

УДК 541.123.3

**О. В. Чудінович<sup>1</sup>, О. Р. Андрієвська<sup>1,2</sup>, Ж. Д. Богатирьова<sup>3</sup>, О. І. Оліфан<sup>1</sup>,  
Л. М. Спасьонова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Кржижановського, 3, Київ, 03680. E-mail: chudinovich\_olia@ukr.net<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр-т. Перемоги, 37, Київ, 03056<sup>3</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, бульв. Академіка Вернадського, 34/1, Київ, 03680**ВЗАЄМОДІЯ ОКСИДІВ ЛАНТАНУ, ІТРІЮ ТА НЕОДИМУ ПРИ  
ТЕМПЕРАТУРІ 1600 °С**

Вперше за допомогою методів рентгенівського фазового аналізу та петрографії досліджено фазові рівноваги у потрійній системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$  при 1600 °С у всьому інтервалі концентрацій. Встановлено, що в системі утворюються тверді розчини на основі кубічної (С) модифікації  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , гексагональної (А) та моноклінної (В) модифікацій  $\text{La}_2\text{O}_3$  і  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Визначено границі розчинності та параметри елементарних комірок твердих розчинів.

**Ключові слова:** оксиди лантану, ітрію, неодиму, фазові рівноваги, тверді розчини, параметри елементарних комірок, функціональна та конструкційна кераміка.

Оксиди рідкісноземельних елементів (РЗЕ) і композити на їх основі мають важливе значення як матеріали в оптиці та оптоелектроніці за рахунок їх хімічної стійкості та термічної стабільності. Керамічні порошки з регульованою морфологією і вузьким розподілом частинок незамінні в якості люмінофорів у плоских дисплеях. Системи на основі оксидів ітрію, лантану і неодиму перспективні для розробки матеріалів для іонних провідників, теплозахисних покриттів та оптично прозорої кераміки [1–24]. Легування оксиду ітрію оксидами лантану та лантаноїдів дозволяє отримати матеріали з рядом унікальних властивостей (оптичні, люмінесцентні, діелектричні) [6–10]. Дані про термодинамічну стабільність твердих розчинів на основі оксидів РЗЕ у літературі відсутні, що обумовлює необхідність дослідження фазових рівноваг у потрійній системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$ .

Обмежуючі подвійні системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$  вивчені у широкому інтервалі температур (1300–2400 °С) і концентрацій (0–100 %) достатньо добре, відомості про фазові рівноваги у системі  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  суперечливі і потребують уточнення.

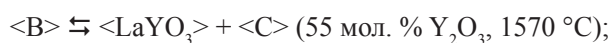
Відомості про фазові рівноваги в системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  та її практичне використання наведено в [13–24]. Вказана система характеризується перитетктичним перетворенням при 2310 °С, ~ 83 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  і мінімумом при 2215 °С, 30 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  [14–15, 18]. У системі утворюються широкі області твердих розчинів на основі різних кристалічних модифікацій вихідних оксидів. Температури поліморфних перетворень  $\text{La}_2\text{O}_3$  ( $X \rightleftharpoons H$ ,  $H \rightleftharpoons A$ ) при добавках оксиду ітрію і  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $H \rightleftharpoons C$ ) при добавках оксиду лантану знижуються. Протяжність областей твердих розчинів збільшується з підвищенням температури.

Тверді розчини на основі H-форми оксидів РЗЕ утворюють безперервний ряд. Крива, що розділяє фазові поля твердих розчинів на основі X- і H-форм оксидів

РЗЕ, має мінімум при 1945 °С, 35 мол. %  $Y_2O_3$ . У А-формі  $La_2O_3$  розчиняється 30 мол. %  $Y_2O_3$  при 1640 °С.

Розчинність  $La_2O_3$  в С-модифікації оксиду ітрію в інтервалі температур 1350–1900 °С змінюється незначно і при 1900 °С становить 15 мол. %  $La_2O_3$ . Показник заломлення змінюється від  $n = 1,910$  до  $n = 1,923$ .

У системі утворюється сполука  $LaYO_3$  (R), яка кристалізується у структурі типу перовскиту з ромбічними викривленнями. Упорядкована R-фаза характеризується вузькою областю гомогенності (48–53 мол. %  $Y_2O_3$  при 1350 °С). Максимальна температура існування впорядкованої фази  $LaYO_3$  у подвійній системі – 1585 °С. Вище зазначеної температури утворюється фаза змінного складу з моноклінною структурою В-типу оксидів РЗЕ. В-фаза зазнає два перетворення за евтектоїдною і перитектоїдною реакціями:



На кривих, що відокремлюють поля твердих розчинів на основі Н-форми оксидів РЗЕ від областей твердих розчинів на основі А-, В- і С- модифікацій оксидів РЗЕ, є евтектоїдна точка з координатами 45 мол. %  $Y_2O_3$  і 1730 °С [18].

Фазові рівноваги у системі  $La_2O_3$ – $Nd_2O_3$  досліджені за допомогою рентгенівського і термічного аналізів при високих температурах [17]. Встановлено, що в системі утворюються три типи безперервних твердих розчинів на основі високотемпературної кубічної Х-модифікації зі структурою типу  $Tl_2O_3$  і двох гексагональних А- і високотемпературної Н- модифікацій оксидів РЗЕ. Перехід А  $\rightleftharpoons$  Н у системі  $La_2O_3$ – $Nd_2O_3$  зафіксований тільки за допомогою термічного аналізу (спостерігається екзотермічний ефект на кривих охолодження). Ліквідус системи характеризується наявністю мінімуму поблизу складу 60 мол. %  $La_2O_3$  [31].

