

УДК 544.3

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.11

ХАРАКТЕРИСТИКА СУБСОЛІДУСНОЇ БУДОВИ СИСТЕМИ BaO–ZrO₂–TiO₂О. М. БОРИСЕНКО^{1*}, С. М. ЛОГВІНКОВ², Р. В. КРИВОБОК¹, Г. В. ЛІСАЧУК¹,
О. Р. ТИМЧЕНКО¹¹ кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА² кафедра охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: onborisenko@ukr.net

АНОТАЦІЯ Проведено комплексний геометро-топологічний аналіз субсолідусної області системи BaO–ZrO₂–TiO₂ з метою визначення стабільних фазових співвідношень та оптимальних концентраційних областей для синтезу мікрохвильових діелектричних керамічних матеріалів. За допомогою розрахункових методів визначено довжини коннод, площі елементарних трикутників, ступені їх асиметрії, а також ймовірності існування відповідних фаз. Встановлено, що система містить стабільні подвійні сполуки підсистем BaO–TiO₂, BaO–ZrO₂ та ZrO₂–TiO₂, а потрібні сполуки відсутні. Триангуляція системи BaO–ZrO₂–TiO₂ зазнає змін у трьох температурних інтервалах: I – до температури 1385 K, II – в інтервалі температур 1385 – 1475 K, III – вище температури 1575 K. Частина елементарних трикутників зберігає свої геометричні характеристики у всьому температурному інтервалі, при цьому найбільші площі існування та високі ймовірності існування мають фази BaTi₂O₅, BaTi₄O₉, BaZrO₃ та ZrTiO₄. Отримані результати дозволяють виділити концентраційні області з великими площами фазових полів та низьким чи середнім ступенем асиметрії, які забезпечують прості технологічні умови синтезу матеріалів, а також зони з малими площами і високою асиметрією, що потребують підвищеної точності дозування та контролю. Робота відкриває перспективи для раціонального вибору складів і технологій синтезу високоефективних мікрохвильових діелектричних керамік для сучасних бездротових і мікрохвильових електронних систем.

Ключові слова: субсолідусна будова; фазові рівноваги; геометро-топологічні характеристики; діелектрична кераміка

CHARACTERISTICS OF THE SUBSOLIDUS STRUCTURE OF THE BaO–ZrO₂–TiO₂O. BORYSENKO¹, S. LOGVINKOV², V. R. KRYVOBOK¹, G. LISACHUK¹, O. TYMCHENKO¹¹ Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE² Department of Occupational Health and Safety, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT A comprehensive geometric-topological analysis of the subsolidus region of the BaO–ZrO₂–TiO₂ system was carried out to determine stable phase relationships and optimal compositional ranges for the synthesis of microwave dielectric ceramic materials. Using computational methods, the lengths of conodes, areas of elementary triangles, their degrees of asymmetry, and the probabilities of existence of the corresponding phases were determined. It was found that the system contains stable binary compounds in the BaO–TiO₂, BaO–ZrO₂, and ZrO₂–TiO₂ subsystems, while ternary compounds are absent. The triangulation of the BaO–ZrO₂–TiO₂ system changes across three temperature intervals: I – up to 1385 K, II – from 1385 to 1475 K, and III – above 1475 K. Some elementary triangles retain their geometric characteristics throughout the entire temperature range, with the largest areas and highest probabilities of existence observed for the phases BaTi₂O₅, BaTi₄O₉, BaZrO₃, and ZrTiO₄. The results allow identification of compositional regions with large phase-field areas and low to medium degrees of asymmetry, which provide simple technological conditions for material synthesis, as well as regions with small areas and high asymmetry, which require increased precision in dosing and process control. This study provides a scientific basis for the rational selection of compositions and synthesis technologies for high-performance microwave dielectric ceramics for modern wireless and microwave electronic systems.

