

УДК 666.651

О.В. Зайчук, О.А. Амеліна, Ю.С. Гордєєв, Ю.Р. Калішенко, Д.В. Філоненко

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ РАДІОПРОЗОРИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ І КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМ $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ І $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Радіопрозорі склокристалічні і керамічні матеріали широко використовують в системах бортового радіообладнання керованих ракет (обтічники), де необхідно забезпечити захист від зовнішніх факторів впливу і покращити умови експлуатації, а також в системах радіонаведення. Зростання швидкості і маневреності ракетного озброєння потребує радіопрозорих матеріалів з малими діелектричними втратами, які б могли працювати при температурах 1400°C і вище. Численні дослідження показують перспективність застосування високотемпературних радіопрозорих матеріалів на основі барій- і стронційалюмосилікатних систем. В огляді наведений детальний аналіз сучасного стану наукових досліджень в галузі радіопрозорих склокристалічних і керамічних матеріалів на основі систем $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ і $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ цельзіанового і стронцій-анортитового складів. Показані переваги і недоліки різних технологічних підходів в одержанні радіопрозорих матеріалів в зазначених системах. Відчутною складністю при синтезі цельзіанових і стронцій-анортитових склокристалічних і керамічних матеріалів є наявність декількох поліморфних модифікацій цельзіанової і стронцій-анортитової фаз, які мають свої структурні особливості. Представлений огляд демонструє, що розвиток різних методів отримання радіопрозорих матеріалів цельзіанового і стронцій-анортитового складів дозволяє варіювати фізико-механічні, термічні і діелектричні властивості при цьому значно розширюючи сфери застосування даних матеріалів. У той же час для впровадження у виробництво високотемпературних радіопрозорих матеріалів зазначених систем необхідне проведення робіт з масштабування технологічних рішень до рівня промислового випуску елементів конструкцій складної форми з високими функціональними показниками.

Ключові слова: склокристалічні матеріали, кераміка, радіопрозорість, цельзіан, стронційовий анортит, спікання, кристалізація, фазовий склад, мікроструктура.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-163-6-4-14

Вступ

Створення передових технологій в мікроелектроніці, радіотехніці, а також авіаційній і ракетній техніці потребує нових видів діелектриків [1]. На сьогодні у виробництві авіаційної і ракетної техніки провідні позиції займають

склокристалічні і керамічні матеріали завдяки їх здатності витримувати найвищі температури експлуатації (до 2000°C). Радіопрозорі склокристалічні і керамічні матеріали широко використовують в системах бортового радіообладнання керованих ракет (обтічники), де необхідно забезпе-

© О.В. Зайчук, О.А. Амеліна, Ю.С. Гордєєв, Ю.Р. Калішенко, Д.В. Філоненко, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

A.V. Zaichuk, O.A. Amelina, Y.S. Hordieiev, Y.R. Kalishenko, D.V. Filonenko

чити захист від зовнішніх факторів впливу і покращити умови експлуатації, а також в системах радіонаведення. До таких матеріалів наряду з високими робочими температурами висувається комплекс жорстких вимог (низькі значення відносної діелектричної проникності (ϵ) і тангенса кута діелектричних втрат ($\tan\delta$), висока термічна стійкість і механічна міцність, низькі значення теплопровідності, теплоємності і питомої ваги, як фактора зниження маси виробів), які дозволяють експлуатувати вироби на їх основі в критичних умовах [2,3].

Тангенс кута діелектричних втрат визначає кількість енергії, що поглинається матеріалом при проходженні крізь нього випромінювання. Матеріал, який характеризується низьким значенням $\tan\delta$, наприклад, розширює радіус дії антенного пристрою. Крім того, важливою є стабільність значень $\tan\delta$ у всьому діапазоні робочих температур. Значення відносної діелектричної проникності, тангенсу кута діелектричних втрат і довжини хвилі пристрою, що передає, визначають товщину стінки обтічника. Перешкоди мінімальні у разі, якщо товщина стінки має величину, кратну половині довжини хвилі робочого випромінювання. Значення ϵ впливає на частоту випромінювання, що розповсюджується в матеріалі діелектрика, а отже – на його довжину хвилі. Якщо $\tan\delta$ зберігає мінімальне значення, товщина стінки може бути збільшена за рахунок зниження ϵ . Враховуючи той факт, що під час високошвидкісного польоту ракет радіопрозорі обтічники зазнають дії термоудару (температура нагрівання до 250–300°C/с) і вібрації, вони повинні мати відповідно високі показники термічної стійкості і механічної міцності. Здебільшого зниження температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) веде до підвищення термостійкості [4,5].

Технологічні підходи щодо одержання радіопрозорих склокристалічних і керамічних матеріалів в алюмосилікатних системах

Склокристалічні матеріали в різних алюмосилікатних системах переважно отримують за двома технологіями: класичною скляною (ситаловою) і керамічною.

Скляна технологія включає варіння скла, формування виробів з розплавленої скломаси, їх відпал і направлену кристалізацію. Властивості склокристалічних матеріалів (ситалів) багато в чому визначаються типом кристалічної фази, яка отримана в результаті термічної обробки скла. Тому склад вихідного скла проектується з урахуванням забезпечення виділення заданої кристалічної фази. Відмінною особливістю ситалів є їх дрібно-

зернистість, яка забезпечує високу механічну міцність, твердість і хімічну стійкість. Середній розмір кристалів у ситалах зазвичай не перевищує 1 мкм.

Для ситалів радіотехнічного призначення найважливішими є діелектричні характеристики на надвисоких частотах. На даний час вироблені основні принципи створення ситалів з необхідними значеннями діелектричної проникності і малими діелектричними втратами в широкому діапазоні частот і температур. При цьому необхідно враховувати хімічний склад вихідного скла, природу та вміст кристалічної фази, розмір кристалів.

Слід відмітити, що найскладнішою і до кінця не вирішеною проблемою в технології ситалів є вибір найбільш ефективного режиму термічної обробки. Від правильності вибору режиму залежать як фізико-механічні, термічні і хімічні властивості, так і технологічні показники (величина усадки, деформація виробів, величина термічних напруг у виробі та його цілісність). Для виробництва ситалів найбільший інтерес становлять склади, які характеризуються значною схильністю до кристалізації. При цьому процеси вироблення і формування такого скла не повинні супроводжуватись його кристалізацією.

Традиційна скляна технологія виготовлення склокристалічних матеріалів крім високої температури варіння вихідного скла (для скла алюмосилікатних систем знаходиться в межах 1550–1700°C) має низку обмежень і недоліків. А саме, жорсткі вимоги до скла щодо його варильних і формувальних властивостей, необхідність чіткого дотримання режиму його термічного оброблення (при відпалі і кристалізації), а також введення каталізаторів кристалізації, що змінює хімічний склад скла [6,7]. Крім того, традиційна скляна технологія вносить обмеження на можливість варіювання фазового складу матеріалів і складність форм самих виробів.