Фазові рівноваги і структура фаз, що утворюються у системі  $Nd_2O_3$ – $Y_2O_3$  при високих температурах (2000–2400 °С), вивчено в роботах [24–30]. Ліквідус характеризується перитектичною реакцією  $L + H \rightleftharpoons X$  при 2370 °С, 84 мол. %  $Y_2O_3$ , і точкою мінімуму приблизно при  $\sim 2250$  °С, 30 мол. %  $Y_2O_3$ . У системі  $Nd_2O_3$ – $Y_2O_3$  утворюється безперервний ряд твердих розчинів Н- типу і широкі області твердих розчинів на основі Х-, А-, В- і С- кристалічних модифікацій оксидів РЗЕ, мають місце два твердофазних перетворення  $H + C \rightleftharpoons B$  і, певно,  $H \rightleftharpoons A + B$ . Відомості про взаємодію оксидів неодиму та ітрію при температурах 1500 °С приведено в [32–33]. Встановлено, що в системі  $Nd_2O_3$ – $Y_2O_3$  при 1600 °С утворюються тверді розчини на основі гексагональної (А), моноклінної (В) модифікацій оксиду неодиму та кубічної (С) модифікації оксиду ітрію. Границі областей гомогенності твердих розчинів при температурі 1600 °С становлять: на основі А- $Nd_2O_3$  0–4 мол. %  $Y_2O_3$ , В- $Nd_2O_3$  — 21–50 мол. %  $Y_2O_3$  та С- $Y_2O_3$  — 30 мол. %  $Y_2O_3$ . Нових фаз не знайдено.

У даній роботі вперше досліджено взаємодію оксидів ітрію, лантану та неодиму при температурі 1600 °С у всьому інтервалі концентрацій.

Для дослідження приготовлено зразки, складі яких лежать на двох променях  $Y_2O_3$  – (50 мол. %  $La_2O_3$ –50 мол. %  $Nd_2O_3$ ) та  $Y_2O_3$  – (90 мол. %  $La_2O_3$ –10 мол. %  $Nd_2O_3$ ).

Для вивчення взаємодії фаз у досліджуваній системі в якості вихідних речовин використовували  $Y_2O_3$  марки ИТo1,  $La_2O_3$  марки ЛаО–1,  $Nd_2O_3$  з вмістом основного компоненту 99,99 % та азотну кислоту класифікації “ч.д.а”. Зразки готували з

концентраційним кроком 5 мол. % із розчинів нітратів з наступним випарюванням та розкладом нітратів на оксиди шляхом прожарювання при 800 °С протягом 2 годин. Порошки пресували у таблетки діаметром 5 і висотою 4 мм під тиском 10–30 МПа. Термообробку зразків проводили у три стадії: у печі з нагрівачами H23U5T (фехраль) при 1100 °С протягом 1080 годин і у печі з нагрівачами з дисиліциду молібдену (MoSi<sub>2</sub>) при 1500 °С протягом 50 годин і при 1600 °С 10 годин у повітрі. Зразки нагрівали від кімнатної до потрібної температури із швидкістю 3 град/хв. Випал зразків був неперервним. Охолодження проводили разом з піччю. Фазовий склад зразків досліджували методом рентгенофазового аналізу (РФА) та петрографії.

Рентгенофазовий аналіз зразків виконано за методом порошку на установці ДРОН–3 при кімнатній температурі (CuK<sub>α</sub> – випромінювання). Крок сканування складав 0,05–0,1 град, експозиція 4 с у діапазоні кутів 2θ від 15 до 90°. Параметри елементарних комірок розраховано за методом найменших квадратів, використовуючи програму LATTEC. Для визначення фазового складу використовували базу даних Міжнародного комітету порошкових стандартів (JSPDS Міжнародний центр дифракційних даних 1999). Склад зразків контролювали за допомогою спектрального та хімічного аналізів вибірково.

Петрографічні дослідження випалених зразків проведено у поляризаційному світлі. Кристалооптичні характеристики фаз визначали на поляризаційному мікроскопі МІН–8 за допомогою високо заломлюючих імерсійних рідин.

Вихідний хімічний і фазовий склад зразків після випалу при 1600 °С, параметри елементарних комірок фаз, що знаходяться у рівновазі при даній температурі, наведено у таблиці.

Таблиця

**Вихідний хімічний і фазовий склад, параметри елементарних комірок фаз системи La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> після випалу зразків при 1600 °С, 10 год. (за даними РФА та петрографії)**

Хімічний склад, % мол.			Фазовий склад, параметри елементарних комірок фаз, нм	Параметри елементарних комірок фаз, нм				
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		<C>	<B>			
				a	a	b	c	β
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Переріз Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> — (50% (мол.) La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —50% (мол.) Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )								
0	50	50	<A*> (a=0,6479, c=0,3795, c/a= 0,5857)					
5	47,5	47,5	<A*> (a=0,6460, c=0,3798, c/a= 0,5879)	—	—	—	—	—
10	45	45	<A*> (a=0,6464, c=0,3798, c/a= 0,5876)	—	—	—	—	—
15	42,5	42,5	<A*> (a=0,6460, c=0,3798, c/a= 0,5879) + <B>	—	1,4223	0,3700	0,8790	85,303
20	40	40	<A*> (a=0,6460, c=0,3798, c/a= 0,5879) + <B>	—	1,4180	0,3685	0,8761	85,438
25	37,5	37,5	<B> + <A*>	—	1,4187	0,3676	0,8730	85,269

