

03,05

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

© В.Г. Костишин<sup>1</sup>, А.В. Труханов<sup>1</sup>, А.А. Алексеев<sup>2</sup>, С.В. Щербаков<sup>2</sup>, И.М. Исаев<sup>1</sup>, А.Ю. Мионович<sup>1</sup>, М.А. Михайленко<sup>3</sup>, М.А. Сысоев<sup>1</sup>, Г.А. Скорлупин<sup>1</sup>, Г.М. Токин<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>3</sup> 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  $P63/mmc$  (№ 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  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , 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  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  ( $\text{SrM}$ ) 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  $\text{SrM}$  обладают лучшей технологичностью по сравнению с гексаферритами  $\text{BaM}$  [2].

Благодаря комплексу своих магнитных свойств и эксплуатационных параметров, феррит  $\text{SrM}$  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  $\text{SrM}$  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  $\text{SrM}$  может стать технология радиационно-термического спекания (РТС), хорошо опробованная на целом ряде типов ферритов [7–9], включая гексаферрит бария  $\text{BaM}$  [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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  марки ММ-2 (ТУ6-09-4816-80; содержание примесей  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  составляет 0.01 wt.% для каждого соединения). В качестве сырья, содержащего стронций, был использован карбонат стронция кристаллический марки „С“ (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].

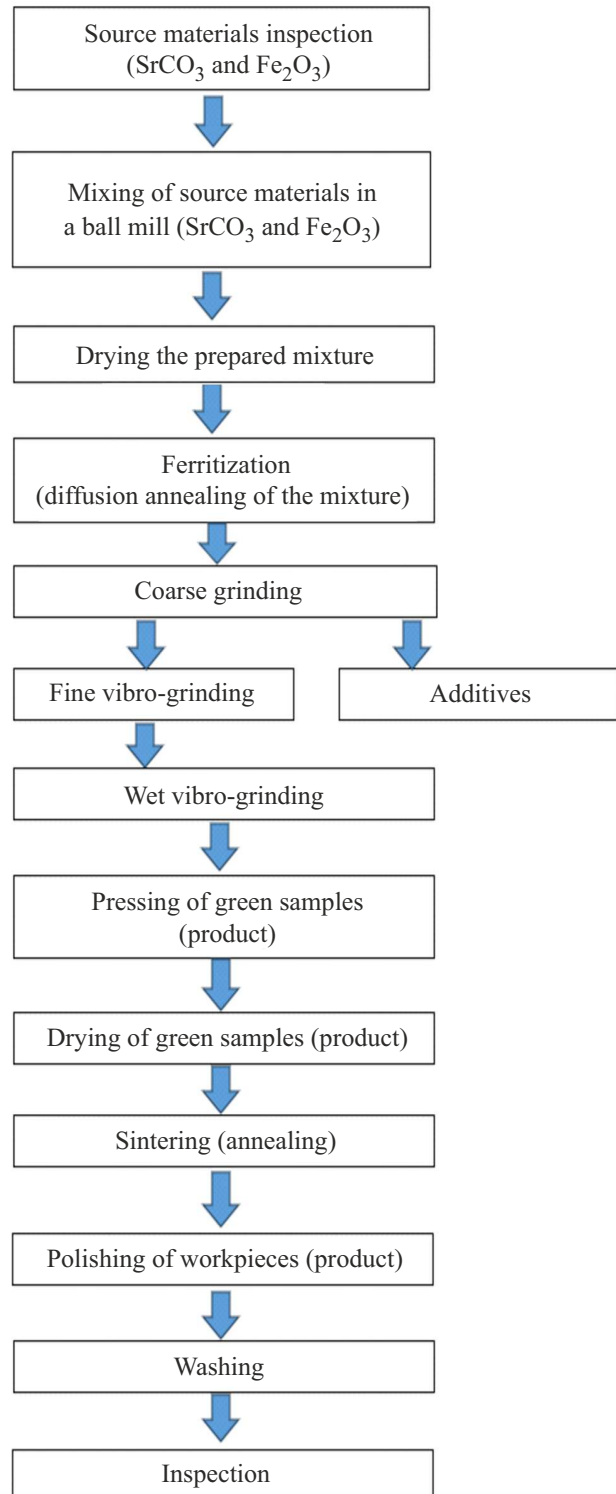
РТС образцов проводилось с использованием быстрых электронов на линейном ускорителе ИЛУ-6 для радиационных технологий на энергию 2.5 MeV ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН [10]. Схема данного ускорителя представлена на рис. 2.

