

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ $GdFeO_3-SrO$ ПРИ 1200–1400°C

© 2022 г. Е. А. Тугова*

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194071 Россия***e-mail: katugova@mail.ioffe.ru*

Поступила в редакцию 09.06.22 г.

После доработки 01.08.22 г.

Принята к публикации 05.08.22 г.

Изучены фазовые соотношения в субсолидусной области системы $GdO_{1.5}-FeO_{1.5}-SrO$ при 1200–1400°C на воздухе. Показано образование трех сложных перовскитоподобных оксидов: $GdSr_2FeO_5$, $GdSrFeO_4$, $Gd_2SrFe_2O_7$, кристаллизующихся в тетрагональной сингонии. Указанные соединения лежат на бинарном сечении $GdFeO_3-SrO$ системы $GdO_{1.5}-FeO_{1.5}-SrO$, из которых последние два оксида образуют гомологический ряд $Gd_nSrFe_nO_{3n+1}$, где $n = 1, 2$. Впервые в условиях твердофазного синтеза при термической обработке смеси исходных оксидов гадолиния, железа(III), карбоната стронция при 1200°C в течение 5 ч получено соединение $GdSr_2FeO_5$, кристаллизующееся в структурном типе Cs_3CoCl_5 (пр. гр. $I4/mcm$). Определен механизм его формирования: лимитирующей стадией является реакция взаимодействия двух оксидов Gd_2SrO_4 и $Sr_3Fe_2O_6$, кристаллизующихся в близких структурных типах. Показано, что феррит $GdSr_2FeO_5$ устойчив в интервале исследуемых температур 1200–1400°C на воздухе.

Ключевые слова: система $GdO_{1.5}-FeO_{1.5}-SrO$, фазовые равновесия, ферриты редкоземельных элементов, механизмы формирования, твердофазные химические реакции

DOI: 10.31857/S0132665122600303

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно проводятся исследования по синтезу и изучению перовскитоподобных соединений [1–5]. Практический интерес представляют ферриты с перовскитоподобной структурой [4, 6–10]. Поэтому закономерен рост исследований, направленных на поиск и получение новых перовскитоподобных железосодержащих соединений, в том числе слоистых оксидов сложного состава, обладающих ценными физико-химическими характеристиками [7–10]. Анализ работ, посвященных, в частности, синтезу ферритов со слоистым строением, показал отсутствие в литературе данных о формировании и устойчивости многих однослойных и двухслойных фаз Руддлсдена–Поппера, существование которых априорно можно было бы предположить. Связано ли то, что в литературе отсутствуют данные о перечисленных соединениях со сложностями синтеза, например, по кинетическим причинам, или с невозможностью синтеза их по термодинамическим причинам – не ясно. Указанные причины инициируют исследование фазовых равновесий в системах $Ln_2O_3-MO-Fe_2O_3$ ($Ln = PЗЭ$; $M = Mg, Ca, Sr, Ba$), в которых образуются рассматриваемые сложные перовскитоподобные оксиды [11–20]. Наиболее широко в литературе отражены работы по изучению систем $Ln_2O_3-SrO-Fe_2O_3$, содержащие легкие лантаноиды ($Ln = La-Eu$)

[12–14, 16–20]. Единичные работы содержат данные о фазах, образующихся в системах Ln_2O_3 –SrO– Fe_2O_3 ($Ln = Gd$ –Ho) [11, 15]. К настоящему времени известны несколько работ, в которых изучались фазовые соотношения в системе Gd_2O_3 –SrO– Fe_2O_3 [11, 15]. Система исследовалась авторами при относительно невысоких значениях температур – 960°C [15] и 1100°C [11]. В работе [15], отражающей субсолидусные отношения в системе Gd_2O_3 –SrO– Fe_2O_3 при 960°C, показано образование восьми соединений, формирующихся в частных разрезах Gd_2O_3 –SrO, SrO– Fe_2O_3 , Gd_2O_3 – Fe_2O_3 : $Sr_7Fe_{10}O_{22}$, $SrFeO_{2.86}$, $Sr_3Fe_2O_6$, $SrFe_{12}O_{19}$, $SrFe_2O_5$, $GdFeO_3$, $Gd_3Fe_5O_{12}$, $SrGd_2O_4$. Согласно данным рассматриваемой работы, ни одного тройного соединения зафиксировано не было. Авторами другой работы [11] установлено образование четырех типов пероскитоподобных твердых растворов с узкими областями устойчивости: $Sr_{1-x}Gd_xFeO_{3-\delta}$ ($0.05 \leq x \leq 0.30$ и $0.80 \leq x \leq 1.00$), $Sr_{2-y}Gd_yFeO_{4-\delta}$ ($y = 0.75$ – 0.80), $Sr_{3-z}Gd_zFe_2O_{7-\delta}$ ($z = 0$ – 0.3 и $z = 1.9$) и $Sr_{4-r}Gd_rFe_3O_{10-\delta}$ ($r = 0.8$) при 1100°C на воздухе. Отдельные публикации отражают особенности процессов формирования сложных оксидов $(GdFeO_3)_n$ SrO, где $n = 1, 2$ со строением фаз Руддлсдена–Поппера [10, 22–26] и твердых растворов общих формул $Gd_xSr_{1-x}FeO_{3-\delta}$, $Gd_{1-x}Sr_{1+x}FeO_4$, $Gd_{2-x}Sr_{1+x}Fe_2O_7$ [9, 21, 27] с более широкими областями гомогенности, чем описаны в [11, 15], образующихся в рассматриваемой системе при температурах выше 1000°C. В частности, было показано [23], что в условиях твердофазного синтеза получение $GdSrFeO_4$ затруднено формированием нецелевого продукта – двухслойной фазы со строением Руддлсдена–Поппера $Gd_2SrFe_2O_7$. Образование более устойчивых фаз, локализованных в системах Ln_2O_3 –MO– B_2O_3 ($Ln = PЗЭ$; $M = Mg, Ca, Sr, Ba$; $B = Al, Fe, Co$), как было показано в работах [23, 28, 29], является причиной, затрудняющей получение целевых продуктов синтеза $LnMBO_4$.