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	35	35	<B> + <A*>	—	1,4157	0,3661	0,8703	85,031
35	32,5	32,5	<B>	—	1,4155	0,3653	0,8677	85,093
40	30	30	<B>	—	1,4118	0,3639	0,8658	85,195
45	27,5	27,5	<B><C>сл	—	1,4080	0,3621	0,8620	84,996
50	25	25	<B> + <C>сл	—	1,4065	0,3610	0,8862	85,714
55	22,5	22,5	<B> + <C>	1,072	1,4037	0,3593	0,8843	85,555
60	20	20	<B> + <C>	1,0728	1,4006	0,3611	0,8825	85,700
65	17,5	17,5	<B> + <C>	1,0726	1,4009	0,3594	0,8843	85,543
70	15	15	<B> + <C>	1,0725	1,4068	0,3705	0,8759	83,109
75	12,5	12,5	<B>сл. + <C>	1,0669	—	—	—	—
80	10	10	<B> сл. + <C>	1,0638	—	—	—	—
85	7,5	7,5	<C>	1,0618	—	—	—	—
90	5	5	<C>	1,0612	—	—	—	—
95	2,5	2,5	<C>	1,0607				
100	0	0	<C>	1,0604				
Переріз Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> — (90 мол. % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —10 мол. % Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )								
0	90	10	<A*> (a=0,6492, c=0,3795, c/a= 0,5846)					
5	85,5	9,5	<A*> (a=0,6481, c=0,3860, c/a= 0,5956)					
10	81	9	<A*> (a=0,6471, c=0,3844, c/a= 0,5940)					
15	76,5	8,5	<A*> (a=0,6462, c=0,3831, c/a= 0,5929)					
20	72	8	<A*> (a=0,6560, c=0,3729, c/a= 0,5681) + <B>		1,4800	0,3694	0,8839	88,56
25	67,5	7,5	<A*> (a=0,6474, c=0,3734, c/a= 0,5768) + <B>		1,4803	0,3690	0,8816	88,03
30	63	7	<B>+<A*>		1,4801	0,3678	0,8799	88,07
35	58,5	6,5	<B>		1,4778	0,3665	0,8762	88,03
40	54	6	<B>		1,4709	0,3644	0,8713	87,95
45	49,5	5,5	<B> + <C>сл.		1,4671	0,3634	0,8936	88,21
55	40,5	4,5	<B> + <C>	1,0709	1,4597	0,3598	0,8885	88,14

Закінчення таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9
60	36	4	<B> + <C>	1,0727	1,4624	0,3611	0,8891	88,62
65	31,5	3,5	<B> + <C>	1,0725	1,4596	0,3606	0,8861	88,48
70	27	3	<B> + <C>	1,0719	1,4616	0,3608	0,8853	88,42
75	22,5	2,5	<B> + <C>	1,0715	1,4610	0,3606	0,8841	88,68
80	18	2	<B>сл. + <C>	1,0722				
85	13,5	1,5	<B> + <C>	1,0661				
90	9	1	<C>	1,0657				
95	4,5	0,5	<C>	1,0641				

\* При заданих умовах ( $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 10 год. у повітрі) гексагональна модифікація  $A\text{-Nd}_2\text{O}_3$ ,  $A\text{-La}_2\text{O}_3$  в зазначених складах гідратує, замість неї спостерігали утворення гексагональної модифікації гідроксиду  $A\text{-Nd}(\text{OH})_3$ ,  $A\text{-La}(\text{OH})_3$ . Позначення фаз: <A> – тверді розчини на основі гексагональної модифікації  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ; <C> – тверді розчини на основі кубічної модифікації  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; <B> – тверді розчини на основі моноклінної модифікації  $\text{La}_2\text{O}_3$  і  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ; сл. – сліди фази

За отриманими результатами побудовано ізотермічний переріз діаграми стану системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$  при  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1).

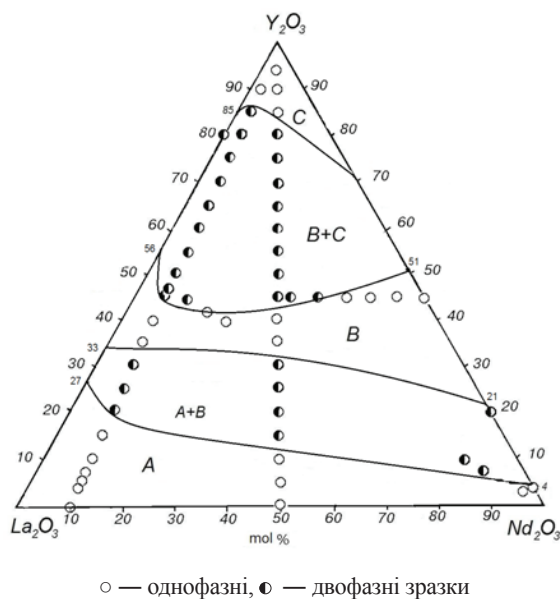
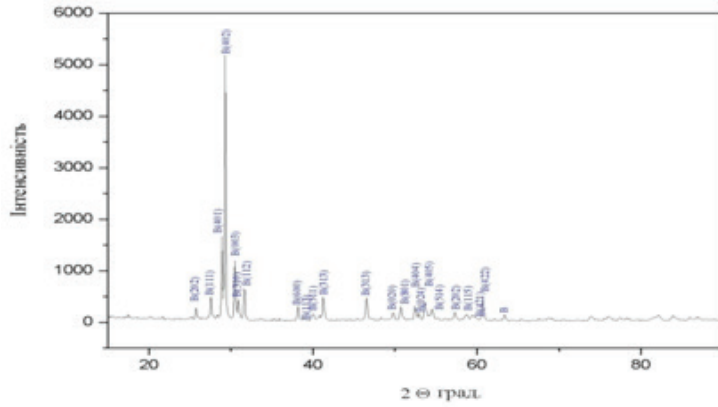
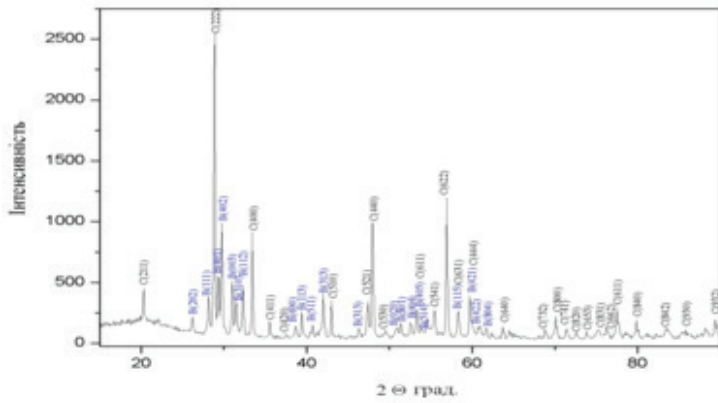