Ниже представлены основные характеристики ускорителя ИЛУ-6:

- максимальная энергия электронов — 2.5 MeV;
- рабочая частота резонатора — 117 МГц;
- 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.

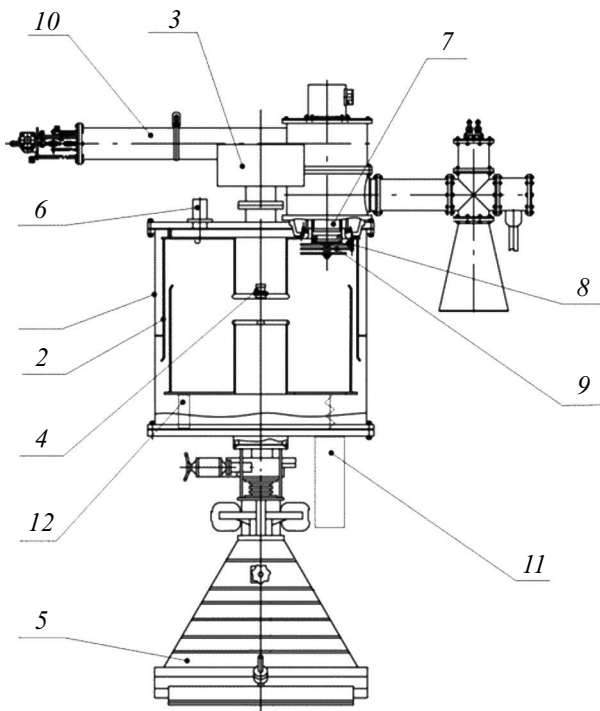
Для спекания гексагональных ферритов в пучке быстрых электронов в работе была использована специально разработанная на кафедре Технологии Материалов Электроники университета МИСИС ячейка для РТС ферритовой керамики и ферритовых изделий [11].

Мёссбауэровские спектры объектов исследования регистрировались на спектрометре МС-1104Е с постоянным ускорением при комнатной температуре, источником  $\gamma$ -излучения служил  $\text{Co}^{57}$  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.

$\alpha$ -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  $\text{CoK}_{\alpha_1}$ -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  $\theta$ , соответствующего первому дифракционному максимуму из набора линий, присущих каждой из выявленных фаз, рад.;  $\lambda$  — длина волны рентгеновского  $\text{CoK}_{\alpha_1}$ -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 $\text{g/cm}^3$
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:  $\rho$  — плотность образца,  $\text{g/cm}^3$ ;  $\rho_0$  — известная плотность жидкости,  $\text{g/cm}^3$ ;  $W_a$  — вес образца на воздухе, г;  $W_l$  — вес образца в жидкости, г.

Рентгеновская плотность гексаферритов вычислялась по данным рентгеноструктурного анализа и составляет в среднем  $5.1 \text{ g/cm}^3$ :

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

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  $\text{Fe}^{3+}$  в структуре гексаферрита типа М: 12k, 4f<sub>1</sub>, 4f<sub>2</sub>, 2a и 2b [12]. Полученные мессбауэровские параметры секстетов после их математической обработки, изомерный сдвиг ( $\delta$ , mm/s), квадрупольное расщепление ( $\Delta$ , mm/s), магнитные поля на ядрах  $\text{Fe}^{57}$  ( $H_{\text{эф}}$ , kOe), ширина резонансных линий ( $\Gamma$ , mm/s), угол  $\Theta$ , (degree°) и площади секстетов ( $S$ , rel.%) приведены в табл. 2.

