03,05

Мёссбауэровские исследования гексагональных изотропных поликристаллических ферритов $SrFe_{12}O_{19}$, полученных методом радиационно-термического спекания

© В.Г. Костишин[1], А.В. Труханов[1], А.А. Алексеев[2], С.В. Щербаков[2], И.М. Исаев[1], А.Ю. Миронович[1], М.А. Михайленко[3], М.А. Сысоев[1], Г.А. Скорлупин[1], 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 ($SrFe_{12}O_{19}$) 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 $SrFe_{12}O_{19}$. 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 P63/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 $SrFe_{12}O_{19}$, демонстрируя высокую энергоэффективность и экономичность по сравнению с традиционными методами

Ключевые слова: радиационно-термическое спекание, изотропные поликристаллические гексагональные ферриты $SrFe_{12}O_{19}$, 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 M-типа $SrFe_{12}O_{19}$ (SrM) имеет кристаллическую структуру, изоморфную магнетоплюмбиту $PbFe_{12}O_{19}$ [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 разработке 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 $SrFe_{12}O_{19}$, 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%) Исфаринского 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 низшей 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].

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

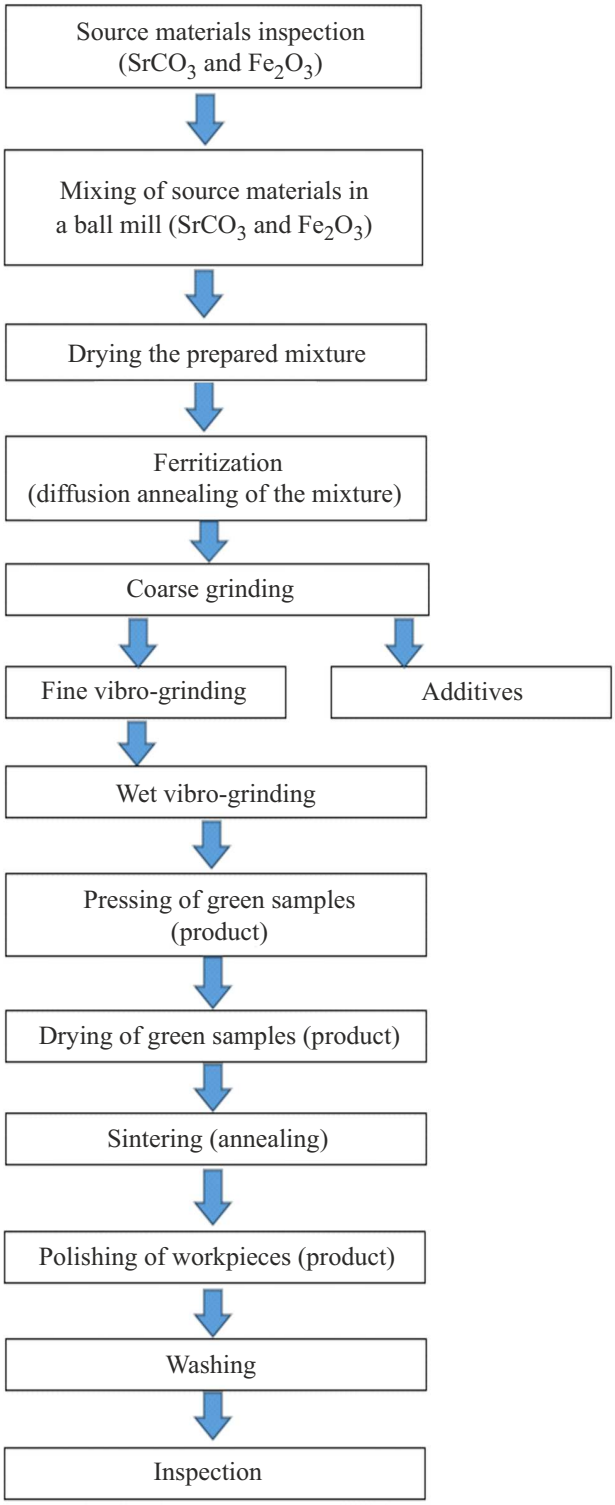


Рис. 1. Характерная технологическая схема получения изотропных поликристаллических гексагональных ферритов $SrFe_{12}O_{19}$ при использовании керамической технологии.

