



UDC 541.123.3

**PHASE RELATIONS FOR THE TERNARY CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SYSTEM at 1100 °C IN AIR**Oksana A. Korniienko<sup>1,3,4\*</sup>, Serhiy F. Korichev<sup>1</sup>, Marina E. Bachurina<sup>1</sup>, Karina I. Kozlovskaya<sup>2</sup>,  
Iryna S. Subbota<sup>2</sup><sup>1</sup>Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, 3 Krzhyzhanovskoho str., 03680 Kyiv, Ukraine<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Prosp. Peremohy, 03056, Kyiv, Ukraine<sup>3</sup>Nanotechcenter LLC, 3 O. Pritsaka Str, Kyiv, 03142, Ukraine<sup>4</sup>International Research Centre for Advanced Functional Nanostructured Materials and technologies (IRC NANO), 3 O. Pritsaka Str, Kyiv 03142, Ukraine

Received 26 December 2025; accepted 1 April 2026; available online 20 June 2026

**Abstract**

The article presents the results of the investigation of phase equilibria in the ternary system CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Samples of various compositions were synthesized and subjected to thermal treatment at 1100 °C. Based on the experimental data obtained, an isothermal section of the system at 1100 °C was constructed. The existence of the following solid solutions was established: F-CeO<sub>2</sub>, C-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, A\*-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, as well as an ordered phase with a perovskite-type structure, LaErO<sub>3</sub>. It was determined that the solubility of cerium dioxide in the crystal lattice of the ordered perovskite-type phase is 1%. According to X-ray phase analysis, the experimental sample with the composition 1 mol.% CeO<sub>2</sub> - 49.5 mol.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 49.5 mol.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> belongs to the two-phase region (R(LaErO<sub>3</sub>) + C), whereas increasing the cerium dioxide content to 2 mol.% leads to the stabilization of a third phase with a cubic fluorite-type structure. The study also revealed that along the CeO<sub>2</sub> - (50 mol.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 50 mol.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) section, the lattice parameter of fluorite-type solid solutions increases with composition, from a = 0.5414 nm for the single-phase composition (95 mol.% CeO<sub>2</sub> - 2.5 mol.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 2.5 mol.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), to a = 0.5464 nm for the two-phase composition (F + C, 65 mol.% CeO<sub>2</sub> - 17.5 mol.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 17.5 mol.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), and to a = 0.5464 nm for the three-phase composition (F + C + R, 40 mol.% CeO<sub>2</sub> - 30 mol.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 30 mol.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). It was established that under the conditions applied in this experiment, no new phases formed in the investigated ternary system. The isothermal section of the CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase diagram at 1100 °C contains four homogeneous solid solution regions: F-CeO<sub>2</sub>, A-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and LaErO<sub>3</sub>. According to Gibbs' phase rule, these regions are bounded by two- and three-phase regions: the two-phase regions are (A + R), (A + F), (R + F), (R + C), (F + C); the three-phase regions are (A + F + R) and (R + F + C).

**Keywords:** phase equilibria; phase diagram; solid solution; lattice parameters; functional ceramics.

**ФАЗОВІ РІВНОВАГИ У ПОТРІЙНІЙ СИСТЕМА CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ЗА 1100 °C В АТМОСФЕРІ ПОВІТРЯ**Оксана А. Корнієнко<sup>1</sup>, Сергій Ф. Корічев<sup>1</sup>, Марина Є. Бачуріна<sup>1</sup>, Каріна І. Козловська<sup>2</sup>,  
Ірина С. Суббота<sup>2</sup><sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Кржижановського 3, Київ, 03680, Україна<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 03056, Київ, Україна**Анотація**

У статті представлені результати дослідження фазові рівноваги в потрійній системі CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Виконаний синтез зразків різного складу та проведена їхня термічна обробка за температури 1100 °C. На основі отриманих експериментальних даних побудований ізотермічний переріз діаграми стану дослідженої системи за 1100 °C. Встановлено існування наступних твердих розчинів: F-CeO<sub>2</sub>, C-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, A\*-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а також упорядкованої фази зі структурою типу перовскиту LaErO<sub>3</sub>. Визначено, що розчинність діоксиду церію в кристалічній ґратці упорядкованої фази зі структурою типу перовскиту становить менше 1%. За даними рентгенофазового аналізу експериментальний зразок 1 мол.% CeO<sub>2</sub> - 49.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 49.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> належить до двофазної області (R(LaErO<sub>3</sub>) + C), в той час як за збільшення кількості діоксиду церію до 2 мол.% спостерігається стабілізація третьої фази, що належить кубічній структурі типу флюориту. В ході дослідження встановлено, що за перерізом CeO<sub>2</sub> - (50 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 50 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) відбувається розширення кристалічної ґратки та збільшення періоду кристалічної решітки твердих розчинів зі структурою типу флюориту від a = 0.5414 нм (однофазний склад, 95 мол.% CeO<sub>2</sub> - 2.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 2.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) до a = 0.5464 нм (двофазний склад (F+C), 65 мол.% CeO<sub>2</sub> - 17.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 17.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та до a = 0.5464 нм (трифазний склад (F+C+R), 40 мол.% CeO<sub>2</sub> - 30 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 30 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Встановлено, що за умов,

\*Corresponding author: e-mail: [kornienkooksana@ukr.net](mailto:kornienkooksana@ukr.net)

© 2026 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v34i2.348373

застосованих у даному експерименті, утворення нових фаз у дослідженій потрійній системі не відбулося. Ізотермічний переріз дослідженої діаграми стану системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  за  $1100^\circ\text{C}$  має чотири гомогенні області твердих розчинів: F- $\text{CeO}_2$ , A- $\text{La}_2\text{O}_3$ , C- $\text{Er}_2\text{O}_3$  та  $\text{LaErO}_3$ . Відповідно до правила фаз Гіббса, ці області межують з дво- та трифазними областями: двофазні – (A+R), (A+F), (R+F), (R+C), (F+C); трифазні – (A+F+R) та (R+F+C) області.

*Ключові слова:* фазові рівноваги; діаграма стану; тверді розчини; періоди кристалічних ґраток; функціональна кераміка.

## Вступ

Дослідження фазових рівноваг у багатокомпонентних оксидних системах є важливим напрямом сучасного матеріалознавства, оскільки діаграми стану дозволяють встановити закономірності фазових рівноваг та взаємодії компонентів у багатокомпонентних матеріалах, визначити області стабільності упорядкованих фаз та твердих розчинів у широкому діапазоні температур і концентрацій.

Матеріали на основі діоксиду церію досить широко досліджуються науковцями. Це пов'язано з широким спектром застосування матеріалів на його основі [1–12]. Відомо, що матеріали на основі діоксиду церію досить широко використовуються в біомедицині [1–4], каталізі [6], сенсорних технологіях, паливних елементах [7], системах зберігання енергії [8], а також як компоненти термостійких та антикорозійних покриттів [9–10] тощо. Високоентропійні матеріали на основі оксидів рідкісноземельних елементів нещодавно викликали інтерес у широкому спектрі застосувань, включаючи акумулятори, каталізатори, термобар'єрні покриття, суперконденсатори тощо [12]. Крім того, матеріали на основі діоксиду церію, легованого оксидами рідкісноземельних елементів, є перспективними матеріалами для створення електролітів для твердих паливних комірок, що працюють в інтервалі температур  $1100\text{--}600^\circ\text{C}$  [13–14].