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$  при температурі  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$

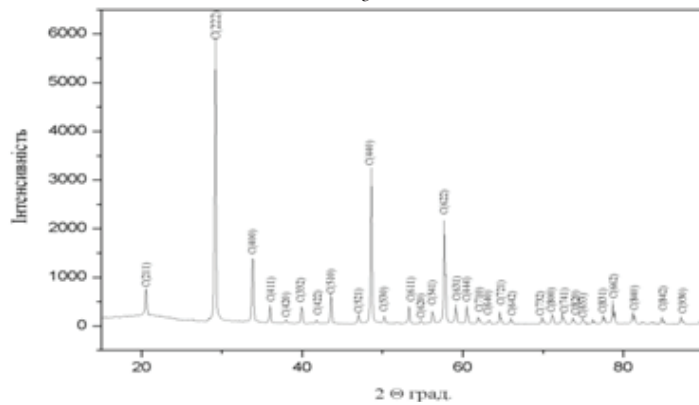




а



б



в

Рис. 2. Дифрактограми зразків системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$  після випалу при  $1600^\circ\text{C}$ : а – 50 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 50 мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 0 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\text{A}^*\text{-A-Nd(OH)}_3$ ); б – 42,5 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 42,5 мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 15 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\text{A}^*\text{-A-Nd(OH)}_3\text{+B-La}_2\text{O}_3$ ); в – 37,5 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 37,5 мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 25 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\text{B-La}_2\text{O}_3$ ); г – 17,5 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 17,5 мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 65 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\text{B-La}_2\text{O}_3\text{+C-Y}_2\text{O}_3$ ); д – 12,5 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 12,5 мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 75 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\text{C-Y}_2\text{O}_3$ ).

Межі області гомогенності В-фази проходять відповідно до її границь у обмежуючих подвійних системах  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$  (33–56 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) і  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$  (21–50 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Область гомогенності твердих розчинів на основі В-фази простягається від 33 до 44 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  у перерізі  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--}$  (90 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}10$  мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) і від 33 до 43 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  у перерізі  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--}$  (50 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}50$  мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) (рис.3).

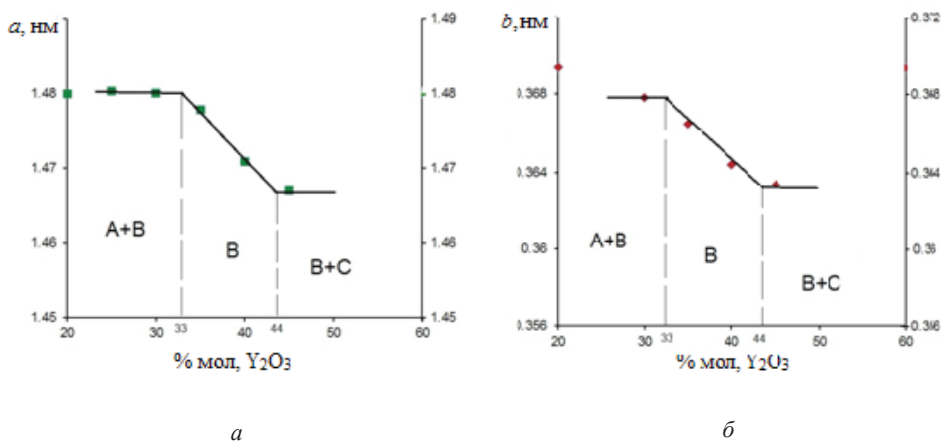


Рис. 3. Концентраційні залежності параметрів  $a$  ( $a$ ) і  $b$  ( $b$ ) елементарної комірки твердих розчинів на основі В-фази у перерізі  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--}$  (90 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}10$  мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) у системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$  після випалу зразків при 1600 °С.

Варто відзначити, що оксиди лантану та неодиму на повітрі гідратуються і замість гексагональної модифікації  $\text{La}_2\text{O}_3$  ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) у зразках, які містять 100–55 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) при 1600 °С спостерігали утворення гексагональної модифікації гідроксиду на основі неодиму (лантану). Параметри елементарної комірки змінюються від  $a = 0,6479$  нм,  $c = 0,3795$  нм,  $c/a = 0,5857$  для твердого розчину  $\text{Nd}(\text{OH})_3$  з вмістом 50 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}0$  мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--}50$  мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  до  $a = 0,6460$  нм,  $c = 0,3798$  нм,  $c/a = 0,5879$  для двофазного зразка (A + B) 40 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}20$  мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--}40$  мол. %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ .

