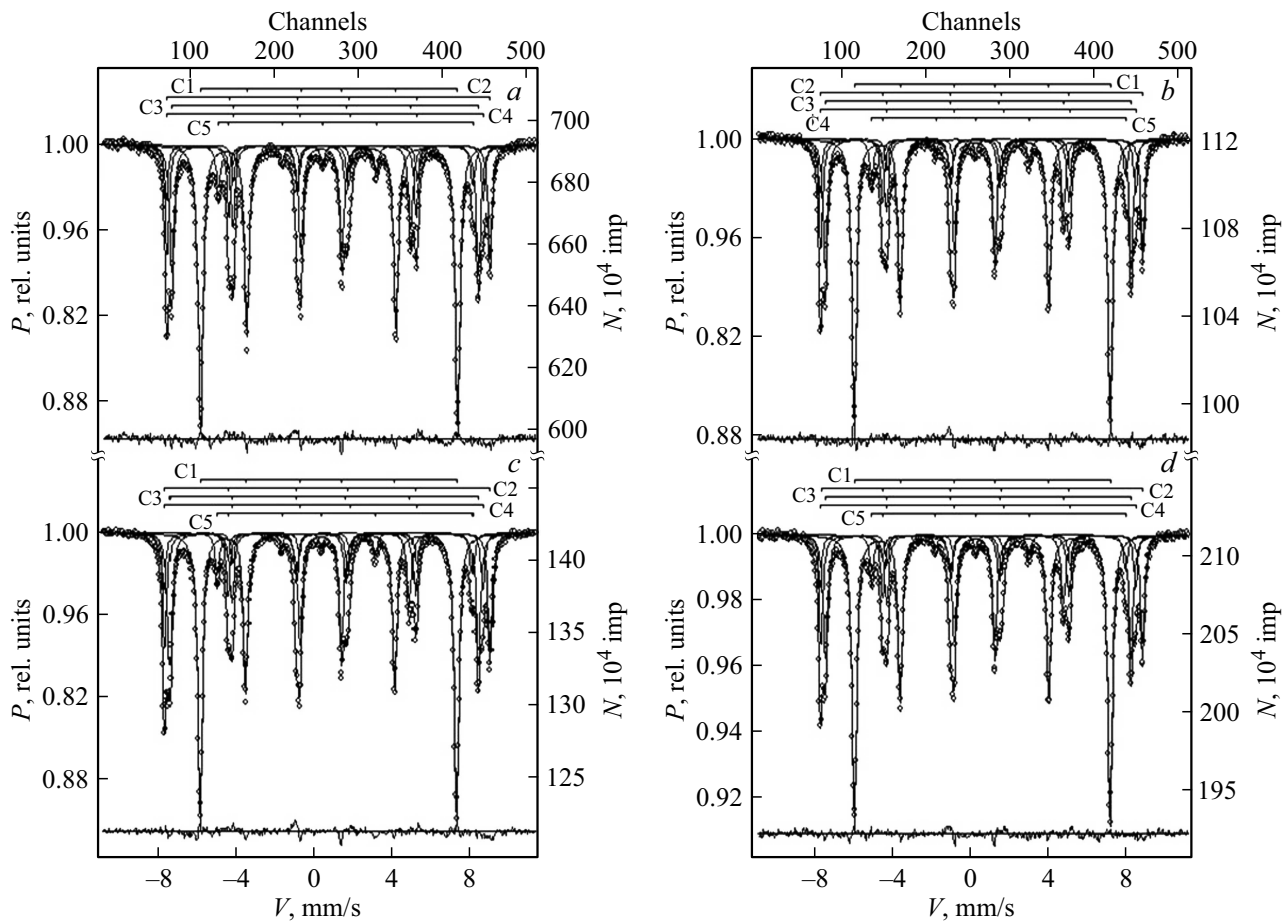


Рис. 4. Мессбауэровские спектры изотропных гексаферритов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, полученных методом РТС при 1300°C и различных значениях времени спекания (min): *a* — 10, *b* — 30, *c* — 60, *d* — 90.

удельной намагниченности в силу того, что она связана как с общим содержанием железа в образце, так и локализацией его по подрешеткам, что позволяет определять мессбауэровские измерения. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Из приведенных данных табл. 4 следует ожидать максимальную удельную намагниченность образца 1350/40, а минимальную намагниченность образцов 1400/30, 1300/10 и 1300/90, показывающие минимум ΔS , а следовательно, и наихудший режим синтеза. Полученное максимальное значение разности площадей от ионов железа, приведенных выше для образца 1250/60, указывает на то, что намагниченность для него следует ожидать максимальной.