Фазові рівноваги в подвійній системі  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  досліджені досить ретельно [15–16]. В роботі [16] побудовано діаграму стану зазначеної системи в температурному інтервалі  $1100\text{--}1500^\circ\text{C}$  (рис. 1). З представлених результатів вищезгаданої праці відомо, що в температурному інтервалі  $1500\text{--}1100^\circ\text{C}$  в подвійній системі  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  існують дві області твердих розчинів: A- $\text{La}_2\text{O}_3$ , F- $\text{CeO}_2$ . Відповідно до правила фаз Гіббса зазначені області розмежовані гетерогенною областю, що містить суміш вище зазначених фаз [15]. Під час побудови зазначеної діаграми стану системи автори спирались на результати досліджень рентгенофазового аналізу та мікроструктурних досліджень. На

думку авторів, поєднання зазначених методів дає змогу отримати достовірні результати. Авторами роботи [16] встановлено, що періоди елементарних комірок кубічних твердих розчинів структури флюориту змінюються від  $a = 0.5409\text{ нм}$  для  $100\%$   $\text{CeO}_2$  до  $a = 0.5590\text{ нм}$  ( $1500^\circ\text{C}$ ), а також  $a = 0.5587\text{ нм}$  ( $1100^\circ\text{C}$ ) для складу, що має наступний хімічний склад:  $50\text{ мол.}\%$   $\text{CeO}_2\text{-}50\text{ мол.}\%$   $\text{La}_2\text{O}_3$  [16]. Межі областей гомогенності відповідають наступним координатам: F- ( $100\text{--}51\text{ мол.}\%$   $\text{CeO}_2$ ) за температур  $1500$  та  $1100^\circ\text{C}$ , A- ( $0\text{--}25\text{ мол.}\%$   $\text{CeO}_2$  ( $1500^\circ\text{C}$ ) та  $0\text{--}15\text{ мол.}\%$   $\text{CeO}_2$  ( $1100^\circ\text{C}$ )) [16].

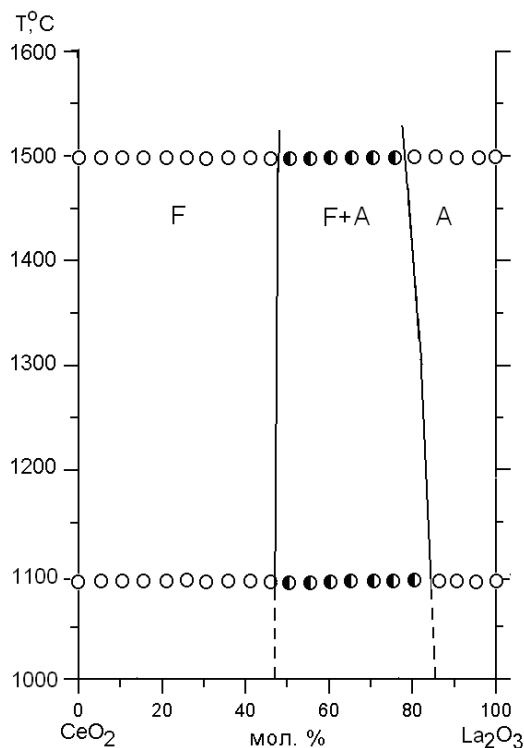


Рис. 1. Фазові рівноваги в подвійній системі  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  [16]

Fig. 1. Phase diagram of the  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  system [16]

Дослідження фазових рівноваг у подвійній системі  $\text{CeO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$  проводили групи авторів [17–20]. У роботі [20] представлена графічна інтерпретація подвійної діаграми стану системи  $\text{CeO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ . На відміну від вище розглянутої системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ , система  $\text{CeO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$  досліджена в ширшому температурному інтервалі, а саме,  $1500\text{--}600^\circ\text{C}$ . Дослідження твердофазної взаємодії

між  $\text{CeO}_2$  та  $\text{Er}_2\text{O}_3$  показало, що в системі  $\text{CeO}_2$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  формуються два типи твердих розчинів з кубічною структурою: на основі флюоритної структури F- $\text{CeO}_2$  та кубічної структури C- $\text{Er}_2\text{O}_3$  [20]. Ці тверді розчини розділені двофазною областю (C+F) (рис. 2) [20]. Водночас автори роботи [20] стверджують, що утворення нових фаз в системі  $\text{CeO}_2$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  не було встановлено. Межі гомогенності твердих розчинів, утворених F- $\text{CeO}_2$ , залежать від температури та визначені за допомогою складів, що містять 30–35 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$  за 1100 °C – 20–25 мол.%, а за 600 °C – 5–10 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (рис. 2) [20].

Авторами [20] встановлено, що максимальна розчинність  $\text{Er}_2\text{O}_3$  в кристалічній ґратці F-модифікації  $\text{CeO}_2$  становить 30 мол.% за 1500 °C та 23 мол.% за 1100 °C. Крім того встановлено, що зі зниженням температури від 1500 до 600 °C області гомогенності твердих розчинів на основі кубічних модифікацій F- $\text{CeO}_2$  та C- $\text{Er}_2\text{O}_3$  істотно звужуються: для F- $\text{CeO}_2$  – від 70 до 90 мол.%  $\text{CeO}_2$ , а для C- $\text{Er}_2\text{O}_3$  – від 35 до 5 мол.%  $\text{CeO}_2$  [20].

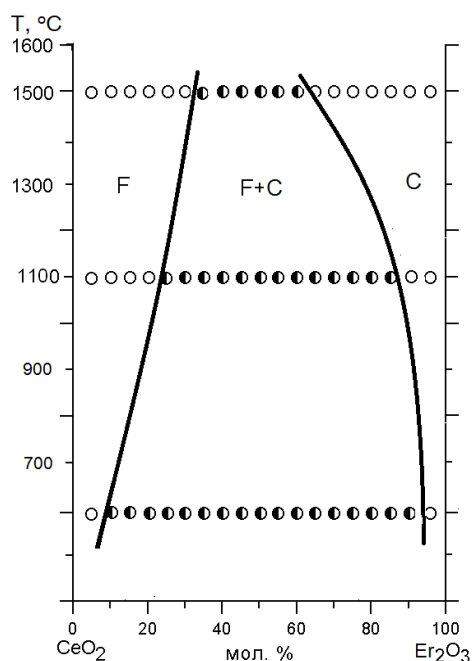


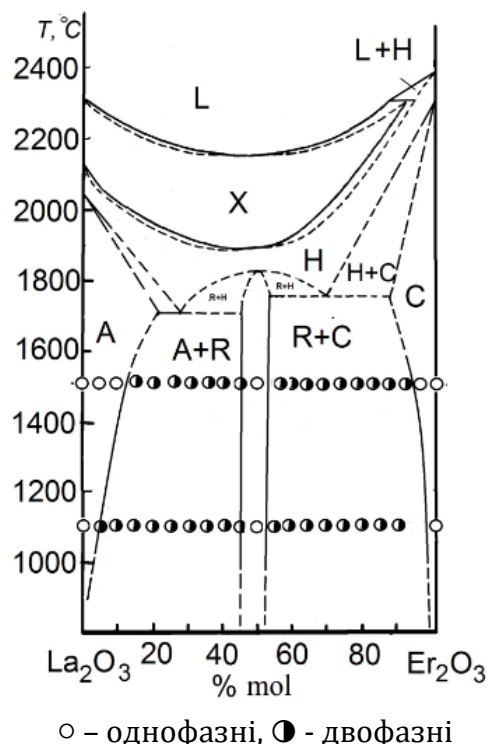
Рис 2. Фазові рівноваги в подвійній системі  $\text{CeO}_2$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  [20]

Fig 2. Phase diagram of the  $\text{CeO}_2$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  system [20]

Фазові рівноваги в подвійній системі  $\text{La}_2\text{O}_3$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  досліджувались авторами [21–28]. У системі існують тверді розчини на основі кубічної (C) та гексагональної (H) модифікацій  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , а також низькотемпературної гексагональної (A), високотемпературних гексагональної (H) та

кубічної (X) модифікацій  $\text{Ln}_2\text{O}_3$ , а також упорядкована фаза зі структурою типу перовскиту  $\text{LaErO}_3$ . Встановлено наступні температури фазових перетворень для  $\text{La}_2\text{O}_3$ :  $A \rightleftharpoons H$  (2050 °C),  $H \rightleftharpoons X$  (2140 °C),  $T_{\text{пл}} = 2310$  °C. (рис. 3).

Фазовий перехід  $A \rightleftharpoons H$  в системі  $\text{La}_2\text{O}_3$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  встановлений за допомогою термічного аналізу в області складів з високим вмістом  $\text{La}_2\text{O}_3$ , однак границі фазових полів не визначені [23]. Ліквідус системи  $\text{La}_2\text{O}_3$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  характеризується наявністю мінімуму поблизу складу, що містить 45 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , та перитектичним перетворенням  $L+H \rightleftharpoons X$  [23]. В роботі [27] встановлено, що упорядкована фаза  $\text{LaErO}_3$  (R) за 1500, 1100 °C існує в інтервалі 45–51 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ . З пониженням температури до 1100 °C спостерігається звуження областей гомогенності на основі твердих розчинів C- $\text{Er}_2\text{O}_3$  та A- $\text{La}_2\text{O}_3$  [27].