Наряду з класичною скляною технологією активно розвивається керамічна технологія склокристалічних матеріалів (порошковий метод). Суть метода полягає в тому, що з синтезованого скла заданого складу готують керамічний шлікер і формують вироби шляхом лиття в пористі форми, з подальшим сушінням і випалом. Порошкова технологія склокристалічних матеріалів дозволяє значно розширити діапазон складів вихідного скла. При цьому можливо застосовувати склади скла, не придатні для класичної скляної технології, зокрема, високов'язкі, «короткі» і склади скла з різною кристалізаційною здатністю. Кера-

мічний спосіб також дозволяє суттєво розширити номенклатуру виробів, які виготовляються, підвищуючи складність їх форм [4].

Однак, незважаючи на незаперечні переваги, керамічна технологія виробів з склокераміки має ряд недоліків, які не дозволяють реалізовувати всі її можливості в повною мірою. Недоліками порошкового методу виготовлення склокераміки є високі температури варіння вихідного скла (для скла алюмосилікатних систем знаходиться в межах 1550–1700°C), специфічні особливості реологічних властивостей керамічних шлікерів (дилатантні суспензії) і недостатня міцність відлитих заготовок. Основним недоліком є різниця в зерновому складі дисперсної фази керамічних шлікерів, що викликає нерівномірний ріст кристалів по об'єму заготовки і може бути причиною отримання виробів (особливо крупногабаритних) з ділянками різної щільності. Це суттєво ускладнює отримання виробів з заданим рівнем радіотехнічних характеристик [8,9].

При розділенні процесів спікання і кристалізації шляхом використання в якості вихідної сировини закристалізованого скла можна досягти однорідності властивостей за об'ємом заготовки. Спікання склокерамічних матеріалів на основі закристалізованого скла, як і у випадку склокераміки з аморфного скла, відбувається за механізмом в'язкої течії. Більш високі значення енергії активації процесу спікання склокераміки з аморфного скла у порівнянні із закристалізованим пов'язані з процесами кристалізації, які відбуваються спільно з процесами спікання. При використанні закристалізованого скла суттєво підвищується однорідність заготовок і, як наслідок, стабільність їх властивостей в верхній і нижній зонах. Також склокераміка на основі закристалізованого скла містить менше залишкової склофази, що викликано процесами додаткової кристалізації, які відбуваються при спіканні склокераміки [6].

В переважній більшості випадків одержання склокристалічних матеріалів на основі алюмосилікатних систем проводиться з застосуванням класичною скляною технології і керамічної технології. Однак для синтезу також застосовується золь-гель метод [10]. Цей метод дозволяє отримати нанокристалічні порошки з рівномірним розподілом вихідних компонентів, які після стадії спікання перетворюються в монолітний склокерамічний матеріал. Така склокераміка відрізняється більш високими показниками механічних властивостей у порівнянні з склокерамікою, яка одержана за традиційною керамічною технологією.

У той же час при використанні золь-гель методу існує проблема агрегації отриманих порошків, що призводить до формування пористості в матеріалі і потребує для його ущільнення застосування високого тиску.

Радіопрозорі керамічні матеріали в алюмосилікатних системах, враховуючи їх складну конструкційну форму, найбільш доцільно виготовляти методом шлікерного лиття. Процес одержання керамічних виробів включає в себе декілька основних етапів: підготовка сировинних матеріалів, мокрий помел, лиття приготовленого шлікеру в пористі форми, сушіння напівфабрикатів і їх випал, механічна обточка виробів.

Щільність кераміки є критичним фактором при її застосуванні. Для забезпечення високої стійкості до пилової і дощової ерозії радіопрозорі матеріали повинні володіти волого непроникністю. В іншому випадку необхідне додаткове використання захисних покриттів [11,12].

Радіопрозорі матеріали цельзіанового і стронцій-анортитового складів

Не дивлячись на досягнення в розвитку технологічних підходів одержання кварцової кераміки, літій- і магнійалюмосилікатних склокристалічних і керамічних матеріалів, розроблені на даний час матеріали характеризуються робочою температурою, яка не перевищує 1100°C [13–17].

Зростання швидкості і маневреності ракетного озброєння потребує радіопрозорих матеріалів з малими діелектричними втратами, які б могли працювати при температурах 1400°C і вище.

Враховуючи вищесказане, наряду з літійвмісними (сподуменовими $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ і евкриптитовими $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), а також магнієвмісними (кордієритовими $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) алюмосилікатними матеріалами для радіопрозорих елементів різних конструкцій останнім часом привертає увагу науковців і промисловців склокристалічні і керамічні матеріали на основі систем $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (BAS) і $\text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (SAS). В цих системах існують кристалічні фази моноклінних форм цельзіану ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), стронцієвого анортиту ($\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) і їх тверді розчини. Цельзіан і стронцієвий анортит володіють високими температурами плавлення 1740°C і 1654°C відповідно, низькими значеннями діелектричних втрат ($\tan \delta < 0,001$) і ТКЛР $(27-40) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, що обумовлює їх перспективність для створення високотемпературних радіопрозорих матеріалів [17,18]. Теоретична щільність моноклінної форми цельзіану становить 3,30 г/см³, а моноклінної форми строн-

цієвого анортиту — $3,08 \text{ г/см}^3$ [19,20]. Цельзіан і стронцієвий анортит утворюють тверді розчини необмеженої розчинності типу $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ у всьому діапазоні складів бінарної системи $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ [21]. Це дає широкі можливості для регулювання мікроструктури, термічних, фізичних і механічних властивостей як цельзіанової кераміки, так і стронцій-анортитової.

Склокристалічні матеріали стронцій-анортитового і цельзіанового складу мають високу однорідність властивостей, низький тангенс кута діелектричних втрат ($\tan \delta < 0,001$) і стабільні властивості при зміні температури.

В роботі [21] здійснені комплексні дослідження з розробки оптимальних складів і режимів термообробки вогнетривких склокристалічних матеріалів, виготовлених за класичною скляною технологією, які переважно складаються з моноклінного стронцієвого анортиту і тіаліту. Ці склокристалічні матеріали забезпечують високу термостійкість (вище 1200°C), межу міцності на згин ($\sigma_{\text{зг}} = 30 \text{ МПа}$) та стабільність термічних, механічних і діелектричних властивостей протягом усього інтервалу робочих температур $20-1200^\circ\text{C}$. Для стронцій-анортитових склокристалічних матеріалів діелектрична проникність змінюється менш ніж на 1%, а тангенс кута діелектричних втрат — менш ніж на 20% в температурному інтервалі $20-1200^\circ\text{C}$.