На рис. 5 представлены рентгено-дифракционные спектры образцов изотропных поликристаллических гексаферритов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ГСИ_8 (*a*), ГСИ_9 (*b*) и ГСИ_10 (*c*), полученные методом РТС при следующих значениях температуры и времени $T^\circ\text{C}/\tau$ min: 1200/60; 1250/60 и 1300/60 соответственно. Детальный анализ спектров рентгеновской дифракции позволил установить, что для ряда образцов (ГСИ_№9, ГСИ_№10 и особенно ГСИ_№12) отмечено изменение соотношения

интенсивностей в дальних углах, что может свидетельствовать о некоторых особенностях микроструктуры. Такое поведение может являться результатом или дефектов кристаллитов, или некоторой ориентацией их роста.

При фиксированном времени спекания ($\tau = 60$ min) при увеличении температуры от 1200 до 1300°C параметры и объем элементарной ячейки образцов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ изменяются нелинейно (рис. 6). Минимальные значения параметров и объема отмечены для образца ГСИ_№9 (1250°C), что может быть обусловлено влиянием эволюции микроструктуры в процессе спекания.

На рис. 7 представлена зависимость плотности ρ образцов изотропных гексаферритов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ при получении по технологии РТС от времени спекания при температуре РТС = 1300°C (*a*) и температуры РТС при временах спекания $\tau = 30$ min и $\tau = 60$ min (*b*). Характерно, что плотность $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ уменьшается с ростом времени РТС (при температуре РТС 1300°C) и растет с ростом температуры РТС в пределах используемых значений температуры и времени РТС.

Следует отметить, что некоторые представленные выше результаты, полученные нами для гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, были ранее получены для других

ферритовых материалов [7–9,14–22], особенно для гексаферрита бария SrFe₁₂O₁₉ [14]. Весьма интересным является тот результат, что при использовании технологии РТС спекание феррита можно провести за несколько десятков минут. И преобладающую роль в этом процессе

