

Фазовые соотношения в системе SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5}

К.М. Кеңес^{1*}, В.Ф. Попова², Е.А. Тугова³

¹Центр физико-химических методов исследования и анализа, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

Отсутствие систематизации данных о сосуществовании и устойчивости соединений тройной системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} при температурах выше 1100°C определило интерес к ее подробному исследованию. Исследования данной работы ориентировались на изучение устойчивости фаз, формирующихся в псевдобинарном разрезе (1-x)GdFeO₃ – xSrO в интервале температур 1200-1400°C на воздухе. Методом отжига и закалки с последующим проведением физико-химического анализа изучено взаимодействие компонентов в системе SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5}. Фазовый состав и последовательность фазовых превращений были охарактеризованы методом порошковой рентгеновской дифракции.

Систематизированы результаты исследования фазовых соотношений в субсолидусной области системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} на воздухе. В системе SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} установлено образование трех сложных перовскитоподобных оксидов GdSr₂FeO₅, GdSrFeO₄, Gd₂SrFe₂O₇, расположенных на бинарном разрезе GdFeO₃ – SrO. Дополнены сведения о межплоскостных расстояниях и интенсивностях рефлексов соединения GdSr₂FeO₅ и показано существование разрыва сместимости твердых растворов Gd_{1-x}Sr_xFeO_{3-α} существующего в интервале 0,05≤x≤0,51 при 1400°C. Расширены сведения о термической устойчивости сложных ферритов гадолиния на основе системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5}.

Ключевые слова: система SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5}; фазовые соотношения; ферриты редкоземельных элементов; перовскитоподобные оксиды; твердофазный синтез.

SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} жүйесінің субсолидус аймағындағы фазалардың қатынасы

К.М. Кеңес^{1*}, В.Ф. Попова², Е.А. Тугова³

¹Физико-химиялық зерттеу және талдау әдістері орталығы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²РФА И.В.Гребенщиков атындағы силикаттар химиясы институты, Санкт-Петербург қ., Ресей

³А.Ф. Иоффе атындағы ФТИ, Санкт-Петербург қ., Ресей

*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} үштік жүйесінің SrO байытылған аймағындағы 1100°C – тан жоғары температурада пайда болатын қосылыстардың пайда болуы мен тұрақтылығы туралы деректердің жүйелі болмауы, аталған жүйені толықтай зерттеуге деген қызығушылықты тудырады. Жұмыс ауадағы 1200-1400°C температура аралығында (1-x)GdFeO₃ – xSrO псевдобинарлық қимасында түзілетін фазалардың тұрақтылығын зерттеуге бағытталған. Фазалық құрам мен фазалық түрленулер тізбегі ұнтақты рентгендік дифракция әдісімен сипатталды.

SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} жүйесінің субсолидус аймағындағы фазалардың ауадағы қатынасы анықталды. SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} жүйесінде GdFeO₃ – SrO бинарлы қимасында орналасқан үш күрделі перовскит тәрізді оксидтерінің GdSr₂FeO₅, GdSrFeO₄, Gd₂SrFe₂O₇ түзілуі анықталды. GdSr₂FeO₅ қосылысының рефлекстерінің интенсивтілігі мен жазықтықаралық арақашықтары туралы мәліметтер толықтырылды және 1400°C температурада 0.05≤x≤0.51 интервалында Gd_{1-x}Sr_xFeO_{3-α} қатты ерітінділерінің қоспаның үзілуі көрсетілген. SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} жүйесіне негізделген күрделі гадолиний ферриттерінің термиялық тұрақтылығы туралы мәліметтер кеңейтілді.

Түйін сөздер: SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} жүйесі; фазалық қатынас; сирекжер элементтердің ферриттері; перовскит тәрізді оксидтер; қатты фазалы синтез.

Phase relations in the SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} system

К.М. Kenges^{1*}, V.F. Popova², E.A. Tugova³

¹Center of Physical-Chemical Methods of Research and Analysis, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²I.V. Grebenschikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

³Ioffe Institute, St Petersburg, Russia

*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

The lack of data systematization on the coexistence and stability of compounds formed in the SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} system at temperatures above 1100°C determines the interest in a more detailed study of this system. The research was focused on studying the stability of phases formed in the pseudobinary section (1-x)GdFeO₃ – xSrO in the temperature range 1200- 1400°C in air. The interaction of components in the SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} system was studied by the method of annealing and quenching followed by physicochemical analysis. The phase composition and sequence of phase transformations were characterized by powder X-ray diffraction.