Keywords: subsolidus structure; phase equilibria; geometric-topological characteristics; dielectric ceramics

Вступ

Із розвитком ринку комерційного бездротового зв'язку, включно з мобільним зв'язком, супутниковими комунікаціями, радіолокацією та технологіями Інтернету речей, мікрохвильові діелектричні матеріали набувають особливого значення як ключові функціональні елементи сучасної радіоелектронної апаратури. Вони широко

застосовуються як діелектричні резонатори та фільтри в мікрохвильових і надвисокочастотних (СВЧ) схемах, забезпечуючи високу стабільність та точність роботи пристроїв.

Використання матеріалів із низькими діелектричними втратами, високою добротністю (Q×f) та температурною стабільністю дозволяє зменшити розміри резонаторів і фільтрів без погіршення електричних характеристик [1–3]. Це

особливо важливо для компактних і мобільних телекомунікаційних пристроїв, сприяючи ефективній інтеграції та мініатюризації схем.

Мікрохвильові діелектричні матеріали виконують критично важливі функції в радіочастотних схемах: генерація та стабілізація робочих частот, фільтрація та селекція сигналів, зниження рівня шумів і підвищення енергетичної ефективності систем [4,5].

Основні вимоги до мікрохвильових діелектричних керамічних матеріалів [1,6,7]: висока діелектрична проникність (ϵ_r) – дозволяє зменшити розміри резонаторних елементів і підвищити щільність компонування схем; високий коефіцієнт якості ($Q \times f$) – забезпечує низькі діелектричні втрати та високу частотну вибірковість; низький температурний коефіцієнт резонансної частоти (tf) – гарантує стабільність робочих характеристик при зміні температури.

Отже, розробка та оптимізація матеріалів із оптимальним поєднанням ϵ_r , $Q \times f$ та tf є пріоритетним завданням сучасної функціональної кераміки, відкриваючи можливості для створення компактних, ефективних і надійних пристроїв бездротового зв'язку нового покоління.

Система $BaO-TiO_2$ викликає значний науковий та практичний інтерес завдяки здатності формувати широкий спектр проміжних фаз із вираженими діелектричними, сегнетоелектричними та п'єзоелектричними властивостями [8,9]. Наявність різноманітних фаз із різними кристалохімічними особливостями дає змогу цілеспрямовано керувати структурою та функціональними характеристиками керамічних матеріалів на їх основі.

Легування сполук системи $BaO-TiO_2$ оксидними добавками, такими як Sm_2O_3 , ZrO_2 та MgO , сприяє нададдитивному покращенню діелектричних властивостей, проявленому у одночасному підвищенні діелектричної проникності, коефіцієнта якості та температурної стабільності [10 – 12]. Цей ефект обумовлений складним впливом легуючих компонентів на кристалічну структуру, дефектний стан та фазові рівноваги системи, включно зі стабілізацією певних фаз, модифікацією зернограничних областей та пригніченням небажаних фазових перетворень. Нададдитивне підсилення діелектричних властивостей створює передумови для розробки нових складів і технологічних підходів у радіокераміці, спрямованих на отримання високоефективних мікрохвильових діелектричних матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками.

Таким чином, подальше комплексне вивчення субсолідусної будови системи $BaO-ZrO_2-TiO_2$ для створення мікрохвильових діелектричних керамічних матеріалів є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Мета роботи

Основною метою роботи є визначення геометро-топологічних характеристик субсолідусної структури системи $BaO-ZrO_2-TiO_2$ за допомогою розрахункових методів, їх комплексний аналіз та використання отриманих результатів для обґрунтування раціональних концентраційних областей синтезу діелектричних керамічних матеріалів.