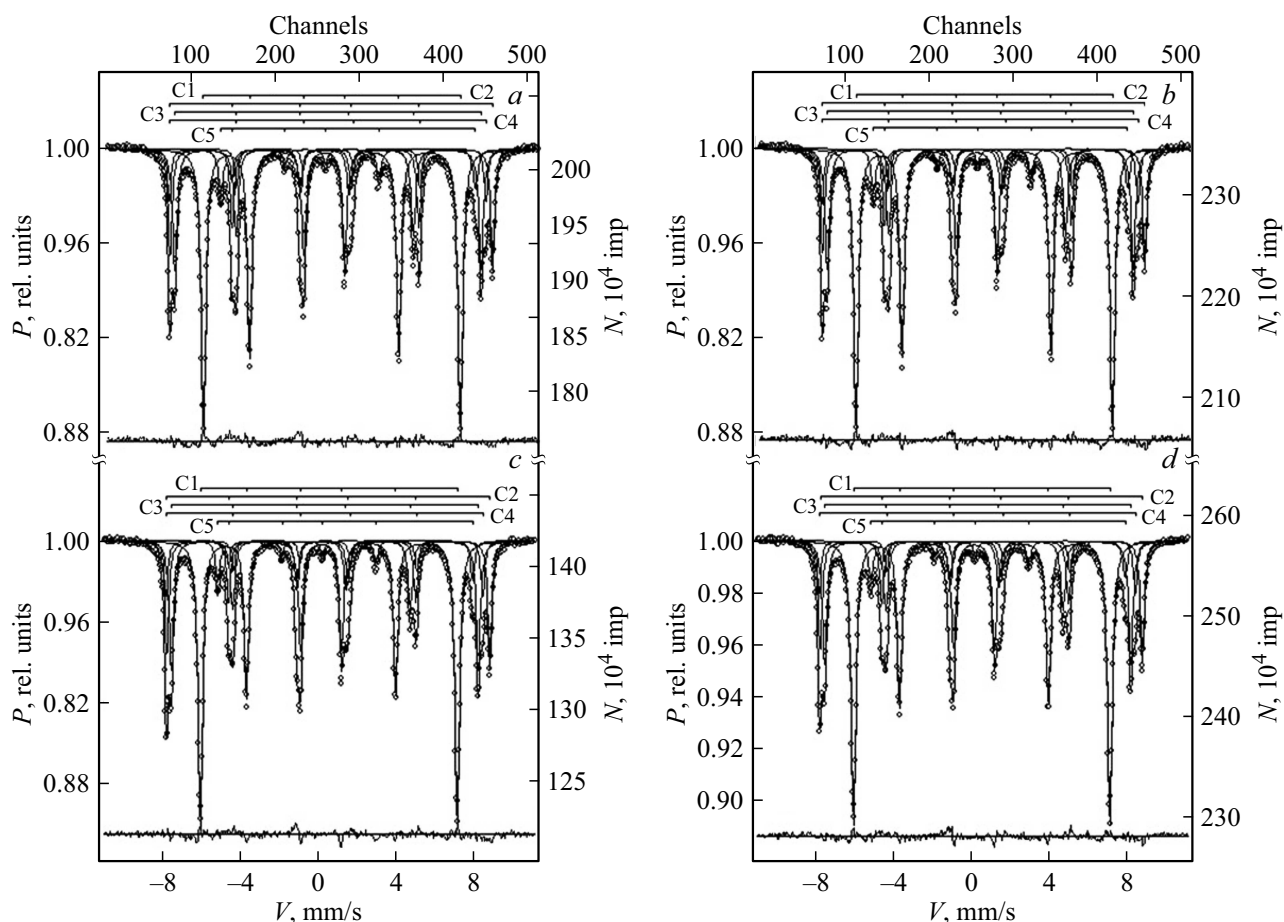
Мессбауэровский спектр образца 1400/10 на рис. 3 не показан, но в табл. 2 приведены его параметры. Из табл. 2 видно, что при всех режимах обработки, все ионы железа соответствуют валентности 3+, согласно значениям изомерного сдвига, при этом все параметры

**Таблица 2.** Параметры мёссбауэровских спектров изотропных гексаферритов SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, полученных методом радиационно-термического спекания при различной температуре

