

О. В. Чудінович<sup>1</sup>, Н. В. Жданюк<sup>2</sup>

## ВЗАЄМОДІЯ ОКСИДІВ ЛАНТАНУ ТА ЛЮТЕЦІЮ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ 1500-1600 °С

<sup>1</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, вул. Кржижановського, 3, Київ, 03142, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", пр-т Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

\* e-mail: chudinovich\_olia@ukr.net

Матеріали, на основі оксидів рідкісноземельних елементів мають широкий спектр застосування, проте фазова взаємодія у системах на їх основі раніше систематично не вивчена. Фазові рівноваги та структурні перетворення у системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  при 1500–1600 °С вивчали методами рентгенофазового аналізу та електронної мікроскопії у всьому інтервалі концентрацій. Зразки різних складів готували з розчинів нітратів за допомогою звичайних керамічних методик: випаровування, сушіння та прожарювання. У системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  утворюються поля твердих розчинів на основі гексагональної (А) модифікації  $\text{La}_2\text{O}_3$ , кубічної (С) модифікації  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  та упорядкована фаза зі структурою типу перовскиту  $\text{LaLuO}_3$  (R) з ромбічними спотвореннями. Визначено параметри елементарної комірки та межі фазових полів твердих розчинів. Систематичне дослідження всього спектру зразків утворення нових фаз не виявило. Гранична розчинність  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  в гексагональній А- $\text{La}_2\text{O}_3$  модифікації досягає ~ 9 мол. % при 1500 і 1600 °С. Гранична розчинність  $\text{La}_2\text{O}_3$  в кубічній С- $\text{Lu}_2\text{O}_3$  модифікації досягає ~ 4 мол. % при 1500 і 7 мол. % при 1600 °С.

**К л ю ч о в і с л о в а:** фазові рівноваги, оксид лантану, оксид лютецію, тверді розчини, параметри елементарної решітки.

*ВСТУП.* Розробка порошкових нанотехнологій створення прозорої функціональної кераміки є одним з перспективних напрямків сучасного матеріалознавства. Інтерес до оптичних керамік як лазерних, сцинтиляційних середовищ обумовлений високою оптичною прозорістю у широкому діапазоні довжин хвиль, радіа-

ційною стійкістю, високою теплопровідністю, добрими термомеханічними властивостями, хімічною стійкістю та термічною стабільністю. Кераміка має високу технологічність виготовлення, широкі можливості варіювання хімічного складу і можуть бути отримані у вигляді композитних елементів з різною структурою.

© О. В. Чудінович, Н. В. Жданюк, 2020

Дослідження діаграм стану на основі оксидів рідкісноземельних елементів є основою для отримання перспективних керамічних матеріалів функціонального призначення [1–6]. Матеріали на основі системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{—Lu}_2\text{O}_3$  можуть бути використанні для створення високотемпературної кераміки на основі  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [7], в оптичній промисловості [8], для діелектричних плівок [9], тощо. Фазові рівноваги у системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{—Lu}_2\text{O}_3$  досліджено за допомогою рентгенівського та термічного аналізів при високих температурах [10]. Кристалізацією розплаву від температури вище 2000 °С отримані монокристали перовскиту  $\text{LaLuO}_3$ . Параметри ромбічної комірки:  $a = 6.00$ ,  $b = 5.79$ ,  $c = 8.35$  нм, просторова група  $R\bar{3}m$  [10]. У роботі [11] наведено розрахунок кисневих вакансій в  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{LaLu}_2\text{O}_3$ , даних про фазові не наведено. Область твердих розчинів на основі поліморфних модифікацій оксидів  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  експериментально не визначено, але розраховано за допомогою програми Thermo-Calc [11]. Ці дані дещо суперечать раніше опублікованим результатам, тому для побудови діаграм стану потрійних систем, які засновані на відповідних знаннях про подвійні системи, необхідно дослідити взаємодію оксидів лантану та лютецію і встановити межі фазових полів при температурах 1500–1600 °С.