Виклад основного матеріалу

У системі $BaO-ZrO_2-TiO_2$ в субсолідусній області стабільні 8 подвійних сполук, тоді як потрійні сполуки відсутні. У підсистемі $BaO-TiO_2$ сполуки $Ba_{11}Ti_{10}O_{31}$, $Ba_6Ti_{17}O_{40}$, $Ba_4Ti_{13}O_{30}$, $Ba_2Ti_9O_{20}$ та $BaTi_5O_{11}$ мають недостатньо вивчені температурні інтервали термодинамічної стабільності, і не виключена ймовірність їх метастабільності [8, 9]. Таким чином, до стабільних фаз цієї підсистеми відносимо Ba_2TiO_4 , $BaTiO_3$, $BaTi_2O_5$ та $BaTi_4O_9$. У підсистемі $BaO-ZrO_2$ стабільними фазами є Ba_2ZrO_4 , $Ba_3Zr_2O_7$ та $BaZrO_3$ [13]. У підсистемі ZrO_2-TiO_2 стабільною є лише одна сполука – $ZrTiO_4$ [14].

Встановлено, що триангуляція системи $BaO-ZrO_2-TiO_2$ зазнає змін у трьох температурних інтервалах [15]:

I – до температури 1385 К система розбивається на елементарні трикутники: $BaO - Ba_2ZrO_4 - Ba_2TiO_4$, $Ba_2ZrO_4 - Ba_2TiO_4 - BaTiO_3$, $Ba_2ZrO_4 - BaTiO_3 - Ba_3Zr_2O_7$, $BaTiO_3 - Ba_3Zr_2O_7 - BaTi_2O_5$, $BaTi_2O_5 - Ba_3Zr_2O_7 - BaZrO_3$, $BaTi_2O_5 - BaZrO_3 - ZrO_2$, $BaTi_2O_5 - ZrO_2 - BaTi_4O_9$, $ZrTiO_4 - BaTi_4O_9 - ZrO_2$, $ZrTiO_4 - BaTi_4O_9 - TiO_2$;

II – в інтервалі температур 1385 – 1475 К система розбивається на елементарні трикутники: $BaO - Ba_2ZrO_4 - Ba_2TiO_4$, $Ba_2ZrO_4 - Ba_2TiO_4 - BaTiO_3$, $Ba_2ZrO_4 - BaTiO_3 - Ba_3Zr_2O_7$, $BaTiO_3 - Ba_3Zr_2O_7 - BaTi_2O_5$, $BaTi_2O_5 - Ba_3Zr_2O_7 - BaZrO_3$, $BaTi_2O_5 - BaZrO_3 - ZrO_2$, $ZrTiO_4 - BaTi_2O_5 - ZrO_2$, $ZrTiO_4 - BaTi_4O_9 - BaTi_2O_5$, $ZrTiO_4 - BaTi_4O_9 - TiO_2$;

III – вище температури 1475 К: $BaO - Ba_2ZrO_4 - Ba_2TiO_4$, $Ba_2ZrO_4 - Ba_2TiO_4 - BaTiO_3$, $Ba_2ZrO_4 - BaTiO_3 - Ba_3Zr_2O_7$, $BaTiO_3 - Ba_3Zr_2O_7 - BaTi_2O_5$, $BaTi_2O_5 - Ba_3Zr_2O_7 - BaZrO_3$, $BaZrO_3 - ZrTiO_4 - ZrO_2$, $BaZrO_3 - ZrTiO_4 - BaTi_2O_5$, $ZrTiO_4 - BaTi_4O_9 - BaTi_2O_5$, $ZrTiO_4 - BaTi_4O_9 - TiO_2$.

Для характеристики субсолідусної області проведено розрахунок довжин коннод, отримані результати наведено в табл. 1.

Основні геометро-топологічні параметри субсолідусної структури системи та її фаз: площі елементарних трикутників, ступінь їх асиметрії (L_{max}/L_{min}), площі фазових областей та ймовірності існування відповідних фаз наведено у табл. 2 – 5.

