

*О. В. САВВОВА, О. І. ФЕСЕНКО, М. І. ТИМОЩУК, В. Б. БІЛОУС, А. В. СКРИПИНЕЦЬ***НОВІ ТИПИ СКЛОКЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

Проаналізовано ріст та основні тенденції розвитку світового ринку передових матеріалів для електроніки та електричної техніки, які вказують на динамічний розвиток із середньорічним темпом приросту на рівні 17 % та інтенсивний ріст попиту на надійні, ефективні і стійкі функціональні керамічні та скломатеріали. Розглянуто основні види та властивості керамічних та скломатеріалів електротехнічного призначення та перспективи їх розвитку. Визначено актуальність розробки склокерамічних матеріалів нового покоління для задоволення потреб електронної та електротехнічної промисловості, зокрема засобів зв'язку, портативних комп'ютерів, датчиків, систем озброєння тощо. Встановлена перспективність створення принципово нових аспектів синтезу матеріалів придатних до формування методами мультиматеріального адитивного виробництва компактних електронних систем стійких до дії екстремальних факторів (удар, швидкісний нагрів тощо). Обґрунтовано вибір літійалюмосилікатних стеклов для одержання склокерамічних матеріалів з самоорганізованою структурою з урахуванням аспектів ресурсо- та енергозбереження. Розроблено основні принципи при створенні нових типів наноструктурованих склокерамічних матеріалів для електронних систем. Імплементація розроблених принципів дозволить забезпечити вітчизняний ринок конкурентоспроможними виробами за рахунок зниження їх вартості та знизить імпортозалежність у галузі ІТ-технологій, приладо- та машинобудуванні, електроніки та електротехніки. Визначено конкурентоздатність нових типів склокерамічних матеріалів та їх значення для розвитку науки, техніки та промисловості.

**Ключові слова:** склокерамічні матеріали; електронні системи; електричні властивості; термічні властивості; наноструктурування.

*О. V. SAVVOVA, O. I. FESENKO, M. I. TYMOSHCHUK, V. B. BILOUS, A. V. SKRIPINETS***NEW TYPES OF GLASS-CERAMIC MATERIALS FOR ELECTRONIC SYSTEMS**

The growth and main trends in the development of the global market of advanced materials for electronics and electrical engineering are analyzed, which indicate dynamic development with an average annual growth rate of 17% and intensive growth in demand for reliable, effective and stable functional ceramic and glass materials. The main types and properties of ceramic and glass materials for electrical purposes and the prospects for their development are considered. The relevance of developing new generation glass-ceramic materials to meet the needs of the electronic and electrical industry, in particular communications equipment, portable computers, sensors, weapons systems, etc., has been determined. The prospects for creating fundamentally new aspects of the synthesis of materials suitable for forming compact electronic systems resistant to extreme factors (impact, rapid heating, etc.) by multi-material additive manufacturing methods have been established. The choice of lithium aluminosilicate glasses for obtaining glass-ceramic materials with a self-organized structure has been justified, taking into account the aspects of resource and energy conservation. The main principles for creating new types of nanostructured glass-ceramic materials for electronic systems have been developed. The implementation of the developed principles will allow providing the domestic market with competitive products by reducing their cost and will reduce import dependence in the field of IT technologies, instrument and mechanical engineering, electronics and electrical engineering. The competitiveness of new types of glass-ceramic materials and their significance for the development of science, technology and industry have been determined.