○ – однофазні, ● – двофазні  
Рис 3. Діаграма стану системи  $\text{La}_2\text{O}_3$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  [27]: вище 1500 °C за даними [16]

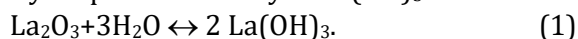
Fig 3. Phase diagram of the  $\text{La}_2\text{O}_3$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  system [27]: вище 1500 °C за даними [16]

Фазові рівноваги в потрійній системі  $\text{CeO}_2$ – $\text{La}_2\text{O}_3$ – $\text{Er}_2\text{O}_3$  досліджені лише за температури 1500 °C в роботі [29]. Оскільки під час розробки методології синтезу нанорозмірних порошків необхідно проводити термообробку за більш низьких температур (з метою запобігання агрегації та росту частинок), необхідним є дослідження фазових рівноваг в

зазначеній потрійній системі за температури 1100 °C [13–14].

### Експериментальна частина

Для синтезу шихт з метою дослідження фазових рівноваг у потрійній системі  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  були використані вихідні речовини: азотнокисла сіль церію  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{La}_2\text{O}_3$  (LaO-1),  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (ErO) і азотну кислоту ( $\text{HNO}_3$ ) марки «ч.д.а.». Оксид лантану попередньо піддавали термообробці в лабораторній муфельній печі за температури 400 °C – 2 год. Зазначену технологічну операцію застосовували задля видалення вологи, оскільки оксид лантану схильний до гідратації під час взаємодії з вологою (1), що міститься в повітрі, внаслідок чого утворюється сполука  $\text{La}(\text{OH})_3$ :



З літературних джерел відомо, що за температур, вищих за 330 °C,  $\text{La}(\text{OH})_3$  перетворюється на  $(\text{LaOOH})$ . Зазначена сполука за подальшого підвищення температури розкладається на оксид лантану ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) [28].

Отримані наважки оксидів РЗЕ розчиняли в  $\text{HNO}_3$ , випарювали та проводили термообробку отриманого прекурсору за температури 800 °C протягом 2 год.

Рентгенофазовий аналіз (РФА) виконували за допомогою установки ДРОН-3 за кімнатної температури ( $\text{CuK}_\alpha$ -випромінювання, Ni-фільтр). Програму *LATTIC* використовували для визначення періодів кристалічних ґраток утворених фаз. Для ідентифікації фаз застосовували базу – JSPDS International Center for Diffraction Data 1999.

*Мета роботи* – проведення досліджень фазових рівноваг та побудова ізотермічного перерізу потрійної діаграми стану системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  за 1100 °C, в атмосфері повітря, в усьому інтервалі концентрацій.

### Результати та їх обговорення

Під час проведення дослідження фазових рівноваг у оксидній системі  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  за температури 1100 °C (в атмосфері повітря) наявність нових фаз не встановлена. В вищезгаданій системі формуються наступні області гомогенності твердих розчинів: на основі кубічної модифікації зі структурою типу флюориту  $\text{CeO}_2$ , кубічної (C) модифікації  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , гексагональної (A) модифікації  $\text{La}_2\text{O}_3$ , а також упорядкованої фази  $\text{LaErO}_3$  (R), яка кристалізується в перовскітоподібній структурі з ромбічним викривленням.

На підставі отриманих експериментальних даних, а також відомостей, що існують в літературних джерелах щодо граничних подвійних систем  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  [16],  $\text{CeO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$  [20],  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  [27], побудовано ізотермічний переріз діаграми стану системи (1100 °C), що містить діоксид церію, а також оксиди лантану та ербію (рис. 4).

У таблиці наведені хімічний та фазовий склади зразків, отриманих після відпалу за температури 1100 °C для системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ . Результати, що представлені в таблиці, дозволяють простежити вплив складу на формування фазових областей у системі на основі діоксиду церію, легованого оксидами РЗЕ ( $\text{La}_2\text{O}_3$  та  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ), і є основою для побудови ізотермічного перерізу діаграми стану системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ .

Досліджений ізотермічний переріз містить дві області, утворені кубічними структурами F- $\text{CeO}_2$ , C-  $\text{Er}_2\text{O}_3$ . Визначено, що найбільшу частину ізотермічного перерізу займає область гомогенності твердого розчину на основі кубічної модифікації зі структурою типу флюориту. З врахуванням меж областей гомогенності граничних подвійних систем  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  (100–51 мол.%  $\text{CeO}_2$ ) та  $\text{CeO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$  (100–78 мол.%  $\text{CeO}_2$ ), а також експериментальних зразків: 70 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 15 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$ – 15 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (однофазний, F) та 65 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 17.5 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$ – 17.5 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (двофазний, F+C) показано, що досліджувана область на діаграмі характеризується випуклістю.

Як відомо, під час легування діоксиду церію ( $\text{CeO}_2$ ) оксидами лантаноїдів відбувається процес ізоморфного заміщення, за якого катіони лантаноїдів ( $\text{Ln}^{3+}$ ) частково заміщують катіони  $\text{Ce}^{4+}$  у кристалічній ґратці зі структурою типу флюориту. Оскільки валентність іонів лантаноїдів нижча, ніж у церію, для збереження електронейтральності структури утворюються кисневі вакансії. Такі вакансії відіграють важливу роль у формуванні дефектної структури твердого розчину, що, в свою чергу, суттєво впливає на його фізико-хімічні властивості.

В дослідженій системі відбувається комплексне легування діоксиду церію ( $\text{CeO}_2$ ) іонами лантану ( $\text{La}^{3+}$ ) та ербію ( $\text{Er}^{3+}$ ). Оскільки зазначені легуючі домішки відносяться до рідкісноземельних елементів, то процес заміщення відбувається за подібним механізмом. Однак спостерігаються і деякі відмінності. Основні відмінності цих

процесів зумовлені різницею в іонних радіусах, електронній будові та хімічній природі легуючих елементів.

Найбільший вплив має розмірний фактор. Іон  $\text{La}^{3+}$  має значно більший радіус (1.16 Å в порівнянні з 0.97 Å для  $\text{Ce}^{4+}$ ), тоді як іон  $\text{Er}^{3+}$  є меншим ( $\approx 0.89$  Å) [31]. Тому заміщення  $\text{Ce}^{4+}$  іонами  $\text{La}^{3+}$  приводить до розширення кристалічної ґратки, а легування  $\text{Er}^{3+}$  навпаки, викликає її стиснення. Ці відмінності впливають на параметри елементарної комірки та ступінь структурного спотворення флюоритоподібної фази.

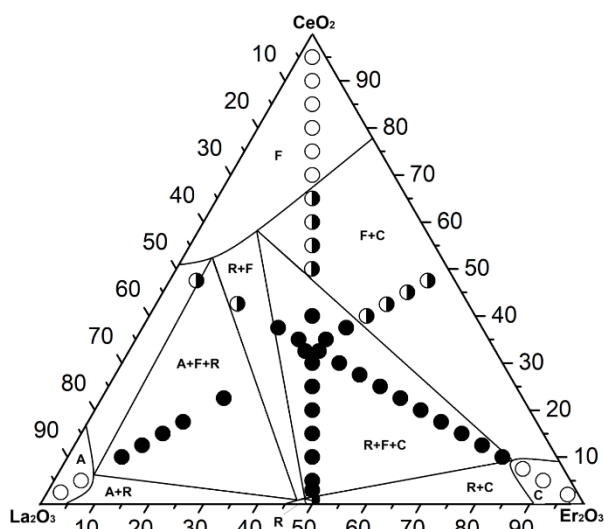


Рис. 4. Ізотермічний переріз діаграми стану системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  при 1100 °C (○ – однофазні, ◐ – двофазні, ● – трифазні зразки).