Таблиця 1 – Довжини коннод (L, %) системи BaO–ZrO₂–TiO₂

№	Позначення конноди	L, %
1	BaO – Ba ₂ ZrO ₄	277
2	Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	72
3	Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaZrO ₃	97
4	BaZrO ₃ – ZrO ₂	554
5	ZrO ₂ – ZrTiO ₄	394
6	ZrTiO ₄ – TiO ₂	606
7	BaO – Ba ₂ TiO ₄	207
8	Ba ₂ TiO ₄ – BaTiO ₃	136
9	BaTiO ₃ – BaTi ₂ O ₅	168
10	BaTi ₂ O ₅ – BaTi ₄ O ₉	165
11	BaTi ₄ O ₉ – TiO ₂	324
12	Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₂ TiO ₄	257
13	Ba ₂ ZrO ₄ – BaTiO ₃	319
14	BaTiO ₃ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	346
15	BaTi ₂ O ₅ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	452
16	BaTi ₂ O ₅ – BaZrO ₃	482
17	BaTi ₂ O ₅ – ZrO ₂	866
18	BaTi ₄ O ₉ – ZrO ₂	884
19	BaTi ₄ O ₉ – ZrTiO ₄	525
20	ZrTiO ₄ – BaTi ₂ O ₅	557
21	ZrTiO ₄ – BaTi ₄ O ₉	525
22	BaZrO ₃ – ZrTiO ₄	494

Таблиця 2 – Характеристика елементарних трикутників системи BaO–ZrO₂–TiO₂ до температури 1385 К

№	Елементарний трикутник	Площа, %	Ступінь асиметрії
1	BaO – Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₂ TiO ₄	59	1,338
2	Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₂ TiO ₄ – BaTiO ₃	39	2,346
3	Ba ₂ ZrO ₄ – BaTiO ₃ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	21	4,806
4	BaTiO ₃ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaTi ₂ O ₅	59	2,690
5	BaTi ₂ O ₅ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaZrO ₃	50	4,969
6	BaTi ₂ O ₅ – BaZrO ₃ – ZrO ₂	283	1,797
7	BaTi ₂ O ₅ – ZrO ₂ – BaTi ₄ O ₉	165	5,358
8	ZrTiO ₄ – BaTi ₄ O ₉ – ZrO ₂	128	2,261
9	ZrTiO ₄ – BaTi ₄ O ₉ – TiO ₂	196	1,870
Σ		1000	–
max		283	
min		21	

Таблиця 3 – Характеристика елементарних трикутників системи BaO–ZrO₂–TiO₂ в інтервалі температур 1385 – 1475 К

№	Елементарний трикутник	Площа, %	Ступінь асиметрії
1	BaO – Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₂ TiO ₄	59	1,338
2	Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₂ TiO ₄ – BaTiO ₃	39	2,346
3	Ba ₂ ZrO ₄ – BaTiO ₃ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	21	4,806
4	BaTiO ₃ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaTi ₂ O ₅	59	2,690
5	BaTi ₂ O ₅ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaZrO ₃	50	4,969
6	BaTi ₂ O ₅ – BaZrO ₃ – ZrO ₂	283	1,797
7	ZrTiO ₄ – BaTi ₂ O ₅ – ZrO ₂	193	2,198
8	ZrTiO ₄ – BaTi ₄ O ₉ – BaTi ₂ O ₅	100	3,376
9	ZrTiO ₄ – BaTi ₄ O ₉ – TiO ₂	196	1,870
Σ		1000	–
max		283	
min		21	

Таблиця 4 – Характеристика елементарних трикутників системи BaO–ZrO₂–TiO₂ вище температури 1475 К

№	Елементарний трикутник	Площа, %	Ступінь асиметрії
1	BaO – Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₂ TiO ₄	59	1,338
2	Ba ₂ ZrO ₄ – Ba ₂ TiO ₄ – BaTiO ₃	39	2,346
3	Ba ₂ ZrO ₄ – BaTiO ₃ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇	21	4,806
4	BaTiO ₃ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaTi ₂ O ₅	59	2,690
5	BaTi ₂ O ₅ – Ba ₃ Zr ₂ O ₇ – BaZrO ₃	50	4,969
6	BaZrO ₃ – ZrTiO ₄ – ZrO ₂	218	2,856
7	BaZrO ₃ – ZrTiO ₄ – BaTi ₂ O ₅	258	2,871
8	ZrTiO ₄ – BaTi ₄ O ₉ – BaTi ₂ O ₅	100	3,376
9	ZrTiO ₄ – BaTi ₄ O ₉ – TiO ₂	196	1,870
Σ		1000	–
max		258	
min		21	

