

УДК 546-31:621:641:662:822 <https://doi.org/10.15407/materials2025.10-11.066>

Прогноз будови поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$

Я. С. Тищенко*, С. М. Лакиза, В. П. Редько, О. В. Дуднік

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
Україна, 03142, Київ, вул. Омеляна Пріцака, 3

*E-mail: tyshjana@ukr.net

Вперше прогнозовано та наведено будову проекції поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ на площину концентраційного трикутника. Найвищою прогнозованою температурою в системі є 2360°C — температура плавлення чистого Gd_2O_3 , а найнижчою — 1500°C — температура трифазної евтектики $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7 + \text{Al}_2\text{TiO}_5 + \text{TiO}_2$. Нових фаз у системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ не прогнозовано. Оскільки взаємодія в системі має в основному евтектичний характер, це дозволяє отримати високотемпературні конструкційні та функціональні композиційні матеріали на основі спрямовано закристалізованих дво- та трифазних евтектик, а також вогнетривкі керамічні матеріали.

Ключові слова: Al_2O_3 , TiO_2 , Gd_2O_3 , проекція поверхні ліквідуса, діаграма стану.

Вступ

На основі системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ можливе створення ряду різних за призначенням матеріалів. Це, перш за все, високотемпературні конструкційні композиційні матеріали на основі спрямовано закристалізованих дво- та трифазних евтектик, матеріали для твердих електролітів, біочутливі датчики кисню [1], носії каталізаторів [2], фероелектричні/діелектричні компоненти пристроїв [3]. Для їх успішного синтезу і використання необхідно знати характер фазових рівноваг у системі, який відображає діаграма стану.

У системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$ існує сполука Al_2TiO_5 (АТ, тіаліт), яка має унікальні властивості, зокрема аномально низький коефіцієнт термічного розширення, порівняний з таким для SiO_2 [4]. Це дозволяє створювати на її основі ряд матеріалів для автомобільної промисловості, в'язку кераміку [5], носії каталізаторів, високостійку до зношування корозійностійку кераміку [6] та інш. Низька здатність до спікання та невисока міцність тіаліту роблять його перспективним для створення високотемпературних композиційних матеріалів.

У системах $\text{TiO}_2\text{—Ln}(\text{Y})_2\text{O}_3$ виявлено ряд сполук, але найбільший інтерес привертають сполуки зі структурою типу пірохлору $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$.

© Я. С. Тищенко, С. М. Лакиза, В. П. Редько, О. В. Дуднік, 2025

Титанати лантаноїдів ($\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) знайшли широке застосування як фотокаталізатори, оптичні матеріали [7, 8], компоненти сегнетоелектричних пристроїв, магнітні матеріали тощо. Також фотокаталізатори $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Gd}, \text{Nd}$) демонструють прийнятну активність для розщеплення води [9–12]. Сполуки $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (GT_2), $\text{Er}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ та $\text{Lu}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ перспективні для застосування як біочутливі датчики [1].

Для створення наукової бази та успішного синтезу і використання нових багатокомпонентних матеріалів у широкому діапазоні температур і концентрацій необхідно знати діаграми стану відповідних систем. Саме тому отримання такої інформації є актуальним.

Результати та їх обговорення

Авторами вивчено взаємодію в системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$, виявлено відсутність потрібних сполук та переважно евтектичний характер взаємодії в ній [13]. Цей факт зробив можливим пошук та прогноз координат нових дво- та трифазних евтектик для спрямованої кристалізації і одержання нових високотемпературних конструкційних матеріалів у системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$.

У роботі [14] автори експериментально побудували ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ при 1400 °С. Нових фаз, а також помітної розчинності третього компонента в фазах обмежуючих подвійних систем не виявлено. Подвійні обмежуючі системи вивчено достатньо і побудовано їх діаграми стану (рис. 1). На діаграмі стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$ не показано поліморфне перетворення $\alpha \rightleftharpoons \beta$ Al_2TiO_5 при 1820 °С, оскільки після першої згадки про нього [15] у друкованих джерелах експериментально не підтверджено його існування.

Поверхню ліквідуса потрібної системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ не досліджено.

Мета роботи — створити прогноз фазових рівноваг у процесі кристалізації в системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ та на його основі побудувати проекцію поверхні ліквідуса на площину концентраційного трикутника.

За результатами прогнозу побудовано проекцію поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ на площину концентраційного трикутника (рис. 2). Прогнозовано температури неваріантних рівноваг та фазовий склад зразків закристалізованих фаз у сплавах системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$. Прогноз координат неваріантних рівноваг наведено у таблиці.