Для визначення границь фазових полів окрім даних РФА використано петрографічні дослідження. Встановлено, що у концентраційному інтервалі від 50 до 70 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  у зразках разом з ізотропною фазою С- $\text{Y}_2\text{O}_3$  явно присутня анізотропна фаза В- $\text{La}_2\text{O}_3$  у вигляді прозорих пластинок. Вміст анізотропної фази В- $\text{La}_2\text{O}_3$  помітно зменшується із збільшенням концентрації  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Для зразка з вмістом 75 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  виявлено тільки одну ізотропну фазу С- $\text{Y}_2\text{O}_3$ .

Таким чином, вивчено фазові рівноваги в системі  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$  при 1600 °С. Встановлено, що в дослідженій системі утворюються області гомогенності твердих розчинів на основі різних кристалічних модифікацій вихідних компонентів різної протяжності. Ізотермічний переріз діаграми стану системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$  при 1600 °С характеризується наявністю трьох однофазних (A, B, C) і двох двофазних (A + B, B + C) областей.



Автори виражають подяку за підтримку Державному фонду фундаментальних досліджень України (грант № Ф73/111-2016, спільно Україна – Білорусь) та Міністерству освіти і науки України (грант № М/128-2016, спільно Україна – Індія).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang S.F., Zhang J., Luo D.W., Gu F., Tang D.Y., Dong Z.L., Tan G.E., Que W.X., Zhang T.S., Li S., Kong L.B. Transparent ceramics: Processing, materials and applications // Progress Solid State Chemistry. – 2013. – Vol. 41. – P. 20–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2012.12.002>.
2. Sanghera J., Bayya S., Villalobos Guillermo, Kim Woohong, Frantz Jesse, Shaw Brandon, Sadowski Bryan, Miklos R., Baker Colin, Hunt Michael, Aggarwal Ishwar, Kung Fred. Transparent ceramics for high-energy laser systems // Optical Materials. – 2011. – Vol. 33. – P. 511–518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2010.10.038>.
3. Boniecki M., Librant Z., Wajler A., Wesolowski W., Weglarz H. Fracture toughness, strength and creep of transparent ceramics at high temperature // Ceramics International. – 2012. – Vol. 38. – P. 4517–4524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.02.028>.
4. Выдрик Г.А., Соловьева Т.В., Харитонов Ф.Я. Прозрачная керамика. – М: Энергия, 1980. – 96 с.
5. Chen B.S., Wu Y. New opportunities for transparent ceramics // Amer.Ceram. Soc. Bull. – 2013. – Vol. 2. – P. 32–37.
6. Chen Y., Lin X., Lin Y., Luo Z. Spectroscopic properties of Yb<sup>3+</sup> ions in La<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> crystal // Solid State Comm. – 2004. – Vol. 132. – P. 533–538. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2004.09.010>.
7. Gong X., Xiong F., Lin Y. Crystal growth and spectral properties of Pr<sup>3+</sup>:La<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> // Mater. Res. Bull. – 2007. – Vol. 42. – P. 413–419. <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2006.07.013>.
8. Lakshminarasimhan N., Varadaraju U.V. Luminescent host lattices, LaInO<sub>3</sub> and LaGaO<sub>3</sub> reinvestigation of luminescence of d10 metal ions // Mater. Res. Bull. – 2006. – Vol. 41. – P. 724–731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2005.10.010>.
9. Taira T. Domain-controlled laser ceramics toward Giant Micro-photonics // Optical Mater. Express. – 2011. – Vol. 1, N 5. – P. 1040–1050. <https://doi.org/10.1364/OME.1.001040>
10. Qing Lu, Q. Yang, C. Jiang, S. Lu, Y. Yuan, Q. Liu. Spectroscopic properties and structure refinement of Nd<sup>3+</sup>(Y<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics // Optical Mater. Express. – 2014. – Vol. 5, N 2. – P. 1035–1040. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2014.05.009>
11. Kumar G.A., Lu Jianren, A. Alexander Kaminskii, Ken-Ichi Ueda. Spectroscopic and stimulated emission characteristics of Nd<sup>3+</sup> in transparent Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics // J. Quantum Electronics. – 2006. – Vol. 42, N 7. – P. 643–650. <http://dx.doi.org/10.1109/JQE.2006.875868>
12. Wang Nengli, Zhang Xiyan, Qiu Guanming, Sun Haiying, Liu Quansheng, Mi Xiaoyun, Wang Xiaochun. Synthesis of La<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup> co-doped yttria nanopowder for transparent ceramics by oxalate precipitation method // J. Rare Earths. – 2010. – Vol. 28, N 2. – P. 232–236. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/S1002-0721\(09\)60086-7](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S1002-0721(09)60086-7)
13. Yoshimura M., Rong X.-Z. Various solid solutions in the systems Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R – La, Nd, and Sm) at high temperature // J. Mater. Sci. Lett. – 1997. – Vol. 16. – P. 1961–1963. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018559322304>.
14. Андрієвська Е.Р. Фазовые равновесия в системах оксидов гафния, циркония и иттрия с оксидами редкоземельных элементов: Монография. – К.: Наук. думка, 2010. – 470 с.
15. Andrievskaya E.R. Phase equilibria in the refractory oxide systems of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides // J. European Ceram. Soc. – 2008. – Vol. 28, N 12. – P. 2363–2388. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.01.009>.
16. Coutures J, Rouanet A., Verges R., Foex M. Etude a haute temperature des systems formes par le sesquioxyde de lanthane et les sesquioxydes de lanthanides. I. Diagrammes de phases (1400 °C < T < T<sub>Liquide</sub>) // J. Solid State Chem. – 1976. – Vol. 17, N 1–2. – P. 172–182. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596\(76\)90218-8](http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596(76)90218-8).
17. Coutures J, Sibieude F, Foex M. Etude a haute temperature des systemes formes par les sesquioxydes de lanthane avec les sesquioxydes de lanthanides. II. Influence de la trempe sur la nature des phases obtenues a la temperature ambiante // J. Solid State Chem. – 1976. – Vol. 17. – P. 377–384. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596\(76\)80006-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596(76)80006-0).
18. Лопато Л.М., Нигманов Б.С., Шевченко А.В., Зайцева З.А. Взаимодействие оксида лантана с оксидом иттрия // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1986. – 22, № 5. – С. 771–774.
19. Berndt V. Maier D., Keller C. New ABO<sub>3</sub> interlanthanide perovskite compounds // J. Solid State Chem. – 1975. – Vol. 13, N 1–2. – P. 131–135. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596\(75\)90090-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596(75)90090-0).