Метою даної роботи є дослідження взаємодії оксидів лантану та лютецію, побудова діаграми стану системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{—Lu}_2\text{O}_3$  при температурі 1500–1600 °С на основі даних рентгенофазового аналізу та мікроскопії.

**ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.** Для дослідження фазових

рівноваг у системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{—Lu}_2\text{O}_3$  при 1500 °С термообробку зразків проводили у дві стадії: у печі з нагрівачами H23U5T (фехраль) і в печі з нагрівачами із дисиліциду молібдену ( $\text{MoSi}_2$ ) при 1500 °С протягом 70 год. При 1600 °С термообробку зразків проводили у три стадії: у печі з нагрівачами H23U5T (фехраль) і у печі з нагрівачами із дисиліциду молібдену ( $\text{MoSi}_2$ ) при 1500 °С і 1600 °С (10 год). Відпал був безперервним. Повноту синтезу перевіряли через визначені проміжки часу. Охолодження проводили разом із піччю.

Фазовий аналіз зразків проведено на основі даних рентгенівських та мікроструктурних досліджень.

Рентгенофазовий аналіз зразків виконано за методом порошку на установці ДРОН–3М при кімнатній температурі (випромінювання  $\text{CuK}\alpha$ ). Напруга на рентгенівській трубці складала 30 кВ, сила струму — 20 мА, крок сканування — 0,05–0,1 град, експозиція 4 с у діапазоні кутів  $2\theta = 15\text{–}90$  град. Параметри елементарних комірок розраховано за методом найменших квадратів з використанням програми LATTEC з похибкою не нижче 0,0002 нм для кубічної фази. Для ідентифікації фаз використовували базу даних Міжнародного комітету порошкових стандартів (JSPDS Міжнародний центр дифракційних даних, 1999).

Мікроструктури вивчали за допомогою растрової електронної мікроскопії (SEM) у зворотню (BSE) і вторинно (SE) відбитих електронах на приладах SUPERPROBE-733 (JEOL-Japan).

Вихідний хімічний і фазовий склад зразків, відпалених при 1500 і 1600 °С,

Таблиця  
Вихідний хімічний і фазовий склади, параметри елементарних комірок фаз після випалу зразків системи  
La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 1500 і 1600 °С

Хімічний склад, мол. La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Фазовий склад	1500 °С						Фазовий склад	1600 °С					
			Параметри елементарних комірок фаз, нм							Параметри елементарних комірок фаз, нм					
			<A>		<C>	R				<A>		<C>	R		
a	c	A	a	b	c	a	c	a	a	b	c				
0	100	<C>			1,0390				<C>			1,0390			
3	97	<C>			1,0395				<C>			1,0398			
5	95	<C>+R			1,0391				<C>			1,0398			
10	90	<C>+R			1,0396	0,6011	0,8350	0,5875	<C>+R			1,0404			
35	65	<C>+R			1,0394	0,6005	0,8350	0,5888	<C>+R			1,0397	0,5996	0,8399	0,5803
40	60	<C>+R							<C>+R			1,0402	0,5993	0,8905	0,5811
42	58	<C>+R			1,0386	0,5998	0,8355	0,5821	<C>+R			1,0416	0,6030	0,8250	0,5809
44	56	<C>+R			1,0396	0,6012	0,8370	0,5813	<C>+R			1,0410	0,5999	0,8501	0,5808
46	54	<C>+R				0,5987	0,8381	0,5802	R				0,5996	0,8374	0,5809
48	52	R				0,6019	0,8400	0,5824	R				0,6000	0,8149	0,5804
50	50	R				0,6015	0,8399	0,5810	R				0,6003	0,8299	0,5812
55	45	R+<A>				0,6014	0,8426	0,5821	R+<A>				0,6022	0,8308	0,5817
90	10	R+<A>	0,6516	0,3841		0,5987	0,8431	0,5818	R+<A>	0,6499	0,3830				
95	5	<A>	0,6513	0,3835					<A>	0,6510	0,3826				
100	0	<A>	0,6523	0,3855					<A>	0,6525	0,3842				

параметри елементарної комірки фаз, що знаходяться у рівновазі при цих температурах, наведено в таблиці 1.