Phase relations results in the SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} system in air were systematized. The formation of three complex perovskite-like oxides GdSr₂FeO₅, GdSrFeO₄, Gd₂SrFe₂O₇, located on the GdFeO₃ – SrO binary section was established. Information on interplanar distances and reflection intensities of the GdSr₂FeO₅ compound has been supplemented and the existence of a miscibility gap for Gd_{1-x}Sr_xFeO_{3-α} solid solutions existing in the range 0.05≤x≤0.51 at 1400°C has been shown. Data on thermal stability of complex gadolinium ferrites based on GdO_{1.5} – SrO – FeO_{1.5} system has been expanded.

Keywords: SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} system, phase relations, rare-earth ferrites; perovskite-like oxides; solid state synthesis.



Фазовые соотношения в системе $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$

К.М. Кенес^{1*} , В.Ф. Попова² , Е.А. Тугова³ 

¹Центр физико-химических методов исследования и анализа, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, ул. Толе би, 96А, 050012, г. Алматы, Казахстан

²Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, наб. адм. Макарова, 2, 199034, г. Санкт-Петербург, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ул. Политехническая, 26, 194021, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

1. Введение

Фазовые соотношения в трехкомпонентных системах $\text{SrO} - \text{LnO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$ (Ln = редкоземельный элемент (РЗЭ)) в литературе практически не описаны. В основном охарактеризованы субсолидусные фазовые отношения в двух системах $\text{SrO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{La}_2\text{O}_3$ и $\text{SrO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Gd}_2\text{O}_3$ [1-5]. В тройной системе $\text{SrO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Gd}_2\text{O}_3$ обнаружены восемь двойных и ни одного тройного соединения [6]. Хотя данные других авторов [7-16] показывают наличие по крайней мере двух тройных соединений GdSrFeO_4 и $\text{Gd}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$ в указанной системе. В системе $\text{SrO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{La}_2\text{O}_3$ построены изотермические разрезы при 1100 и 1300°C на воздухе [1]. Система $\text{Eu}_2\text{O}_3 - \text{SrO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ представлена тремя тройными соединениями: EuSrFeO_4 , $\text{Eu}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$, $\text{Sr}_2\text{EuFeO}_5$ [17].

Отсутствие систематизации данных о сосуществовании и устойчивости соединений, формирующихся, особенно, в области, обогащенной SrO, тройной системы $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$ при температурах выше 1100°C, определило интерес к более подробному исследованию данной системы. Настоящая работа нацелена на изучение возможных фазовых соотношений в субсолидусной области системы $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$ в интервале температур 1200-1400°C на воздухе. Исследования данной работы ориентировались на изучение устойчивости фаз, формирующихся в псевдобинарном разрезе $(1-x) \text{GdFeO}_3 - x \text{SrO}$. Полученные в настоящем исследовании данные расширят сведения о материалах РЗЭ и станут справочным материалом по термической устойчивости и температурным интервалам существования перовскитоподобных оксидов. Эти сведения необходимы как при

оптимизации режимов синтеза исследуемых фаз, так и прогнозировании путей получения новых или малоизученных соединений. Кроме того, исследование поведения и взаимодействия компонентов на основе системы $\text{GdO}_{1.5} - \text{SrO} - \text{FeO}_{1.5}$ в широком интервале температур представляет практический интерес, поскольку компоненты системы входят, в том числе, и в состав жертвенных материалов [18].

2. Эксперимент

Получение целевых составов и фаз, расположенных на бинарном разрезе $\text{GdFeO}_3 - \text{SrO}$ системы $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$, осуществлялось методом твердофазных химических реакций. В качестве исходных реагентов были использованы следующие вещества:

- Gd_2O_3 , (марка ССТ с содержанием основного компонента 99,99%, кубической модификаций)
- SrCO_3 (марка ОСЧ 7-2, ТУ 6-09-01-659-91)
- $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (марка ЧДА, структурный тип корунда).