**Keywords:** glass-ceramic materials; electronic systems; electrical properties; thermal properties; nanostructuring.

**Вступ.** Широкий попитом на ринку електронної техніки та електроніки користуються нові та удосконалені матеріали з комплексом особливих властивостей, які одержують шляхом застосування інноваційних технологій синтезу та спеціальної обробки. До асортименту матеріалів, що характеризуються найвищим рівнем зацікавленості виробниками можна віднести: спеціальну кераміку, композити, полімери, та біоматеріали, біочіпи, квантові точки, гнучкі батареї, напівпровідники, тривимірні інтегровані схеми, органічні компоненти електроніки, «розумне» скло, фотонні кристали та інші матеріали, які складають значний потенціал для розвитку науки і техніки [1]. Так, електроніка має вирішальне значення для виробництва відновлюваної енергії: вітрових та гідротурбін, сонячних фотоелектричних станцій або сонячного опалення та охолодження, а також для створення інтелектуальних мереж. Ультраконденсатори та нові технології відновлюваної енергії, такі як друковані органічні сонячні елементи, є одними з ключових технологій які трансформують ландшафт для відновлюваної енергії та модальності її розподілу.

Згідно з даними маркетингових досліджень [2] світовий ринок передових матеріалів для електроніки останнє десятиліття знаходиться у стані динамічного росту з 5,4 млрд доларів США у 2018 році до

прогнозованого 11,9 млрд доларів до 2023 року із середньорічним темпом приросту на рівні 17 %. Значну частину цього ринку складає електротехнічна та електронна кераміка, яка переживає значний прогрес, зумовлений новітніми методами та технологіями виробництва. Від високопродуктивних ізоляційних матеріалів до мініатюрних компонентів, інновації сприяють зростанню в цьому секторі.

Аналіз останніх досліджень світового ринку електротехнічної та електронної кераміки [3] показує, що у 2023 році він оцінювався у 12,98 млрд доларів, і за прогнозами, до 2031 року, він досягне позначки у майже 20 млрд доларів. Така значна динаміка розвитку ринку відображає попит на надійні, ефективні і стійкі функціональні керамічні та скломатеріали для задоволення потреб виробників сучасної електроніки.

Розробка найсучаснішої високоефективної функціональної кераміки електротехнічного призначення має велике значення для розвитку сучасної техніки, що вимагає від дослідників подальшого вивчення багатофункціональності та основних механізмів структуроутворення керамічних матеріалів [4]. Електротехнічні силікатні матеріали характеризується великою універсальністю застосування в електроніці та електриці, а високоефективна електронна кераміка є необхідним

матеріалом для забезпечення сталої роботи електронних систем в умовах екстремальних навантажень. Залежно від застосування та вимог такі матеріали використовуються, наприклад, як носії схем, радіатори, датчики, виконавчі механізми, а також як активні або пасивні компоненти в різних областях (табл. 1). Розширені функціональні можливості електронної кераміки та скломатеріалів демонструють високий потенціал для сучасного матеріалознавства та технології.

техніці при виробництві кожухів радіолокаторів, електроізоляторів, вакуум-щільних оболонок, плити для мікросхем, електронних приладів та носії інформації. Серед комерційних видів найбільш широко застосовуваними набули ситали на основі кордієриту, шпінелі та дисилікату літію, зокрема для виробництва антенних обтічників та магнітні підкладки для дисків пам'яті (табл. 2).

Відомі, ще з початку 70-х років минулого сторіччя, комерційні вітчизняні ситали для