Дослідження твердофазної взаємодії La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гексагональна модифікація, A) і Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кубічна модифікація оксидів рідкісноземельних елементів, C, структура типу П<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) при температурах 1500, 1600 °С показало, що в системі La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> утворюються три типи твердих розчинів: на основі гексагональної модифікації A-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кубічної модифікації C-Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і впорядкованої фази LaLuO<sub>3</sub> (R), що кристалізується у структурі типу перовскиту з ромбічними викривленням (рис. 1).

Розчинність La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в C-модифікації Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> становить 4 мол. % при 1500 та 7 мол. % при 1600 °С. Параметри елементарної комірки при 1600 °С збільшується від a = 1,0390 нм для чистого Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до a = 1,0404 нм для граничного складу твердого розчину.

Розчинність Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в гексагональній A-модифікації La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> становить 9 мол. % при 1500, 1600 °С. Згідно з даними РФА, в зразках, що містять від 100 до 55 мол. % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> замість гексагональної фази A-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> утворюється гексагональна модифікація гідроксиду лантану A-La(OH)<sub>3</sub>, оскільки оксид лантану на повітрі гідратує. Параметри елементарної комірки

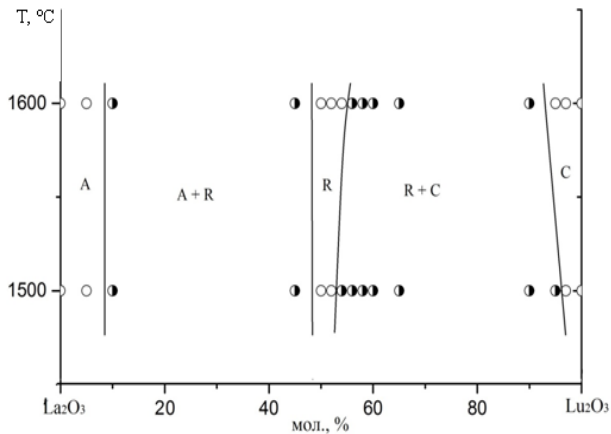


Рис. 1 Діаграма стану  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  в інтервалі температур 1500–1600 °С: ○ – однофазні, ● – двофазні зразки

змінюються від  $a = 0,6523$  нм,  $c = 0,3855$  нм для чистого  $\text{La}(\text{OH})_3$  до  $a = 0,6516$  нм,  $c = 0,3841$  нм для двофазного зразка ( $A + R$ ), що містить 90 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 10 мол. %  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (1500 °С).

Використовуючи дані рентгенофазового аналізу і концентраційні залежності параметрів елементарної комірки встановлено, що впорядкована фаза  $\text{LaLuO}_3$  ( $R$ ) при температурі 1500 °С існує в інтервалі концентрацій 48–53 мол. % при 1500 °С і 48–55 мол. %  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  при 1600 °С. Параметри елементарної комірки  $R$ -фази змінюються від  $a = 0,5996$ ,  $b = 0,8374$ ,  $c = 0,5809$  нм для однофазного зразка, що містить 46 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  до  $a = 0,6022$ ,  $b = 0,8308$ ,  $c = 0,5817$  нм для двофазного зразка ( $R + C$ ), що містить 55 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$ .

Зміну мікроструктури двофазних зразків ( $C + R$ ) в залежності від концентрації оксиду лютецію можна чітко простежити на рис.2. Світла область – фаза  $C\text{--Lu}_2\text{O}_3$ . Темна область – фаза  $\text{LaLuO}_3$  ( $R$ ), що підтверджено РФА. Зі зменшенням вмісту оксиду лютецію кількість фази типу пе-

ровскиту збільшується, змінюється морфологія зразків, з'являються пори характерні для більш крихкої  $C$ -фази. Мікροструктурні дослідження у двофазній області дозволили спостерігати за процесом впорядкування  $R$ -фази, який протікає внаслідок дифузії іонів  $\text{La}^{3+}$  в твердий розчин на основі  $C\text{--Lu}_2\text{O}_3$  та наступне перебудування ґратки. Мікροструктури для інших фазових областей не є інформативними.