Подготовительный этап синтеза, заключающийся в предварительном прокаливании исходных реагентов, был выполнен в течение 2 ч при 1000°C для оксида Gd_2O_3 и при 300°C для оксидов SrCO_3 , Fe_2O_3 . Поправка на декарбонизацию SrCO_3 была рассчитана по термогравиметрическим данным и составила 0,0067 [19]. Смеси реагентов, отвечающие стехиометрии синтезируемых соединений и твердых растворов (таблица 1) после гомогенизации с небольшим количеством воды, высушивались. Полученные смеси, размер частиц которых составлял 63 мкм, прессовались в виде цилиндров диаметром 15 мм и

толщиной 3-4 мм под давлением 500 МПа и обжигались. Термообработку смесей, отвечающих рассматриваемым составам (рисунок 1), проводили на воздухе в печах с платиновыми и платинородиевыми нагревателями в режиме “изотермический отжиг – закалка” при температурах 1200°C, 1300°C, 1400°C и изотермических выдержках 5 и 30 ч. Охлаждение образцов проводилось в режиме быстрого изъятия проб из печи на воздухе [19].

На рисунке 1 представлен концентрационный треугольник системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} с выделенным псевдобинарным разрезом, по которому проводились исследования.

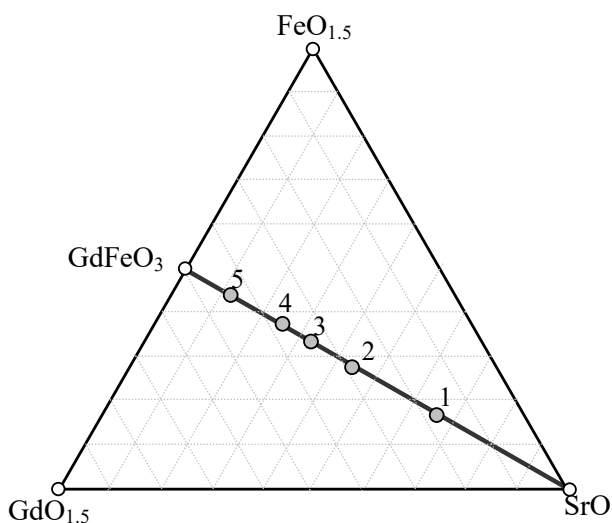


Рисунок 1 – Концентрационный треугольник системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} с выделенным псевдобинарным разрезом, по которому проводились исследования

Фазовый состав и последовательность фазовых превращений образцов системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} были охарактеризованы методом порошковой рентгеновской дифракции. Съёмку проводили в автоматическом режиме (в интервале углов 2θ, равном 20-80°, с шагом 0,02 градуса, экспозиция 1 – 10 с) при напряжении – 35 кВ, токе – 30 мА на дифрактометрах ДРОН-3 и Shimadzu XRD-7000 (CuK_α-излучение). Результаты съёмки сохранялись в символьном файле *.smp (формат PDWin). Выделение дифракционных пиков проводилось исходя из дублетной модели пика программой DRWin из программного комплекса PDWin 4.0. Считали, что равновесие достигнуто, когда рентгеновские дифрактограммы последовательно нагретых образцов 1-5 разреза GdFeO₃ – SrO не показывали никаких дальнейших изменений.

Количественный рентгенофазовый анализ проводили сравнением образца с эталонами по интенсивностям методом съёмки без эталона, основанном на том, что интенсивность линий на рентгенограммах фаз пропорциональна объёмному содержанию фазы, и измеряя абсолютную интенсивность линий каждой фазы на рентгенограмме или отношение интенсивностей линий различных фаз, можно определить концентрацию каждой фазы [20].

3. Результаты и обсуждение

Анализ результатов, полученных из данных рентгеновской дифракции (рисунок 2), обобщенных в таблице 1, позволяет заключить, что состав образцов разреза GdFeO₃ – SrO системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5} после термообработки, в целом, соответствовал заданному номинальному составу шихты; некоторые отклонения обусловлены, вероятно, фазовой неоднородностью материалов.