Таблиця 1. Керамічні та скломатеріали електротехнічного призначення

| Призначення                          | Матеріал                                                             | Область застосування                                                    | Властивості матеріалів                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Пасивні компоненти                   | $\text{Al}_2\text{O}_3$                                              | MLCC конденсатори, резистори                                            | Низька електропровідність для ізоляції різних шарів електродів, здатність розсіювати енергію у вигляді тепла                                                                                                |
| П'єзо-електрика                      | $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ , $\text{BaTiO}_3$ | п'єзоелектричні пристрої                                                | Високі п'єзоелектричним коефіцієнтам й механічних властивостей для перетворення механічних навантажень в електричні сигнали і навпаки                                                                       |
| Ізолятори                            | Порцеляна, стеатитова чи кордієритова                                | свічки запалювання, бобіни котушок, тримачі електронних трубок          | Високий питомий опір ізоляції, низькі діелектричні втрати та оптимальні діелектричні властивості при різних температурах і частотах                                                                         |
| Інтегральні схеми та напівпровідники | $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{AlN}$ , $\text{BeO}$                | підкладки та упаковка, тиглі, носії для пластин                         | Низька діелектрична проникність й втрати, висока теплопровідність, хімічна стабільність для надійності підкладок інтегральних схем й виробництва напівпровідників                                           |
| Електро-кераміка                     | Магніти на основі фериту, ITO, SLT, SYT                              | постійні магніти, тонкоплівкові транзистори                             | Електронна провідність для магнітних та електронних компонентів                                                                                                                                             |
| Керамічні друковані плати            | $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{AlN}$ , $\text{SiC}$                | високочастотна електроніка, світлодіодне освітлення, силова електроніка | Низькі втрати сигналу, висока діелектричну проникність, для радіочастотних та мікрохвильових ланцюгів, ефективне розсіювання тепла для світлодіодних модулів, термічну стабільність для силової електроніки |
| Скло                                 | алюмосилікатні, кварцові чи боратні стекла                           | дисплеї, гнучкі пристрої                                                | Універсальність у виробництві панелей і гнучких пристроїв, та забезпечення захисту від факторів навколишнього середовища                                                                                    |

Високі фізико-хімічні властивості керамічних та скломатеріалів, включаючи високотемпературну надпровідність, спеціальні магнітні, напівпровідникові, електрооптичні, акустико-оптичні, обумовлюють високий потенціал цих матеріалів при проведенні наукових досліджень спрямованих на вирішення широкого спектру фундаментальних наукових проблем і прикладних інженерних завдань [4].

На сьогоднішній день цікавість до одержання склокристалічних матеріалів (СКМ) нового покоління пояснюється необхідністю забезпечення потреб електронної та електротехнічної промисловості та створення принципово нових аспектів їх синтезу. В час штучного інтелекту майбутнє матеріалознавства – «розумні» та «інтелектуальні» СКМ, які характеризуються рядом унікальних властивостей.

Традиційно електротехнічні ситали знайшли широке застосування в радіо- і високочастотній

виготовлення антенних обтічників виробництва фірми ТОВ «Спецтехстекло А» представлені сподумен, кордієрит та дисилікат літію вмісними матеріалами та промислові електротехнічні ситали марки 17-МЧ дозволили підтвердити перспективність використання СКМ, як компонентів електронних систем, зокрема за рахунок їх високої електричної міцності.

Склокераміка становить нове покоління тонких матеріалів для мікроелектроніки. На сьогодні успішно розробляються та впроваджуються жорсткі диски на основі СКМ для зберігання інформації. Так, фірма Minolta Co. Ltd Noya Corp. (США) виробляє подібні диски на основі кордієритових ситалів. Проведення розробок наноструктурованих СКМ на основі шпінелі, енстатиту та гексацельзіану відкриває нові перспективи їх використання в якості основної складової твердих магнітних дисків для зберігання інформації (табл. 3).

Таблиця 2. Основні види комерційних склокристалічних матеріалів електротехнічного призначення

| Виробник                        | Комерційна назва           | Кристалічна фаза                           | Застосування                          |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| Schott, Німеччина               | Foturan                    | дисилікат літію                            | фоточутливі матеріали                 |
|                                 | Zerodur                    | $\beta$ -кварц                             | дзеркала телескопа                    |
| Corning Inc., США               | Fotoform/Fotoceram         | дисилікат літію                            | світлочутливі матеріали               |
|                                 | Пірокерам 9606             | $\alpha$ -кордієрит                        | антенні обтічники                     |
|                                 | 9664                       | шпінель-енстатит                           | магнітні підкладки для дисків пам'яті |
| Nippon ElectricGlass, Японія    | ML-05                      | дисилікат літію                            | магнітні підкладки для дисків пам'яті |
| ТОВ «Спецтех стекло А», Україна | АС-418<br>АС-380<br>АС-023 | сподумен,<br>кордієрит,<br>дисилікат літію | антенні обтічники                     |
| ПАТ Ситал, Україна              | СТ-50-1                    | кордієрит                                  | плівкові мікросхеми                   |
| НВП «ТЕПЛОЕНЕРГОМАШ», Україна   | 8к                         | сподумен                                   | радіолокаційні прилади                |