Fig. 4. Isothermal section at 1100 °C for the  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  system (○ – single-phase samples, ◐ – two-phase samples, ● – three-phase samples)

В ході дослідження встановлено, що за перерізом  $\text{CeO}_2$  – (50 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 50 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) відбувається розширення кристалічної ґратки та збільшення періоду кристалічною решітки твердих розчинів зі структурою типу флюориту від  $a = 0.5414$  нм (однофазний склад, 95 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 2.5 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 2.5 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) до  $a = 0.5464$  нм (двофазний склад (F+C), 65 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 17.5 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 17.5 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) та до  $a = 0.5464$  нм (трифазний склад (F+C+R), 40 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 30 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 30 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ). Аналогічне збільшення параметру елементарної комірки спостерігається і вздовж променю  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  (50 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 50 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) після збільшення кількості оксиду лантану в досліджених зразках, а саме: від  $a = 0.5417$  нм (двофазний склад (F+C), 47.5 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 5 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 47.5 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) до  $a =$

0.5513 нм (трифазний склад (R+F+C), 37.5 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 35 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 37.5 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ). Із застосуванням отриманих даних були побудовані графіки концентраційних залежностей параметрів елементарних комірок та визначені межі існування областей, що утворюються в дослідженій системі. Вказані графіки наведені на рисунках 5–6. На рисунку 7 представлено дифрактограми зразків після їх термічної обробки за температури 1100 °C.

В дослідженій системі утворюється ще одна область гомогенності з кубічною структурою  $\text{C-Ln}_2\text{O}_3$ . Це кубічна структура оксидів РЗЕ, що є похідною від структури типу флюориту, але містить аніонні вакансії, які виникають внаслідок зменшення ступеня окиснення катіона (з +4 до +3), що призводить до зниження симетрії ґратки та змінює координаційні числа атомів. На відміну від кубічної структури типу флюориту, зазначений твердий розчин ( $\text{C-Er}_2\text{O}_3$ ) утворює значно меншу область гомогенності, що дещо збільшується після додавання третього компоненту. Легування оксиду ербію іонами  $\text{Ce}^{4+}$  приводить до зменшення параметру ґратки та підвищує її симетрію, наближаючи структуру  $\text{C-Er}_2\text{O}_3$  до структури флюориту. В зазначеній системі під час додавання  $\leq 10$  мол.%  $\text{CeO}_2$  відбувається зазначений перехід, що приводить до утворення гетерогенної області, а саме трифазної ( $\text{R}+\langle\text{F}\rangle+\langle\text{C}\rangle$ ). Водночас спостерігаються наступні зміни в значеннях параметрів елементарної комірки  $\text{C-Er}_2\text{O}_3$ : від  $a = 1.0534$  нм (однофазний склад (C), 1 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 1 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 98 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) до  $a = 1.0635$  нм (трифазний склад (R+F+C), 10 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 10 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 80 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ). Крім зазначених твердих розчинів у дослідженій системі утворюється вузька область гомогенності на основі упорядкованої фази зі структурою типу перовскиту  $\text{LaErO}_3$ , що простягається вздовж сторони концентраційного трикутника, а саме подвійної системи  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  (45–51 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ). Розчинність іонів  $\text{Ce}^{4+}$  у зазначеній кристалічній ґратці становить менше 1 мол.%. За даними рентгенофазового аналізу експериментальний зразок 1 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 49.5 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 49.5 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$  належить до двофазної області ( $\text{R}(\text{LaErO}_3) + \text{C}$ ), до того ж за збільшення кількості діоксиду церію до 2 мол.% спостерігається стабілізація третьої фази, що належить кубічній структурі типу

флюориту. Дифрактограми зазначених зразків наведено на рисунку 7 (в, г).

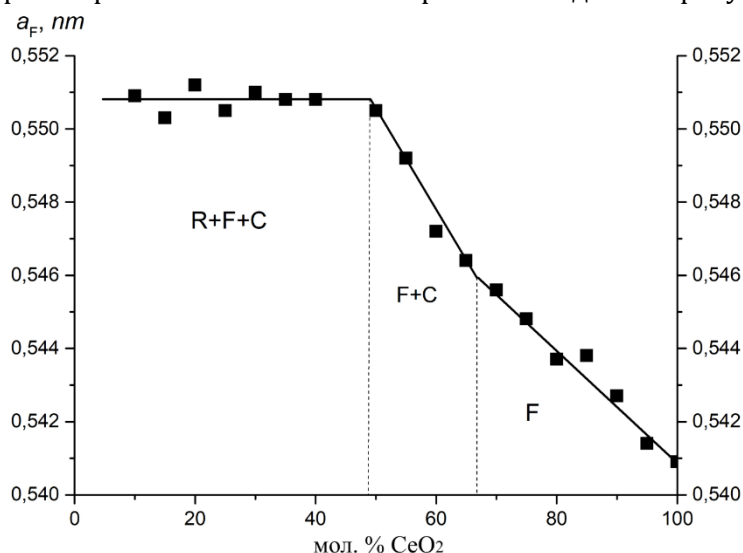


Рис. 5. Концентраційна залежність параметра  $a$  елементарних комірок твердих розчинів зі структурою типу флюориту F-CeO<sub>2</sub> у перерізі CeO<sub>2</sub>-(50 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-50 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) трикомпонентної системи CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> за 1100 °C

Fig. 5. Concentration dependences of lattice parameters for solid solutions based on fluorite-type (F) along the CeO<sub>2</sub>-(50 mol % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-50 mol % Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) section in the ternary CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system at 1100 °C

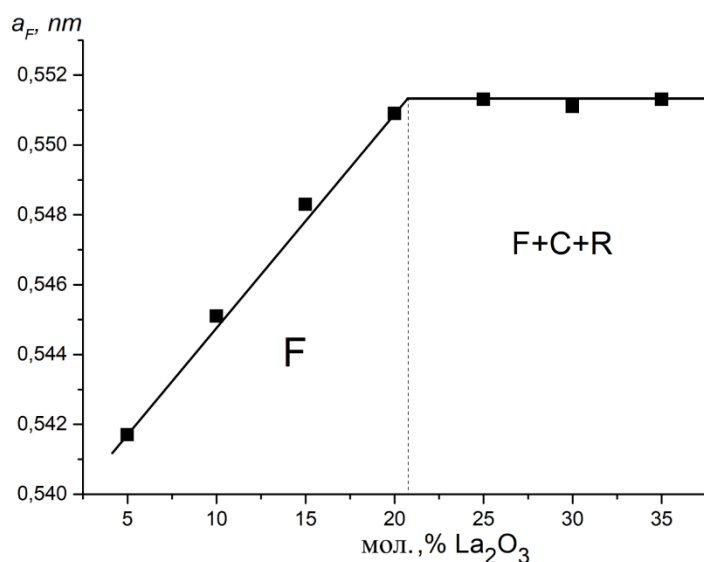


Рис. 6. Концентраційна залежність параметра  $a$  елементарних комірок твердих розчинів зі структурою типу флюориту F-CeO<sub>2</sub> у перерізі La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(50 мол.% CeO<sub>2</sub>-50 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) трикомпонентної системи CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> за 1100 °C