В связи с подобной особенностью твердофазного синтеза, в частности однослойных фаз Руддлсдена–Поппера $LnMBO_4$ ($Ln = PЗЭ$; $M = Mg, Ca, Sr, Ba$; $B = Al, Fe, Co$), избежать образования побочных устойчивых продуктов можно только изменением схемы протекания реакции, например, использованием других исходных компонентов, изменяя степень дисперсности реагентов и уровень гомогенности реакционной композиции, введением гетерофазных добавок, небольшого избытка того или иного реагента и др. способами, приводящими к изменению последовательности и вида образующихся промежуточных продуктов твердофазного взаимодействия.

Отсутствие систематизации данных о сосуществовании и устойчивости соединений, формирующихся, особенно в области, обогащенной SrO, тройной системы $GdO_{1.5}$ –SrO– $FeO_{1.5}$ при температурах выше 1100°C, определяет интерес к более подробному исследованию данной системы. Настоящая работа направлена на изучение возможных фазовых соотношений в субсолидусной области системы $GdO_{1.5}$ –SrO– $FeO_{1.5}$ в интервале температур 1200–1400°C на воздухе. Исследования данной работы ориентировались на изучение устойчивости фаз, формирующихся в псевдобинарном разрезе $(1-x)GdFeO_3$ – $xSrO$ ($x > 0.33$) (табл. 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез целевых составов, расположенных на бинарном разрезе $GdFeO_3$ –SrO системы $GdO_{1.5}$ –SrO– $FeO_{1.5}$, осуществлялся методом твердофазных химических реакций из оксидов Gd_2O_3 , Fe_2O_3 и карбоната стронция $SrCO_3$. Предварительно реагенты прокаливали в течение 2 ч: Gd_2O_3 – при 1000°C, $SrCO_3$, Fe_2O_3 – при 300°C. Поправка на декарбонизацию $SrCO_3$ была рассчитана по термогравиметрическим данным [23, 24]. Смеси реагентов, отвечающие стехиометрии синтезируемых целевых составов, после

Таблица 1. Номинальный (по синтезу) и реальный (по анализу) состав образцов системы GdO_{1.5}–SrO–FeO_{1.5}

Номинальный состав, мол. %	Количественное содержание фаз
65.6GdFeO ₃ ·34.4SrO	100.0% GdSrFeO ₄
60.0GdFeO ₃ ·40.0SrO	34.0 мол. % GdSr ₂ FeO ₅ 66.0 мол. % GdSrFeO ₄
50.0GdFeO ₃ ·50.0SrO	84.0 мол. % GdSr ₂ FeO ₅ 16.0 мол. % SrO

Таблица 2. Результаты элементного и фазового состава смеси SrO : GdO_{1.5} : FeO_{1.5} = 1.05 : 1 : 1, термически обработанной при 1200 и 1400°C

Температура обработки, °C	Элементный состав анализируемых областей, мол. %			Фазовый состав анализируемых областей
	FeO _{1.5}	SrO	GdO _{1.5}	
1200	30.12	32.57	37.31	GdSrFeO ₄
	42.92	50.18	6.84	Sr ₃ Fe ₂ O ₆
	40.08	47.68	12.24	
	24.30	45.54	30.16	GdSr ₂ FeO ₅
	25.13	45.98	28.89	
	3.37	4.77	91.86	Gd ₂ O ₃
	2.42	6.02	91.56	
1400	32.66	35.00	32.34	GdSrFeO ₄
	32.13	34.85	33.02	GdSrFeO ₄ /Gd _{0.95} Sr _{1/05} FeO _{4+δ}
	33.65	34.40	31.95	
	33.05	34.80	32.15	

* Жирным шрифтом выделен состав по площади.

гомогенизации в воде, высушивались, прессовались и обжигались в режиме изотермического отжига–закалки при 1200–1400°C на воздухе в течение 5 и 35 ч.