Авторами [22–24] проводились детальне вивчення впливу різних добавок в скло стехіометричного стронцій-анортитового і цельзіанового складів. Зокрема, встановлено, що добавка бор оксиду чи бор оксиду з титан(IV) оксидом дозволяє знизити температуру початку кристалізації моноклінного стронцієвого анортиту і цельзіану на $\approx 50^\circ\text{C}$. Підвищення вмісту алюмінію оксиду у порівнянні з стехіометричним складом також обумовлює зниження температури кристалізації стронцієвого анортиту і цельзіану, однак веде до утворення гексагональної форми наряду з моноклінною. Додавання до стехіометричних складів скла алюміній і бор оксидів одночасно дозволяє знизити тривалість термооброблення вихідного скла з метою кристалізації заданих фаз, зберігаючи при цьому високі значення фізико-механічних властивостей.

Виробництво цельзіанових і стронцій-анортитових матеріалів за класичною технологією виготовлення склокристалічних матеріалів пов'язано зі значними енергетичними витратами (температура варіння вихідного скла $1650-1700^\circ\text{C}$ та тривалий процес кристалізації 20 год і більше).

Крім того, обмежується складність форм для готових виробів і важко забезпечується їх заданий склад [23–25].

Для одержання матеріалів з підвищеною відтворюваністю та стабільністю функціональних характеристик доцільно застосовувати керамічний спосіб. Однак у цьому випадку не завжди вдається одержати водонепроникний матеріал, що важливо для забезпечення стійкості до ерозії [18,19,26].

Для одержання щільної структури цельзіанової і стронцій-анортитової кераміки вводять модифікуючі добавки, які діють за різними механізмами, інтенсифікуючи процес спікання при знижених температурах.

Встановлена ефективна мінералізуюча дія літій оксиду, який вводили за допомогою скла системи $\text{Li}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3$ (5–7 мас.%) [27] і $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ сподуменового складу (20–30 мас.%) [28], на процеси спікання цельзіанової кераміки. Іони Li^+ також мають ефективну дію на процес спікання і перехід гексагональний цельзіан → моноклінний цельзіан у BAS склокераміці, яка отримана золь-гель методом [10]. Перехід гексагональної форми цельзіану в моноклінну форму та інтенсивне спікання завершується за температури 1400°C . Проте, в процесі випалу зазначених видів кераміки і склокераміки утворюються алюмосилікати літію, що знижує температуру ефективної експлуатації таких матеріалів і дещо підвищує їх діелектричні втрати.

При додаванні скла в системі $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ сподуменового складу [29] також відбувається активізація процесу спікання стронцій-анортитової кераміки. Найбільш раціональний вміст скла сподуменового складу становить 20–30 мас.%, що суттєво знижує стійкість матеріалу до високотемпературного нагрівання і підвищує діелектричні втрати за рахунок утворення β -сподумену.

В роботі [30] було досліджено вплив добавок на інтенсифікацію процесу спікання керамічних матеріалів на основі BAS системи. Було обрано низку добавок, що діють за різними механізмами: MgO , Cr_2O_3 , ZrSiO_4 та TiO_2 (модифікатори) та CaCO_3 , B_2O_3 , MoO_3 та $\text{SnO}_2 \cdot \text{Li}_2\text{O}$ (мінералізатори). Встановлено, що найбільш перспективним інтенсифікатором для процесу спікання цельзіану є евтектична добавка $\text{SnO}_2 \cdot \text{Li}_2\text{O}$ у кількості 1,0 мас.%, введення якої до складу шихти вже при 1200°C показало наявність цельзіану у матеріалі. Додавання інших дослідних добавок призвело до незначного збільшення пористості

структури.

Сприятливий вплив на процеси твердофазного спікання цельзіанової і стронцій-анортитової кераміки і утворення моноклінної форми цельзіану і стронцієвого анортиту надає зола від спалювання вугілля [31,32]. Така зола містить 75–78 мас.% скловидної фази, збагаченої силіцій(IV) оксидом, а також кристалічні фази муліту, кварцу, магнетиту. Ступінь спікання і швидкість реакції перетворення гексагональної форми цельзіану і стронцієвого анортиту в моноклінний цельзіан і моноклінний стронцієвий анортит зростають зі збільшенням часу механічної активації сировинної суміші (до 12 год) і температури випалу кераміки (до 1300°C). Однак така кераміка не може бути використана для виготовлення радіотехнічних виробів внаслідок вмісту достатньо великої кількості оксидів феруму у вигляді магнетиту (1,9 мас.%).

Авторами [33] було розглянуто вплив нітриду бору на фазовий склад, мікроструктуру і механічні властивості цельзіанової кераміки. Показано, що введення BN істотно прискорює перехід гексагональної форми в моноклінну. При цьому високий ступінь спікання композиційної кераміки BAS–BN досягається лише при введенні нітриду бору в кількості до 30 мас.% і температурі випалу 1500°C.

В роботі [34] запропоновано спосіб одержання щільноспеченої цельзіанової склокераміки методом твердофазного спікання на основі BAS скла евтектичного складу. З метою одержання моноклінної форми цельзіану до її складу додатково вводили порошки BaAl_2O_4 і SrAl_2O_4 . Синтезована кераміка має високі значення ТКЛР (не нижче $49 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), що погіршує термостійкість матеріалу. Крім того, вихідне BAS скло характеризується високою температурою евтектики (1400°C), що значно збільшує енергетичні витрати на процес його варіння.

Введення до складу кераміки серії SAS і BAS добавки TiO_2 у кількості 3,0 мас.% забезпечує синтез заданої кристалічної фази (цельзіану та стронцієвого анортиту) при 1350°C і дозволяє одержати нульове водопоглинання [35]. Однак показники міцності кераміки (межа міцності при стисканні становить 97,1 МПа) залишаються низькими.

Для інтенсифікації процесів спікання стронцій-анортитової кераміки авторами [36] було досліджено дію мінералізаторів (Li_2O , Cr_2O_3 , SnO_2). Максимальний рівень спікання (нульове водопоглинання) досягається при вмісті добавки Li_2O як окремо, так і в композиції з SnO_2 в кількості

2–3 мас.% за температури 1250–1350°C. У той же час для таких матеріалів не були досягнуті високі показники механічної міцності.

Активне формування щільноспеченої структури стронцій-анортитової кераміки за рахунок рідкофазного спікання і перекристалізації зерен відбувається при введенні флюсуючого компонента $\text{SrO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3$ [37]. Вміст значної кількості B_2O_3 суттєво знижує високотемпературну стійкість керамічних матеріалів.

Активізація процесу спікання стронцій-анортитової кераміки також відбувається при додаванні боросилікатного скла [38]. Завершення формування стронцій-анортитової фази і повне ущільнення досягається при вмісті боросилікатного скла 10 мас.% за температури 1350°C. Зі збільшенням вмісту скла в залежності від умов охолодження утворюється кварц чи кристобаліт, що негативно впливає на термостійкість кераміки.