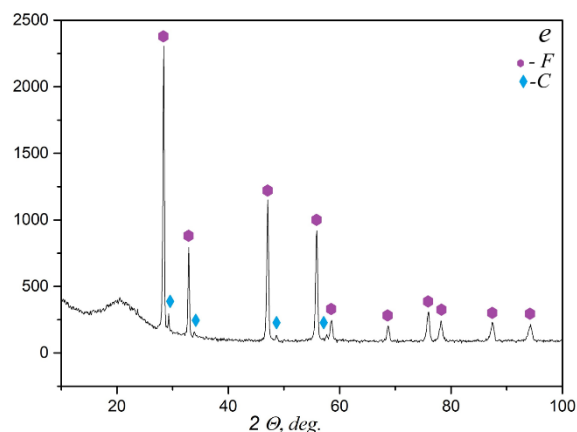
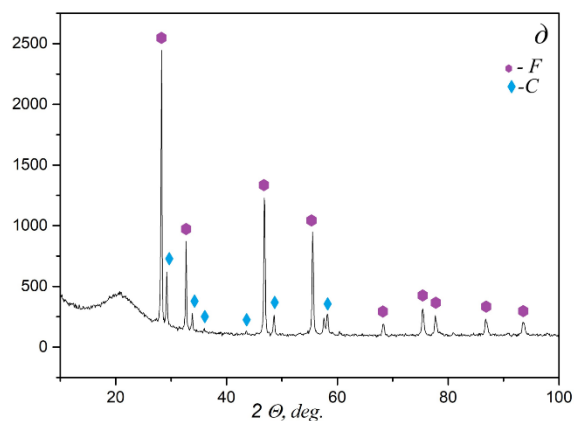
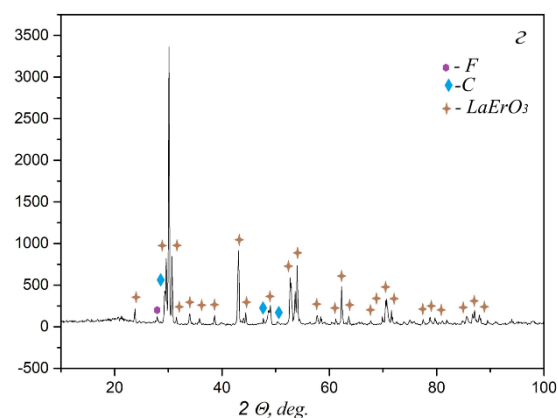
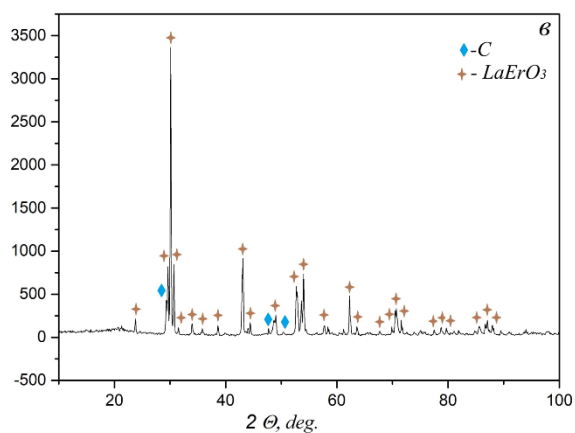
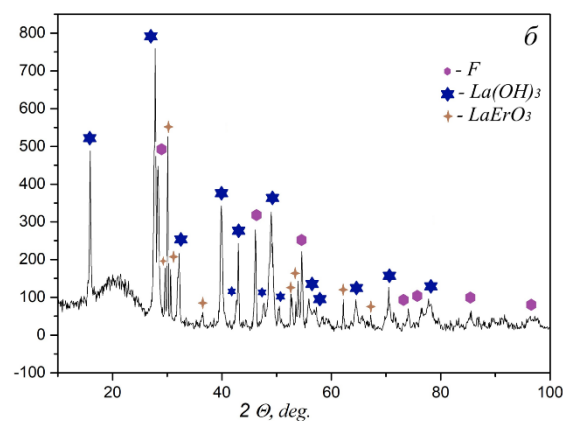
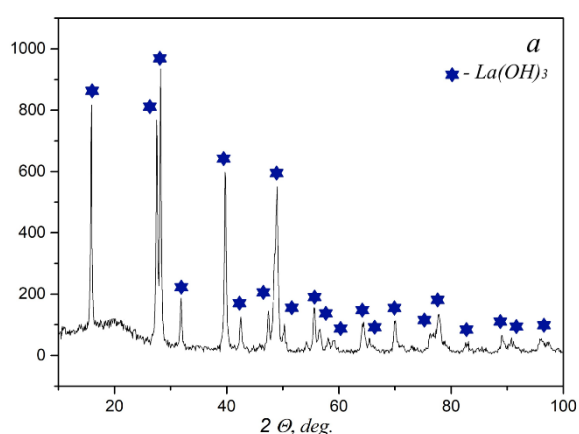
Fig. 6. Concentration dependences of lattice parameters for solid solutions based on fluorite-type (F) along the La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(50 mol % CeO<sub>2</sub>-50 mol % Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) section in the ternary CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system at 1100 °C

Матеріали на основі LaErO<sub>3</sub> належать до важливого класу функціональних оксидів, які поєднують структурну стабільність, оптичну активність, діелектричні та магнітні властивості. Завдяки своїй кристалічній структурі та можливості регулювання складу за допомогою легуючих домішок, зазначені матеріали демонструють високу термостійкість і хімічну інертність, що робить їх придатними для роботи в екстремальних

умовах. Поєднання іонів La<sup>3+</sup> та Er<sup>3+</sup> забезпечує матеріалу не лише механічну й фазову стабільність, а й унікальні оптичні та електричні характеристики, необхідні для використання в лазерній техніці, оптичних підсилювачах, сенсорах, паливних елементах і мікроелектроніці. Таким чином, LaErO<sub>3</sub> можна вважати перспективним матеріалом нового покоління для різноманітних наукових і технічних застосувань.

Область гомогенності твердих розчинів, які мають гексагональну кристалічну ґратку, знаходиться в куті зі значним вмістом оксиду лантану. Межі вказаної області були визначені з використанням літературних джерел щодо граничних подвійних систем  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  [16],  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  [27], а також експериментальних зразків: однофазний склад (A\*), 5 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 90 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 5 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$  та двофазний склад (R+F+A\*), 1 мол.%  $\text{CeO}_2$  – 1 мол.%  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 98 мол.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ . Як вже зазначалося вище, оксид лантану ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) належить до активних рідкісноземельних оксидів, які легко взаємодіють із вологою навколишнього середовища. Завдяки своїй лужній природі та

високій поверхневій активності він має здатність інтенсивно сорбувати водяну пару з повітря, внаслідок чого поступово переходить у гідроксид лантану  $\text{La}(\text{OH})_3$ . З врахуванням вищезазначеного можна пояснити утворення на дифрактограмах зразків, що містять значну кількість оксиду лантану, піків, які належать структурі  $\text{La}(\text{OH})_3$ . Дифрактограми, що належать деяким фазовим полям, які містять гексагональну структуру, представлено на рисунку 7 (б, з). Крім того, під час проведення експериментальних досліджень було встановлено, що внаслідок вищезазначеного переходу відбувається розтріскування або повне руйнування експериментальних зразків.