Потрібних сполук у системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ не передбачається (рис. 2). Прогноз будови поверхні ліквідуса зроблено на основі триангуляції системи.

Побудова ізотермічного перерізу діаграми стану при 1400 °С [14] дозволяє стверджувати, що квазібінарними перерізами системи, які її триангулюють, слід вважати перерізи $\text{GT}_2\text{—GdAlO}_3$ (GA), $\text{GT}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ та $\text{GT}_2\text{—AT}$. Ці перерізи ділять концентраційний трикутник на чотири вторинних трикутники, в кожному з яких повинна знаходитись трифазна евтектика. На цих перерізах повинні знаходитись неваріантні евтектичні точки, координати яких прогнозовано на рис. 2 та в таблиці. Через ці точки проходять моноваріантні криві, які розділяють відповідні поля первинної кристалізації евтектичних фаз.

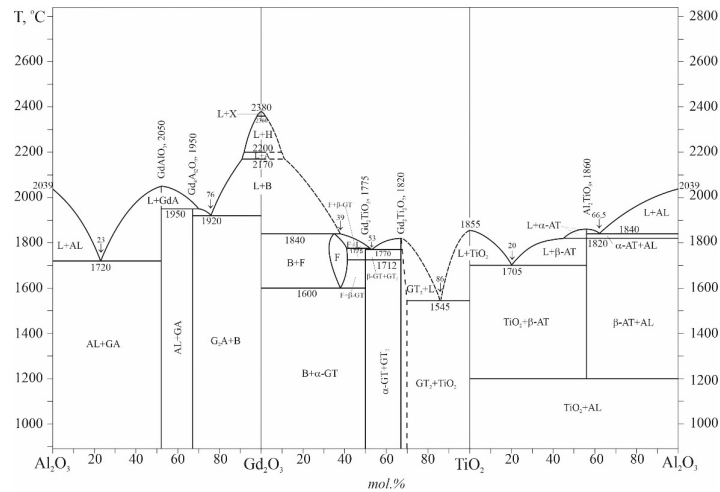


Рис. 1. Подвійні системи, що обмежують потрійну $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ [14].

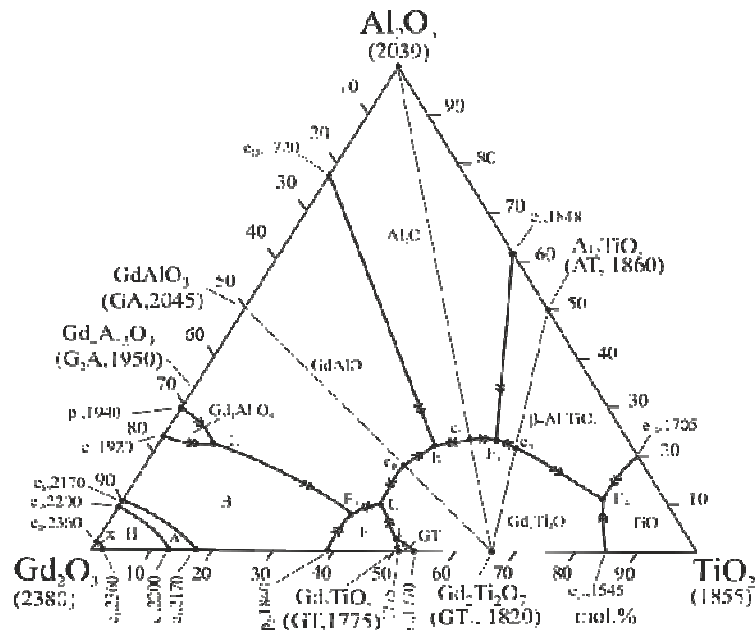


Рис. 2. Прогноз проекції поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ на площину концентраційного трикутника.

Прогнозування координат квазіподвійних евтектичних точок на квазібінарних перерізах системи дозволило спрогнозувати положення та координати трифазних евтектик у вторинних трикутниках системи (рис. 2, таблиця) і проекцію поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$.