Відчутною складністю при синтезі стронцій-анортитових склокристалічних і керамічних матеріалів, як і у випадку цельзіанових матеріалів, є наявність декількох поліморфних модифікацій стронцієвого анортиту, які мають структурні особливості [19,22].

В роботі [23] досліджені процеси фазоутворення в склі системи $\text{SrO} \text{--} \text{Al}_2\text{O}_3 \text{--} \text{SiO}_2$ стехіометричного стронцій-анортитового складу. Гексагональна форма стронцієвого анортиту часто утворюється першою, маючи тенденцію залишатися в метастабільному стані за низьких температур. Для гексагональної модифікації характерний фазовий перехід в орторомбічну модифікацію зі зміною об'єму 3%. Це негативно позначається на термомеханічних показниках кераміки [39]. Моноклінна форма стронцієвого анортиту має високу температуру плавлення (1650°C), порівняно низький температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) $35 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Вона також відрізняється кращими показниками міцності [19,37].

У випадку використання золь-гель методу утворення моноклінної форми стронцієвого анортиту в домінуючій кількості має місце в області температур 1250–1300°C. ТКЛР такої кераміки становить $45 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, а межа міцності на згин досягає 80 МПа після термічного оброблення при температурі 1350°C [40]. Ще більш високі температури і тривалість спікання необхідні для утворення моноклінної форми стронцієвого анортиту при традиційному твердофазному синтезі.

Авторами [41] успішно синтезовано кераміку складу $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ шляхом твердофазного спікання. Контрольоване додавання SrO

посилює перетворення гексагональної форми цельзіану в моноклінну. Такий підхід також має потенціал для зниження температури спікання кераміки у порівнянні з традиційним способом.

В роботі [42] надано розробку вогнетривкого керамічного матеріалу на основі барієвих та стронцієвих алюмосилікатів, який має температуру початку деформації в діапазоні 1350–1450°C і в основному містить кристалічні фази цельзіану і стронцієвого анортиту або їх твердих розчинів. Фазовий склад такої кераміки утворюється при дотриманні складу фазоутворюючих оксидів у наступних діапазонах, мас. %: SiO₂ 25–45, Al₂O₃ 23–37, BaO 0–35, SrO 0–30, TiO₂ 5–15. Розроблена кераміка характеризується високим показником ТКЛР (30–55)·10⁻⁷ °C⁻¹.

Доведено [20], що додавання SrO до складу склокераміки на основі цельзіану має важливе значення у процесі її кристалізації. Це приводить до розширення інтервалу між температурами кристалізації і розм'якшення (температурного діапазону ущільнення). В результаті має місце суттєве ущільнення структури матеріалу.

У статті [43] було вивчено властивості та структурні особливості скла в системі SrO–xBaO–Al₂O₃–B₂O₃–SiO₂ (x=0–20 мол. %). Встановлено позитивний вплив заміни SrO на BaO в кількості до 20 мол. % на склоутворюючу здатність дослідних складів скла, а також формування моноклінної форми стронцієвого анортиту в процесі їх кристалізації. Внаслідок близькості іонних радіусів і подібного заряду катіонів Sr²⁺ і Ba²⁺ не змінюються основні структурні одиниці сітки скла. В той же час із збільшенням кількості барій оксиду до 20 мол. % знижується ТКЛР дослідного скла від 78·10⁻⁷ °C⁻¹ до 71·10⁻⁷ °C⁻¹. Значення об'ємного електричного опору при температурі 300°C знаходяться в межах 10^{10,7}–10^{11,6} Ом/см, що свідчить про високі електроізоляційні властивості дослідних складів скла і дозволяє розглядати його як компонент композиційних матеріалів діелектричного призначення.

Термодинамічними розрахунками [44,45] визначені ймовірні шляхи перебігу реакцій утворення фази цельзіану і стронцієвого анортиту в точках потрійних евтектик системи BaO–Al₂O₃–SiO₂ і SrO–Al₂O₃–SiO₂, відповідно. Евтектичні точки були обрані в області кристалізації цельзіану і стронцієвого анортиту і мали температуру, яка не перевищувала 1400°C. Найбільш ймовірним є утворення цельзіану при взаємодії компоненту BAS скла (2BaO·SiO₂), а утворення стронцієвого анортиту при взаємодії

компонентів SAS скла (SrO·SiO₂ і 2SrO·Al₂O₃·SiO₂) з Al₂O₃·2SiO₂, який є продуктом дегідратації каолініту. Визначені закономірності дають змогу здійснити обґрунтований вибір скла в системах BaO–Al₂O₃–SiO₂ і SrO–Al₂O₃–SiO₂ з найнижчою температурою варіння для подальшого виготовлення низькотемпературної цельзіанової і стронцій-анортитової кераміки.

Виконані термодинамічні розрахунки [44,45] лягли в основу розробки складів низькотемпературної цельзіанової і стронцій-анортитової кераміки.

В роботах [46,47] наведені результати досліджень радіопрозорості цельзіанової і стронцій-анортитової кераміки, в складі якої частину компонентів вводили за допомогою порівняно легкоплавкого скла евтектичних складів, отриманого на основі псевдо-потрійних систем BaO–Al₂O₃–SiO₂ і SrO–Al₂O₃–SiO₂. У процесі випалу кераміки реалізується принцип реакційного формування її мікроструктури. Утворення цельзіану і стронцієвого анортиту переважно відбувається за рахунок інтенсивної взаємодії основних компонентів скла з кристалічними наповнювачами в процесі спікання кераміки, а також внаслідок кристалізації скла. Після спікання при порівняно низьких температурах (1200–1375°C) одержані водонепроникні матеріали зі значеннями ТКЛР для цельзіанової кераміки (35–36)·10⁻⁷ °C⁻¹, а для стронцій-анортитової кераміки в межах (39,2–39,7)·10⁻⁷ °C⁻¹ що обумовлює їх достатньо високу термічну стійкість (не нижче 750°C). Показник вогнетривкості для цельзіанової кераміки становить 1540–1580°C, а для стронцій-анортитової кераміки 1425–1475°C. Крім того, досягнуті діелектричні показники на рівні: ε=5,1–5,5; tanδ=0,0005–0,001 у надвисокочастотному електромагнітному полі (10¹⁰ Гц). Розроблена кераміка може бути використана в якості високотемпературних радіопрозорих матеріалів для авіаційної і ракетної техніки.