Фазовый состав и последовательность фазовых превращений образцов системы GdO_{1.5}–SrO–FeO_{1.5} были охарактеризованы методом порошковой рентгеновской дифракции. Съемку проводили на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (CuK_α-излучение). Считали, что равновесие достигнуто, когда рентгеновские дифрактограммы последовательно нагретых образцов разреза GdFeO₃–SrO не показали никаких дальнейших изменений. Расчет условных концентраций, сводящийся к сравнению образца с эталонами по интенсивностям, и параметров элементарной ячейки оксида GdSrFeO₄, построение теоретической рентгеновской дифрактограммы GdSr₂FeO₅ выполнены с помощью пакета программ PDWin 4.0. Угловая поправка проведена с использованием метода внутреннего стандарта. В качестве стандарта использовался α-Si. При построении теоретической рентгеновской дифрактограммы GdSr₂FeO₅ за основу были взяты данные о пространственной группе – *I4/mcm* класса соединений Cs₃CoCl₅, сведения о типе и координатах атомов *x/a*, *y/b*, *z/c*, заселенности структурных позиций (*G*) элементов Gd³⁺, Sr²⁺, Fe³⁺, O²⁻ (табл. 3) [30–32].

Элементный состав образца, в который сверх стехиометрии соединения GdSrFeO₄ добавлен 5 мол. % избыток карбоната стронция в пересчете на SrO, анализировали с помощью растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгенов-

Таблица 3. Общие данные, химический состав, атомные параметры для фазы $GdSr_2FeO_5$ по данным работы [30, 41–43]

Фаза: $GdSr_2FeO_5$						
Химическая формула: $GdSr_2FeO_5$						
Сингония: Тетрагональная. Пространственная группа: $I4/mcm$, $a = 6.819 \text{ \AA}$, $c = 11.197 \text{ \AA}$.						
Число формульных единиц: 4						
Атомные параметры						
Эл. 1	Эл. 2	G_1	G_2	x/a	y/b	z/c
Gd^{3+}	Sr^{2+}	0.50	0.50	0.32144(5)	0.17856(5)	0
Sr^{2+}		1.00		0	0	0.25
Fe^{3+}		1.00		0.5	0	0.25
O_1^{-2}		1.00		0	0	0
O_2^{-2}		1.00		0.14496(43)	0.35504(43)	0.14216(32)

ской спектроскопии с использованием электронного микроскопа Quanta 200 в комплексе с рентгеновским микроанализатором. Содержание элементов, нормированное на 100%, вычислено с помощью параметра ZAF-коррекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгенофазового анализа образцов системы $65.6GdFeO_3 \cdot 34.4SrO$ (рис. 1), полученных термообработкой смеси оксидов Gd_2O_3 , Fe_2O_3 и $SrCO_3$, в которую сверх стехиометрии соединения $GdSrFeO_4$ добавлен 5 мол. % избыток карбоната стронция в пересчете на SrO , при $1100\text{--}1300^\circ\text{C}$ в течение 5 ч свидетельствуют о формировании оксидов $SrFeO_{3-\delta}$, $Sr_3Fe_2O_6$, $GdSrFeO_4$ и об остаточном количестве непрореагировавшего оксида гадолиния Gd_2O_3 . Данные сканирующей электронной микроскопии с элементным анализом фаз (табл. 2) также свидетельствуют о многостадийном процессе образования $GdSrFeO_4$ в смеси $SrO : GdO_{1.5} : FeO_{1.5} = 1.05 : 1 : 1$, состоящем из процессов образования промежуточной фазы: $Sr_3Fe_2O_6$. Согласно приведенным данным микроанализа в смеси, полученной при 1200°C , формируется фаза $GdSr_2FeO_5$ (табл. 2). Отметим отсутствие в работах, посвященных исследованию фазовых равновесий в рассматриваемой трехкомпонентной системе, данных об образовании $GdSr_2FeO_5$. Упоминание об оксиде $GdSr_2FeO_5$ было сделано в работах [30–32], в которых приведены параметры элементарных ячеек ряда сложных ферритов $LnSr_2FeO_5$ ($Ln = P3\Theta$). Немногочисленные сведения [30–33] о ферритах общей формулы $LnSr_2FeO_5$ позволяют относить рассматриваемые фазы к классу перовскитоподобных оксидов.