Образец SrFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , T °C/τ min	Компоненты спектра	δ, mm/s	Δ, mm/s	H <sub>эф</sub> , kOe	S, %	Γ, mm/s	Θ, °
1200/60	C1(12k)	0.35	0.39	412	49.0	0.29	55.3
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.37	0.30	517	16.2	0.25	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 <sub>2</sub> )	0.37	0.30	517	15.5	0.24	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 <sub>2</sub> )	0.37	0.32	518	15.9	0.25	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 <sub>2</sub> )	0.37	0.32	517	16.7	0.26	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 <sub>2</sub> )	0.37	0.31	517	16.4	0.25	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, полученных методом РТС при различных значениях времени спекания

Образец SrFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , T °C/τ min	Компоненты спектра	δ, mm/s	Δ, mm/s	H <sub>эф</sub> , kOe	S, %	Γ, mm/s	Θ, °
1300/10	C1(12k)	0.35	0.39	412	48.8	0.29	52.3
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.37	0.31	517	16.2	0.24	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 <sub>2</sub> )	0.37	0.32	517	16.5	0.24	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 <sub>2</sub> )	0.37	0.32	518	15.9	0.25	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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 <sub>2</sub> )	0.37	0.31	517	17.0	0.25	
	C3(4f <sub>1</sub> )	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  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , полученных методом радиационно-термического спекания при различных значениях температуры и времени спекания ( $T^\circ\text{C}/\tau$ , min): *a* — 1200/60; *b* — 1250/60; *c* — 1300/60; *d* — 1350/40.

**Таблица 4.** Разности площадей секстетов  $\Delta S$  с противоположными направлениями магнитных моментов ионов  $\text{Fe}^{3+}$  12k, 2a, 2b и 4f<sub>1</sub>, 4f<sub>2</sub>

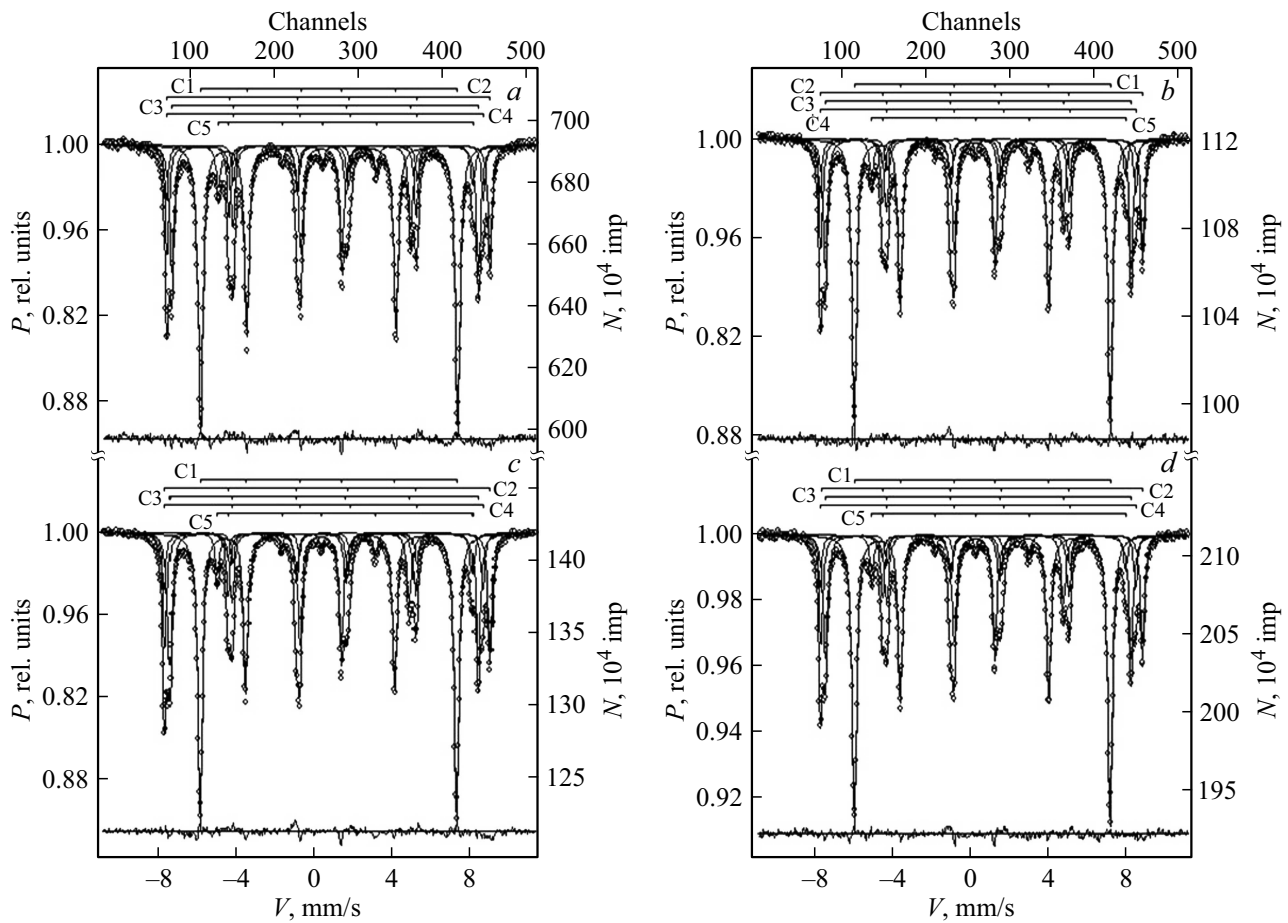
$T/\tau$	1200/60	1250/60	1300/60	1350/40	1400/30	1300/10	1300/30	1300/90
$\Delta S$	26.6	28.0	27.0	30.2	24.4	24.4	25.2	24.4