Висновки

Виконано аналіз сучасного стану наукових досліджень в галузі радіопрозорих склокристалічних і керамічних матеріалів на основі систем BaO–Al₂O₃–SiO₂ і SrO–Al₂O₃–SiO₂. Показані переваги і недоліки різних технологічних підходів в отриманні радіопрозорих матеріалів в зазначених системах. Відчутною складністю при синтезі цельзіанових і стронцій-анортитових склокристалічних і керамічних матеріалів є наявність декількох поліморфних модифікацій цельзіанової і стронцій-анортитової фаз, які мають свої структурні особливості. Наданий огляд де-

монструє, що розвиток різних методів одержання радіопрозорих матеріалів цельзіанового і стронцій-анортитового складів дозволяє варіювати фізико-механічні, термічні і діелектричні властивості при цьому значно розширюючи сфери застосування даних матеріалів. У той же час для подальшого ефективного впровадження у виробництво високотемпературних радіопрозорих матеріалів зазначених систем необхідне проведення робіт з масштабування технологічних рішень до рівня промислового випуску елементів конструкцій складної форми з високими функціональними показниками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sebastian M.T., Ubic R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties // *Int. Mater. Rev.* – 2015. – Vol.60. – No. 7. – P.392-412.
2. Microwave materials for defense and aerospace applications / Varghese J., Joseph N., Jantunen H., Behera S., Kim K., H.T., Sebastian M.T. // *Handbook of advanced ceramics and composites.* – Cham: Springer, 2020. – P.165-213.
3. Suzdal'tsev E.I. Radio transparent, heat-resistant materials for the 21st century // *Refract. Ind. Ceram.* – 2002. – Vol.43. – P.103-110.
4. Technological aspects of fabrication of radiotransparent glass-ceramic materials based on high-temperature aluminosilicate systems (review) / Chaynikova A.S., Vaganova M.L., Shchegoleva N.E., Lebedeva Yu.E. // *Proc. VIAM.* – 2015. – No. 11. – P.26-39.
5. Cass R.B. Fiber reinforced ceramic radome material with improved resistance to thermal shock, high temperature and erosion. *Advanced Cerametrics Incorporated*, 2006. p. 1-7.
6. Pilate P., Delobel F. Low thermal expansion ceramic and glass-ceramic materials // *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses.* – 2021. – Vol.2. – P.47-58.
7. Hotza D., de Oliveira A.P.N. New silicate glass-ceramic materials and composites // *Adv. Sci. Technol.* – 2010. – Vol.68. – P.1-12.
8. Riedel R., Chen I-W. *Ceramics science and technology. Volume 2: Materials and properties.* – Wiley, 2010. – 862 p.
9. Narang S.B., Bahel S. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: a review // *J. Ceram. Process. Res.* – 2010. – Vol.11. – No.3. – P.316-321.
10. Microscopic scale evidence of phase transformation process in barium aluminosilicate glass-ceramic. / Wu S., Xia L., Shi B., Wen G. // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2018. – Vol.38. – No. 2. – P.727-733.
11. Зайчук О.В., Амеліна О.А. Дослідження шляхів підвищення фізико-технічних показників кварцової кераміки // *Питання хімії та хім. технол.* – 2017. – № 6. – С.63-67.
12. Quartz ceramics modified by nanodispersed silica additive / Khomenko E.S., Zaichuk A.V., Karasik E.V., Kunitsa A.A. // *Funct. Mater.* – 2018. – Vol.25. – No.3. – P.613-618.
13. Fabrication and high-temperature strength of 2.5D SiO₂/SiO₂ composites prepared by a combined vacuum impregnation and sol-gel method / Zhang Y., Fan X., Yang Z., Zhou C., Li Y. // *Ceram. Int.* – 2023. – Vol.49. – No. 22 (Part B). – P.36199-36205.
14. Effect of sintering treatment time on the sintering behaviour and thermal shock resistance of Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics / Lutpi H.A., Mohamad H., Abdullah T.K., Ismail H. // *J. Asian Ceram. Soc.* – 2021. – Vol.9. – P.507-518.
15. Micro/millimeter-wave dielectric indialite/cordierite glass-ceramics applied as LTCC and direct casting substrates: current status and prospects / Ohsato H., Varghese J., Vahera T., Kim J.S., Sebastian M.T., Jantunen H., et al. // *J. Korean Ceram. Soc.* – 2019. – Vol.56. – P.526-533.
16. Ultra-high-frequency radio-transparent ceramics of cordierite composition doped with MgO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ glass: synthesis, microstructure, thermal and physical properties / Zaichuk A.V., Amelina A.A., Hordieiev Y.S., Kalishenko Y.R. // *Open Ceram.* – 2023. – Vol.15. – Art. No. 100377.
17. Kenion T., Yang N., Xu C. Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: a review // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2022. – Vol.42. – No.1. – P.1-17.
18. Bansal N.P. Solid state synthesis and properties of monoclinic celsian // *J. Mater. Sci.* – 1998. – Vol.33. – No.19. – P.4711-4715.
19. The formation of feldspar strontian (SrAl₂Si₂O₈) via ceramic route: reaction mechanism, kinetics and thermodynamics of the process / Ptacek P., Soukal F., Opravil T., Bartonickova E., Wasserbauer J. // *Ceram. Int.* – 2016. – Vol.42. – No. 7. – P.8170-8178.
20. Sintering behaviour of celsian based ceramics obtained from the thermal conversion of (Ba, Sr)-exchanged zeolite A / Marocco A., Liguori B., Dell'Agli G., Pansini M. // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2011. – Vol.31. – No. 11. – P.1965-1973.
21. High-temperature resistant glass-ceramics based on Sr-anorthite and talite phases / Orlova L.A., Popovich N.V., Uvarova N.E., Paleari A., Sarkisov P.D. // *Ceram. Int.* – 2012. – Vol.38. – No. 8. – P.6629-6634.
22. Sung Y.M. Monocelsian formation in the SrO-Al₂O₃-2SiO₂ glass // *J. Mater. Sci. Lett.* – 2000. – Vol.19. – No. 6. – P.453-454.
23. Hordieiev Y., Zaichuk A. Impact of La₂O₃ substitution on the structural, thermal, and radiation shielding properties of sodium-barium borosilicate glasses // *Int. J. Ceram. Eng. Sci.* – 2025. – Vol.7. – No.6. – Art. No. e70029.
24. Sung Y.M., Kim S. Sintering and crystallization of off-stoichiometric SrO-A₂O₃-2SiO₂ glasses // *J. Mater. Sci.* – 2000. – Vol.35. – No. 17. – P.4293-4299.