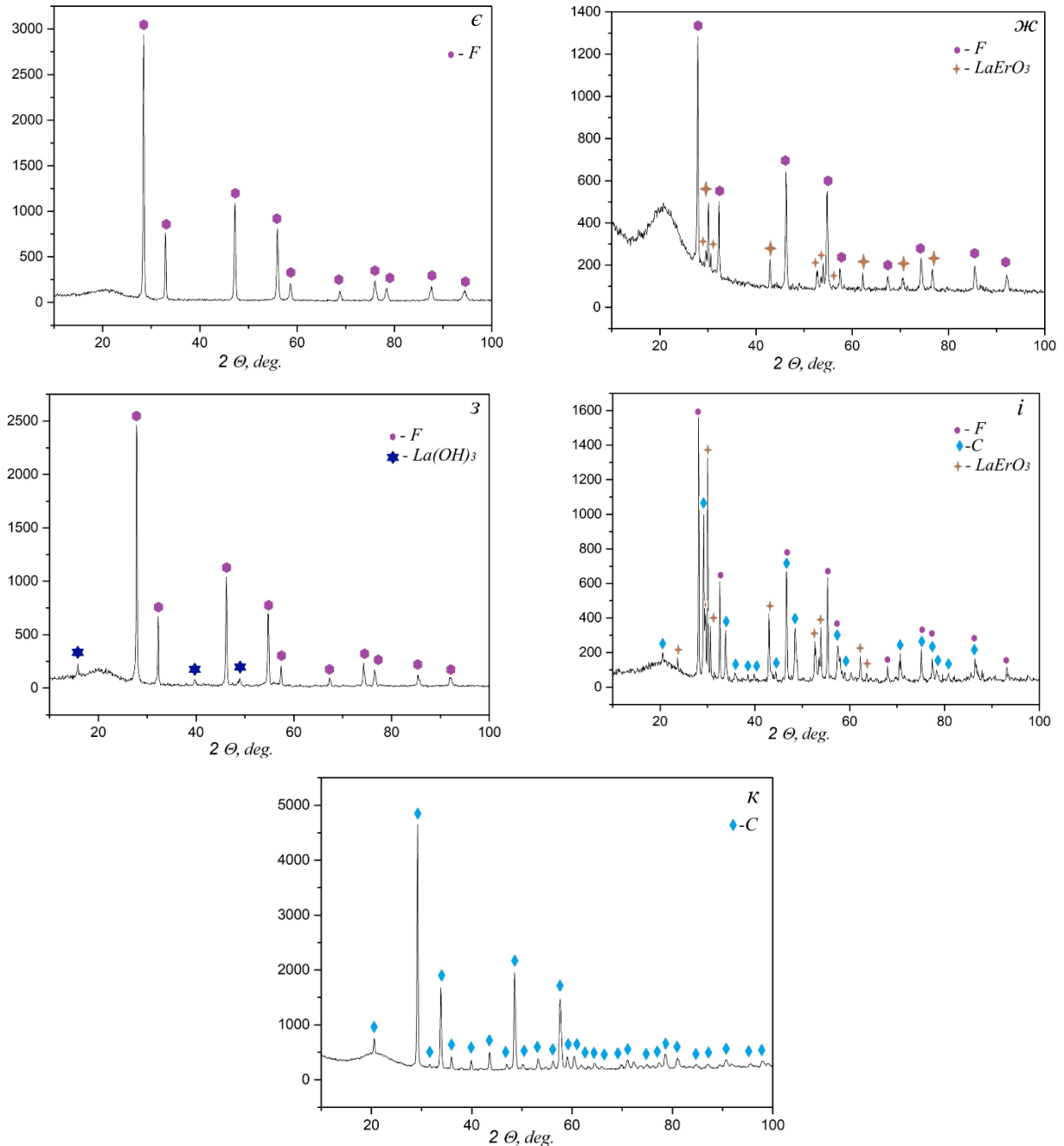


Рис. 7. Дифрактограми зразків після термічної обробки за температури 1100 °C: а - 2.5 мол.% CeO<sub>2</sub>-95 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A\*); б - 15 мол.% CeO<sub>2</sub>-70 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A\*+R+F); в - 1 мол.% CeO<sub>2</sub>-49.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-49.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R+C); г - 2 мол.% CeO<sub>2</sub>-49 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-49 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R+C+F); д - 55 мол.% CeO<sub>2</sub>-22.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-22.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C+F); е - 65 мол.% CeO<sub>2</sub>-17.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-17.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C+F); є - 70 мол.% CeO<sub>2</sub>-15 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F); ж - 42.5 мол.% CeO<sub>2</sub>-42.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F+R); з - 47.5 мол.% CeO<sub>2</sub>-47.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F+ A\*); і - 30 мол.% CeO<sub>2</sub>-30 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R+C+F); к - 7.5 мол.% CeO<sub>2</sub>-7.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-85 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C).

Fig. 7. X-Ray diffractions samples of 1100 °C: а - 2.5 mol % CeO<sub>2</sub>-95 mol % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2.5 mol % Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A\*); б - 15 мол.% CeO<sub>2</sub>-70 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A\*+R+F); в - 1 mol % CeO<sub>2</sub>-49.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-49.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R+C); г - 2 mol % CeO<sub>2</sub>-49 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-49 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R+C+F); д - 55 mol % CeO<sub>2</sub>-22.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-22.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C+F); е - 65 мол.% CeO<sub>2</sub>-17.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-17.5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C+F); є - 70 мол.% CeO<sub>2</sub>-15 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F); ж - 42.5 мол.% CeO<sub>2</sub>-42.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F+R); з - 47.5 мол.% CeO<sub>2</sub>-47.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F+ A\*); і - 30 мол.% CeO<sub>2</sub>-30 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R+C+F); к - 7.5 мол.% CeO<sub>2</sub>-7.5 мол.% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-85 мол.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C).

Як відомо, оксид лантану є перспективною матрицею для створення люмінесцентних матеріалів, а саме апконвекторів [32]. Легування оксиду лантану іонами РЗЕ

підвищує люмінесцентні властивості. Зазначені матеріали вважаються перспективними для застосування в галузі оптоелектронних пристроїв та різних

кольорових дисплеїв. Слід відмітити, що для зазначеної галузі застосування перспективними є матеріали на основі  $\text{La}(\text{OH})_3$ , доповані іонами  $\text{Ln}^{3+}$  [32].

Отже, в ході проведеного експерименту були досліджені фазові рівноваги в системі  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  за температури 1100 °С (в атмосфері повітря) та показана будова ізотермічного перерізу вищезгаданої системи. Визначено, що за умов, застосованих у даному експерименті, нових фаз у дослідженій потрійній системі не утворилося. Переріз містить чотири гомогенні області твердих розчинів: F- $\text{CeO}_2$ , A- $\text{La}_2\text{O}_3$ , C-  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ,  $\text{LaErO}_3$ . Відповідно до правила фаз Гіббса зазначені області межують з дво- та трифазними областями. А саме: двофазні – (A+R), (A+F), (R+F), (R+C), (F+C), трифазні – (A+F+R), (R+F+C).

З отриманих нами попередніх даних [29] встановлено, що після зниження температури від 1500 до 1100 °С в потрійній системі на основі оксидів церію, лантану та ербію відбувається звуження всіх областей гомогенності. За подальшого зниження температури відбуватиметься зменшення кількості фазових полів у зазначеній системі, що пов'язано зі стійкістю упорядкованої фази зі структурою типу перовскиту.

На основі отриманих результатів, а також із аналізу відомостей, що містять літературні джерела, щодо фазових рівноваг у потрійних системах ряду  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3$  виявлено деякі закономірності. Включення  $\text{La}_2\text{O}_3$  та  $\text{Ln}_2\text{O}_3$  в ґратку  $\text{CeO}_2$  призводить до формування дефектних твердих розчинів, у яких зарядова компенсація здійснюється за рахунок утворення кисневих вакансій. Кількість і характер дефектів визначаються співвідношенням компонентів і іонними радіусами лантаноїдів, що зумовлює зміну

параметрів ґратки та фізико-хімічних властивостей матеріалів. Зі зменшенням іонного радіуса катіонів від  $\text{La}^{3+}$  до важких лантаноїдів спостерігається звуження області гомогенності на основі кубічної структури типу флюориту. Для систем церієвої підгрупи область гомогенності F- $\text{CeO}_2$  має більшу протяжність [33–34; 36], під час переходу до іттрієвої підгрупи спостерігається звуження зазначеної області [29; 35; 37–38]. Для систем іттрієвої підгрупи характерними є утворення упорядкованої фази зі структурою типу перовскиту  $\text{LaLnO}_3$ , яка буде стабільною для:  $\text{Y}^{3+}$  до 1600 °С,  $\text{Er}^{3+}$  до 1820 °С,  $\text{Tm}^{3+}$  до 1955 °С,  $\text{Yb}^{3+}$  до 2040 °С [39]. У ході пониження температури будова ізотермічних перерізів буде змінюватися, що пов'язано з поліморфізмом оксидів РЗЕ.

### Висновки

За результатами, отриманими в представленому дослідженні, побудований ізотермічний переріз потрійної діаграми стану системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  (1100 °С). Утворення нових фаз за зазначених умов не спостерігалось. В дослідженій системі утворюються області гомогенності різної протяжності на основі вихідних компонентів, а також упорядкованої фази зі структурою типу перовскиту  $\text{LaErO}_3$ , що має орторомбічну структуру. Встановлено, що розчинність іонів  $\text{Ce}^{4+}$  в зазначеній кристалічній ґратці становить менше 1 мол.%. Визначені параметри елементарних комірок для всіх досліджених зразків. Встановлено, що після додавання іонів лантаноїдів відбувається розширення кубічної кристалічної ґратки зі структурою типу флюориту. Наведена коротка характеристика потрійних систем ряду  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3$ .