лежат в пределах значений, характерных для ионов  $\text{Fe}^{3+}$  соответствующих координаций: 12k, 4f<sub>2</sub>, 2a — октаэдры, 4f<sub>1</sub> — тетраэдр, и 2b — бипирамида [12]. Однако, некоторые параметры несколько отличаются от теоретических. Это касается площадей от ионов  $\text{Fe}(4f_1)$ , 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  $\text{Fe}^{3+}$ , по сравнению с октаэдрическими, как это было объяснено в работе [13]. С другой стороны, можно отметить уменьшения угла  $\Theta$ , при увеличении температуры. Это особенно проявляется с уменьшением времени синтеза (обр. 1350/40, 1400/10). Следовательно, при этих режимах за счет уменьшения угла  $\Theta$  от 55° происходит увеличение магнитной текстуры образцов.

Для выяснения влияния непосредственно времени синтеза были зарегистрированы мессбауэровские спектры гексаферритов  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , 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  $\Theta$ , но четкой зависимости влияния на него нет. При этом наименьшее влияние на угол  $\Theta$  происходит при времени синтеза 10 min (образец 1300/10).

Для сопоставления удельной намагниченности образцов с данными мессбауэровских измерений были рассчитаны разности площадей секстетов  $\Delta S$  с противоположными направлениями магнитных моментов ионов  $\text{Fe}^{3+}$  12k, 2a, 2b и 4f<sub>1</sub>, 4f<sub>2</sub>. Разности  $\Delta S$  пропорциональны



**Рис. 4.** Мессбауэровские спектры изотропных гексаферритов  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , полученных методом РТС при  $1300^\circ\text{C}$  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  $\Delta S$ , 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