Таблиця 3. Основні види нових типів склокристалічних матеріалів електротехнічного призначення

| Склад,<br>мол. %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Кристалічна<br>фаза  | Властивості                                                                                                                                                                                                                                                   | Застосування                                                     | Розробник                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> = 50,5–56,0; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 10,0–30,0;<br>MgO = 10,0–30,0; TiO <sub>2</sub> = 4,2–10,6;<br>P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 0,1–5,0; Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 0,1–9,0;<br>Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 0,1–9,0; Li <sub>2</sub> O = 0,1–12,0;<br>ZrO <sub>2</sub> = 1,0–12,0; B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0,1–5,0;<br>Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0,1–9,0; K <sub>2</sub> O = 0,1–5,0;<br>Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0,1–5,0; ZnO = 0,1–5,0;<br>La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0,1–5,0 | шпінель,<br>енстатит | E = 145 ГПа;<br>σ = 220 МПа;<br>R <sub>a</sub> = 0,5–1,0 нм                                                                                                                                                                                                   | підкладки<br>магнітних<br>дисків                                 | Minolta<br>Co. Ltd<br>(Японія)          |
| SiO <sub>2</sub> = 42,0–65,0; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 5,0–11,0;<br>MgO = 15,0–33,0;<br>TiO <sub>2</sub> = 5,5–13,0 при<br>Σ(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 58,0–80,0 та<br>MgO/Σ(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 0,125–0,550                                                                                                                                                                                                                                                                     | шпінель,<br>енстатит | E > 110 ГПа                                                                                                                                                                                                                                                   | підкладки<br>магнітних<br>дисків                                 | Hoya Corp.<br>(США)                     |
| Σ(MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> ) = 89,0*;<br>Σ(TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , CeO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ,<br>ZnO) = 7,8*;<br>Σ (SrO, CaO, B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 2,2*                                                                                                                                                                                                                                                                            | кордієрит,<br>муліт  | HV = 10,6–11,5 ГПа;<br>K <sub>1C</sub> = 7,0–7,5 МПа·м <sup>1/2</sup> ;<br>E = 350 ГПа;<br>KCU = 7,0–7,5 кДж/м <sup>2</sup> ;<br>σ <sub>згин</sub> = 350 МПа;<br>ε = 3,35–3,95;<br>tgδ = 0,005–0,007<br>(при f = 10 <sup>10</sup> Гц)                         | підкладка в<br>конструкції<br>гібридної<br>інтегральної<br>схеми | ХНУМГ ім.<br>О.М. Бекетова<br>(Україна) |
| SiO <sub>2</sub> = 60,0–67,0;<br>R <sub>2</sub> O = 15,0–17,0;<br>RO = 2,5–8,0;<br>RO <sub>2</sub> = 0,0–12,0;<br>R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 3,0–9,0;<br>Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0,0–1,5;<br>P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 0,0–3,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | дисилікат<br>літію   | α = (62,5–89,7)·10 <sup>-7</sup> град <sup>-1</sup> ;<br>HV = 8,74–8,82 ГПа;<br>K <sub>1C</sub> = 3,10–3,15 МПа·м <sup>1/2</sup> ;<br>σ <sub>ст</sub> = 650 МПа;<br>E = 307–320 ГПа;<br>tgδ = 0,015–0,018;<br>ε = 14,58–14,96<br>(при f = 10 <sup>5</sup> Гц) | вакуум-<br>щільна<br>оболонка<br>електричних<br>пристроїв        | НТУ «ХП»<br>(Україна)                   |
| SiO <sub>2</sub> = 60,0; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 18,0;<br>Li <sub>2</sub> O = 7,0; CaO = 2,0; MgO = 1,0;<br>TiO <sub>2</sub> = 2,0; ZrO <sub>2</sub> = 1,0;<br>SnO <sub>2</sub> = 1,0; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 3,0;<br>B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 1,5; CeO <sub>2</sub> = 0,5                                                                                                                                                                                                                                                  | сподумен             | T <sub>розм</sub> = 1250 °C,<br>α = 22,4·10 <sup>-7</sup> град <sup>-1</sup> ;<br>E <sub>м</sub> = 37 МВ/м;<br>tgδ = 0,008;<br>ε = 9; lg ρ <sub>v</sub> = 15<br>(при f = 10 <sup>6</sup> Гц, t = 20 °C)                                                       | діелектрик<br>конденсаторів                                      |                                         |
| *мас. %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                  |                                         |