Таблиця

**Хімічний і фазовий склади, параметри елементарних комірок фаз системи  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  після термообробки зразків при 1100 °С (за даними РФА)**

Table

#### Phase composition and lattice parameters of $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ samples annealed at 1100 °С (according to XRD)

Хімічний склад, мол.%			Фазовий склад і параметри елементарних комірок, нм		Параметри елементарних комірок фаз, нм				
$\text{CeO}_2$	$\text{La}_2\text{O}_3$	$\text{Er}_2\text{O}_3$			<R>			<C>	<F>
1	2	3	5		a	b	c	a	a
1	2	3	5		6	7	8	9	10
Переріз $\text{CeO}_2$ – (50 мол.% $\text{La}_2\text{O}_3$ – 50мол.% $\text{Er}_2\text{O}_3$ )									
1	49.5	49.5	R +<C>		0.6052	0.5834	0.8446	-	-
2	49	49	R+<F> + <C>		0.6057	0.5850	0.8446	-	-
3	48.5	48.5	R+<F> + <C>		0.6063	0.5880	0.8425	-	-
4	48	48	R+<F> + <C>		0.6051	0.5822	0.8454	-	-

5	47.5	47.5	R+<F> + <C>	0.6056	0.5848	0.8452	-	-
10	45	45	R+<F> + <C>	0.6056	0.5841	0.8452	-	0.5509
15	42.5	42.5	R+<F> + <C>	0.6052	0.5814	0.8488	-	0.5503
20	40	40	R+<F> + <C>	0.6047	0.5781	0.8510	-	0.5512
25	37.5	37.5	R+<F> + <C>	0.6058	0.5803	0.8500	1.0606	0.5505
30	35	35	R+<F> + <C>	0.6046	0.5769	0.8510	1.0605	0.5510
35	32.5	32.5	R+<F> + <C>	0.6048	0.5730	0.8565	1.0609	0.5508
40	30	30	R+<F> + <C>	-	-	-	1.0608	0.5508
50	25	25	<F> + <C>	-	-	-	1.0606	0.5505
55	22.5	22.5	<F> + <C>	-	-	-	1.0604	0.5492
60	20	20	<F> + <C>	-	-	-	1.0582	0.5472
65	17.5	17.5	<F> + <C>	-	-	-	1.0575	0.5464
70	15	15	<F>	-	-	-	-	0.5456
75	12.5	12.5	<F>	-	-	-	-	0.5448
80	10	10	<F>	-	-	-	-	0.5437
85	7.5	7.5	<F>	-	-	-	-	0.5438
90	5	5	<F>	-	-	-	-	0.5427
95	2.5	2.5	<F>	-	-	-	-	0.5414
100	0	0	<F>	-	-	-	-	0.5409
Переріз La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – (50 мол.% CeO <sub>2</sub> – 50 мол.% Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )								
47.5	47.5	5	<F>+<C>	-	-	-	1.0583	0.5417
45	45	10	<F>+<C>	-	-	-	1.0584	0.5451
42.5	42.5	15	<F>+<C>	-	-	-	1.0599	0.5483
40	40	20	<F>+<C>	-	-	-	1.0610	0.5509
37.5	25	37.5	R+<F> + <C>	-	-	-	1.0624	0.5513
35	30	35	R+<F> + <C>	-	-	-	1.0630	0.5511
32.5	35	32.5	R+<F> + <C>	-	-	-	1.0624	0.5513
22.5	55	22.5	<F> + R+<A> (a=0,6466; c = 0,3864)	-	-	-	-	0.5572
17.5	65	17.5	<F> + R+<A> (a=0,6494; c = 0,3825)	-	-	-	-	0.5572
15	70	15	<F> + R+<A> (a=0,6481; c = 0,3828)	-	-	-	-	0.5570
12.5	75	12.5	<F> + R+<A> (a=0,6488; c = 0,3819)	-	-	-	-	0.5573
10	80	10	<F> + R+<A> (a=0,6488; c = 0,3813)	-	-	-	-	-
5	90	5	<A> (a=0,6497; c = 0,3832)	-	-	-	-	-
2,5	95	2,5	<A> (a=0,6509; c = 0,3839)	-	-	-	-	-
Переріз Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – (50 мол.% CeO <sub>2</sub> – 50 мол.% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )								
1	1	98	<C>	-	1.0534	-	-	-
2	2	96	<C>	-	1.0555	-	-	-
5	5	90	<C>	-	1.0573	-	-	-
7.5	7.5	85	<C>	-	1.0612	-	-	-
10	10	80	R+<F> + <C>	-	1.0612	-	-	-
12.5	12.5	75	R+<F> + <C>	-	1.0632	-	-	-
15	15	70	R+<F> + <C>	-	1.0617	-	-	-
17.5	17.5	65	R+<F> + <C>	-	1.0644	-	-	-
20	20	60	R+<F> + <C>	-	1.0638	-	-	-
22.5	22.5	55	R+<F> + <C>	-	1.0634	-	-	-
25	25	50	R+<F> + <C>	-	1.0631	-	-	-
27.5	27.5	45	R+<F> + <C>	-	1.0634	-	-	-
30	30	40	R+<F> + <C>	-	1.0635	-	-	-
32.5	32.5	35	R+<F> + <C>	-	1.0635	-	-	-
35	35	30	R+<F> + <C>	-	1.0634	-	-	-
37.5	37.5	25	R+<F> + <C>	-	-	-	-	-
42.5	42.5	15	-	-	-	-	-	-
47.5	47.5	5	-	-	-	-	-	-

\*) За використаних умов термообробки (t = 1100 °C, на повітрі) гексагональна А-модифікація La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не зберігається, замість неї спостерігали утворення гексагональної модифікації La(OH)<sub>3</sub>. Позначення фаз: <C> – тверді розчини на основі кубічної модифікації Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <F> – тверді розчини на основі кубічної модифікації зі структурою типу флюориту CeO<sub>2</sub>, R – упорядкована фаза зі структурою типу перовскиту LaErO<sub>3</sub>.

\*) At given conditions (at 1100°C) the hexagonal modification of A-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> unquenchable and hexagonal modification of La(OH)<sub>3</sub> was observed instead. Designation of phases: <A\*>, solid solutions based on hexagonal modification of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <F>, solid solutions based on cubic modification with fluorite-type structure of CeO<sub>2</sub>, <C>, solid solutions based on cubic modification of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, R - ordered phase with a perovskite-type structure, LaErO<sub>3</sub>.