Таблица 1 – Результаты анализа состава образцов системы SrO – GdO_{1.5} – FeO_{1.5}

Номер образца, представленного на рис. 1	Исходный состав, мол. %		Состав образцов системы SrO – GdO _{1.5} – FeO _{1.5} после термической обработки при 1400°C		
	GdFeO ₃	SrO	Количественное содержание фаз	Состав при пересчете на оксиды системы GdFeO ₃ – SrO, мол. %	
	GdFeO ₃	SrO		GdFeO ₃	SrO
1	33	67	84 мол.% GdSr ₂ FeO ₅ 16 мол.% SrO	47	53
2	57	43	34 мол.% GdSr ₂ FeO ₅ 66 мол.% GdSrFeO ₄	60	40
3	67	33	88 мол.% GdSrFeO ₄ 12 мол.% Gd ₂ SrFe ₂ O ₇	69	31
4	75	25	79 мол.% Gd ₂ SrFe ₂ O ₇ 21 мол.% GdSrFeO ₄	76	24
5	89	11	26 мол.% Gd ₂ SrFe ₂ O ₇ 74 мол.% GdFeO ₃	91	9

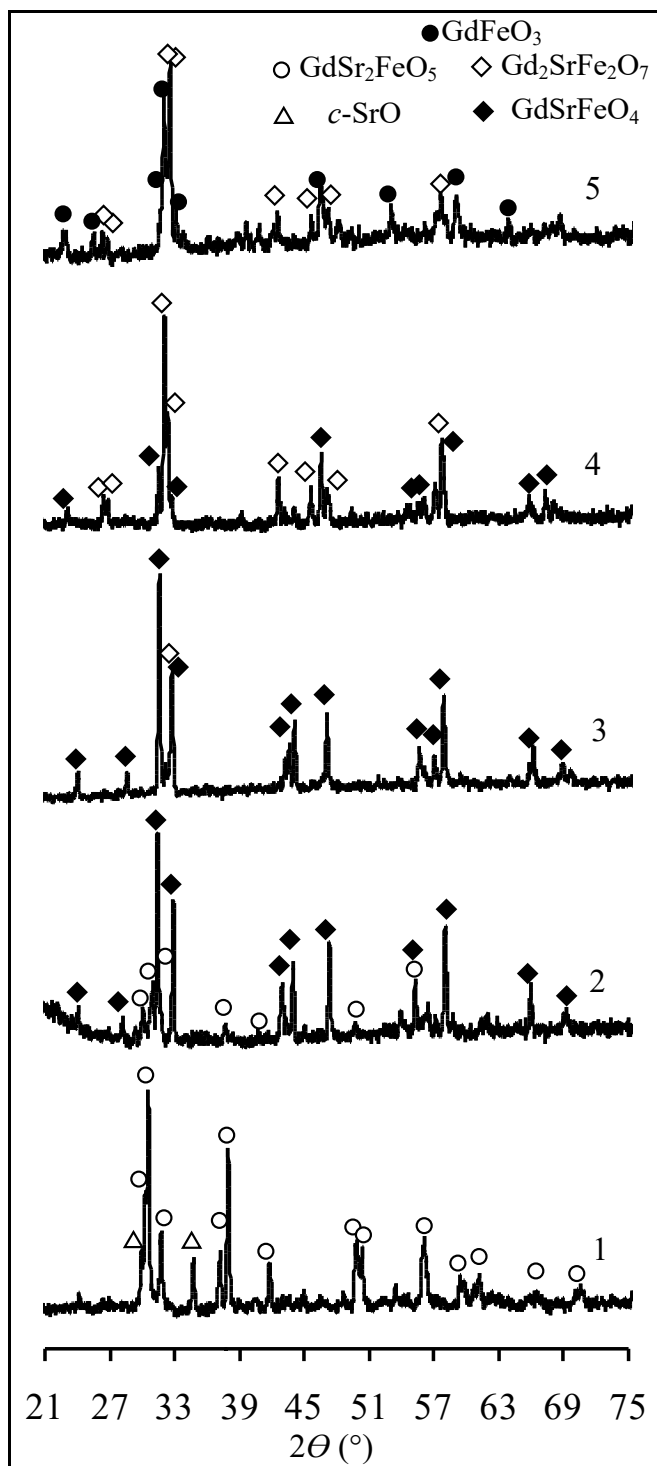


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы образцов 1-5 псевдобинарного разреза $\text{GdFeO}_3 - \text{SrO}$ после термической обработки при 1400°C в течение 30 ч на воздухе