Таблиця 5 – Геометро-топологічні характеристики фаз системи BaO–ZrO₂–TiO₂

Сполука	Зі скількома фазами співіснує	У скількох трикутниках існує	Площа існування, S _p , %	Ймовірність існування, ω
до температури 1385 K				
BaO	2	1	59 (min)	0,020 (min)
ZrO ₂	4	3	576 (max)	0,192 (max)
TiO ₂	2	1	196	0,065
Ba ₂ TiO ₄	3	2	98	0,032
BaTiO ₃	4	3	119	0,040
BaTi ₂ O ₅	5	4	557	0,186
BaTi ₄ O ₉	4	3	489	0,163
Ba ₂ ZrO ₄	4	3	119	0,040
Ba ₃ Zr ₂ O ₇	4	3	130	0,043
BaZrO ₃	3	2	333	0,111
ZrTiO ₄	3	2	324	0,108
Σ	–	–	3000	1,000
в інтервалі температур 1385 – 1475 K				
BaO	2	1	59 (min)	0,020 (min)
ZrO ₂	3	2	476	0,159
TiO ₂	2	1	196	0,065
Ba ₂ TiO ₄	3	2	98	0,032
BaTiO ₃	4	3	119	0,040
BaTi ₂ O ₅	6	5	685 (max)	0,228 (max)
BaTi ₄ O ₉	3	2	296	0,099
Ba ₂ ZrO ₄	4	3	119	0,040
Ba ₃ Zr ₂ O ₇	4	3	130	0,043
BaZrO ₃	3	2	333	0,111
ZrTiO ₄	4	3	489	0,163
Σ	–	–	3000	1,000
вище температури 1475 K				
BaO	2	1	59 (min)	0,020 (min)
ZrO ₂	2	1	218	0,073
TiO ₂	2	1	196	0,065
Ba ₂ TiO ₄	3	2	98	0,032
BaTiO ₃	4	3	119	0,040
BaTi ₂ O ₅	5	4	467	0,156
BaTi ₄ O ₉	3	2	296	0,099
Ba ₂ ZrO ₄	4	3	119	0,040
Ba ₃ Zr ₂ O ₇	4	3	130	0,043
BaZrO ₃	4	3	526	0,175
ZrTiO ₄	5	4	772 (max)	0,257 (max)
Σ	–	–	3000	1,000

Обговорення результатів

Встановлено (табл. 2–4), що елементарні трикутники: BaO – Ba₂ZrO₄ – Ba₂TiO₄, Ba₂ZrO₄ – Ba₂TiO₄ – BaTiO₃, Ba₂ZrO₄ – BaTiO₃ – Ba₃Zr₂O₇, BaTiO₃ – Ba₃Zr₂O₇ – BaTi₂O₅, BaTi₂O₅ – Ba₃Zr₂O₇ – BaZrO₃, ZrTiO₄ – BaTi₄O₉ – TiO₂ залишаються незмінними у всьому температурному інтервалі. Серед, яких найбільшу площу має елементарний трикутник ZrTiO₄ – BaTi₄O₉ – TiO₂ (196 %), та порівняно з іншими елементарними трикутниками відносно низький ступінь асиметрії (1,870). Сполуки ZrTiO₄ та BaTi₄O₉, які входять до цього

елементарного трикутника, мають відносно високу ймовірність існування, особливо ZrTiO₄ – ступінь існування якого збільшується при підвищенні температури (табл. 5).