Дальнейшее увеличение температуры и продолжительности обжига смеси $SrO : GdO_{1.5} : FeO_{1.5} = 1.05 : 1 : 1$ до 1400°C в течение 5 и 35 ч приводит к получению, согласно данным рентгенофазового и элементного анализа (рис. 1, табл. 1, 2), практически однофазного близкого по стехиометрии к оксиду $GdSrFeO_4$ состава: $Gd_{0.95}Sr_{1.05}FeO_{4+\delta}$. По данным рентгеноструктурных исследований параметры элементарной ячейки $Gd_{0.95}Sr_{1.05}FeO_{4+\delta}$, полученного термической обработкой при 1400°C в течение 35 ч составили: $a = 3.8470(1) \text{ \AA}$, $c = 12.415(1) \text{ \AA}$, $V = 183.74 \text{ \AA}^3$. Рассчитанные значения параметров кристаллической структуры рассматриваемого оксида находятся в хорошем согласии с данными разных авторов, определивших структурные

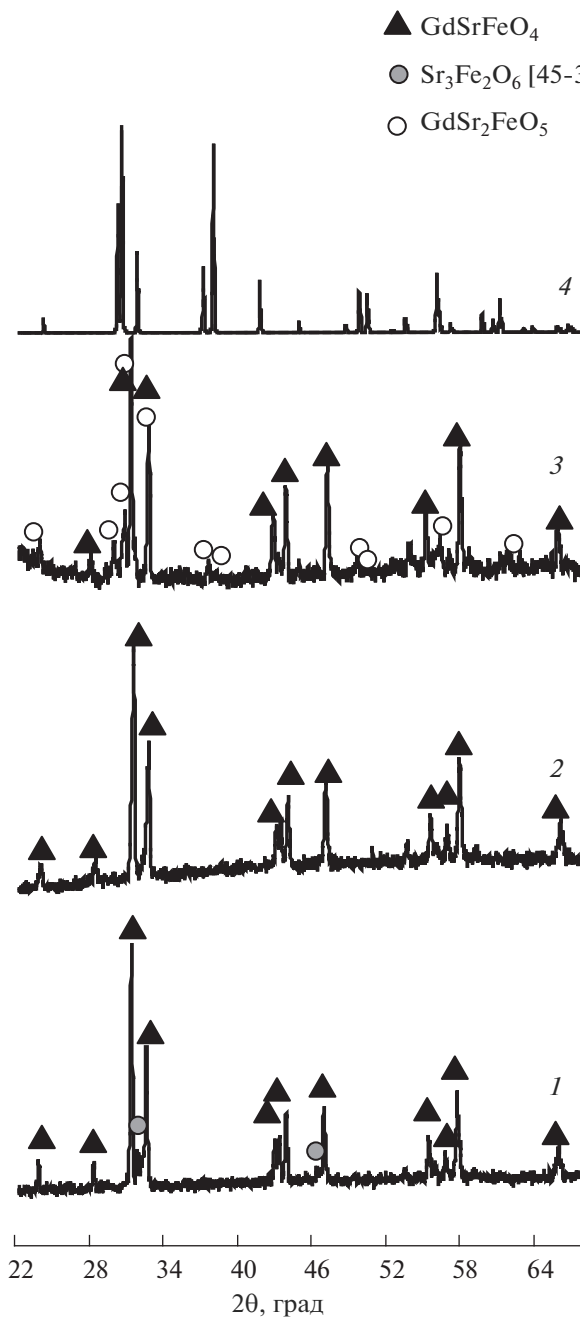


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов псевдобинарного разреза $65.6\text{GdFeO}_3\text{--}34.4\text{SrO}$ (1, 2) и $60.0\text{GdFeO}_3\text{--}40.0\text{SrO}$ (3), после термической обработки при температурах, °С: 1) 1200, 2) 1400, 3) 1400, 4) теоретическая рентгеновская дифрактограмма фазы $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ приведена для сравнения.

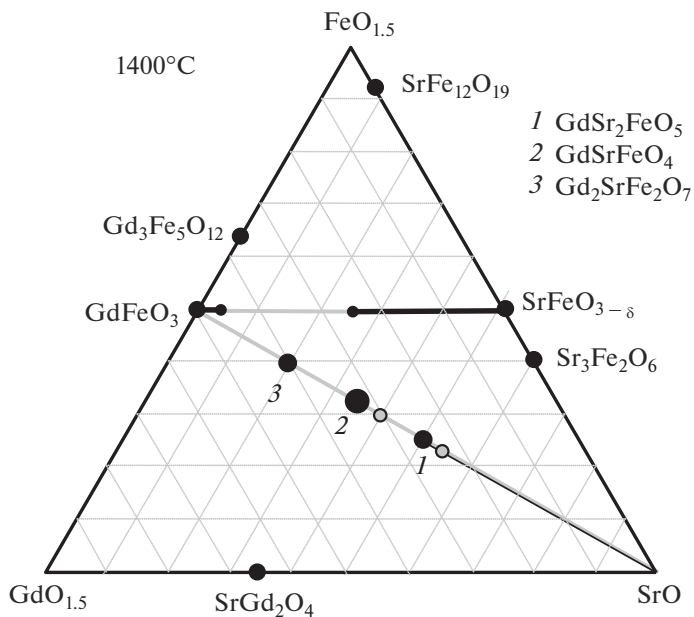


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая субсолидусные фазовые соотношения в системе $GdO_{1.5}$ – SrO – $FeO_{1.5}$ на воздухе при $1400^{\circ}C$.