Прогнозована поверхня ліквідуса діаграми стану системи складається з дванадцяти полів первинної кристалізації фаз на основі TiO_2 , області твердих розчинів з флюоритоподібною структурою F, областей кристалічних модифікацій Gd_2O_3 на основі моноклінної форми B, високотемпературної кубічної форми X, високотемпературної гексагональної

Координати прогнозованих неваріантних точок рідини діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$

Точки рівноваги	Температура, °C	Склад, % (мол.)			Неваріантні рівноваги
		Al_2O_3	TiO_2	Gd_2O_3	
e_{11}	1790	17	44	39	$L \rightleftharpoons \text{GT}_2 + \text{GA}$
e_{12}	1785	21	60	19	$L \rightleftharpoons \text{GT}_2 + \text{AT}$
e_{13}	1780	23	51	26	$L \rightleftharpoons \text{GT}_2 + \text{AL}$
U_1	1900	22	10	68	$L + \text{G}_2\text{A} \rightleftharpoons \text{B} + \text{GA}$
U_2	1695	3	49	48	$L + \text{GT} \rightleftharpoons \text{F} + \text{GT}_2$
U_3	1680	10	43	47	$L + \text{GT}_2 \rightleftharpoons \text{F} + \text{GA}$
E_1	1750	23	55	22	$L \rightleftharpoons \text{GT}_2 + \text{AL} + \text{AT}$
E_2	1700	22	46	32	$L \rightleftharpoons \text{GA} + \text{AL} + \text{GT}_2$
E_3	1665	8	39	53	$L \rightleftharpoons \text{B} + \text{F} + \text{GA}$
E_4	1500	11	79	10	$L \rightleftharpoons \text{GT}_2 + \text{AT} + \text{TiO}_2$

форми Н та низькотемпературної гексагональної форми А, фаз Al_2TiO_5 (AT), Al_2O_3 (AL), GdAlO_3 (GA), $\text{Gd}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ (G_2A), Gd_2TiO_5 (GT) та $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (GT_2).

Поле первинної кристалізації фаз на основі TiO_2 обмежене огинаючою $e_{14}E_4e_{15}$. Координати потрібної евтектичної точки E_4 , в якій проходить неваріантна конгруентна реакція $L \rightleftharpoons \text{AT} + \text{TiO}_2 + \text{GT}_2$, за прогнозом становлять 11% (мол.) $\text{Al}_2\text{O}_3 + 79\% \text{TiO}_2 + 10\% \text{Gd}_2\text{O}_3$, 1500 °C (таблиця, рис. 2).

Поле первинної кристалізації фази AT на поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ (рис. 2) обмежене огинаючою $e_8E_1e_{10}E_4e_{14}$.

Область первинної кристалізації фази AL обмежена огинаючою $e_{13}E_2e_{11}E_1e_8$. Ця область витягнута вздовж сторони $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$ концентраційного трикутника $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$. Координати потрібної евтектичної точки E_1 , в якій проходить неваріантна конгруентна реакція $L \rightleftharpoons \text{AT} + \text{GT}_2 + \text{AL}$, прогнозовані при 23% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 55\% \text{TiO}_2 + 22\% \text{Gd}_2\text{O}_3$, 1750 °C (таблиця, рис. 2). Координати потрібної евтектичної точки E_2 , в якій проходить неваріантна конгруентна реакція $L \rightleftharpoons \text{GA} + \text{GT}_2 + \text{AL}$, прогнозовані при 22% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 46\% \text{TiO}_2 + 32\% \text{Gd}_2\text{O}_3$, 1700 °C (таблиця, рис. 2).

Область первинної кристалізації фази GA обмежена огинаючою $p_1U_1E_3U_3e_9E_2e_{13}$ і прилягає до сторони $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Gd}_2\text{O}_3$ концентраційного трикутника $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$. Координати потрібної евтектичної точки E_3 , в якій проходить неваріантна конгруентна реакція $L \rightleftharpoons \text{B} + \text{GA} + \text{F}$, прогнозовані при 8% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 39\% \text{TiO}_2 + 53\% \text{Gd}_2\text{O}_3$, 1665 °C (таблиця, рис. 2).

Невелику площу на поверхні ліквідуса діаграми стану займає поле первинної кристалізації фази $\text{Gd}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ (G_2A) (рис. 2), яка у подвійній обмежуючій системі утворюється за перитектичною реакцією $L + \text{GA} \rightleftharpoons \text{G}_2\text{A}$ і обмежена огинаючою $p_1U_1e_7$. Координати перехідної точки U_1 , в якій проходить неваріантна інконгруентна реакція $L + \text{G}_2\text{A} \rightleftharpoons \text{B} + \text{GA}$, прогнозовані при 22% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{TiO}_2 + 68\% \text{Gd}_2\text{O}_3$, 1900 °C (таблиця, рис. 2).