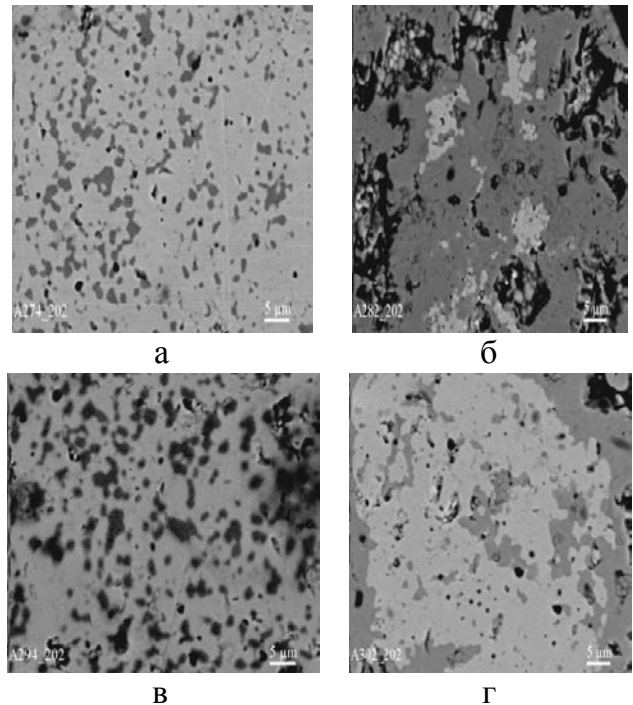


Рис. 2 Мікροструктури зразків системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  випалених при 1500 і 1600 °С: а) 10 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}90$  мол. %  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (1500 °С); б) 44 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}56$  мол. %  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (1500 °С); в) 10 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}90$  мол. %  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (1600 °С); г) 44 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}56$  мол. %  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (1600 °С)

**ВИСНОВКИ.** Таким чином, у результаті вивчення фазових рівноваг в системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  при 1500 і 1600 °С встанов-

лено, що в системі утворюються області твердих розчинів на основі гексагональної (А) і кубічної (С) кристалічних модифікацій вихідних компонентів, а також упорядкованої фази типу перовскиту  $\text{LaLuO}_3$  (R).

#### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКСИДОВ ЛАНТАНА И ЛЮТЕЦИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1500–1600 °С

О. В. Чудинович, Н. В. Жданюк

<sup>1</sup> *Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины ул. Кржижановского, 3, Киев, 03142, Украина*

<sup>2</sup> *Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", пр-т Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна*

\* E-mail: [chudinovych\\_olia@ukr.net](mailto:chudinovych_olia@ukr.net)

Материалы на основе оксидов редкоземельных элементов имеют широкий спектр применения, однако фазовое взаимодействие в системах на их основе ранее систематически не изучено. Фазовые равновесия и структурные преобразования в системе  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  при 1500–1600 °С изучали методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии во всем интервале концентраций. Образцы различных составов готовили из растворов нитратов с помощью обычных керамических методик: испарение, сушки и прокаливания. В системе  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  образуются поля твердых растворов на основе гексагональной (А) модификации  $\text{La}_2\text{O}_3$ , кубической (С) модификации  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  и структура типа перовскита  $\text{LaLuO}_3$  (R) с ромбическими искажениями. Определены параметры элементарной ячейки и границы фазовых полей твердых растворов. Систематическое исследование всего спектра образцов образования

новых фаз не выявило. Предельная растворимость  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  в гексагональной А- $\text{La}_2\text{O}_3$  модификации достигает ~ 9 мол. % при 1500 и 1600 °С. Предельная растворимость  $\text{La}_2\text{O}_3$  в кубической С- $\text{Lu}_2\text{O}_3$  модификации достигает ~ 4 мол. % при 1500 и 7 мол. % при 1600 °С.