параметры однослойного перовскитоподобного феррита $GdSrFeO_4$ и твердых растворов на его основе, кристаллизующихся в структурном типе K_2NiF_4 [6, 10, 22, 25, 34]. Фиксируемые во всех образцах методом рентгенофазового анализа и методом электронной сканирующей микроскопии с элементным микроанализом соединения, образующиеся при термообработке исходных составов, содержащих некоторый избыток SrO по сравнению со стехиометрией соединения $GdSrFeO_4$, расположены в области $GdO_{1.5}$ – SrO – $SrFeO_{3-\delta}$ системы $GdO_{1.5}$ – SrO – $FeO_{1.5}$ (рис. 2). Этот факт существенно изменяет схему фазообразования в системе $GdO_{1.5}$ – SrO – $FeO_{1.5}$ по сравнению со случаем, когда исходный состав (67 мол. % $GdFeO_3$ –33 мол. % SrO) не содержит избытка SrO [23] и приводит к отсутствию образования нецелевой фазы $Gd_2SrFe_2O_7$ при получении продукта $GdSrFeO_4$.

Для подтверждения формирования оксида $GdSr_2FeO_5$, условия и механизм образования которого малоизвестны, была построена теоретическая рентгеновская дифрактограмма по методике, представленной в экспериментальной части. Расчет включал (табл. 3) использование рентгенодифрактометрических данных параметров элементарной ячейки, сведения о типе и координатах атомов x/a , y/b , z/c $GdSr_2FeO_5$, взятых из работ [30–32]. Полученная теоретическая рентгеновская дифрактограмма по набору межплоскостных расстояний, углов, индексов отражений, подобна рентгеновской дифрактограмме изоструктурного оксида $EuSr_2FeO_5$ (база данных ICDD, № 27-840), кристаллизующегося в структурном типе Cs_3CoCl_5 .

Сравнение приведенных на рис. 1 теоретической рентгеновской дифрактограммы для $GdSr_2FeO_5$ и экспериментальных результатов рентгенофазового анализа образцов, полученных термообработкой смеси, соответствующей соотношению компонентов $60.0GdFeO_3$ – $40.0SrO$, в интервале температур 1200 – $1400^{\circ}C$, позволяет отметить полное

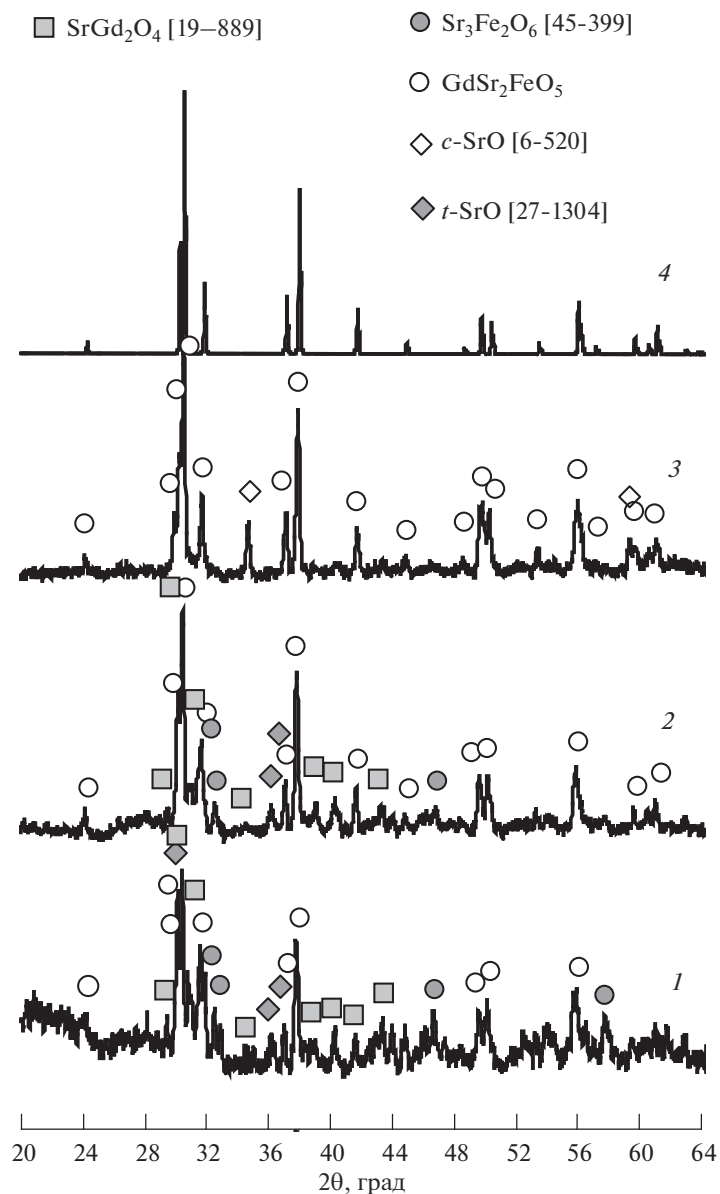


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы образца псевдобинарного разреза $47\text{GdFeO}_3\text{--}53\text{SrO}$, после термической обработки при температурах, °С: 1) 1200, 2) 1300, 3) 1400, 4) теоретическая рентгеновская дифрактограмма фазы $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ приведена для сравнения.