Саме СКМ мають ряд істотних переваг – краща якість поверхні, вища зносостійкість, опір вібрації при високих швидкостях обертання, можливість отримання на її основі тонких дисків у порівнянні з алюмінієвими і скляними матеріалами. Основним аргументом для застосування таких матеріалів у високочастотній електроніці є їх чудова однорідність, що дозволяє виготовляти конструкції з точністю до кГц в діапазоні частот ГГц [6].

Вітчизняними науковцями розроблено нові наноструктуровані СКМ з маркуванням КСК-10, СЛ-9 та СП-10 на основі кристалічних фаз муліту, дисилікату літію та сподумену, відповідно, (табл. 3) для електротехніки в приладо-, машинобудуванні та авіатехніці [7, 8]. Розроблені матеріали характеризуються вищою електричною міцністю при порівнянні з промисловою електротехнічною керамікою на основі кордієриту (група 410) та ситалу 17-МЧ та близькі за електричними властивостями з ситалом марки СТ-50-1. Головною відмінністю розроблених ситалів є те, що їх високі механічні властивості (в'язкість руйнування, міцність на згин та стиснення) дозволяють використовувати їх як матеріали електротехнічного призначення (для виготовлення підкладок мікросхем та електронних приладів, носіїв інформації, діелектриків конденсаторів та колб електровакуумних приладів), для створення електронних систем (ЕС) здатних витримувати в процесі експлуатації значні термічні, механічні та електричні навантаження [9].

На сьогодні при виробництві сучасних ЕС важливим фактором є мініатюризація пристроїв, зокрема засобів зв'язку, портативних комп'ютерів, датчиків, систем озброєння тощо. Проте, використання класичних методів одержання ЕС, із подальшою їх комбінацією у пристрої, призводить до підвищення ризиків виходу систем із ладу через погіршення зв'язків між ними та не дозволяє одержувати системи із високим рівнем функціонального заповнення простору.

Вирішенням вказаної проблеми є використання технологій мультиматеріального адитивного виробництва для одержання компактних ЕС [10]. Така технологія дозволяє мінімізувати вільний простір ЕС і забезпечити її високу структурну міцність та стійкість до впливу механічних факторів. Проте, ці технології знаходяться, ще на стадії розробки і мають ряд недоліків, зокрема висока пористість підкладок, низька структурна міцність, високий коефіцієнт лінійного розширення, складність та багатостадійність процесу виробництва, висока вартість сировини тощо [11].

Серед усіх існуючих технологій мультиматеріального адитивного виробництва найбільший практичний інтерес має метод лазерного спікання неметалевих, зокрема склокерамічних, та металевих порошків.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розробка основних принципів при створенні нових типів наноструктурованих СКМ для виробництва ЕС.

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання:

- формулювання основних вимог до скломатеріалів для електронних систем;
- обґрунтування вибору стекол для одержання СКМ для електронних систем;
- обґрунтування вибору критеріїв синтезу скломатриці;
- вибір структурних критеріїв при розробці складів.