*Тут і надалі концентрації подано у % (мол.).

Найменшу площу на поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ займає поле первинної кристалізації фази Gd_2TiO_5 (GT) (рис. 2), яке обмежене огинаючою $p_3U_2e_{12}$. Координати точки перехідної реакції U_2 ($L + GT \rightleftharpoons F + GT_2$) прогнозовано перетином ліній моноваріантних рівноваг $e_{13}U_2$ та p_3U_2 .

Частину площі поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ займають поля первинної кристалізації фаз на основі B, A, H та X модифікацій компонента Gd_2O_3 (рис. 2), які обмежені огинаючою $e_7U_1E_3p_2$. Ці чотири поля розділені лініями моноваріантних рівноваг e_6e_5 , e_4e_3 та e_2e_1 .

За прогнозом, максимальна температура ліквідуса в системі становить 2360°C — температура плавлення чистого Gd_2O_3 , а мінімальна температура ліквідуса — 1500°C і відповідає температурі плавлення трифазної евтектики E_4 . Нових фаз у системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ не прогнозовано. Оскільки прогнозована взаємодія в потрібній системі має в основному евтектичний характер, це дозволяє отримувати як високотемпературні конструкційні та функціональні композиційні матеріали на основі спрямовано закристалізованих дво- та трифазних евтектик, так і вогнетривкі керамічні матеріали.

Висновки

Вперше зроблено прогноз будови поверхні ліквідуса діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ на площину концентраційного трикутника. Найвищою температурою в системі є 2360°C — температура плавлення чистого Gd_2O_3 , а найнижчою — 1500°C — температура потрібної евтектики $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7 + \text{Al}_2\text{TiO}_5 + \text{TiO}_2$. На основі прогнозу встановлено наявність чотирьох чотирифазних неваріантних евтектичних рівноваг, трьох чотирифазних неваріантних рівноваг перехідного типу, а також трьох трифазних неваріантних евтектичних рівноваг з участю рідини.

Прогноз будови ліквідуса системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ дозволяє зробити висновки про те, що ця система перспективна для створення високотемпературних конструкційних композиційних матеріалів на основі спрямовано закристалізованих дво- та трифазних евтектик, вогнетривких керамічних матеріалів та широкого спектра функціональних матеріалів.

Одержаний прогноз є фактично робочою моделлю діаграми стану дослідженої системи, що дозволяє науково обґрунтовано вибрати склади для експериментальної перевірки будови поверхні ліквідуса.

Список літератури

1. Pana T.-M., Liao P.-Y., Chang K.-Y., Chi L. Structural and sensing characteristics of $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, Er_2TiO_5 and $\text{Lu}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ sensing membrane electrolyte-insulator-semiconductor for bio-sensing applications. *Electrochimica Acta*. 2013. Vol. 89. P. 798—806. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.10.099>
2. Christopher J., Swamy C.S. Surface characterization and catalytic activity of $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{Y, Sm, Gd and Tb}$). *Mater. Sci.* 1991. Vol. 26. P. 4966—4970. <https://doi.org/10.1007/BF00549878>
3. Hayun S., Navrotsky A. Formation enthalpies and heat capacities of rare earth titanates: RE_2TiO_5 ($\text{RE} = \text{La, Nd and Gd}$). *Solid State Chem.* 2012. Vol. 187. P. 70—74. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2011.12.033>
4. Maitra S., Bhattacharya S., Sil G., Mondal S. Aluminium titanate ceramics-A review. *Indian Ceram. Soc.* 2002. Vol. 61. P. 69—98. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2002.10800029>