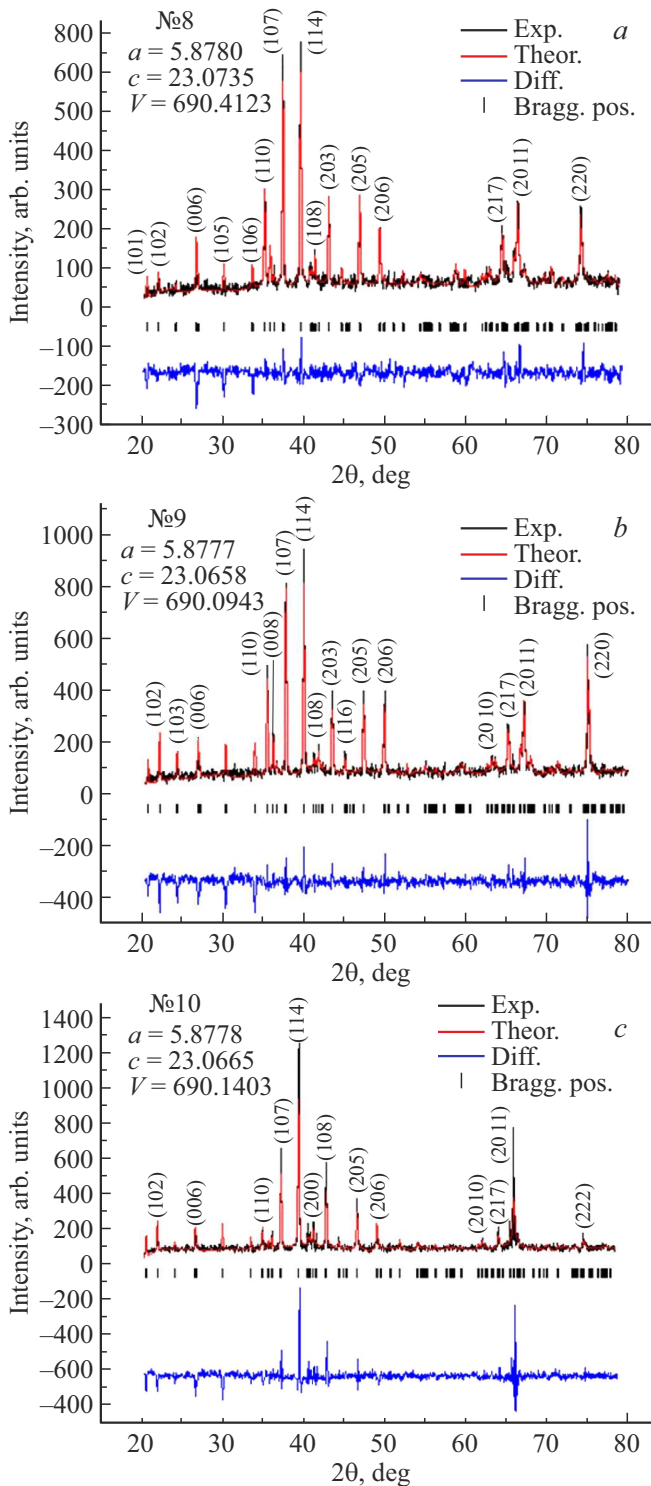


Рис. 5. Рентгено-дифракционные спектры образцов изотропных поликристаллических гексаферритов SrFe₁₂O₁₉ ГСИ_8 (a), ГСИ_9 (b) и ГСИ_10 (c), полученных методом РТС.

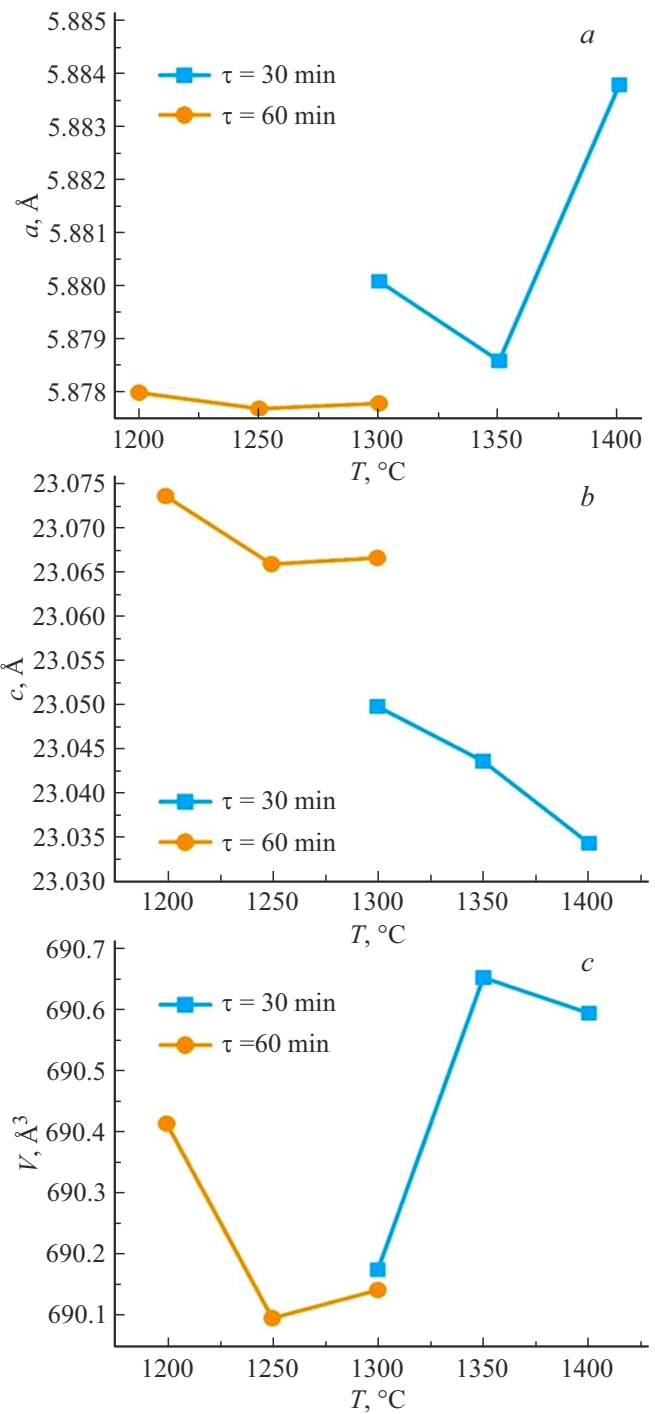


Рис. 6. Изменение параметров решетки *a* (a), *c* (b) и объема *V* (c) элементарной ячейки для образцов изотропных поликристаллических гексаферритов SrFe₁₂O₁₉, синтезированных РТС при различных температурах в течение 60 и 30 min.