25. Beall G.H. Refractory glass–ceramics based on alkaline earth aluminosilicates // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2009. – Vol.29. – No. 7. – P.1211-1219.
26. Sung Y.M., Kwak W.C. Influence of various heating procedures on the sintered density of Sr-celsian glass-ceramic // *J. Mater. Sci. Lett.* – 2002. – Vol.21. – No. 11. – P.841-843.
27. *Structure* and microwave dielectric properties of $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ceramic with Li_2O – B_2O_3 sintering additive / Huang L., Ding S., Yan X., Song T., Zhang Y. // *J. Alloys Compd.* – 2020. – Vol.820. – Art. No. 153100.
28. *Synthesis* and characteristic of celsian ceramics with the use of glass in the system Li_2O – Al_2O_3 – B_2O_3 – SiO_2 / Zaichuk A.V., Amelina A.A., Hordieiev Yu.S., Kalishenko Y.R., Sribniak N.N. // *Funct. Mater.* – 2020. – Vol.27. – P.827-835.
29. *Patterns* the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium-anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition / Zaichuk O., Amelina A., Hordieiev Y., Kalishenko Y., Sribniak N., Halushka S., et al. // *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* – 2020. – Vol.6. – No. 6(108). – P.15-26.
30. *Інтенсифікація* процесу спікання керамічних матеріалів на основі системи BaO – Al_2O_3 – SiO_2 / Лисачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В. // *Вісн. нац. техн. унів-ту «ХПІ»*. Сер. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – 2022. – № 1. – С.3-8.
31. *Synthesis* of monoclinic celsian from coal fly ash by using a one-step solid-state reaction process / Long-Gonzalez D., Lopez-Cuevas J., Gutierrez-Chavarria C.A., Pena P., Baudin C., Turrillas X. // *Ceram. Int.* – 2010. – Vol.36. – No. 2. – P.661-672.
32. *Influence* of mechanical activation on the synthesis of Sr-celsian employing a precursor mixture containing coal fly ash / Lopez-Badillo C.M., Lopez-Cuevas J., Rodriguez-Galicia J.L., Gutierrez-Chavarria C.A., Pech-Canul M.I. // *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* – 2013. – Vol.52. – No. 2. – P.98-104.
33. *Effects* of BN on the microstructural evolution and mechanical properties of BAS-BN composites / Li Q., Cai D., Yang Z., Duan X., Li D., Suna Y., Wang S., Jia D., Joachim B., Zhou Y. // *Ceram. Int.* – 2019. – Vol.45. – No. 2. – P.1627-1633.
34. *Preparation* of monoclinic celsian glass-ceramic by a solid-state reaction of the BaO – Al_2O_3 – SiO_2 eutectic glass, BaAl_2O_4 and SrAl_2O_4 / Tong Z., Ji H., Li X., Liu Z. // *Ceram. Int.* – 2019. – Vol.45. – No. 13. – P.16698-16702.
35. *Перспективные* радиопрозрачные керамические материалы для ракетной и космической техники / Лисачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Федоренко Е.Ю., Трусова Ю.Д. // *Вісн. НТУ «ХПІ»*. Сер. Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2014. – № 28. – С.72-79.
36. *Influence* of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in SrO – Al_2O_3 – SiO_2 / Lisachuk G., Kryvobok R., Zakharov A., Tsovm V., Lapuzina O. // *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* – 2017. – Vol.1(6-85). – P.10-15.
37. Chen S., Zhu D.G., Cai X.S. Low-temperature densification sintering and properties of monoclinic- $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ceramics // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2014. – Vol.45. – No. 9. – P.3995-4001.
38. El-Khesheh A.A., Zawrah M.F., Hamzawy E.M. Development of low thermal expansion monocrystalline Sr-feldspar phase via Sr-cordierite ceramic/borosilicate glass composite // *Ceram. Int.* – 2018. – Vol.44. – No. 12. – P.13720-13726.
39. *The microstructure* and mechanical properties of sintered celsian and strontium-celsian glass-ceramics / Barbeeri L., Corradi A.B., Leonelli C., Manfredini T., Romagnoli M., Siligardi C. // *Mater. Res. Bull.* – 1995. – Vol.30. – No. 1. – P.27-41.
40. *Physical-chemical* and structural processes occurring during heat-treatment of strontium-aluminosilicate glass / Shchegoleva N.E., Sarkisov P.D., Orlova L.A., Popovich N.V. // *Glass Ceram.* – 2012. – Vol.69. – No. 3-4. – P.117-121.
41. *Solid-state* synthesis of ceramics in the BaO – SrO – Al_2O_3 – SiO_2 system / Fu Y.-P., Chang C.-C., Lin C.-H., Chin T.-S. // *Ceram. Int.* – 2004. – Vol.30. – P.41-45.
42. *Пат. US20090056380* A1, MKI C03C10/14, C04B35/107. Refractory glass ceramics / Beall G.H. – № US 11/895,847; Заявл. 28.08.2007; Опубл. 05.03.2009. – 3 с.
43. *Properties* and structural characteristics of glasses in the SrO – BaO – Al_2O_3 – B_2O_3 – SiO_2 system for dielectric composite materials / Amelina O.A., Zaichuk O.V., Hordieiev Y.S., Filonenko D.V., Kalishenko Y.R. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2024. – No. 6. – P.47-54.
44. *Thermodynamic* analysis of reactions of the celsian phase formation during the synthesis of thermal shock resistance ceramics based on eutectic glasses of the BaO – Al_2O_3 – SiO_2 system / Zaichuk O.V., Amelina O.A., Hordieiev Y.S., Kalishenko Y.R., Ovchynnykov O.V., et al. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2023. – No. 3. – P.63-71.
45. *Thermodynamic* analysis of the reactions of strontium anorthite formation during the firing of thermal shock resistance ceramics based on the eutectic glasses of the SrO – Al_2O_3 – SiO_2 systems / Zaichuk O.V., Sukhyi K.M., Amelina O.A., Hordieiev Y.S., Filonenko D.V., Rudnieva L.L., et al. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2023. – No. 6. – P.99-106.
46. *Ultra-high* frequency radio-transparent ceramics of celsian composition based on BaO – Al_2O_3 – B_2O_3 – SiO_2 glass: microstructure, physical and technical properties / Zaichuk A., Amelina A., Kalishenko Y., Hordieiev Y., Rudnieva L. // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2022. – Vol.57. – No. 6. – P.1183-1194.
47. *Radio-transparent* strontium-anorthite ceramics modified with SrO – Al_2O_3 – B_2O_3 – SiO_2 glass: synthesis, microstructure, thermal and physical properties / Amelina A., Zaichuk O., Hordieiev Y., Filonenko D., Kozis K., Osinovy H. // *J. Aust. Ceram. Soc.* – 2025. – Vol.61. – P.1321-1334.