20. Mizuno M., Rouanet A., Yamada T., Noguchi T. Phase diagram of the system  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  at high temperatures // J. Ceram. Soc. Japan. – 1976. – Vol. 84, No. 7. – P. 342–347. [http://dx.doi.org/10.2109/jcersj1950.84.971\\_342](http://dx.doi.org/10.2109/jcersj1950.84.971_342).
21. Coutures J., Foex M. Etude a haute temperature du diagrama d'equilibre du systeme forme par le sesquioxyde d'yttrium // J. Solid State Chem. – 1974. – Vol. 11, N 4. – P. 294–300. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596\(74\)80034-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596(74)80034-4).
22. George W., Emma T., Rhodes William H. Analytical microscopy study of phases and fracture in  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  alloys // J. Am. Ceram. Soc. – 1988. – Vol. 71, N 10. – P. 820–825. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1988.tb07529.x>.
23. Rhodes W.H. Controlled transient solid second phase sintering of yttria // J. Am. Ceram. Soc. – 1981. – Vol. 64, N 1. – P. 13–17. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1981.tb09551.x>.
24. Coutures J., Verges R., Foex M. Etude a haute temperature des systemes formes par le sesquioxyde de neodyme avec les sesquioxides d'yttrium et d'ytterbium // Mater. Res. Bull. – 1974. – Vol. 9, N 12. P.1603–1612. [http://dx.doi.org/10.1016/0025-5408\(74\)90150-0](http://dx.doi.org/10.1016/0025-5408(74)90150-0)
25. Adylov G.T., Voronov G.V., Sigalov L.M. The system  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  // Inorg. Mater. – 1987. – Vol. 23, N 11. – P. 1146–1164.
26. Huang S., O. Van der Biest, Vleugels J. Experimental investigation and thermodynamic assessment of the  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  system // J. Am. Ceram. Soc. – 2006. – Vol. 89, N 8. – P. 2596–2601. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01072.x>
27. Chavan S.V., Achary S.N., Tyagy A.K. XRD investigations in the  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  system and structural studies of a stabilized monoclinic phase // J. Comp. – 2007. – Vol. 441. – P. 332–336.
28. Salehi S., Yuksel B., Vanmeensel K., Van der Biest O., Vleugels J.  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  double stabilized  $\text{ZrO}_2\text{-TiCN}$  nanocomposites // Materials Chem. Phys. – 2009. – Vol. 113. – P. 596–601.
29. Soboleva L.V., Chirkin A.P.  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  phase diagram and the growth of (Y, Nd)  $\text{Al}_5\text{O}_{12}$  single crystals // Crystallography reports. – 2003 – Vol. 48, N 5. – P. 945–949.
30. Fabrichnaya O., Savinykh G., Schreiber G., Seifert H.J. Phase relations in the  $\text{ZrO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  system: Experimental study and thermodynamic modeling // J. Europ. Ceram. Soc. – 2012. – Vol. 32. – P. 3171–3185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.04.034>
31. Торопов С.А., Барзаковский В.П., Лапин В.В., Курцева Н.Н. Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов. Л.: Наука, 1969. – 822с.
32. Чудинувич О.В. Взаємодія оксидів ітрію та неодиму при температурі 1500 °С // Український хімічний журнал. – 2016. – 82, № 8. – С. 92-97.
33. Chudinovych O.V., Andrievskaya E.R., Bogatryyova J.D., Shirokov A.V. Phase Relations in the Yttria-Neodymia System at 1500 °C // Processing and Application of Ceramics. – 2017. – Vol. 11, N 1. – P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.2298/PAC1701001C>.

Стаття надійшла до редакції 29.04.2017

**О. В. Чудинувич<sup>1</sup>, Е. Р. Андриевская<sup>1,2</sup>, Ж. Д. Богатырева<sup>3</sup>, Е. И. Олифан<sup>1</sup>,  
Л. Н. Спасенова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, ул. Кржижановского, 3, Киев, 03680, e-mail: chudinovych\_olia@ukr.net

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр-т Победы, 37, корпус 21, Киев, 03056,

<sup>3</sup>Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, бульв. Академика Вернадского, 34/1, Киев, 03680

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКСИДОВ ЛАНТАНА, ИТТРИЯ И НЕОДИМА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1600 °С**

Впервые с помощью методов РФА и петрографии исследованы фазовые равновесия в тройной системе  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3$  при 1600 °С во всем интервале концентраций. Установлено, что в системе образуются твердые растворы на основе кубической (С) модификации  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , гексагональной (А) и моноклинной (В) модификаций  $\text{La}_2\text{O}_3$  и

Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Определены границы растворимости и значения параметров элементарных ячеек твердых растворов.

**Ключевые слова:** оксиды лантана, иттрия, неодима, фазовые равновесия, твердые растворы, параметры элементарных ячеек, функциональная и конструкционная керамика.