5. Cano I.G., Dosta S., Miguuel J.R., Guilemany J.M. Production and characterization of metastable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$ ceramic materials. *J. Mater. Sci.* 2007. Vol. 42. P. 9331—9335. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1871-8>
6. Zang F.X., Manoun B., Saxena S.K. Pressure-induced order-disorder transitions in pyrochlore $\text{RE}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (RE = Y, Gd). *Mater. Lett.* 2006. Vol. 60. P. 2773—2776. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.095>
7. Wang Z., Zhou G., Jiang D., Wang S. Recent development of $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ system transparent ceramics. *J. Adv. Ceram.* 2018. Vol. 7. P. 289—306. <https://doi.org/10.1007/s40145-018-0287-z>
8. Mahapatra A., Subudhi S., Swain S., Sahu R., Negi R.R., Samanta B., Kumar P. Electrical and optical properties of yttrium titanate thin films synthesized by sol-gel technique. *Integrated Ferroelectrics*. 2019. Vol. 203. P. 43—51. <https://doi.org/10.1080/10584587.2019.1674953>
9. Elbarhoumi H., Khliissa F., Ben Rejeb H., Martin I.R., Garbout A. Structural and luminescence properties of Dy^{3+} ion-substituted $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (Ln = Gd, Y) pyrochlore phosphors for white light applications. *J. Luminescence*. 2025. Vol. 280. P. 121116. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2025.121116>
10. Joseph Lyjo K., Dayas K.R., Damodar S., Bindu K., Krishnankutty K., Nampoori V.P.N., Radhakrishnan P. Photoluminescence studies on rare earth titanates prepared by self-propagating high temperature synthesis method, *Spectrochimica Acta. Part A. Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2008. Vol. 71. P. 1281—1285. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.03.030>
11. Xue H., Zhang Y., Xu J., Liu X., Qian Q., Xiao L., Chen Q. Facile one-pot synthesis of porous $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (Ln = Nd, Gd, Er) with photocatalytic degradation performance for methyl orange. *Catalysis Communications*. 2014. Vol. 51. P. 72—76. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2014.03.017>
12. Abe R., Higashi M., Sayama K., Abe Y., Sugihara H. Photocatalytic activity of R_3MO_7 and $\text{R}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (R = Y, Gd, La; M = Nb, Ta) for water splitting in to H_2 and O_2 . *J. Phys. Chem. B*. 2006. Vol. 110. P. 2219—2226. <https://doi.org/10.1021/jp0552933>
13. Tyshchenko Ja.S., Lakiza S.N., Red'ko V.P., Dudnik O.V. Isothermal sections of the phase diagram of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$ system at 1400 and 1550 °C. *Powder. Metall. Met. Ceram.* 2017. Vol. 55. P. 698—706. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9857-9>
14. Tyshchenko Ya.S., Lakiza S.M., Red'ko V.P., Dudnik O.V. Isothermal section of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ phase diagram at 1400 °C. *Powder. Metall. Met. Ceram.* 2017. Vol. 56. P. 88—93. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9875-7>
15. Lang S., Fillmore C., Maxwell L. The system beryllia-alumina-titania: phase relations and general physical properties of three-component porcelains. *J. Res. Nat. Bur. Stand.* 1952. Vol. 48. P. 301—321. <https://doi.org/10.6028/jres.048.038>

References

1. Pana, T.-M., Liao, P.-Y., Chang, K.-Y., Chi, L. (2013). Structural and sensing characteristics of $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, $\text{Er}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ and $\text{Lu}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ sensing membrane electrolyte-insulator-semiconductor for bio-sensing applications. *Electrochimica Acta*, Vol. 89, pp. 798—806. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.10.099>
2. Christopher, J., Swamy, C. S. (1991). Surface characterization and catalytic activity of $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (Ln = Y, Sm, Gd and Tb). *Mater. Sci.*, Vol. 26, pp. 4966—4970. <https://doi.org/10.1007/BF00549878>
3. Hayun, S., Navrotsky, A. (2012). Formation enthalpies and heat capacities of rare earth titanates: $\text{RE}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (RE = La, Nd and Gd). *Solid State Chem.*, Vol. 187, pp. 70—74. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2011.12.033>
4. Maitra, S., Bhattacharya, S., Sil, G., Mondal, S. (2002). Aluminium titanate ceramics - A review. *Indian Ceram. Soc.*, Vol. 61, pp. 69—98. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2002.10800029>
5. Cano, I. G., Dosta S., Miguuel, J. R., Guilemany, J. M. (2007). Production and characterization of metastable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$ ceramic materials. *J. Mater. Sci.*, Vol. 42, pp. 9331—9335. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1871-8>
6. Zang, F. X., Manoun, B., Saxena, S. K. (2006). Pressure-induced order-disorder transitions in pyrochlore $\text{RE}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (RE = Y, Gd). *Mater. Lett.*, Vol. 60, pp. 2773—2776. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.095>
7. Wang, Z., Zhou, G., Jiang, D., Wang, S. (2018). Recent development of $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ system transparent ceramics. *J. Adv. Ceram.*, Vol. 7, pp. 289—306. <https://doi.org/10.1007/s40145-018-0287-z>