Надійшла до редакції 19.08.2025

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF DEVELOPING RADIO-TRANSPARENT GLASS-CERAMIC AND CERAMIC MATERIALS BASED ON THE $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ AND $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ SYSTEMS: A REVIEW

A.V. Zaichuk *, O.A. Amelina, Y.S. Hordieiev, Y.R. Kalishenko, D.V. Filonenko

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

* e-mail: zaychuk_av@ukr.net

Radio-transparent glass-ceramic and ceramic materials are widely used in onboard radio systems of guided missiles (radomes), where protection from environmental factors and enhanced operational reliability are required, as well as in radio guidance systems. The increasing speed and maneuverability of modern missiles demand radio-transparent materials with low dielectric losses that can withstand temperatures of 1400°C and above. Numerous studies indicate the promising potential of high-temperature radio-transparent materials based on barium- and strontium-aluminosilicate systems. This review provides a detailed analysis of the current state of research on radio-transparent glass-ceramic and ceramic materials based on the $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ and $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ systems, focusing on celsian and strontium-anorthite compositions. The advantages and disadvantages of different technological approaches to producing radio-transparent materials in these systems are discussed. A significant challenge in synthesizing celsian and strontium-anorthite glass-ceramic and ceramic materials is the existence of multiple polymorphic modifications of the phases, each having distinct structural characteristics. The review shows that by developing various fabrication methods for celsian and strontium-anorthite compositions it is possible to tune mechanical, thermal, and dielectric properties, thus considerably expanding the range of potential applications. However, the industrial implementation of high-temperature radio-transparent materials from these systems requires scaling up the technological solutions to enable the manufacture of complex-shaped structural components with high functional performance.

Keywords: glass-ceramic materials; ceramics; radio-transparency; celsian; strontium anorthite; sintering; crystallization; phase composition, microstructure.

REFERENCES

1. Sebastian MT, Ulic R, Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *Int Mater Rev*. 2015; 60(7): 392-412. doi: 10.1179/1743280415Y.0000000007.
2. Varghese J, Joseph N, Jantunen H, Behara SK, Kim HT, Sebastian MT. Microwave materials for defense and aerospace applications. In: Mahajan YR, Johnson R, editors. *Handbook of advanced ceramics and composites*. Cham: Springer; 2020. p. 165-213. doi: 10.1007/978-3-030-16347-1_9.
3. Suzdal'tsev EI. Radio transparent, heat-resistant materials for the 21st century. *Refract Ind Ceram*. 2002; 43: 103-110. doi: 10.1023/A:1019603111549.
4. Chaynikova AS, Vaganova ML, Shchegoleva NE, Lebedeva YuE. Technological aspects of fabrication of radiotransparent glass-ceramic materials based on high-temperature aluminosilicate systems (review). *Proc VIAM*. 2015; 11: 26-39. doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-4-4.
5. Cass RB. *Fiber reinforced ceramic radome material with improved resistance to thermal shock, high temperature and erosion*. Advanced Cerametrics Incorporated; 2006. p. 1-7.
6. Pilate P, Delobel F. Low thermal expansion ceramic and glass-ceramic materials. *Encyclopedia of materials: technical ceramics and glasses*. 2021; 2: 47-58. doi: 10.1016/B978-0-12-818542-1.00048-5.
7. Hotza D, de Oliveira APN. New silicate glass-ceramic materials and composites. *Adv Sci Technol*. 2010; 68: 1-12. doi: 10.4028/www.scientific.net/ast.68.1.
8. Riedel R, Chen IW. *Ceramics science and technology. Volume 2: Materials and properties*. Wiley-VCH; 2010. doi: 10.1002/9783527631735.
9. Narang SB, Bahel S. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: a review. *J Ceram Process Res*. 2010; 11(3): 316-321.
10. Wu S, Xia L, Shi B, Wen G. Microscopic scale evidence of phase transformation process in barium aluminosilicate glass-ceramic. *J Eur Ceram Soc*. 2018; 38(2): 727-733. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.09.025.
11. Zaychuk AV, Amelina AA Doslidzhennia shliakhiv pidvyshchennia fizyko-tekhnichnykh pokaznykiv kvartsovoi keramiky [Search for the ways to improve the physical and technical parameters of quartz ceramics]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2017; (6): 63-67. (in Ukrainian).
12. Khomenko ES, Zaichuk AV, Karasik EV, Kunitsa AA. Quartz ceramics modified by nanodispersed silica additive. *Funct Mater*. 2018; 25(3): 613-618. doi: 10.15407/fm25.03.613.
13. Zhang Y, Fan X, Yang Z, Zhou C, Li Y. Fabrication and high-temperature strength of 2.5D $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ composites prepared by a combined vacuum impregnation and sol-gel method. *Ceram Int*. 2023; 49: 36199-36205. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.08.299.
14. Lutpi HA, Mohamad H, Abdullah TK, Ismail H. Effect of sintering treatment time on the sintering behaviour and thermal shock resistance of $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics. *J Asian Ceram Soc*. 2021; 9(2): 507-518. doi: 10.1080/21870764.2021.1896094.
15. Ohsato H, Varghese J, Vahera T, Kim JS, Sebastian MT, Jantunen H, et al. Micro/millimeter-wave dielectric indialite/cordierite glass-ceramics applied as LTCC and direct casting substrates: current status and prospects. *J Korean Ceram Soc*. 2019; 56(6): 526-533. doi: 10.4191/keers.2019.56.6.01.
16. Zaichuk AV, Amelina AA, Hordieiev YS, Kalishenko YR. Ultra-high-frequency radio-transparent ceramics of cordierite composition doped with $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass: synthesis, microstructure, thermal and physical properties. *Open Ceram*. 2023; 15: 100377. doi: 10.1016/j.oceram.2023.100377.
17. Kenion T, Yang N, Xu C. Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: a review. *J Eur Ceram Soc*. 2022; 42: 1-17. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.006.