играет именно величина температуры РТС, значение которой — характерно для каждого вида керамики. На сегодняшний день физический механизм интенсификации процесса спекания керамики под действием потока быстрых электронов до конца не выяснен [15–18]. Наиболее распространенным и прижившемся в кругу специали-

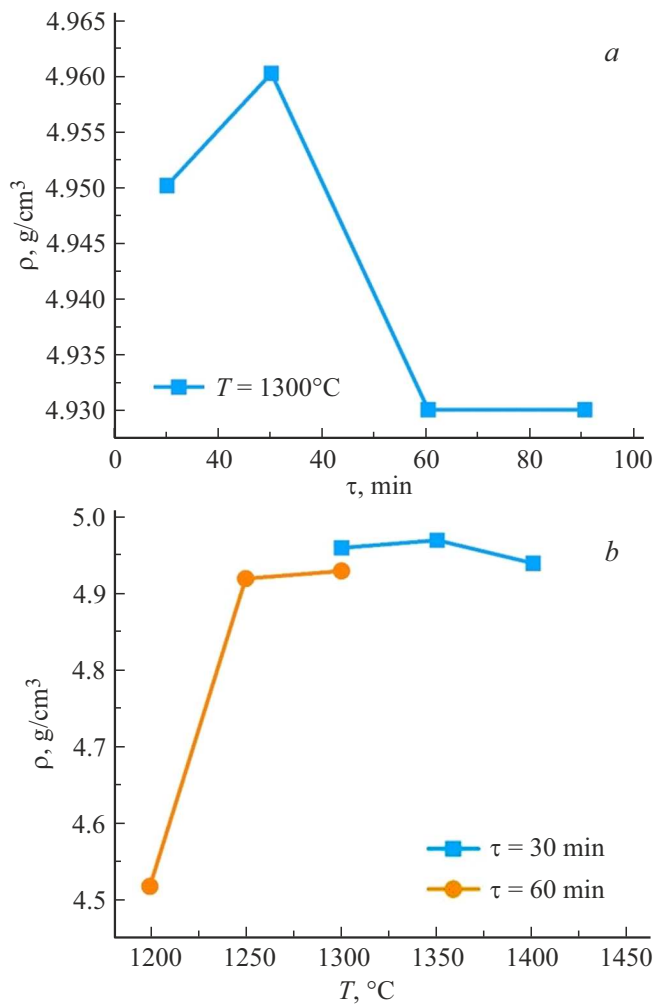


Рис. 7. Изменение плотности образцов гексаферрита SrFe₁₂O₁₉ при РТС в зависимости от времени РТС (а) и температуры РТС (б).

стов является мнение, что преобладающим механизмом радиационного усиления массопереноса в ферритовой керамике является поверхностно-рекомбинационный механизм. При облучении керамических заготовок в зернах и порошковых прессовках индуцируются электронные возбуждения, стремящиеся локализоваться на границах зерен, границах фаз и там рекомбинировать, выделяя энергию и тепло. В результате указанных процессов создаются градиенты температуры, вызывающие термодиффузионные потоки, существенно способствующие ускорению реакций твердофазного синтеза феррита.

4. Заключение и выводы

Таким образом, в настоящей работе впервые методом РТС синтезированы изотропные поликристаллические гексагональные ферриты SrFe₁₂O₁₉. Изучены магнитная и кристаллическая структура, а также некоторые физические свойства полученных объектов исследования.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Полученные в работе методом РТС образцы SrFe₁₂O₁₉ являлись однофазными.

2. РТС может быть использовано в качестве альтернативной технологии для получения гексагонального феррита SrFe₁₂O₁₉. По сравнению с традиционной керамической технологией с термическим спеканием, технология РТС показала себя в качестве высоко энергоэффективной и недорогой.

3. В технологии РТС величина температуры спекания играет существенно большую роль, чем величина времени спекания.

4. В процессе РТС гексаферритов SrFe₁₂O₁₉ анизотропное искажение элементарной ячейки обусловлено, по всей видимости, индуцированием в кристаллической решетке быстрыми электронами кислородных вакансий. С высокой вероятностью, для улучшения параметров образцов SrFe₁₂O₁₉ придется использовать дополнительную финишную операцию кратковременного отжига в атмосфере кислорода.