К л ю ч е в ы е с л о в а: фазовые равновесия, оксид лантана, оксид лютеция, твердые растворы, параметры элементарной решетки.

#### INTERACTION OF LANTHANE AND LUTETIUM AT TEMPERATURE 1500–1600°C

О. V. Chudinovych<sup>1</sup>, N. V. Zhdanyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of National Academy of Sciences of Ukraine, Krzhizhanovsky str., 3, Kyiv, 03142, Ukraine*

<sup>2</sup> *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Victory Ave., Kyiv, 03056, Ukraine*

\* e-mail: [chudinovych\\_olia@ukr.net](mailto:chudinovych_olia@ukr.net)

Materials based on  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  system are promising candidates for a wide range of applications, but the phase relationship has not been studied systematically previously. To address this challenge, the subsection of the phase diagram for 1500 and 1600 °С have been elucidated. The samples of different compositions have been prepared from nitrate acid solutions by evaporation, drying and heat treatment at 1100, 1500 and 1600 °С. The phase relations in the binary  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  system at 1500 and 1600 °С were studied from the heat treated samples using X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy in the overall concentration range. The X-ray analysis of the samples was performed by powder method using DRON-3 at room temperature ( $\text{CuK}\alpha$  radiation). It was established that in the binary  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Lu}_2\text{O}_3$  system

there exist fields of solid solutions based on hexagonal (A) modification of  $\text{La}_2\text{O}_3$ , cubic (C) modification of  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ , and with perovskite-type structure of  $\text{LaLuO}_3$  (R) with rhombic distortions. The systematic study that covered whole composition range excluded formation of new phases. The systematic study that covered whole composition range excluded formation of new phases. The boundaries of mutual solubility and concentration dependences the lattice parameters for all phases have been determined. The solubility of  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  in the hexagonal A-lanthanum modification is  $\sim 9$  mol. % at 1500 and 1600 °C. The solubility of  $\text{La}_2\text{O}_3$  in the cubic C- $\text{Lu}_2\text{O}_3$  is  $\sim 4$  mol. % at 1500 and 7 mol. % at 1600 °C.

**Key words:** phase equilibria, lanthanum, lutetium, solid solutions, lattice parameters.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Wang S. F., Zhang J., Luo D. W. et al. Transparent ceramics: Processing, materials and applications // Progress in Solid State Chem. – 2013. – 41. – P. 20–54.
2. Liu Zehua, Shuxing Li, Yihua Huang et al. Composite ceramic with high saturation input powder in solid-state laser lighting: Microstructure, properties, and luminous emittances // Ceramics International. – 2018. – 44, Iss. 16 – P. 20232 – 20238.
3. Krystal Ivy, Jones Zachary, Seeley M. Nerine et al. Direct ink write fabrication of transparent ceramic gain media // Optical Materials. – 2018. – 75. – P. 19–25.
4. Liangkai Liu, Qihua Zhu, Qiangqiang Zhu et al. Fabrication of fine-grained undoped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  transparent ceramic using nitrate pyrogenation synthesized nanopowders // Ceramics International. – 2019. – 45, Iss. 5 – P. 5339 – 5345.
5. Zhang Yumin, Jung In-Ho. Critical evaluation of thermodynamic properties of rare earth sesquioxides (RE = La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc and Y) // Yumin Zhang, In-Ho Jung // Calphad. – 2017. – 58. – P. 169 – 203.
6. Navrotsky Alexandra, Wingyee Lee, Mielewczyk-Gryn Aleksandra et al. Thermodynamics of solid phases containing rare earth oxides // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2015. – 88. – P. 126–141.
7. Urakami R., Yukio Sato, Masayoshi Ogushi et al. Phase transformation and interface segregation behavior in  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics sintered with  $\text{La}_2\text{O}_3$ - $\text{Lu}_2\text{O}_3$  mixed additive // Journal of the American Ceramic Society. – 2017. – 100, Iss. 3 – P. 1231-1240.
8. Proessdorf A., Michael Niehle, Frank Grosse et al. Strain dynamics during  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Lu}_2\text{O}_3$  superlattice and alloy formation // Journal of Applied Physics. – 2016. – 119, Iss. 21. – P. 215-301.
9. Tabata T., Kita K., Toriumi A. Amorphous High-k  $\text{LaLuO}_3$  Dielectric Film for Ge MIS Gate Stack. International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba, 2008, 14-A-1-4 pp. 14-15.
10. Торонов С.А. Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов. – Ленинград: изд. Наука, 1987. 822 с.
11. Xiong K., Robertson J. Electronic structure of oxygen vacancies in  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  and  $\text{LaLuO}_3$  // Microelectronic engineering. – 2009. – 86, Iss. 7-9. – P. 1672-1675.
12. Matvei Zinkevich. Thermodynamics of rare earth sesquioxides // Progress in Materials Science. – 2007. – 52. – P. 597–647.