В результате изучения фазового состава разреза $\text{GdFeO}_3 - \text{SrO}$ в сопоставлении с литературными данными [9-16,22] показано образование сложных оксидов 1:1 (GdSrFeO_4), 2:1 ($\text{Gd}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$), 1:2 ($\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$). Формирование феррита $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$, условия и механизм образования которого ранее не были описаны в литературе при изучении фазовых соотношений в системе $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$, подтверждено сопоставлением теоретической рентгеновской дифрактограммы с экспериментальными данными настоящей работы (рисунок 3). Рентгеновская дифрактограмма $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ (рисунок 2, дифрактограмма 1, таблица 1) была проиндексирована по интенсивным рефлексам в рамках тетрагональной ячейки. Уточнены параметры элементарной ячейки оксида $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$, составившие: $a = 6,838 \text{ \AA}$ и $c = 11,275 \text{ \AA}$ (пространственная группа: $I4/mcm$, $d_x = 5,90 \text{ мг/м}^3$). Значения межплоскостных расстояний и интенсивности рефлексов приведены в таблице 2.

Согласно данным теоретического расчета в сопоставлении с экспериментальными результатами рентгенофазового анализа образца (образец 1 рисунки 2 и 3) следует отметить полное соответствие рефлексов, относимых к набору характеристических линий для фазы $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$.

Результаты исследования фазовых соотношений в системе $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$, полученные в настоящей работе, и по данным работ [3,8,11-16,22,23], обобщены на рисунке 4 в виде изобарно-изотермического сечения

Таблица 2 – Межплоскостные расстояния (d) и интенсивности рефлексов (I/I_0) соединения $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$

d экспер., \AA	d расчет, \AA	h k l	I/I_0 , %
3,6819	3,665	1 1 2	7
2,9509	2,9514	2 1 1	49
2,9241	2,9234	2 0 2	100
2,8186	2,8187	0 0 4	34
2,4141	2,4176	2 2 0	24
2,3695	2,3720	2 1 3	81
2,1609	2,1623	3 1 0	24
2,0161	2,0169	3 1 2	7
1,8308	1,8325	2 2 4	26
1,8113	1,8120	2 1 5	25
1,7102	1,7080	4 0 0	8
1,6429	1,6408	2 0 6	26
1,6371	1,6359	4 0 2	25
1,5541	1,5544	4 0 3	17
1,5465	1,5482	3 3 2	13
1,5252	1,5251	1 1 7	8
1,5144	1,5151	4 2 1	17
1,3338	1,3349	3 2 6	11

фазовой диаграммы $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$ на воздухе при 1400°C .

Феррит стронция $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ находится в равновесии с оксидами GdSrFeO_4 , SrO , $\text{Sr}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$, SrGd_2O_4 . $\text{Gd}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$ сопряжен с $\text{GdO}_{1.5}$, $\text{Gd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\alpha}$, GdSrFeO_4 и GdFeO_3 , а GdSrFeO_4 соединен коннодами с $\text{GdO}_{1.5}$, $\text{SrFeO}_{3-\delta}$, $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ и $\text{Gd}_2\text{SrFe}_2\text{O}_7$. В результате триангуляции системы $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$ установлено существование 17 элементарных треугольников (рисунок 4).

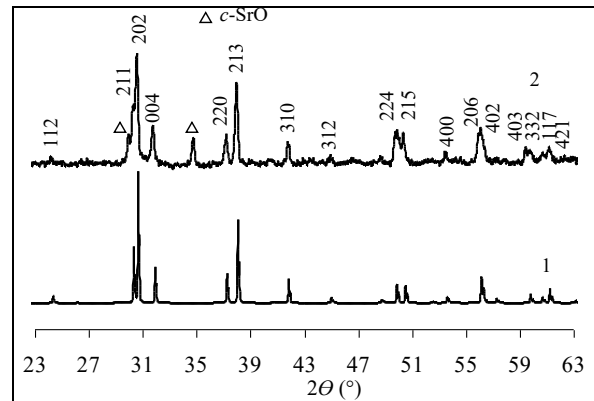
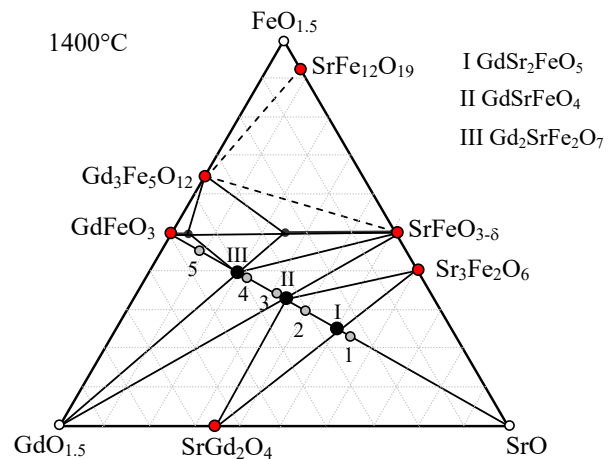