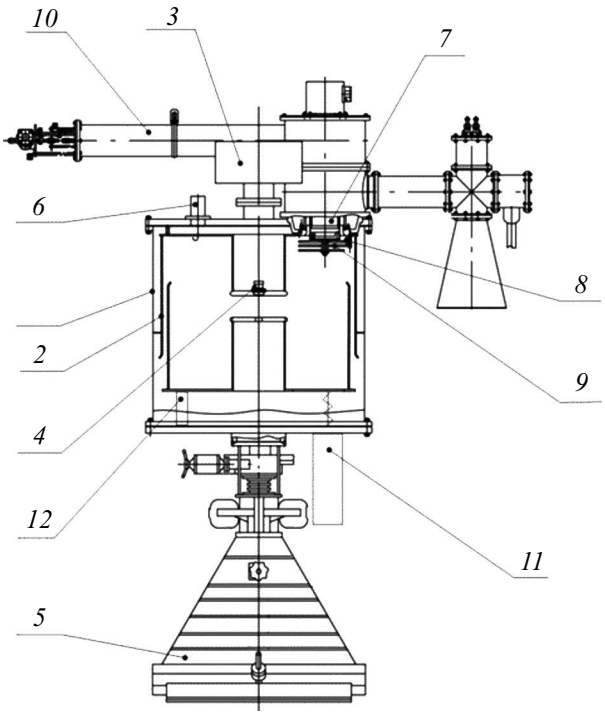


Рис. 2. Схема линейного ускорителя ИЛУ-6: *1* — вакуумный бак; *2* — резонатор; *3* — магниторазрядный насос типа НМД; *4* — инжектор электронов; *5* — выпускное устройство; *6* — измерительная петля; *7* — анод лампы ВЧ генератора; *8* — опора петли ввода ВЧ мощности; *9* — петля ввода ВЧ мощности; *10* — катодный шлейф; *11* — ввод напряжения смещения −7 kV; *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 $\lambda = 0.178897$ nm. 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:

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

где: L_C — средний размер области когерентного рассеяния, nm; 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_{a_1}-излучения, nm; $\lambda = 0.178897$ nm.

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

Таблица 1. Информация о полученных в настоящей работе методом РТС образцах $SrFe_{12}O_{19}$

№ п/п	№ сырой заготовки	№ образца	Температура РТС, °C	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:

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

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

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

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

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°C/τ, 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 M: 12k, $4f_1$, $4f_2$, 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_{eff}, 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 мессбауэровских спектров изотропных гексаферритов $SrFe_{12}O_{19}$, 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_{eff}, 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 мессбауэровских спектров изотропных гексаферритов $SrFe_{12}O_{19}$, 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_{eff}, 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	