**Результати та їх обговорення.** Розширення областей застосування електронних систем вимагає удосконалення матеріалів та посилення вимог до їх властивостей. Наджорсткі умови експлуатації потребують високих електричних, термічних та механічних властивостей СКМ (табл. 4).

Таблиця 4. Властивості склокристалічних матеріалів

| Властивості / стандарт<br>(за наявності)                                                            | Показники |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Електричні</b>                                                                                   |           |
| Питомий електроопір, Ом·м,<br>при T = 20 °C                                                         | 10–16     |
| Діелектрична проникність,<br>при $f = 10^{10}$ Гц                                                   | 3,5       |
| Електрична міцність, МВ·м <sup>-1</sup> ,<br>при $f = 50$ Гц<br>(ДСТУ ІЕС 60168:2009)               | 25–75     |
| Тангенс кута діелектричних втрат при<br>$f = 10^{10}$ Гц                                            | 0,005     |
| <b>Механічні</b>                                                                                    |           |
| Коефіцієнт інтенсивності напруг,<br>МПа·м <sup>1/2</sup> (EN1288-1:2000)                            | 4–6       |
| Твердість за Кнупом, ГПа<br>(ДСТУ ISO 9385-2002)                                                    | 8,0       |
| Модуль пружності, ГПа                                                                               | 150–200   |
| Міцність на згин, МПа                                                                               | 400       |
| Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>                                                                | 4–5       |
| Абразивостійкість, г/см <sup>2</sup>                                                                | 0,003     |
| <b>Термічні</b>                                                                                     |           |
| Коефіцієнт теплопровідності,<br>Вт/(м·°C) при T = 20 °C                                             | 0,07–0,09 |
| Температурний коефіцієнт лінійного<br>розширення $\alpha_{100-600} \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup> | 0,5–20    |
| Хімічна стійкість, г/дм <sup>2</sup>                                                                | 0,01–0,03 |
| Щільність, кг/м <sup>3</sup>                                                                        | 2350      |
| Вартість, у.о./кг                                                                                   | нижче 50  |

Поряд з цим більш висока при порівнянні з керамікою хімічна стійкість та чистота шліфування поверхні дозволяє створювати на основі склокераміки тонкі пластини для підкладок мікроелементів та схем, які виготовляються в вакуумі.

Забезпечення високих експлуатаційних властивостей високоміцних склокерамічних матеріалів реалізується шляхом формування ситалізованої нано- та субмікронної структури скломатриці в умовах двохстадійної

низькотемпературної (< 800 °C) та короткотривалої (< 1 год) термічної обробки за рахунок:

– вибору складів на основі літійалюмосилікатних стекл зі значеннями розрахункових показників  $f_{Si} > 0,35$ ,  $K_{кр} \geq 3,5$  та  $K_{пр} \geq 2,1$  в області метастабільної ліквідації та кристалізації  $\beta$ -евкриптити,  $\beta$ -сподумену та/або дисилікату літію;

– використання комплексних каталізаторів кристалізації  $P_2O_5$ ,  $CeO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $ZrO_2$  та  $ZnO$ ;

– забезпечення утворення сиботаксичних груп  $[SiO_4]^{4-}$  у розплаві при в'язкості понад  $10^8$  Па·с при співвідношенні  $SiO_2/Al_2O_3 = 1,0-4,0$  з вмістом  $Li_2O$  6–10 мас. % для формування зародків кристалізації;

– протікання тонкодисперсної об'ємної кристалізації скла з наявністю  $\beta$ -евкриптити та  $\beta$ -сподумену та/або дисилікату літію у кількості порядку 80 об.% при співвідношенні 1/1/0,5;

– протікання поверхневої кристалізації з формуванням шовковистої текстур з  $R_a = 1-3$  мкм.