Рисунок 3 – Сопоставление данных рентгеновской дифракции: теоретической рентгеновской дифрактограммы $\text{GdSr}_2\text{FeO}_5$ (1) и экспериментальных данных образца 1 (2)



Примечание: Исследованные в работе образцы 1-5 показаны на схеме светло-серыми кружками. Состав приведен по данным таблицы 1 (последний столбец).

— соответствуют сериям непрерывных твердых растворов по данным [23],
 ---- соответствуют данным [3,17].

Рисунок 4 – Схема, иллюстрирующая фазовые соотношения в системе $\text{SrO} - \text{GdO}_{1.5} - \text{FeO}_{1.5}$ на воздухе при 1400°C

4. Заключение

Систематизированы и обобщены результаты исследования фазовых соотношений в системе $GdO_{1.5} - SrO - FeO_{1.5}$ на воздухе при 1000-1400°C.

Показано образование трех сложных перовскитоподобных оксидов $GdSr_2FeO_5$, $GdSrFeO_4$, $Gd_2SrFe_2O_7$. Рассматриваемые соединения лежат на бинарном сечении $GdFeO_3 - SrO$ системы $SrO - GdO_{1.5} - FeO_{1.5}$, из которых последние два оксида образуют гомологический ряд $(GdFeO_3)_n SrO$ или $Gd_n SrFe_n O_{3n+1}$, где $n = 1, 2$. Показано существование разрыва смесимости твёрдых растворов $Gd_{1-x} Sr_x FeO_{3-a}$ существующего в интервале

$0,05 \leq x \leq 0,51$ при 1400°C [23]. Показано образование ряда $Gd_{2-x} Sr_{1+x} Fe_2 O_7$ ($0 \leq x \leq 0,5$) [8]. Дополнены сведения о межплоскостных расстояниях и интенсивностях рефлексов соединения $GdSr_2FeO_5$. Определены параметры элементарной ячейки $GdSr_2FeO_5$, составившие: $a = 6,838 \text{ \AA}$ и $c = 11,275 \text{ \AA}$.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта проекта: “Физико-химическое конструирование новых сложных редкоземельных оксидов для получения функциональных материалов” (ИРН АР09058268).