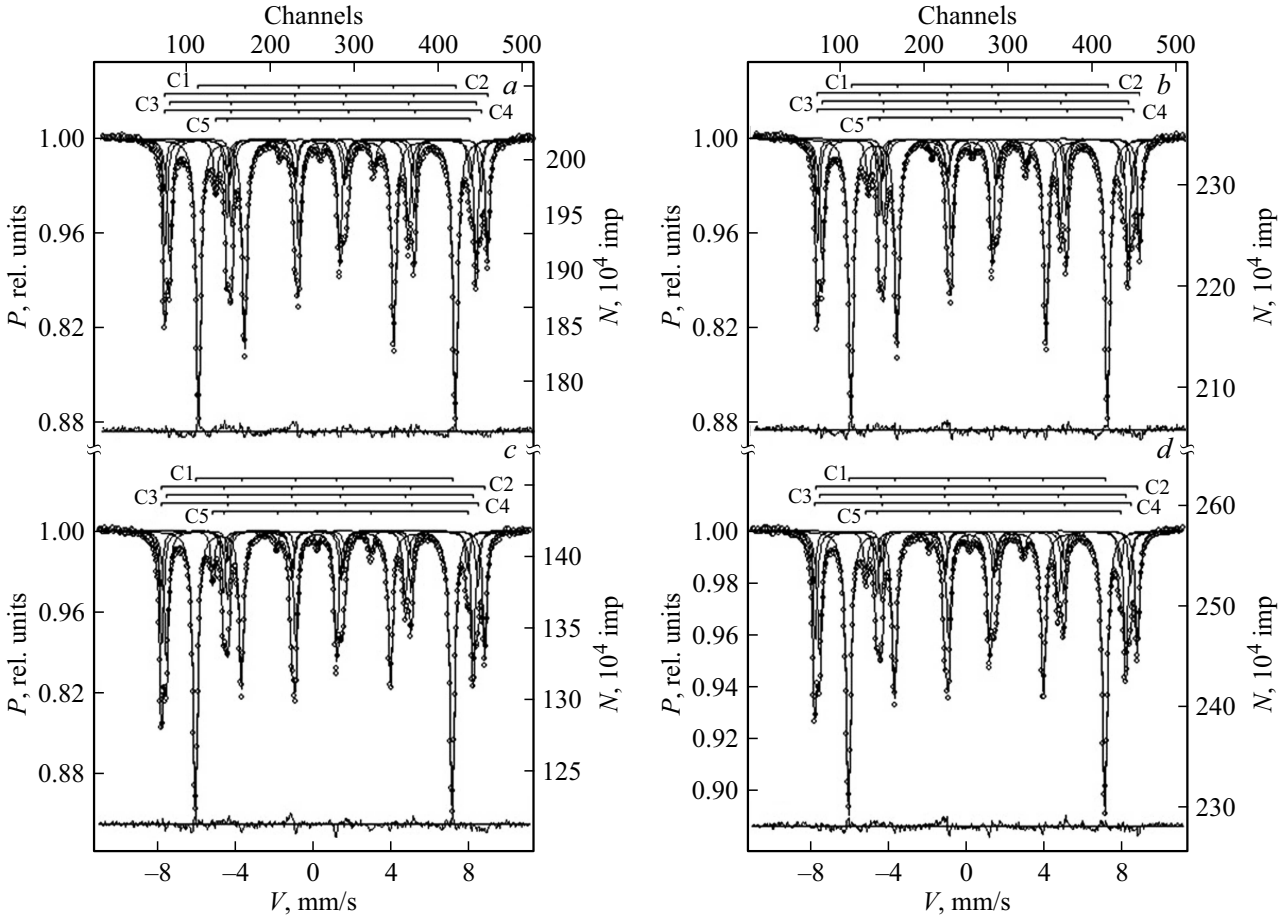


Рис. 3. Мессбауэровские спектры изотропных гексаферритов $SrFe_{12}O_{19}$, полученных методом радиационно-термического спекания при различных значениях температуры и времени спекания (T°C/τ, min): *a* — 1200/60; *b* — 1250/60; *c* — 1300/60; *d* — 1350/40.