соответствие рефлексов, относимых к набору характеристических линий для фаз $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ и GdSrFeO_4 . Указанный результат еще раз свидетельствует о получении фазы – $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ с перовскитоподобной структурой. Формирование $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ фиксируется при термической обработке смеси исходных оксидов гадолиния, желе-

за(III), стронция при 1200°C в течение 5 ч (рис. 1). По данным работы [20] изоструктурный оксид $\text{EuSr}_2\text{FeO}_5$ термически устойчив до температуры конгруэнтного плавления при $1540 \pm 15^\circ\text{C}$. На основании указанной работы [20], по-видимому, можно предположить устойчивое существование $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ в интервале температур 1200–1500°C.

Результаты рентгенофазового анализа образца, соответствующего соотношению компонентов $\text{GdFeO}_3 : \text{SrO} = 47 : 53$, свидетельствуют, что после термообработки на воздухе при 1200–1400°C, в рассматриваемой системе содержится смесь фаз SrO и $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$. Заметим некоторое отклонение состава от номинального (табл. 1), что может быть связано со возможными сложностями получения образцов, обогащенных SrO [20].

При температурах обработки равных 1200–1300°C (рис. 3), наряду с указанными оксидами фиксируются по данным рентгеновской дифракции фазы $\text{Sr}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$ и SrGd_2O_4 , кристаллизующихся в структурных типах $\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ и CaFe_2O_4 , обладающих близким строением [35, 36]. Основываясь на данных рентгеновской дифракции можно предположить формирование $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$, проходящим за счет взаимодействия фаз $\text{Sr}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$ и SrGd_2O_4 . Отметим также фиксируемый переход SrO из тетрагональной модификации в кубическую при повышении температуры до 1400°C.

На рис. 2 в виде изобарно-изотермического сечения фазовой диаграммы $\text{GdO}_{1.5}\text{--SrO--FeO}_{1.5}$ на воздухе при 1400°C обобщены полученные ранее результаты исследования фазовых соотношений в субсолидусной области системы $\text{GdO}_{1.5}\text{--SrO--FeO}_{1.5}$ [23, 24, 27] и данные настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системе $\text{GdO}_{1.5}\text{--SrO--FeO}_{1.5}$ установлено образование трех тройных сложных оксидов с перовскитоподобной структурой: $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$, GdSrFeO_4 , $\text{Gd}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$, а также ограниченного ряда твердых растворов в псевдобинарном разрезе $\text{GdFeO}_3\text{--SrFeO}_{3-\delta}$. Показано, что изменение схемы протекания твердофазного синтеза GdSrFeO_4 позволяет предотвратить формирование нецелевой фазы, $\text{Gd}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$, получив однофазный целевой продукт. Показано образование GdSrFeO_4 с узкой областью гомогенности. Определено формирование оксида $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$, ранее практически не описанного в литературе, при термической обработке смеси исходных оксидов гадолиния, железа(III), карбоната стронция при 1200°C в течение 5 ч. Показано, что феррит $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ устойчив в интервале исследуемых температур 1200–1400°C. Показано существование разрыва смесимости твердых растворов $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\alpha}$, существующего в интервале $0.05 \leq x \leq 0.51$ при 1400°C [27].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность за поддержку исследований в области изучения фазовых равновесий тугоплавких оксидных систем чл.-корр. РАН В.В. Гусарову.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yatoo M.A., Skinner S.J.* Ruddlesden-Popper phase materials for solid oxide fuel cell cathodes: A short review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. V. 56 (6). P. 3747–3754.