18. Bansal NP. Solid state synthesis and properties of monoclinic celsian. *J Mater Sci*. 1998; 33: 4711-4715. doi: 10.1023/A:1004484903436.
19. Ptacek P, Soukal F, Opravil T, Bartonickova E, Wasserbauer J. The formation of feldspar strontian ($\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) via ceramic route: reaction mechanism, kinetics and thermodynamics of the process. *Ceram Int*. 2016; 42: 8170-8178. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.02.024.
20. Marocco A, Liguori B, Dell'Agli G, Pansini M. Sintering behaviour of celsian based ceramics obtained from the thermal conversion of (Ba, Sr)-exchanged zeolite A. *J Eur Ceram Soc*. 2011; 31: 1965-1973. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.028.
21. Orlova LA, Popovich NV, Uvarova NE, Paleari A, Sarkisov PD. High-temperature resistant glass-ceramics based on Sr-anorthite and tialite phases. *Ceram Int*. 2012; 38: 6629-6634. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.05.049.
22. Sung YM. Monocelsian formation in the $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$ glass. *J Mater Sci Lett*. 2000; 19(6): 453-454. doi: 10.1023/A:1006724930508.
23. Hordieiev Y, Zaichuk A. Impact of La_2O_3 substitution on the structural, thermal, and radiation shielding properties of sodium-barium borosilicate glasses. *Int J Ceram Eng Sci*. 2025; 7: e70029. doi: 10.1002/ces2.70029.
24. Sung YM, Kim S. Sintering and crystallization of off-stoichiometric $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$ glasses. *J Mater Sci*. 2000; 35: 4293-4299. doi: 10.1023/A:1004880201847.
25. Beall GH. Refractory glass-ceramics based on alkaline earth aluminosilicates. *J Eur Ceram Soc*. 2009; 29: 1211-1219. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.08.010.
26. Sung YM, Kwak WC. Influence of various heating procedures on the sintered density of Sr-celsian glass-ceramic. *J Mater Sci Lett*. 2002; 21: 841-843. doi: 10.1023/A:1015710309425.
27. Huang L, Ding S, Yan X, Song T, Zhang Y. Structure and microwave dielectric properties of $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ceramic with $\text{Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ sintering additive. *J Alloys Compd*. 2020; 820: 153100. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.153100.
28. Zaichuk AV, Amelina AA, Hordieiev YuS, Kalishenko YR, Sribniak NN. Synthesis and characteristic of celsian ceramics with the use of glass in the system $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *Funct Mater*. 2020; 27(4): 827-835. doi: 10.15407/fm27.04.827.
29. Zaichuk O, Amelina A, Hordieiev Y, Kalishenko Y, Sribniak N, Halushka S, et al. Patterns in the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium-anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition. *East Eur J Enterprise Technol*. 2020; 6(6(108)): 15-26. doi: 10.15587/1729-4061.2020.216754.
30. Lisachuk G, Kryvobok R, Voloshchuk V. Intensyfikatsiia protsesu spikannia keramichnykh materialiv na osnovi systemy $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [Intensification of the sintering process of ceramic materials based on the $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system]. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series Innovation researches in students' scientific work*. 2022; 1: 3-8. (in Ukrainian). doi: 10.20998/2220-4784.2022.01.01.
31. Long-Gonzalez D, Lopez-Cuevas J, Gutierrez-Chavarria CA, Pena P, Baudin C, Turrillas X. Synthesis of monoclinic celsian from coal fly ash by a one-step solid-state reaction process. *Ceram Int*. 2010; 36: 661-672. doi: 10.1016/j.ceramint.2009.10.008.
32. Lopez-Badillo CM, Lopez-Cuevas J, Rodriguez-Galicia JL, Gutierrez-Chavarria CA, Pech-Canul MI. Influence of mechanical activation on the synthesis of Sr-celsian employing a precursor mixture containing coal fly ash. *Bol Soc Esp Ceram Vidr*. 2013; 52(2): 98-104. doi: 10.3989/cyv.132013.
33. Li Q, Cai D, Yang Z, Duan X, Li D, Sun Y, et al. Effects of BN on the microstructural evolution and mechanical properties of BAS-BN composites. *Ceram Int*. 2019; 45: 1627-1633. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.10.039.
34. Tong Z, Ji H, Li X, Liu Z. Preparation of monoclinic celsian glass-ceramic by a solid-state reaction of the $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ eutectic glass, BaAl_2O_4 and SrAl_2O_4 . *Ceram Int*. 2019; 45: 16698-16702. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.05.137.
35. Lisachuk HV, Kryvobok RV, Zakharov AV, Fedorenko EYu, Trusova YuD. Perspektivnye radioprozrachnye keramicheskie materialy dlia raketnoi i kosmicheskoi tekhniki [Promising radio-transparent ceramic materials for rocket and space technology]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «KhPI» Seriya Khimiia, Khimichna Tekhnologii ta Ekologhiia*. 2014; 28: 72-79. (in Russian).
36. Lisachuk G, Kryvobok R, Zakharov A, Tsovma V, Lapuzina O. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *East Eur J Enterprise Technol*. 2017; 1(6-85): 10-15. doi: 10.15587/1729-4061.2017.91110.
37. Chen S, Zhu DG, Cai XS. Low-temperature densification sintering and properties of monoclinic- $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ceramics. *Metall Mater Trans A*. 2014; 45: 3995-4001. doi: 10.1007/s11661-014-2344-8.
38. El-Kheshen AA, Zawrah MF, Hamzawy EMA. Development of low thermal expansion mono crystalline Sr-feldspar phase via Sr-cordierite ceramic/borosilicate glass composite. *Ceram Int*. 2018; 44: 13720-13726. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.213.
39. Barbeeri L, Corradi AB, Leonelli C, Manfredini T, Romagnoli M, Siligardi C. The microstructure and mechanical properties of sintered celsian and strontium-celsian glass-ceramics. *Mater Res Bull*. 1995; 30: 27-41. doi: 10.1016/0025-5408(94)00103-0.
40. Shchegoleva NE, Sarkisov PD, Orlova LA, Popovich NV. Physical-chemical and structural processes occurring during heat-treatment of strontium-aluminosilicate glass. *Glass Ceram*. 2012; 69: 117-121. doi: 10.1007/s10717-012-9427-z.
41. Fu YP, Chang CC, Lin CH, Chin TS. Solid-state synthesis of ceramics in the $\text{BaO-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system. *Ceram Int*. 2004; 30: 41-45. doi: 10.1016/S0272-8842(03)00059-2.

42. Beall GH, inventor; Corning Inc., assignee. *Refractory glass ceramics*. United States patent US 20090056380 A1. 2009 Mar 5.

43. Amelina OA, Zaichuk OV, Hordieiev YS, Filonenko DV, Kalishenko YR. Properties and structural characteristics of glasses in the $\text{SrO}-\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system for dielectric composite materials. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024; (6): 47-54. doi: 10.32434/0321-4095-2024-157-6-47-54.

44. Zaichuk O, Amelina A, Hordieiev Yu, Kalishenko Yu, Ovchynnykov O, Basov Yu, et al. Thermodynamic analysis of reactions of the celsian phase formation during the synthesis of thermal shock resistance ceramics based on eutectic glasses of the $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023; (3): 63-71. doi: 10.32434/0321-4095-2023-148-3-63-71.

45. Zaichuk OV, Sukhyi KM, Amelina OA, Hordieiev YS, Filonenko DV, Rudnieva LL, et al. Thermodynamic analysis of the reactions of strontium anorthite formation during the firing of thermal shock resistance ceramics based on the eutectic glasses of the $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ systems. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023; (6): 99-106. doi: 10.32434/0321-4095-2023-151-6-99-106.

46. Zaichuk A, Amelina A, Kalishenko Y, Hordieiev Y, Rudnieva L. Ultra-high frequency radio-transparent ceramics of celsian composition based on $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass: microstructure, physical and technical properties. *J Chem Technol Metall*. 2022; 57(6): 1183-1194.

47. Amelina A, Zaichuk O, Hordieiev Y, Filonenko D, Kozis K, Osinovyy H. Radio-transparent strontium-anorthite ceramics modified with $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass: synthesis, microstructure, thermal and physical properties. *J Aust Ceram Soc*. 2025; 61: 1321-1334. doi: 10.1007/s41779-025-01167-2.