Таблица 4. Разности площадей секстетов ΔS с противоположными направлениями магнитных моментов ионов Fe^{3+} 12k, 2a, 2b и $4f_1$, $4f_2$

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 Fe^{3+} соответствующих координаций: 12k, $4f_2$, 2a — октаэдры, $4f_1$ — тетраэдр, и 2b — бипирамида [12]. Однако, некоторые параметры несколько отличаются от теоретических. Это касается площадей от ионов Fe($4f_1$), 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 Fe^{3+}, по сравнению с октаэдрическими, как это было объяснено в работе [13]. С другой стороны, можно отметить уменьшении 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 $SrFe_{12}O_{19}$, полученных по технологии РТС при температуре 1300°C 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 Fe^{3+} 12k, 2a, 2b и $4f_1$, $4f_2$. Разности ΔS пропорциональны

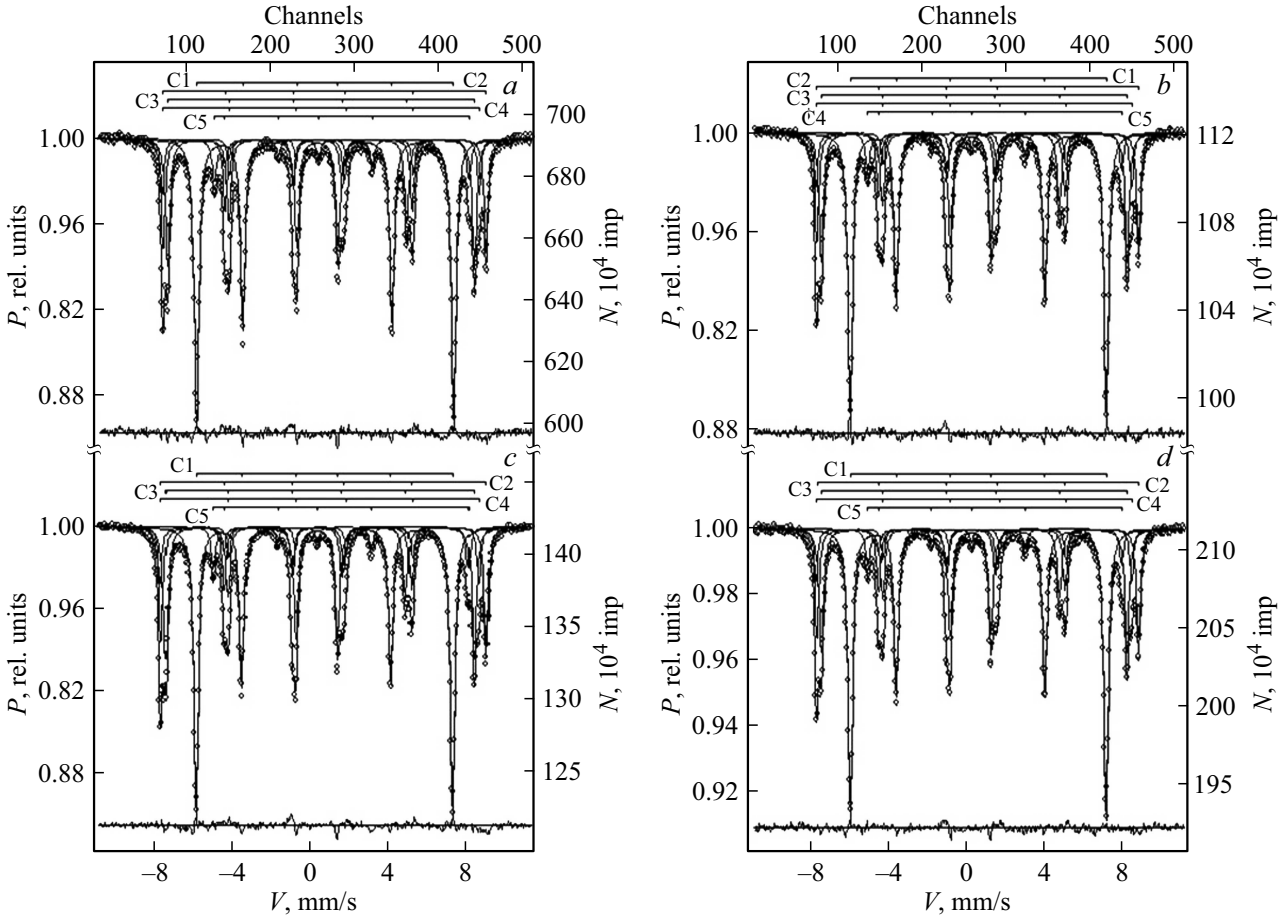


Рис. 4. Мессбауэровские спектры изотропных гексаферритов $SrFe_{12}O_{19}$, полученных методом РТС при 1300°C и различных значениях времени спекания (min): *a* — 10, *b* — 30, *c* — 60, *d* — 90.