#### REFERENCES

1. Wang S.F., Zhang J., Luo D.W., Gu F., Tang D.Y., Dong Z.L., Tana G.E.B., Que W.X., Zhang T.S., Li S., Kong L.B. Trans-

- parent ceramics: Processing, materials and applications. *Progress in Solid State Chem.* 2013. 41: 20.
2. Liu Zehua, Shuxing Li, Yihua Huang, Lujie Wang, Yirong Yao, Tao Long, Xiumin Yao, Xuejian Liu, Zhengren Huang. Composite ceramic with high saturation input powder in solid-state laser lighting: Microstructure, properties, and luminous emittances. *Ceramics International.* 2018. 44(16): 20232.
  3. Krystal Jones Ivy, Zachary M. Seeley, Nerine J. Cherepy, Eric B. Duoss, Stephen A. Payne. Direct ink write fabrication of transparent ceramic gain media. *Optical Materials.* 2018. 75: 19.
  4. Qihua Zhu, Qiangqiang Zhu, Benxue Jiang, Minghui Feng, Long Zhang. Fabrication of fine-grained undoped  $Y_2O_3$  transparent ceramic using nitrate pyrogenation synthesized nanopowders. *Ceramics International.* 2019. 45(5): 5339.
  5. Zhang Yumin, Jung In-Ho. Critical evaluation of thermodynamic properties of rare earth sesquioxides (RE = La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc and Y). *Calphad.* – 2017. 58: 169.
  6. Navrotsky Alexandra, Lee Wingyee, Mielewczyk-Gryn Aleksandra, V. Ushakov Sergey, Anderko Andre, Wu Haohan, E. Riman Richard. Thermodynamics of solid phases containing rare earth oxides. *The Journal of Chemical Thermodynamics.* 2015. 88: 126.
  7. Urakami R., Yukio Sato, Masayoshi Ogushi, Takeshi Nishiyama, Aoi Goto, Kazuhiro Yamada, Ryo Teranishi, Kenji Kaneko, Mikito Kitayama. Phase transformation and interface segregation behavior in  $Si_3N_4$  ceramics sintered with  $La_2O_3$ – $Lu_2O_3$  mixed additive. *Journal of the American Ceramic Society.* 2017. 100(3): 1231.
  8. Proessdorf A., Michael Niehle, Frank Grosse, Peter Rodenbach, Michael Hanke, Achim Trampert. Strain dynamics during  $La_2O_3/Lu_2O_3$  superlattice and alloy formation. *Journal of Applied Physics.* 2016. 119(21): 215.
  9. Tabata T., Kita K., Toriumi A. Amorphous High-k  $LaLuO_3$  Dielectric Film for Ge MIS Gate Stack. International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba, 2008, 14-A-1-4:14.
  10. Toropov S. A. State diagrams of refractory oxide systems. *Russ.*
  11. Xiong K., Robertson J. Electronic structure of oxygen vacancies in  $La_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$  and  $LaLuO_3$ . *Microelectronic engineering.* 2009. 86(7-9): 1672.
  12. Matvei Zinkevich. Thermodynamics of rare earth sesquioxides. *Progress in Materials Science.* 2007. 52: 597.

Надійшла 04.02.2020 .