Литература

- 1 Fossdal A., Einarsrud M. A., Grande T. Phase relations in the pseudo-ternary system $La_2O_3 - SrO - Fe_2O_3$ // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2005. – Vol.88, Is.7. – P.1988-1991.
- 2 Aksenova T.V., Vakhromeeva A.E., Elkalashy Sh.I., Urusova A.S., Cherepanov V.A. Phase equilibria, crystal structure, oxygen nonstoichiometry and thermal expansion of complex oxides in the $Nd_2O_3 - SrO - Fe_2O_3$ system // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2017. – Vol.251. – P.70-78.
- 3 Khvostova L.V., Volkova N.E., Gavrilova L.Ya., Maignan A., Cherepanov V.A. $Gd_2O_3 - SrO - Fe_2O_3$ system: The phase diagram and oxygen content in oxides // *Materials Today Communications*. – 2021. – Vol.29. – P.102885.
- 4 Tugova E.A., Popova V.F., Gusarov V.V., Zvereva I.A. Phase diagram of the $LaFeO_3 - LaSrFeO_4$ system // *Glass Physics and Chemistry*. – 2006. – Vol.32. – P.674-676.
- 5 Urusova A. S., Rudik, V. V., Mychinko, M. Y., Cherepanov, V. A. Phase equilibria, structure, oxygen nonstoichiometry, and thermal expansion of oxides in the $1/2Y_2O_3 - SrO - 1/2Fe_2O_3$ system // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2019. – Vol.102, Is.1. – P.465-475.
- 6 Yang L.T., Liang J.K., Song G.B., Chang H., Rao G.H. Compounds and phase relations in the $SrO - Fe_2O_3 - CuO$, $SrO - Fe_2O_3 - Gd_2O_3$ and $Gd_2O_3 - Fe_2O_3 - CuO$ ternary systems // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2003. – Vol.353, Is.1-2. – P.301-306.
- 7 Christopher J., Swamy C.S. Studies on the catalytic decomposition of N_2O on $LnSrFeO_4$ ($Ln = La, Pr, Nd, Sm$ and Gd) // *Journal of Molecular Catalysis*. – 1991. – Vol.68, Is.2. – P.199-213.
- 8 Sheshko T.F., Kryuchkova T.A., Serov Yu.M., Chislova I.V., Zvereva I.A. New mixed perovskite-type $Gd_{2-x} Sr_{1+x} Fe_2 O_7$ catalysts for dry reforming of methane, and production of light olefins // *Catalysis in Industry*. – 2017. – Vol.9, Is.2. – P.162-169.
- 9 Singh S., Singh D. Effect of increasing Sr content on structural and physical properties of K_2NiF_4 -type phase $GdSrFeO_4$ // *Ceramics International*. – 2017. – Vol.43. – P.3369-3376.
- 10 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. – Vol.37. – P.653-660.
- 11 Otrepina I.V., Volodin V.S., Zvereva I.A., Liu J.S. Investigation of the formation of the $GdSrFeO_4$ oxide // *Glass Physics and Chemistry*. – 2009. – Vol.35. – P.423-430.
- 12 Tugova E.A., Gusarov V.V. Peculiarities of layered perovskite-related $GdSrFeO_4$ compound solid state synthesis // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2011. – Vol.509, Is.5. – P.1523-1528.
- 13 Tugova E.A. Mechanisms of the solid-state synthesis of $Ln_2SrFe_2O_7$ ($Ln = La, Nd, Gd, Dy$) layered perovskite-related phases // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2019. – Vol.89. – P.2295-2300.
- 14 Тугова Е.А., Бобрышева Н.П., Селютин А.А., Гусаров В.В. Магнитные свойства сложных оксидов $Gd_2SrM_2O_7$ ($M = Fe, Al$) // *Журнал общей химии*. – 2008. – Т.78, №11. – С.1764-1765.
- 15 Зверева И.А., Отрепина И.В., Семенов В.Г., Тугова Е.А., Попова В.Ф., Гусаров В.В. Механизм формирования сложного оксида $Gd_2SrFe_2O_7$ // *Журнал общей химии*. – 2007. – Т.77, №6. – С.881-886.
- 16 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 $La_2SrFe_2O_7$ // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1998. – Vol.269. – P.13-16.
- 17 Drogenik M., Kolar D., Golič L. Phase relations in the system $SrO - Eu_2O_3 - Fe_2O_3$ and a new ternary phase Sr_2EuFeO_5 // *Journal of the Less Common Metals*. – 1974. – Vol.37, Is.2. – P.281-284.
- 18 Комлев А.А., Альмяшев В.И., Бешта С.В., Хабенский В.Б., Грановский В.С., Гусаров В.В. Жертвенный материал для ловушки расплава на основе высокоглиноземистого цемента и керамического наполнителя // *Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ*. – 2019. – №2(16) – С.52-70.
- 19 Торопов Н.А, Бондарь И.А., Лазарев А.Н., Смолин Ю.И. Силикаты редкоземельных элементов и их аналоги. – Изд-во Наука, Ленингр.отд. Л., 1971. – С.14.
- 20 Санкт-Петербургский государственный университет, Методики РЦ Рентгенодифракционные методы исследования: Фазовый анализ. Интернет-страница: <https://researchpark.spbu.ru/xrd-metods-rus/65-xrd-fazovyj-analiz-rus>