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 гексаферитов $SrFe_{12}O_{19}$ ГСИ_8 (*a*), ГСИ_9 (*b*) и ГСИ_10 (*c*), полученные методом РТС при следующих значениях температуры и времени $T°C/\tau$ 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 $SrFe_{12}O_{19}$ 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 $SrFe_{12}O_{19}$ 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 $SrFe_{12}O_{19}$ 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 $SrFe_{12}O_{19}$, были ранее получены для других

ферритовых материалов [7–9,14–22], особенно для гексаферрита бария $SrFe_{12}O_{19}$ [14]. Весьма интересным является тот результат, что при использовании технологии РТС спекание феррита можно провести за несколько десятков минут. И превалирующую роль в этом процессе

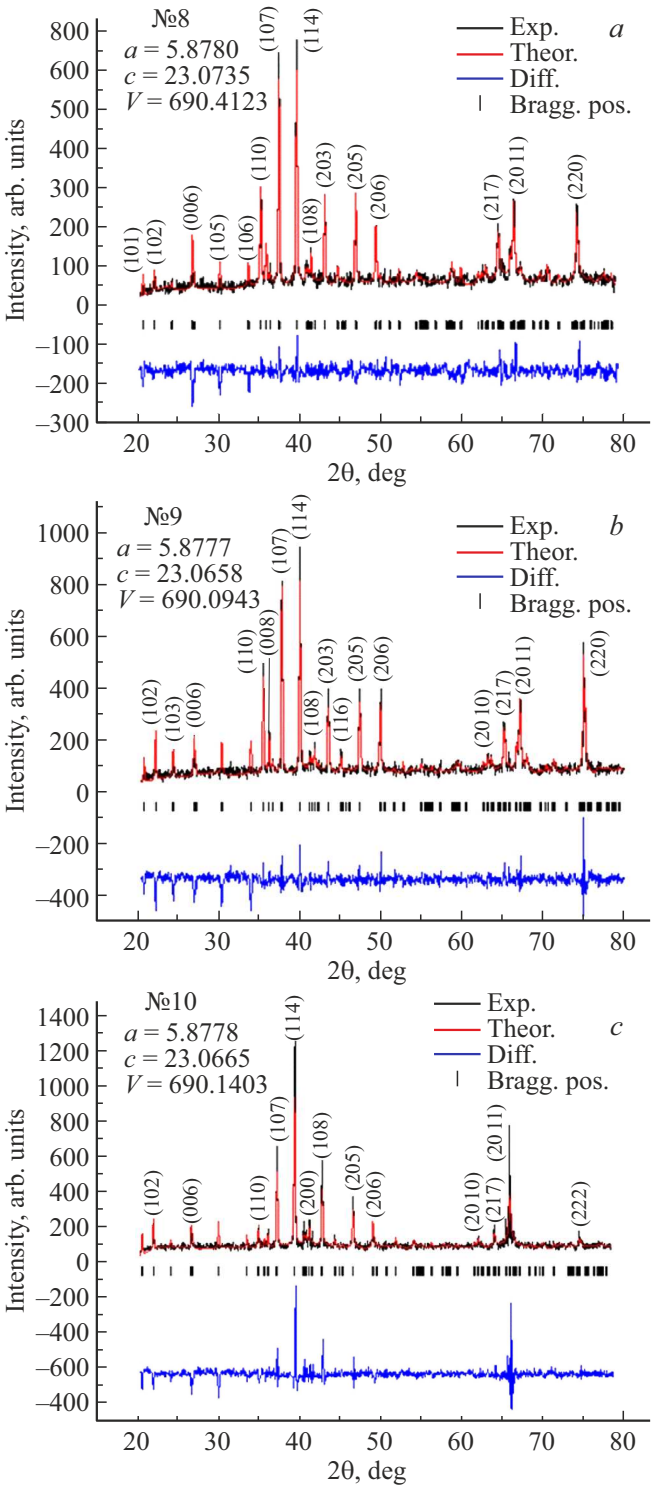


Рис. 5. Рентгено-дифракционные спектры образцов изотропных поликристаллических гексаферритов $SrFe_{12}O_{19}$ ГСИ_8 (*a*), ГСИ_9 (*b*) и ГСИ_10 (*c*), полученных методом РТС.

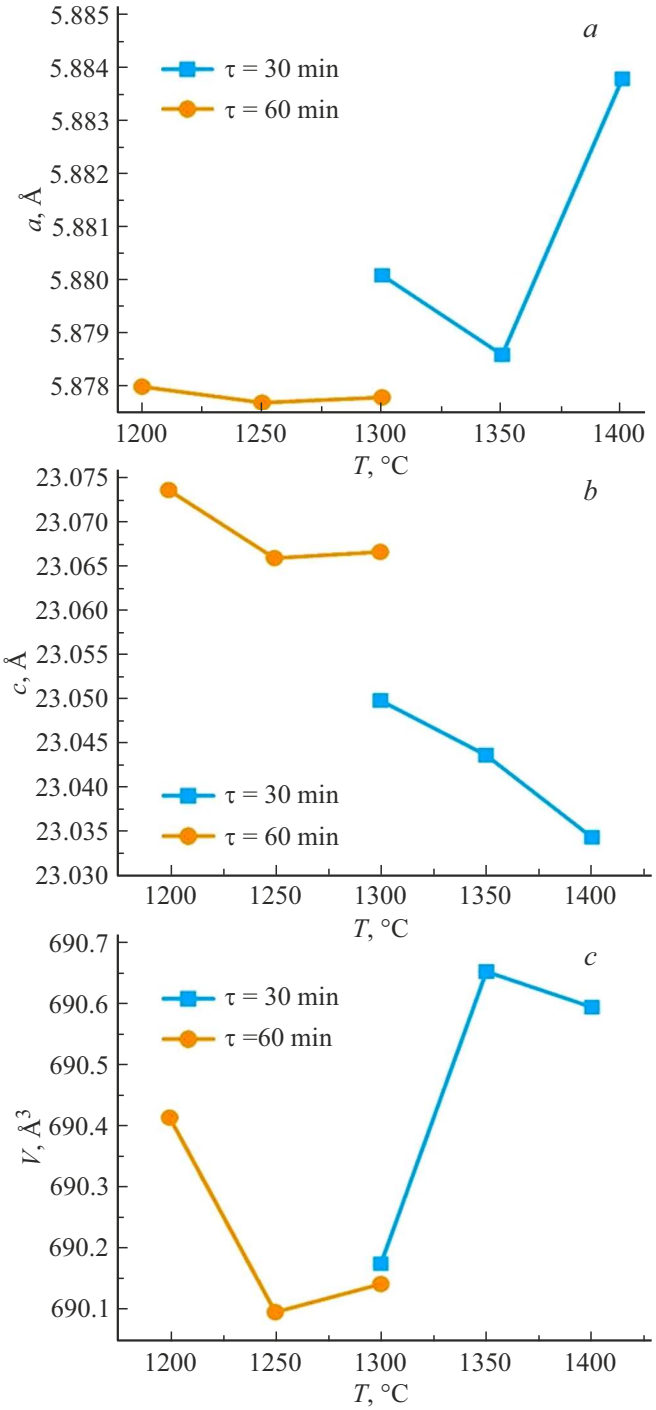


Рис. 6. Изменение параметров решетки *a* (*a*), *c* (*b*) и объема *V* (*c*) элементарной ячейки для образцов изотропных поликристаллических гексаферитов $SrFe_{12}O_{19}$, синтезированных РТС при различных температурах в течение 60 и 30 min.