8. Mahapatra, A., Subudhi, S., Swain, S., Sahu, R., Negi, R. R., Samanta, B., Kumar, P. (2019). Electrical and optical properties of yttrium titanate thin films synthesized by sol-gel technique. *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 203, pp. 43—51. <https://doi.org/10.1080/10584587.2019.1674953>
9. Elbarhoumi, H., Khliissa, F., Ben Rejeb, H., Martin, I. R., Garbout, A. (2025). Structural and luminescence properties of Dy^{3+} ion-substituted $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Y}$) pyrochlore phosphors for white light applications. *J. Luminescence*, Vol. 280, pp. 121116. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2025.121116>
10. Joseph, Lyjo, K., Dayas, K. R., Damodar, S., Bindu, K., Krishnankutty, K., Nampoori, V. P. N., Radhakrishnan, P. (2008). Photoluminescence studies on rare earth titanates prepared by self-propagating high temperature synthesis method, *Spectrochimica Acta — Part A. Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 71, pp. 1281—128515. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.03.030>
11. Xue, H., Zhang, Y., Xu, J., Liu, X., Qian, Q., Xiao, L., Chen, Q. (2014). Facile one-pot synthesis of porous $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Gd}, \text{Er}$) with photocatalytic degradation performance for methyl orange. *Catalysis Communications*, Vol. 51, pp. 72—76. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2014.03.017>
12. Abe, R., Higashi, M., Sayama, K., Abe, Y., Sugihara, H. (2006). Photocatalytic activity of R_3MO_7 and $\text{R}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{R} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{La}; \text{M} = \text{Nb}, \text{Ta}$) for water splitting into H_2 and O_2 . *J. Phys. Chem. B*, Vol. 110, pp. 2219—2226. <https://doi.org/10.1021/jp0552933>
13. Tyshchenko, Ja. S., Lakiza, S. N., Red'ko, V. P., Dudnik, O. V. (2017). Isothermal sections of the phase diagram of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$ system at 1400 and 1550 °C. *Powder. Metall. Met. Ceram.*, Vol. 55, pp. 698—706. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9857-9>
14. Tishchenko, Ya. S., Lakiza, S. M., Red'ko, V. P., Dudnik, O. V. (2017). Isothermal section of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ phase diagram at 1400 °C. *Powder. Metall. Met. Ceram.*, Vol. 56, pp. 88—93. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9875-7>
15. Lang, S., Fillmore, C., Maxwell, L. (1952). The system beryllia-alumina-titania: Phase relations and general physical properties of three-component porcelains. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, Vol. 48, pp. 301—321. <https://doi.org/10.6028/jres.048.038>

Tentative construction of the liquidus surface of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ phase diagram

Ya. S. Tyshshenko*, S. M. Lakiza, V. P. Red'ko, E. V. Dudnik

I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv

*E-mail: tyshjana@ukr.net

ID ORCID: 0009-0001-7680-4414

One of the main development directions of the modern materials science is the creation of new oxide ceramic materials for mechanical engineering, energy, chemical, aerospace, electronics and other industries in multicomponent systems, including TiO_2 , Al_2O_3 and lanthanide oxides. The $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ system, which contains the gadolinium oxide from the middle of the lanthanide series, was selected for the study. The established interaction regularities in the specified system will allow to predict the interaction and construct elements of phase diagrams of unstudied of the series $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Ln}_2\text{O}_3$, ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Gd}, \text{Er}$) systems. The authors have constructed tentative liquidus surface of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ phase diagram. On the basis of the prediction, the presence of four four-phase invariant eutectic equilibria, three four-phase nonvariant transient equilibria, and three three-phase nonvariant eutectic equilibria with the participation of a liquid were established. The maximum predicted liquidus temperature in the system is 2360 °C, which is the melting point of pure Gd_2O_3 , and the minimum liquidus temperature is 1500 °C, which corresponds to the melting point of the three-phase eutectic $\text{E}_4\text{L} \rightleftharpoons \text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7 + \text{Al}_2\text{TiO}_5 + \text{TiO}_2$. No new phases were found in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$ system. Interaction in a three-component system is predominantly eutectic in nature, which opens up a number of promising opportunities for creating materials for various purposes. These include, first and foremost, high-temperature structural composite materials based on directionally solidified two-phase and three-phase eutectics, materials for solid electrolytes (TOPE, oxygen sensors, films for electronic devices, etc.), immobilizing materials for the nuclear industry, viscous ceramics, catalyst carriers, highly wear-resistant and corrosion-resistant ceramics, as well as superrefractories.

Keywords: oxides Al_2O_3 , TiO_2 , Gd_2O_3 , liquidus projection, phase diagram.