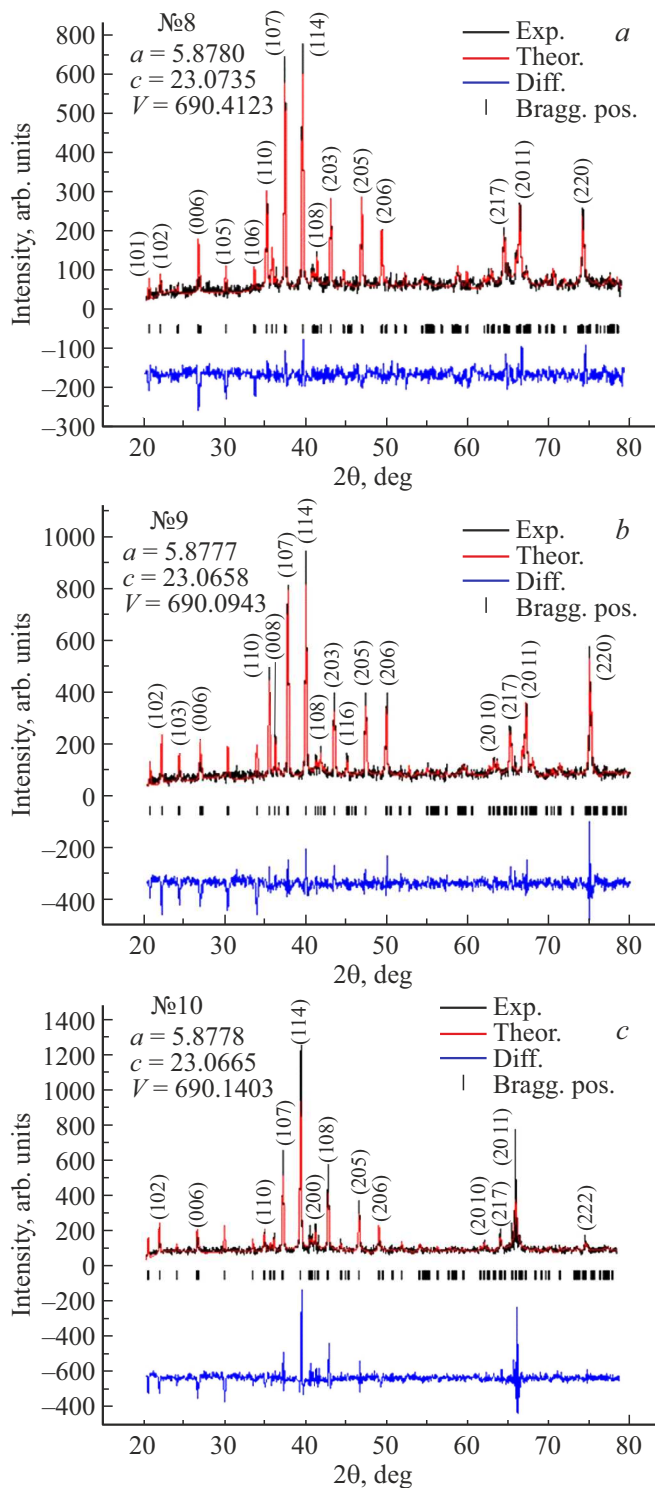
интенсивностей в дальних углах, что может свидетельствовать о некоторых особенностях микроструктуры. Такое поведение может являться результатом или дефектов кристаллитов, или некоторой ориентацией их роста.

При фиксированном времени спекания ( $\tau = 60$  min) при увеличении температуры от  $1200$  до  $1300^\circ\text{C}$  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 ( $1250^\circ\text{C}$ ), что может быть обусловлено влиянием эволюции микроструктуры в процессе спекания.

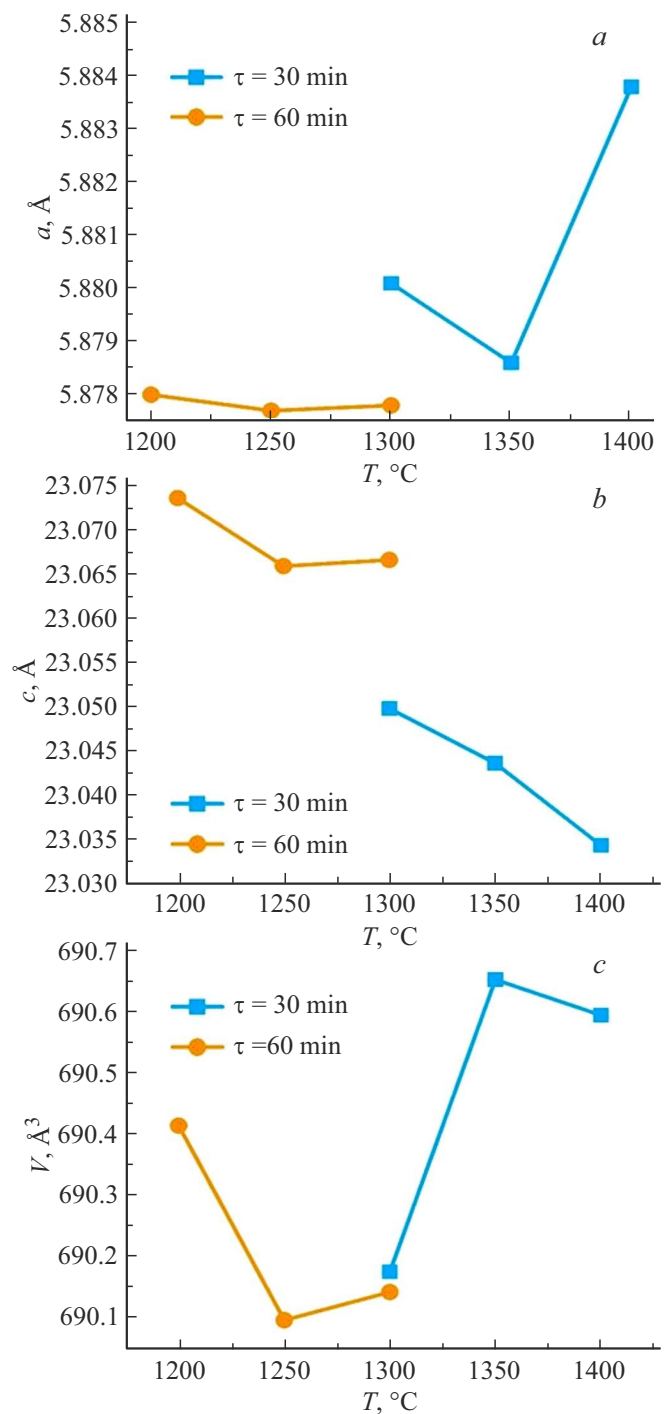
На рис. 7 представлена зависимость плотности  $\rho$  образцов изотропных гексаферритов  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  при получении по технологии РТС от времени спекания при температуре РТС =  $1300^\circ\text{C}$  (*a*) и температуры РТС при временах спекания  $\tau = 30$  min и  $\tau = 60$  min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