Елементарні трикутники BaO – Ba₂ZrO₄ – Ba₂TiO₄, Ba₂ZrO₄ – Ba₂TiO₄ – BaTiO₃, Ba₂ZrO₄ – BaTiO₃ – Ba₃Zr₂O₇, BaTiO₃ – Ba₃Zr₂O₇ – BaTi₂O₅, BaTi₂O₅ – Ba₃Zr₂O₇ – BaZrO₃ мають низькі значення площі (21 – 59 %).

Елементарний трикутник BaTi₂O₅ – BaZrO₃ – ZrO₂, який залишається незмінним до температури 1475 K, має найвищу площу (283 %) та низький ступінь асиметрії (1,797).

- Zaman T., Bhattacharyya S. K., Mofarah S. S., Koshy P., Sorrell C. C. Effects of Sn⁴⁺ solid solubility mechanisms on the electromechanical and energy storage performance of (Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Ti_{0.92}Zr_{0.08})O₃. *Materials Horizons*. 2026. doi: 10.1039/D5MH01632K.
- Logvinkov S., Borysenko O., Kryvobok R., Klochko N., Shabanova H., Korohodska A., Shumeiko V., Voloshchuk V. Thermodynamics of phase equilibria and reaction sintering of microwave ceramic dielectrics in the BaO–TiO₂–MgO system. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2025. Vol. 17, No. 6. P. 06031-1-06031-6. doi: 10.21272/jnep.17(6).06031.
- Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Shabanova H., Korohodska A. Thermodynamic Modeling of ZrO₂–TiO₂–MgO System. *2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2025. P. 1–4. doi: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288397.
- Gong W., Chen T., Jin Z. Thermodynamic investigation of ZrO₂–BaO system. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007. Vol. 17, No 2. P. 232–237. doi: 10.1016/s1003-6326(07)60077-6.
- Saenko I., Platovskaia M., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the ZrO₂–TiO₂ system. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 101, No 1. P. 386–399. doi: 10.1111/jace.15176.
- Логвінков С. М., Борисенко О. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Шумейко В. М., Цапко Н. С. Топологічна невизначеність тетрадрації чотирикомпонентних фізико-хімічних систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 4 (26). С. 30–36. doi:10.20998/2413-4295.2025.04.05.
- Huang Y., Shen Y., Wang J. From terahertz imaging to terahertz wireless communications. *Engineering*, 2023, Vol. 22, pp. 106–124, doi: 10.1016/j.eng.2022.06.023.
- Wang Z., Guo H., Wei H., Sun Y., Li K., Yang L., Huang Y., Yang W., Liu F., Li Y. Near-zero TCF and high quality factor achieved in Li₂Ti_{1-x}(Fe_{1/2}Nb_{1/2})_xO₃-based microwave dielectric ceramics via phase modulation engineering. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2026, Vol. 18, no. 1, pp. 1931–1941, doi: 10.1021/acsami.5c17751.
- Liu B., Yin H., Tang Y., Ren X., Yuan B. Preparation and dielectric properties of porous mullite-based wave transparent ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2026, Vol. 109, e70273, doi: 10.1111/jace.70273.
- Zaman T., Koshy P., Daniels J. E., Sorrell C. C. Review of phase equilibria of the system BaO–TiO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 2025, Vol. 108, no. 6, e20408, doi: 10.1111/jace.20408.
- Zaman T., Jiang Y., Mofarah S. S., Bhattacharyya S. K., Koshy P., Daniels J. E., Sorrell C. C. Phase equilibria in the system BaO–TiO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 2024, Vol. 108, no. 1, e20143, doi: 10.1111/jace.20143.
- Zaman T., Bhattacharyya S. K., Mofarah S. S., Koshy P., Sorrell C. C. Effects of Sn⁴⁺ solid solubility mechanisms on the electromechanical and energy storage performance of (Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Ti_{0.92}Zr_{0.08})O₃. *Materials Horizons*, 2026, doi: 10.1039/D5MH01632K.
- Logvinkov S., Borysenko O., Kryvobok R., Klochko N., Shabanova H., Korohodska A., Shumeiko V., Voloshchuk V. Thermodynamics of phase equilibria and reaction sintering of microwave ceramic dielectrics in the BaO–TiO₂–MgO system. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2025, Vol. 17, no. 6, pp. 06031-1-06031-6, doi: 10.21272/jnep.17(6).06031.
- Borysenko O., Logvinkov S., Kryvobok R., Shabanova H., Korohodska A. Thermodynamic Modeling of ZrO₂–TiO₂–MgO System. *2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2025, pp. 1–4, doi: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288397.
- Gong W., Chen T., Jin Z. Thermodynamic investigation of ZrO₂–BaO system. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, Vol. 17, no. 2, pp. 232–237, doi: 10.1016/s1003-6326(07)60077-6.
- Saenko I., Platovskaia M., Savinykh G., Fabrichnaya O. Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the ZrO₂–TiO₂ system. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, Vol. 101, no. 1. pp. 386–399, doi: 10.1111/jace.15176.
- Logvinkov S., Borysenko O., Shabanova H., Korohodska A., Shumeiko V., Tsapko N. Topological uncertainty of the tetrahedration of four-component physico-chemical systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 4 (26), pp. 30–36, doi:10.20998/2413-4295.2025.04.05.