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-

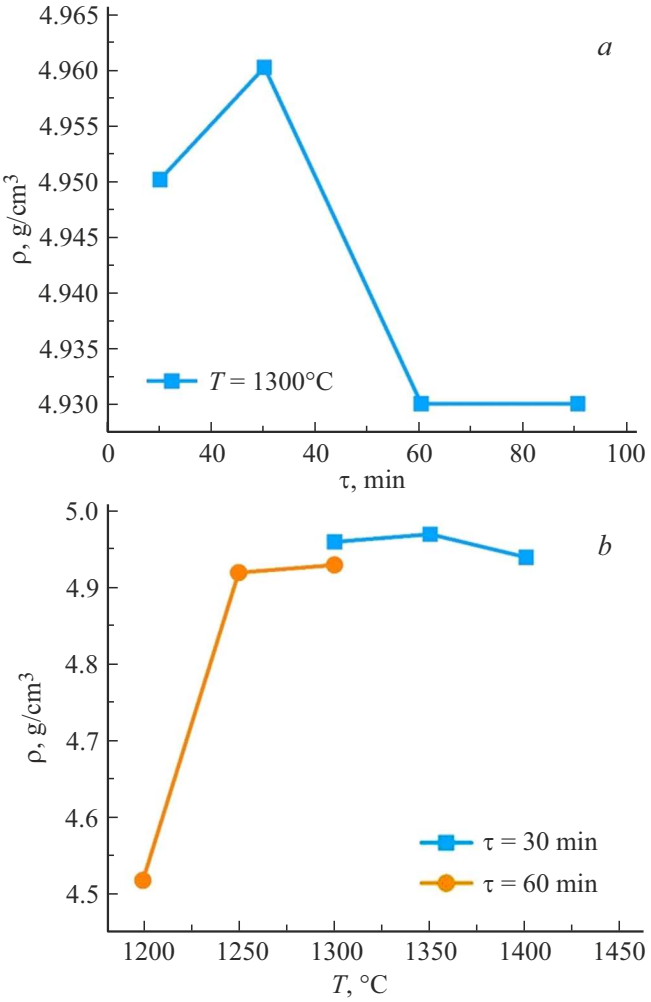


Рис. 7. Изменение плотности образцов гексаферрита $SrFe_{12}O_{19}$ при РТС в зависимости от времени РТС (*a*) и температуры РТС (*b*).

стов является мнение, что превалирующим 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 $SrFe_{12}O_{19}$. 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 $SrFe_{12}O_{19}$ являлись однофазными.

2. РТС может быть использовано в качестве альтернативной технологии для получения гексагонального феррита $SrFe_{12}O_{19}$. 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 $SrFe_{12}O_{19}$ анизотропное искажение элементарной ячейки обусловлено, по всей видимости, индуцированием в кристаллической решетке быстрыми электронами кислородных вакансий. С высокой вероятностью, для улучшения параметров образцов $SrFe_{12}O_{19}$ придется использовать дополнительную финишную операцию кратковременного отжига в атмосфере кислорода.

5. Наиболее оптимальным режимом синтеза изотропных гексаферритов $SrFe_{12}O_{19}$ 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. Коровушкин, Е.А. Белоконь, М.В. Калинюк, М.А. Михайленко, М.В. Коробейников, А.А. Брязгин, 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. Брязгин, 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-термического 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. Брязгин. 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. Суржиков, А.В. Малышев, В.А. Власов, Е.В. Николаев. Известия вузов. Химия и химическая технология **61**, *6*, 69 (2018).

Редактор К.В. Емцев