- 21 Tugova E.A. A comparative analysis of the formation processes of Ruddlesden-Popper phases in the $\text{La}_2\text{O}_3\text{-SrO-M}_2\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Al, Fe}$) systems // *Glass Physics and Chemistry*. – 2009. – Vol.35. – P.416-422.
- 22 Тугова Е.А. Фазообразование в системе $\text{GdFeO}_3\text{-SrO}$ при 1200–1400°C // *Физ. хим. стекла*. – 2022. – Т.48(6). – С. 763-772.
- 23 Tugova E.A., Krasilin A.A., Panchuk V.V., Semenov V.G., Gusarov V.V. Subsolidus phase equilibria in the $\text{GdFeO}_3\text{-SrFeO}_{3-6}$ system in air // *Ceramics International*. – 2020. – Vol.46, Is.15. – P.24526-24533.
- References**
- 1 Fossdal A, Einarsrud MA, Grande T (2005) *J Am Ceram Soc* 88(7):1988-1991. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00356.x>
- 2 Aksenova TV, Vakhromeeva AE, Elkalashy SI, Urusova AS, Cherepanov VA (2017) *J Solid State Chem* 251:70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.04.015>
- 3 Khvostova LV, Volkova NE, Gavrilova LY, Maignan A, Cherepanov VA (2021) *Mater Today Communications* 29:102885. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102885>
- 4 Tugova EA, Popova VF, Zvereva IA, Gusarov VV (2006) *Glass Phys Chem+* 32:674-676. <https://doi.org/10.1134/S1087659606060137>
- 5 Urusova AS, Rudik VV, Mychinko MY, Cherepanov VA (2019) *J Am Ceram Soc* 102(1), 465-475. <https://doi.org/10.1111/jace.15906>
- 6 Yang LT, Liang JK, Song GB, Chang H, Rao GH (2003) *J Alloy Compd* 353(1-2):301-306. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)01301-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)01301-4)
- 7 Christopher J, Swamy CS (1991) *J Mol Catal* 68(2):199-213. [https://doi.org/10.1016/0304-5102\(91\)80075-E](https://doi.org/10.1016/0304-5102(91)80075-E)
- 8 Sheshko TF, Kryuchkova TA, Serov YM, Chislova IV, Zvereva IA (2017) *Catalysis in Industry* 9:162-169. <https://doi.org/10.1134/S207005041702009X>
- 9 Singh S, Singh D (2017) *Ceram Int* 43(3):3369-3376. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.11.182>
- 10 Chislova IV, Matveeva AA, Volkova AV, Zvereva IA (2011) *Glass Phys Chem+* 37:653-660. <https://doi.org/10.1134/S1087659611060071>
- 11 Otrepina IV, Volodin VS, Zvereva IA, Liu JS (2009) *Glass Phys Chem+* 35: 423-430. <https://doi.org/10.1134/S1087659609040129>
- 12 Tugova EA, Gusarov VV (2011) *J Alloy Compd* 509(5):1523-1528. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.149>
- 13 Tugova EA (2019) *Russian Journal of General Chemistry* 89:2295-2300. <https://doi.org/10.1134/S1070363219110215>
- 14 Tugova EA, Bobrysheva NP, Selyutin AA, Gusarov VV (2008) *Russ J Gen Chem* 78:2000-2001. <https://doi.org/10.1134/S1070363208110029>
- 15 Zvereva IA, Otrepina IV, Semenov VG, Tugova EA, Popova VF, Gusarov VV (2007) *Russ J Gen Chem* 77:973-978. <https://doi.org/10.1134/S1070363207060011>
- 16 Sharma IB, Singh D, Magotra SK (1998) *J Alloy Compd* 269(1-2):13-16. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00153-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00153-4)
- 17 Drogenik M, Kolar D, Golič L (1974) *J Less-Common Met* 37(2):281-284. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(74\)90043-5](https://doi.org/10.1016/0022-5088(74)90043-5)
- 18 Komlev AA, Almyashev VI, Beshta SV, Khabensky VB, Granovsky VS, Gusarov VV (2019) Technologies for supporting the life cycle of nuclear power plants [Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla YAEU] 2:52-70. (In Russian)
- 19 Toropov NA, Bondar IA, Lazarev AN, Smolin Yul (1971) Rare earth silicates and their analogues [Rare earth silicates and their analogue]. Nauka, Leningrad, USSR. 1-230 pp. (In Russian)
- 20 St. Petersburg State University, Methods of RC X-ray diffraction research methods: Phase analysis. Web-page: <https://researchpark.spbu.ru/xrd-metods-rus/65-xrd-fazovyj-analiz-rus>. (In Russian)
- 21 Tugova EA (2009) *Glass Phys Chem+* 35:416-422. <https://doi.org/10.1134/S1087659609040117>
- 22 Tugova EA (2022) *Glass Phys Chem+* 48(6):614-621. <https://doi.org/10.1134/S1087659622600454>
- 23 Tugova EA, Krasilin AA, Panchuk VV, Semenov VG, Gusarov VV (2020) *Ceram Int* 46(15):24526-24533. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.239>