References (transliterated)

- Kui J. Microwave dielectric ceramic materials and their industry development overview and future prospects. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1885, 032034, doi: 10.1088/1742-6596/1885/3/032034.
- Belous A., V'yunov O., Kovalenko L., Khitrovskiy V., Godziszewski K., Yashchynshyn Y. Development of high-performance single- and multiphase dielectrics for advanced microwave applications. *Science and Innovation*, 2025, Vol. 21, no. 4, pp. 21–36, doi: 10.15407/scine21.04.021
- Chen Y.-B., Fan Y., Chang S.-H., Shen S. Study on microwave dielectric materials an adjustable temperature drift coefficient and a high dielectric constant. *Ceramics*, 2024, Vol. 7, no. 3, pp. 1227–1236, doi: 10.3390/ceramics7030081.
- Krishna V. N., Padmasin K. G. A review on microwave band pass filters: Materials and design optimization techniques for wireless communication systems. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, Vol. 154, 107181, doi: 10.1016/j.mssp.2022.107181.

Відомості про авторів (About authors)

Борисенко Оксана Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Oksana Borysenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Логвінков Сергій Михайлович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, професор кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Sergey Logvinkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Occupational Health and Safety, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Кривобок Руслан Вікторович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач науково-дослідної частини; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2334-4434>; e-mail: Ruslan.Krivobok@khp.edu.ua.

Kryvobok Ruslan – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head, Scientific and Research Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2334-4434>; e-mail: Ruslan.Krivobok@khp.edu.ua.

Лісачук Георгій Вікторович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», заступник завідувача науково-дослідної частини; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7157-9115>; e-mail: lisachuk@kpi.kharkov.ua.

Lisachuk Georgiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head, Scientific and Research Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7157-9115>; e-mail: lisachuk@kpi.kharkov.ua.

Тимченко Олександр Романович – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6689-6556>; e-mail: sasha.timchenko.94@gmail.com.

Tymchenko Oleksandr – postgraduate student, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6689-6556>; e-mail: sasha.timchenko.94@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Логвінков С. М., Борисенко О. М., Кривобок Р. В., Лісачук Г. В., Тимченко О. Р. Характеристика субсолідусної будови системи ВаО–ZrO₂–TiO₂. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 82-88. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.11.

Please cite this article as:

Logvinkov S., Borysenko O., Kryvobok R., Lisachuk G., Tymchenko O. Characteristics of the subsolidus structure of the ВаО–ZrO₂–TiO₂. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 82–88, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.11.

Надійшла (received) 01.02.2026
Прийнята (accepted) 04.03.2026
Опублікована (published) 02.04.2026