5. Наиболее оптимальным режимом синтеза изотропных гексаферритов SrFe₁₂O₁₉ является диапазон 1250–1300°C и время спекания 30–60 min.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ № 24-13-00268

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.М. Летюк, В.Г. Костишин, А.В. Гончар. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. МИСИС, М. (2005). 352 с.
- [2] А.Б. Альтман, А.Н. Гербер, П.А. Гладышев, Ю.А. Грацианов, Е.Н. Зейн, Л.А. Кавалерова, Ю.М. Пятин, Ю.С. Сакатунов, В.Г. Сергеев, А.Д. Скоков, Р.Ю. Сухоруков, А.М. Чернявская. Постоянные магниты. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина, 2-е изд., перераб. и доп. Энергия, М. (1980). 488 с.
- [3] А. Устинов, В.Н. Кочемасов, Е.Р. Хасьянова. Электроника НТБ **148**, 8, 86 (2015).
- [4] M. Shalaby, M. Peccianti, Y. Ozturk, R. Morandotti. Nature Communications **4**, 1, 1558 (2013).
- [5] R.C. Pullar. Prog. Mater. Sci. **57**, 7, 1191 (2012).
- [6] V.G. Harris. IEEE Transactions on Magnetics **48**, 3, 1075 (2011).
- [7] И.М. Исаев, С.В. Щербаков, В.Г. Костишин, А.Г. Налогин, В.В. Мокляк, Б.К. Остафийчук, А.А. Алексеев, В.В. Корвушкин, Е.А. Белоконь, М.В. Калинюк, М.А. Михайленко, М.В. Коробейников, А.А. Брызгин, Д.В. Салогуб. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники **20**, 3, 220 (2017).

- [8] В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, А.Г. Налогин, С.В. Щербаков, И.М. Исаев, А.А. Алексеев, А.Ю. Миронович, Д.В. Салогуб. ФТТ **62**, 7, 1028 (2018).
- [9] A.P. Surzhikov, A.M. Pritulov, E.N. Lysenko, A.N. Sokolovskii, V.A. Vlasov, E.A. Vasendina. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry **109**, 1, 63 (2011).
- [10] В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, Г.Б. Глаголев, И.В. Горнаков, Е.Н. Кокин, Г.С. Крайнов, Г.И. Кузнецов, А.Н. Лукин, И.Г. Макаров, С.А. Максимов, С.В. Мигинский, В.Е. Нехаев, А.Д. Панфилов, В.М. Радченко, Н.Д. Ромашко, А.В. Сидоров, М.А. Тиунов, В.О. Ткаченко, А.А. Тувик, Б.Л. Факторович, В.Г. Ческидов. Наука — производству **63**, 7, 11 (2003).
- [11] А.С. Комлев, И.М. Исаев, В.Г. Костишин, Д.Н. Читанов, А.В. Тимофеев. Ячейка для радиационно-гермического спекания. НОУ-ХАУ. Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ „МИСИС“ № 81-219-2016 ОИС от 29 декабря 2016 г.
- [12] X. Obradors, A. Collomb, M. Pernet, D. Samaras, J.C. Joubert. Journal of Solid State Chemistry **56**, 2, 1191 (2012).
- [13] В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, К.В. Похолок, А.В. Труханов, И.М. Исаев, А.Ю. Миронович, М.А. Дарвиш. Физика твердого тела **63**, 10, 1496 (2021).
- [14] В.Г. Костишин, И.М. Исаев, С.В. Щербаков, А.Г. Налогин, Е.А. Белоконь, А.А. Брызгин. Восточно-Европейский журнал передовых технологий **5**, 8, 32 (2016).
- [15] А.Ю. Анненков, А.С. Ивашутенко. Известия Томского политехнического университета **308**, 7, 30 (2005).
- [16] A.P. Surzhikov, E.N. Lysenko, A.V. Malyshev, A. Petrova, S.A. Ghyngazov, A.K. Aimukhanov. Eurasian Physical Technical Journal **17**, 1, 26 (2020).
- [17] O. Stary, A.V. Malyshev, E.N. Lysenko, A. Petrova. Eurasian Journal of Physics and Technology **17**, 2, 6 (2020).
- [18] А.С. Комлев. Таврический научный обозреватель **17**, 12, 135 (2016).
- [19] A.V. Malyshev, E.N. Lysenko, E.A. Sheveleva, O.A. Surzhikova, A.K. Aringazin. Materials science **18**, 1, 3 (2021).
- [20] O. Stary, A.P. Surzhikov, A.V. Malyshev, E.N. Lysenko, E.A. Sheveleva. Eurasian Physical Technical Journal **18**, 3, 11 (2021).
- [21] A.P. Surzhikov, A.V. Malyshev, E.N. Lysenko, O. Stary. Materials science **19**, 1, 5 (2022).
- [22] Е.Н. Лысенко, А.П. Суржииков, А.В. Малышев, В.А. Власов, Е.В. Николаев. Известия вузов. Химия и химическая технология **61**, 6, 69 (2018).

Редактор К.В. Емцев