**O. V. Chudinovych<sup>1</sup>, E. R. Andrievskaya<sup>1,2</sup>, J. D. Bogatyryova<sup>3</sup>, E. I. Olifan<sup>1</sup>,  
L. N. Spasyonova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, 3 Krzhizhanovsky str., Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: chudinovych\_olia@ukr.net

<sup>2</sup>National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», 37 Pobedy Ave., Bld. 21, Kyiv, 03056, Ukraine,

<sup>3</sup>Physics and Technology Institute of Metal and Alloys NAS of Ukraine, 34/1 Academician Vernadsky Blvd, Kyiv, 03680, Ukraine,

## INTERACTION OF THE LANTHANA, YTTRIA WITH NEODYMIA AT TEMPERATURE 1600 °C

First, the phase equilibria in the ternary La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system at 1600 °C were studied by X-ray diffraction and petrography in the overall concentration range. The samples of different compositions have been prepared from nitrate acid solutions by evaporation, drying, and calcinations at 1100, 1500 and 1600 °C. It was established that in the system there exist fields of solid solutions based on cubic (C) modification of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hexagonal (A) and monoclinic (B) modifications of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The isothermal section has been developed. The systematic study that covered whole composition range excluded formation of new phases. The isothermal section of the La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system at 1600 °C is characterized by three homogeneity fields (A, B, C) and two two-phase (A + B, B + C) fields. The lattice parameters of the unit cells and the boundaries of the homogeneity fields for solid solutions were determined. The homogeneity field of solid solutions based on B-phase extends from 33 to 44 mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> along the section Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - (90 mol % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 10 mol % Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and from 33 to 43 mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> along the section Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - (50 mol % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 50 mol % Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). The homogeneity field of A-phase was revealed to extend from 0 to 19 mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> along the section Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - (90 mol % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 10 mol % Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

**Key words:** lanthana, yttria, neodymia, phase equilibria, solid solutions, lattice parameters of the unit cells, functional and structural ceramics.

## REFERENCES

1. Wang S.F., Zhang J., Luo D.W., Gu F., Tang D.Y., Dong Z.L., Tan G.E., Que W.X., Zhang T.S., Li S., Kong L.B. *Transparent ceramics: Processing, materials and applications*. Progress in Solid State Chemistry, 2013, vol. 41, pp. 20–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2012.12.002>
2. Sanghera J., Bayya S., Villalobos Guillermo, Kim Woohong, Frantz Jesse, Shaw Brandon, Sadowski Bryan, Miklos R., Baker Colin, Hunt Michael, Aggarwal Ishwar, Kung Fred. *Transparent ceramics for high-energy laser systems*. Optical Materials, 2011, vol. 33, pp. 511–518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2010.10.038>
3. Boniecki Marek, Librant Zdzisław, Wajler Anna, Wesolowski Władysław, Weglarz Helena. *Fracture toughness, strength and creep of transparent ceramics at high temperature*. Ceramics International. 2012, vol. 38, pp. 4517–4524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.02.028>
4. Vydryk G.A., Solovyov T.V., Kharitonov F.YA. *Prozrachnaya keramika* [Transparent ceramics] Moscow: Energy, 1980, 96 p. (in Russian)
5. Chen By Shi, Wu Yiquan. *New opportunities for transparent ceramics*. Amer. Ceram. Soc. Bull., 2013, vol. 2, pp. 32–37.