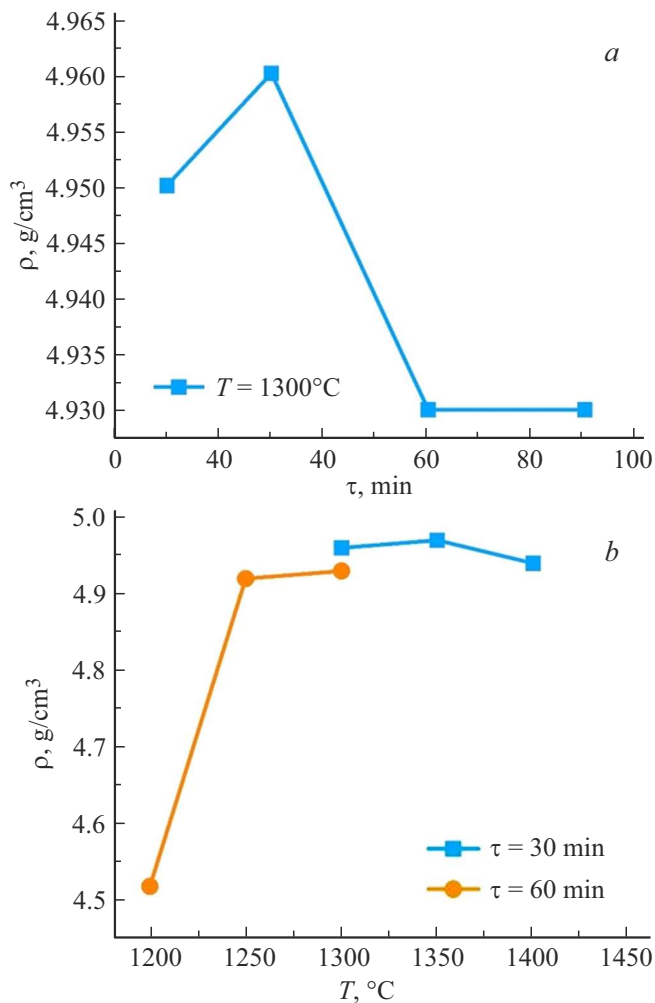


Рис. 7. Изменение плотности образцов гексаферрита SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> при РТС в зависимости от времени РТС (а) и температуры РТС (б).

станов 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 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>. 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<sub>12</sub>O<sub>19</sub> являлись однофазными.

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

5. Наиболее оптимальным режимом синтеза изотропных гексаферритов SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 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. Коробушкин, 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