2. Ломанова Н.А. Фазы Ауривиллиуса Bi_{m+1}Fe_{m-3}Ti₃O_{3m+3}; синтез, строение, свойства (обзор) // ЖНХ. 2022. Т. 67. № 6. С. 665–677. [Lomanova N. A. Aurivillius phases Bi_{m+1}Fe_{m-3}Ti₃O_{3m+3}; synthesis, structure, and properties (a Review) // Russ. J. Inorgan. Chem. 2022. V. 67. № 6. P. 741–753].
3. Nirala G., Yadav D., Shail Upadhyay Sh. Ruddlesden–Popper phase A₂BO₄ oxides: Recent studies on structure, electrical, dielectric, and optical properties // Journal of Advanced Ceramics. 2020. V. 9 (2). P. 129–148.
4. Sokolova A.N., Proskurina O.V., Danilovich D.P., Gusarov V.V. Photocatalytic properties of composites based on Y_{1-x}Bi_xFeO₃ (0 ≤ x ≤ 0.15) nanocrystalline solid solutions with a hexagonal structure // Nano-syst. Phys. Chem. Math. 2022. V. 13 (1). P. 87–95.
5. Ding P., Li W., Zhao H., Wu C., Zhao L., Dong B., Wang Sh. Review on Ruddlesden–Popper perovskites as cathode for solid oxide fuel cells // J. Phys. Mater. 2021. V. 4 (2). 022002
6. Christopher J., Swamy C.S. Studies on the catalytic decomposition of N₂O on LnSrFeO₄ (Ln = La, Pr, Nd, Sm, and Gd) // J. Mol. Catal. 1991. V. 68. P. 199–213.
7. Nguyen A.T., Phung V.D., Mittova V.O., Ngo H.D., Vo Th.N., Thi M.L. Le, Nguyen V.H., Mittova I. Ya, Le M.L.Ph., Ahn Y.N., Kim I.T., Nguyen T.L. Fabricating nanostructured HoFeO₃ perovskite for lithium-ion battery anodes via co-precipitation // Scripta Materialia. 2022. V. 207. 114259.
8. Tikhanova S.M., Lebedev L.A., Martinson K.D., Chebanenko M.I., Buryanenko I.V., Semenov V.G., Nevedomskiy V.N., Popkov V.I. The synthesis of novel heterojunction h-YbFeO₃/o-YbFeO₃ photocatalyst with enhanced Fenton-like activity under visible-light // New J. Chem. 2021. V. 45 (3). P. 1541–1550.
9. Sheshko T.F., Kryuchkova T.A., Serov Yu.M., Chislova I.V., Zvereva I.A. New mixed perovskite-type Gd_{2-x}Sr_{1+x}Fe₂O₇ catalysts for dry reforming of methane, and production of light olefins // Catalysis in Industry. 2017. V. 9. № 2. P. 162–169.
10. Singh S., Singh D. Effect of increasing Sr content on structural and physical properties of K₂NiF₄-type phase GdSrFeO₄ // Ceram. Int. 2017. V. 43. P. 3369–3376.
11. Khvostova L.V., Volkova N.E., Gavrilova L.Ya., Maignan A., Cherepanov V.A. Gd₂O₃–SrO–Fe₂O₃ system: The phase diagram and oxygen content in oxides // Materials Today Communications. 2021. V. 29. 102885.
12. Volkova N.E., Khvostova L.V., Galaida A.P., Gavrilova L.Ya., Cherepanov V.A. Phase equilibria, crystal structure and oxygen nonstoichiometry of the complex oxides in Sm – (Sr, Ba) – (Co, Fe) – O systems // Chimica Techno Acta. 2018. V. 5. № 1. P. 55–79.
13. Тугова Е.А. Фазовые трансформации в системе Nd₂SrAl₂O₇ –Nd₂SrFe₂O₇ // ЖНХ. 2022. Т. 67. № 6. С. 809–816; Tugova E.A. Phase transformations in the Nd₂SrAl₂O₇ –Nd₂SrFe₂O₇ system // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 6. P. 874–880.
14. Fossdal A., Einarsrud M.-A., Grande T. Phase relations in the pseudo-ternary system La₂O₃–SrO–Fe₂O₃ // J. Am. Ceram. Soc. 2005. V. 88 [7] P. 1988–1991.
15. Yang L.T., Liang J.K., Song G.B., Chang H., Rao G.H. Compounds and phase relations in the SrO–Fe₂O₃–CuO, SrO–Fe₂O₃–Gd₂O₃ and Gd₂O₃–Fe₂O₃–CuO ternary systems // J. Alloys Compd. 2003. V. 353. P. 301–306.
16. Тугова Е.А., Попова В.Ф., Зверева И.А., Гусаров В.В. Диаграмма состояния системы LaFeO₃–LaSrFeO₄ // Физика и химия стекла. 2006. Т. 32. № 6. С. 923–926; Tugova E.A., Popova V.F., Zvereva I.A., Gusarov V.V. // Glass Physics and Chemistry. 2006. T. 32. № 6. С. 674–676.
17. Samaras D., Buisson G. Croissance dans le flux de monocristaux de SrNdFeO₄ et SrNd₂Fe₂O₇ // Journal of Crystal Growth. 1976. V. 32. № 3. P. 332–334.
18. Aksenova T.V., Volkova N.E., Maignan A., Cherepanov V.A. Phase equilibria in the Nd₂O₃–BaO–Fe₂O₃ system: Crystal structure, oxygen content, and properties of intermediate oxides // J. Am. Ceram Soc. 2022. V. 105. P. 3601–3612.
19. Aksenova T.V., Elkalashy S.I., Urusova A.S., Cherepanov V.A., Vakhromeeva A.E. Phase equilibria, crystal structure, oxygen nonstoichiometry and thermal expansion of complex oxides in the Nd₂O₃–SrO–Fe₂O₃ system // Journal of Solid State Chemistry. 2017. V. 251. P. 70–78.
20. Drogenik M., Kolar D., Golič L. Phase relations in the system SrO–Eu₂O₃–Fe₂O₃ and a new ternary phase Sr₂EuFeO₅ // Journal of the Less-Common Metals. 1974. V. 37. P. 281–284.
21. Числова И.В., Матвеева А.А., Волкова А.В., Зверева И.А. Золь-гель синтез наноструктурированных перовскитоподобных ферритов гадолиния // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37. № 6. С. 101–111. [Chislova I.V., Matveeva A.A., Volkova A.V., Zvereva I.A. Sol–Gel Synthesis of Nanostructured Perovskite-Like Gadolinium Ferrites // Glass Physics and Chemistry. 2011. V. 37. № 6. P. 653–660].
22. Отрепина И.В., Володин В.С., Зверева И.А., Лиу Д.-Ш. Исследование процесса образования оксида GdSrFeO₄ // Физика и химия стекла. 2009. Т. 35. № 4. С. 558–567. [Otrepina I.V., Volodina V.S., Zvereva I.A., Liu D.-Sh. Investigation of the formation of the GdSrFeO₄ oxide // Glass Phys. Chem. 2009. V. 35. P. 423–430].
23. Tugova E.A., Gusarov V.V. Peculiarities of layered perovskite-related GdSrFeO₄ compound solid state synthesis // J. Alloys Compd. 2011. V. 509. № 5. P. 1523–1528.
24. Тугова Е.А. Механизмы твердофазного синтеза слоистых перовскитоподобных фаз Ln₂SrFe₂O₇ (Ln = La, Nd, Gd, Dy) // Журн. общей химии. 2019. Т. 89. Вып. 11. С. 1792–1798. [Tu-