6. Chen Y., Lin X., Lin Y., Luo Z. *Spectroscopic properties of Yb<sup>3+</sup> ions in La<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> crystal*. Solid State Comm, 2004, vol. 132, pp. 533–538. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2004.09.010>
7. Gong X., Xiong F., Lin Y. *Crystal growth and spectral properties of Pr<sup>3+</sup>:La<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>*. Mater. Res. Bull., 2007, vol. 42, pp. 413–419. <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2006.07.013>
8. Lakshminarasimhan N., Varadaraju U.V. *Luminescent host lattices, LaInO<sub>3</sub> and LaGaO<sub>3</sub> reinvestigation of luminescence of d10 metal ions*. Mater. Res. Bull., 2006, vol. 41, pp. 724–731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2005.10.010>
9. Taira T. *Domain-controlled laser ceramics toward Giant Micro-photonics*. Optical Mater. Express, 2011, vol. 1, no 5, pp. 1040–1050. <https://doi.org/10.1364/OME.1.001040>
10. Qing Lu. Q. Yang, C. Jiang, S. Lu, Y. Yuan, Q. Liu. *Spectroscopic properties and structure refinement of Nd<sup>3+</sup>(Y<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics*. Optical Mater. Express, 2014, vol. 5, no 2, pp. 1035–1040. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2014.05.009>
11. Kumar G. A., Lu Jianren, A. Alexander Kaminskii, Ken-Ichi Ueda. *Spectroscopic and stimulated emission characteristics of Nd<sup>3+</sup> in transparent Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics*. J. Quantum Electronics, 2006, vol. 42, no 7, pp. 643–650. <http://dx.doi.org/10.1109/JQE.2006.875868>
12. Wang Nengli, Zhang Xiyang, Qiu Guanming, Sun Haiying, Liu Quansheng, Mi Xiaoyun, Wang Xiaochun. *Synthesis of La<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup> co-doped yttria nanopowder for transparent ceramics by oxalate precipitation method*. J. Rare Earths, 2010, vol. 28, no 2, pp. 232–236. [http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721\(09\)60086-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721(09)60086-7)
13. Yoshimura Masahiro, Rong Xiao-Zheng. *Various solid solutions in the systems Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R – La, Nd, and Sm) at high temperature*. J. Mater. Sci. Lett, 1997, vol. 16, pp. 1961–1963. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018559322304>
14. Andrievskaya E.R. *Fazovy'e ravnovesiya v sistemah oksidov gafniya, cirkoniya i ittriya s oksidami redkozemel'ny'h e'lementov [Phase equilibria in systems hafnium oxide, zirconium and yttrium oxides of rare earth elements.]* Kiev, Nuykova dymka, 2010, 470 p. (in Russian)
15. Andrievskaya E.R. *Phase equilibria in the refractory oxide systems of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides*. J. European Ceram. Soc., 2008, vol. 28, no 12, pp. 2363–2388. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2008.01.009>
16. Coutures J, Rouanet A., Verges R., Foex M. *Etude a haute temperature des systems formes par le sesquioxyde de lanthane et les sesquioxydes de lanthanides. I. Diagrammes de phases (1400 °C < T < T Liquide)*. J. Solid State Chem, 1976, vol. 17, no 1–2, pp. 172–182. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596\(76\)90218-8](http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596(76)90218-8)
17. Coutures J. Sibieude F., Foex M. *Etude a haute temperature des systemes formes par les sesquioxydes de lanthane avec les sesquioxydes de lanthanides. II. Influence de la trempe sur la nature des phases obtenues a la temperature ambiante*. J. Solid State Chem, 1976, vol. 17, pp. 377–384. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596\(76\)80006-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596(76)80006-0)
18. Lopato L.M., Nyhmanov B.S., Shevchenko A.V., Zaitseva Z.A. *Vzaimodeystvie oksida lantana s oksidom ittriya. Izv. USSR Academy of Sciences. Ino. Materials*, 1986, 22, no 5, pp.771–774 (in Russian)
19. Berndt V. Maier D., Keller C. *New ABO<sub>3</sub> interlanthanide perovskite compounds*. J. Solid State Chem, 1975, vol. 13, no 1–2, pp. 131–135. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596\(75\)90090-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596(75)90090-0)
20. Mizuno M., Rouanet A., Yamada T., Noguchi T. *Phase diagram of the system La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at high temperatures*. J. Ceram. Soc. Japan, 1976, vol. 84, no 7, pp. 342–347. [http://dx.doi.org/10.2109/jcersj1950.84.971\\_342](http://dx.doi.org/10.2109/jcersj1950.84.971_342)
21. Coutures J., Foex M. *Etude a haute temperature du diagrama d'equilibre du systeme forme par le sesquioxyde d'yttrium*. J. Solid State Chem, 1974, vol. 11, no 4, pp. 294–300. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596\(74\)80034-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4596(74)80034-4)
22. George Wei, Emma T., Rhodes William H. *Analytical microscopy study of phases and fracture in Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alloys*. J. Am. Ceram. Soc, 1988, vol. 71, no 10, pp. 820–825. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1988.tb07529.x>
23. Rhodes W.H. *Controlled transient solid second phase sintering of yttria*. J. Am. Ceram. Soc, 1981, vol. 64, no 1, pp. 13–17. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1981.tb09551.x>
24. Coutures J., Verges R., Foex M. *Etude a haute temperature des systemes formes par le sesquioxyde de neodyme avec les sesquioxides d'yttrium et d'ytterbium*. Mater. Res. Bull., 1974, vol. 9, no 12, pp. 1603–1612. [http://dx.doi.org/10.1016/0025-5408\(74\)90150-0](http://dx.doi.org/10.1016/0025-5408(74)90150-0)
25. Adylov G.T., Voronov G.V., Sigalov L.M. *The system Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Inorg. Mater, 1987, vol. 23, no 11. pp. 1146–1164.
26. Huang S., O. Van der Biest, Vleugels J. *Experimental investigation and thermodynamic assessment of the Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system*. J. Am. Ceram. Soc, 2006, vol. 89, no 8, pp. 2596–2601. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01072.x>

28. Chavan S.V., Achary S.N., Tyagy A.K. *XRD investigations in the  $Nd_2O_3$ - $Y_2O_3$  system and structural studies of a stabilized monoclinic phase*. J. comp, 2007, vol. 441, pp. 332–336.
29. Salehi S., Yuksel B., Vanmeensel K., Van der Biest O., Vleugels J.  *$Nd_2O_3$ - $Y_2O_3$  double stabilized  $ZrO_2$ -TiCN nanocomposites*. Materials chem. Phys, 2009, vol. 113, pp. 596–601.
30. Soboleva L.V., Chirkin A.P.  *$Nd_2O_3$ - $Al_2O_3$ - $Y_2O_3$  phase diagram and the growth of (Y, Nd)  $Al_5O_{12}$  single crystals*. Crystallography reports, 2003, vol. 48, no 5, pp. 945–949.
31. Fabrichnaya O., Savinykh G., Schreiber G., Seifert H.J. *Phase relations in the  $ZrO_2$ - $Nd_2O_3$ - $Y_2O_3$ - $Al_2O_3$  system: Experimental study and thermodynamic modeling*. J. Europ. Ceram. Soc, 2012, vol. 32, pp. 3171–3185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.04.034>
32. Toropov S.A., Borzakovskiy V.P., Lapin V.V., Kurtseva N.N. *Diagrammy' sostoyaniya sistem tugoplavkih oksidov* [State diagrams of refractory oxides] Leningrad, Nauka, 1987, 822 p. (in Russian).
33. Chudinovych O.V. *Vzaimodia oksidov itriya ta neodima pri temperature 1500 °C* [The interaction of neodymium and yttrium oxide at 1500 °C] Ukrainian Chemistry Journal., 2016, vol. 82, no 8, pp. 92-97. (in Ukrainian).
34. Chudinovych O.V., Andrievskaya E.R., Bogatyryova J.D., Shirokov A.V. *Phase Relations in the Ytria-Neodymia System at 1500 °C*. Processing and Application of Ceramics., 2017, vol. 11, no 1, pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.2298/PAC1701001C>