## References

- [1] Balaraman, S., Iruson, B., Krishnmoorthy, S., Elayaperumal, M., Sangaraju, S. (2023) Synthesis of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> blended CeO<sub>2</sub> nanocomposites and investigation of their biomedical applications. *Chemical Physics Impact*, 6, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2023.100167>
- [2] Monroy-Ramirez, H. Ch., Salto-Sevilla, J., Arceo-Orozco, S., Caloca-Camarena, F., Flores-Pena, R., Lopez-Mena, E., Galicia-Moreno, M., Armendariz-Borunda, J. (2025) Cerium oxide nanoparticles: a promising nanotherapy approach for chronic degenerative diseases. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20, 1-22. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00295-8>
- [3] Abbasi, R., Shineh, G., Mobaraki, M. (2023) Structural parameters of nanoparticles affecting their toxicity for biomedical applications: a review. *J. Nanopart Res*, 25, 43. <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05690-w>
- [4] Abel, E.D., Gloyn, A.L., Evans-Molina, C., Joseph, J.J., Misra, S., Pajvani, U.B., Simcox, J., Susztak, K., Drucker, D.J. (2024) Diabetes mellitus-progress and opportunities in the evolving epidemic. *Cell*, 187(15), 3789–3820. <https://doi.org/10.1016/j.metop.2021.100151>
- [5] Mustafa, K., Raheel, M., Abro, I. A., Muskan, S., Rizvi, Z., Ma, J., Nazeer, F., GaoShizhen, Zh L., Ma Zh. (2026) Structural properties of CeO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub>-based composite oxide materials for passive daytime radiative cooling. *Inorganic Chemistry Communications*, 183, 115791. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115791>
- [6] Yoon, S., Kim, J., An, K. (2025) Strategies for oxygen vacancy formation in CeO<sub>2</sub>-based materials for thermal catalysis. *Chem Catalysis*, 5(7), 101423. <https://doi.org/10.1016/j.checat.2025.101423>
- [7] Wang, K., Yang, J., An, B., Zhang, Q., Song, D., Wang, Y. (2024) Mechanical and electrical properties Ge and Gd co-doped CeO<sub>2</sub>-based electrolyte for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 50, 37698. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.131>
- [8] Waghmare, A. M., Gaikar, P. S., Cui, Ch., Kim, J. M., Bulakhe, R. N., Nagare, B. J. (2026) A review of developments and challenges in advanced anode materials for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 663, 238853. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238853>
- [9] Xu, Y., Xue, Y., H, Li, Meng B., Liu Y., Li L., W.Wei, H.Wang, Dong Sh. (2025) One stone three birds: hydrophobic, self-healing and UV-resistant polyurethane composite coating based on FPANI@CeO<sub>2</sub> for anti-corrosion applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 199, 109236. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109236>
- [10] Wang, H., Hu, H., Zhou Ch., Wei W., Fan B., Wang H., Dong, Sh. (2023) Fabrication of self-healable superhydrophobic polyurethane coating based on functional CeO<sub>2</sub> nanoparticles for long-term anti-corrosion application. *Progress in Organic Coatings*, 183, 107799. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107799>
- [11] Periasamy, P.A., Saravanakumar, B., William, J., Karthikeyan, N., Vadivel, S. (2024) Breaking barriers of CeO<sub>2</sub> in energy storage: Hydrothermal energized preparation of mesoporous carbon added CeO<sub>2</sub> nanohybrids as supercapacitor electrodes. *Electrochimica Acta*, 507, 145144. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145144>
- [12] Ghasali, E., Zhang, R., Sadiqa, A., Saleem, Raza, Jie, L., Landarani-Isfahani A., Orooji Y., Karimi-Maleh H. (2025) Conventional, microwave and spark plasma sintering of high entropy rare earth ceramic: La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Alloys and Compounds*, 185670. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.185670>
- [13] Kirkgeçit6 R., Torun, H. Öz. (2020) Synthesis and characterization of CeLaMO<sub>2</sub> (M: Sm, Gd, Dy) compounds for solid ceramic electrolytes. *Processing and Application of Ceramics*, 314, 14.
- [14] Stojmenovi M. Niši' N., Žuni' M., Basoli F., Gulicovki J., Ristovi' I., Kragovi' M. (2022) Development of a new system of solid ionic conductors based on multi-doped ceria for application in IT-SOFCs. *Processing and Application of Ceramics*, 391, 16. <https://doi.org/10.2298/PAC2204391S>
- [15] Sibieude, F., Schiffmacher, G., Caro, P. (1978) Étude au microscope électronique de structures modulées dans les régions système La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub> riches en La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J. Solid State Chemistry*, 23(3-4), 367.
- [16] Andrievskaya, E. R., Kornienko, O. A., Sameljuk, A. V., Sayir, A. (2011) Phase relation studies in the CeO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system at 1100-1500 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 1277. [doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.05.024](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.05.024)
- [17] Genel, F., Kucich, P. L., Minichelli, D. (2001) Solid solutions in ternary phase diagram CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using pyrolytic precursors. *British Ceramic Transactions*, 100(4), 155–158.
- [18] Andrievskaya, E. R., Gusarov, V. V., Kornienko, O. A., Sameljuk, A. V. (2012) Interaction of ceria and erbia at 1500 °C. *Proc. of Berezny Institute for refractories*, 112, 133–140.
- [19] Mandal, B. P., Roy, M., Grover, V., Tyagi, A. (2008) X-ray diffraction, μμ-Raman spectroscopic studies on CeO<sub>2</sub>-RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (RE=Ho, Er) systems: Observation of parasitic phases. *Journal of Applied Physics*. 103, 506.
- [20] Andrievska, O. R., Kornienko, O. A., Bykov, O. I., Sameliuk, A. V., Bohatyriova, Z. D. (2020) Interaction of ceria and erbia in air within temperature range 1500 – 600 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(8), 3098. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.002>
- [21] Schneider S. I., Roth R. S. (1960) Phase Equilibria in Systems Involving the Rare-Earth Oxides. Part II. Solid State Reactions in Trivalent Rare-Earth Oxide Systems. *Journal of Res. National Bureau of Standards-A. Physics and Chem.* 64(4), 322.
- [22] Traverse, J.P. (1971). *Etude du Polymorphisme des sesquioxides de terres rares*. These. Grenoble.

- [23] Coutures, J., Rouanet, A., Verges, R., Foex, M. (1976) Etude a haute temperature des systems formes par le sesquioxyde de lanthane et les sesquioxides de lanthanides. I. Diagrammes de phases ( $1400\text{ }^{\circ}\text{C} < T < T$  Liquide). *Journal Solid State Chem.* 17(1-2), 172.
- [24] Kornienko, O.A., Andrievskaya, E.R., Samelyuk, A.V., (2018) Interactions between oxides lanthanum and erbium at 1500 C. *Ukrainian Chemistry Journal*, 84(6), 95.
- [25] Zinkevich M. (2007) Thermodynamics of rare earth sesquioxides. *Progress Material Science*, 52, 647.
- [26] Zhang Y. (2016). *Thermodynamic Properties of Rare Earth Sesquioxides*. Supervisor Prof In-ho Jung McGill University, Montreal, QC, Canada.
- [27] Kornienko, O.A., Chudinovych, O.V., Bykov, A.I., Samelyuk, A.V., Andrievskaya, E.R. (2019) Phase equilibria in the  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  system in the temperature range 1100–1500°C. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 58(1-2), 89
- [28] Lopato, L.M., Shevchenko, A.V., Kushchevsky, A.E., Tresvyatsky, S.G. (1974). Polimorfnye prevrashcheniya okislov redkozemel'nykh elementov pri vysokikh temperaturakh. *Izv. Akad. Nauk. Neorgan. Mater.*, 10(8), 1481–1487.
- [29] Kornienko, O.A., Sameljuk, A.V., Bykov, O.I., Yurchenko, Yu.V., Barshchevskaya A.K. (2020) Phase relation studies in the  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  system at 1500°C. *Journal of the European Ceramic Society*, 40, 4184. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.042>
- [30] Materazzi, S. (2008) Coordination Compounds and Inorganics. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, 5, 478.
- [31] Andrievskaya, E. R. (2010) *Phase Equilibria in the systems of Hafnia, Yttria with rare-earth Oxides*. Scientific book Project, Kiev, Naukova Dumka.
- [32] Zhang, X., Yang, P., Wang, D., Xu, J., Li, Ch., Gai, Sh., Lin, J. (2012)  $\text{La}(\text{OH})_3\text{:Ln}^{3+}$  and  $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Ln}^{3+}$  (Ln = Yb/Er, Yb/Tm, Yb/Ho) Microrods: Synthesis and Up-conversion Luminescence Properties. *Cryst. Growth Des.* 12(1), 306–312. <https://doi.org/10.1021/cg201091u>
- [33] Korniienko, O.A., Bykov, O.I., Sameljuk, A.V., Bataiev, Yu. M., Yushkevych, S.V. (2021) Phase equilibria in the  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$  system at 1250 and 1500 °C. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 3(4), 17 <https://doi.org/10.34256/irjmt2143>
- [34] Kornienko, O., Bykov, O., Sameliuka, Yurchenko, Y. (2020) Phase relation studies in the  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$  system at 1250 °C. *Ukrainian Chemistry Journal*, 86(3), 35. <https://doi.org/10.33609/0041-6045.86.3.2020.35-47>
- [35] Korniienko, O.A., Yushkevych, S.V., Bykov, O.I., Samelyuk, A.V., Bataiev, Yu. M., Zamula, M.V. (2022). Phase equilibrium in binary  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Dy}_2\text{O}_3$  and ternary  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Dy}_2\text{O}_3$  systems. *Journal of the European Ceramic Society*. 42. 5820–5830. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.045>
- [36] Korniienko, O.A., Andrievskaya, O.R., Bykov, O.I., Urbanovich, V.S., Yushkevych, S.V., Spasonova L.M. (2021) Phase relation studies in the  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$  system at 1500°C *Powder Metall Met Ceram*, 60, 97. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00219-z>
- [37] Kornienko, O., Yushkevych, S., Bykov, O., Samelyuk, A., Bataiev, Y. (2022) Phase Equilibrium in the Ternary  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$  System at 1500 °C. *Solid State Phenomena*. 331, 159 <https://doi.org/10.4028/p-4000g3>
- [38] Korniienko, O.A., Yushkevych, S.V., Bykov, O.I., Samelyuk, A.V., Bataiev, Yu. M., Zamula, M.V. (2023) Phase relation studies in the  $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Ho}_2\text{O}_3$  system at temperature of 1500 °C *Materials Today Communications*, 35, 105789 <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105789>
- [39] Kolesnichenko, V., Yurchenko, Y. V., Korniienko, O. A., Zamula, M.V., Samelyuk, A.V., Shyrokov, O.V., Tomila, T.V., Ragulya, A.V., Kotko, A. (2023) Spark plasma sintering of a ceramic material with a  $\text{LaLuO}_3$  perovskite-type structure. *Nano Hybrids and Composites*, 43, 1.