- gova E.A. Mechanisms of the solid-state synthesis of $\text{Ln}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$ (Ln = La, Nd, Gd, Dy) layered perovskite-related phases // Russ. J. Gen Chem. 2019. V. 89. № 11. P. 2295–2300].
25. Shimada M., Koizumi M. Mossbauer effect of SrLnFeO_4 (Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd) // Mat. Res. Bull. 1976. V. 11. P. 1237–1240.
 26. Sharma I.B., Singh D., Magotra S.K. Effect of substitution of magnetic rare earths for La on the structure, electric transport and magnetic properties of $\text{La}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$ // J. Alloys Compd. 1998. V. 269. P. 13–16.
 27. Tugova E.A., Krasilin A.A., Panchuk V.V., Semenov V.G., Gusarov V.V. Subsolidus phase equilibria in the GdFeO_3 – $\text{SrFeO}_{3-\delta}$ system in air // Ceram. Int. 2020. V. 46 (15). P. 24526.
 28. Zhang Zh., Wu H., Meng X., Li J., Zhan Zh. Evaluation of $\text{GdSrCoO}_{4+\delta}$ intergrowth oxides as cathode materials for intermediate-temperature solid oxide fuel cells // Electrochimica Acta. 2014. V. 133. P. 509–514.
 29. Тугова Е.А. Однослойные фазы Руддлсдена-Поппера в системах Ln_2O_3 – MO – Al_2O_3 // Журн. общ. химии. 2016. Т. 86. № 11. С. 1766–1773. [Tugova E.A. Tugova E.A. P/RS intergrowth type phases in the Ln_2O_3 – MO – Al_2O_3 systems // Russ. J. Gen. Chem. 2016. V. 86. № 11. P. 2410–2417].
 30. Drofenik M., Zupan J., Kolar D., Volavšek B. Magnetic and crystallographic investigations of some rare earth ferrite compounds // Zeitschrift für Naturforschung B. 1974. V. 29. № 5–6. P. 318–319.
 31. Drofenik M., Golič L., Kolar D. Crystal growth of some alkaline-earth rare-earth pentaoxometallates // Journal of Crystal Growth. 1979. V. 47. P. 739–742.
 32. Drofenik M., Golič L. Refinement of the $\text{Sr}_2\text{EuFeO}_5$ and $\text{Sr}_2\text{EuAlO}_5$ structures // Acta Crystallogr. 1979. V. B35. № 5. P. 1059–1062.
 33. Lim A.R., Park S.S., Chang J.-H. Structural properties of two inequivalent Cs(1) and Cs(2) sites in perovskite tricaesium pentahalogenocobaltate, Cs_3CoX_5 (X = Cl, Br) // AIP Advances. 2017. V. 7. P. 105018.
 34. Ruddlesden S.N., Popper P. New compounds of the K_2NiF_4 type // Acta Crystallographica. 1957. V. 10. № 7. P. 538–539.
 35. Киселева Н.Н., Столяренко А.В., Рязанов В.В., Сенько О.В., Докукин А.А. Прогнозирование новых соединений состава $\text{A}^{3+}\text{B}^{3+}\text{C}^{2+}\text{O}_4$ // ЖХХ. 2017. Т. 62. № 8. С. 1068–1077. [Kiseleva N.N., Stolyarenko A.V., Ryazanov V.V., Sen'ko O.V., Dokukin A.A. Prediction of new $\text{A}^{3+}\text{B}^{3+}\text{C}^{2+}\text{O}_4$ compounds // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2017. V. 62. № 8. P. 1058–1066].
 36. Barry Th.L., Roy R. New rare-earth-alkaline earth oxide compounds. Predicted compound formation and new families found // J. Inorg. Nucl. Chem. 1967. V. 29. P. 1243–1248.