Вибір склокераміки в системі  $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$  обґрунтовано її значним комерційним значенням зважаючи на її низький ТКЛР і високу хімічну стійкість [12] для застосування в побуті (варочні панелі електричних та газових печей), медицині (стоматологія, кісткове протезування), техніці (оптичні вікна, дзеркала), електроніці (гібридні схеми, магнітні диски), машино- та авіабудуванні (антенні обтічники, бронематеріали для скління та захисту) і фотоніці [13]. Літійалюмосилікатна світлочутлива склокераміка демонструє значний потенціал для заміни кремнієвих матеріалів у виготовленні пристроїв мікроелектромеханічної системи [14]. Широкий діапазон складів на основі твердих розчинів  $\beta$ -кварцу,  $\beta$ -евкриптити,  $\beta$ -сподумену або дисилікату літію, які визначаються міцно зв'язаною структурою (рис. 1), дозволяє створити поліфазні композиції з регульованими властивостями та здатністю до обробки. Важливе значення при цьому має склад та вміст каталізаторів кристалізації [15, 16], модифікуючих та склоутворюючих компонентів, зокрема співвідношення  $CaF_2/\Sigma(CaO+CaF_2)$  [17] та вміст  $Al_2O_3$  [18].

Завдяки формуванню дисипативної самоорганізованої мікро- та наноструктури СКМ характеризуються спеціальними електричними властивостями ( $\epsilon = 7-8$ ;  $\lg \rho = 10-16$  Ом·м при  $T = 20$  °C,  $\tg \delta = 0,0003-0,0030$  при  $f = 1$  МГц і  $T = 25$  °C).

Разом з цим простота виготовлення виробів складної форми, а також їх незначна вага ( $\rho = 2350-2400$  кг/м<sup>3</sup>), екологічність виробництва та енергозбереження, відносно невисока вартість при порівнянні з керамічними матеріалами дозволяє віднести створення нових СКМ для електронних систем до пріоритетних галузей науки та техніки.

**Висновки.** Розроблено основні принципи при створенні нових типів наноструктурованих СКМ для електронних систем, які полягають у розробці складів СКМ з самоорганізованою структурою на основі вітчизняної сировини в умовах низькотемпературної

короткотривалої термічної та характеризуються виключно високими термічними, електричними та хімічними властивостями завдяки вмісту алюмосилікатів та дисилікату літію.

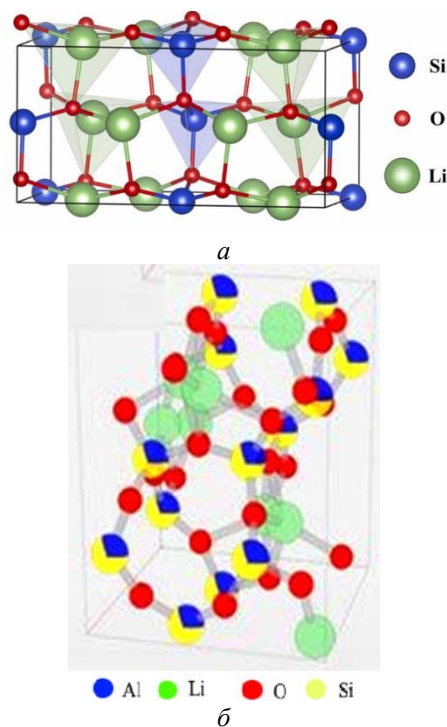


Рисунок 1 – Структура кристалів;  
а – дисилікату літію, б –  $\beta$ -сподумену

Забезпечення впровадження основних принципів ресурсо- та енергозбереження та аспектів захисту навколишнього середовища дозволить вирішити важливі матеріалознавчі та технологічні задачі щодо створення принципово нового типу наноструктурованих СКМ. Це дозволить забезпечити вітчизняний ринок конкурентоспроможними виробами за рахунок зниження їх вартості та знизить імпортозалежність у галузі ІТ-технологій, приладо- та машинобудуванні, електроніці та електротехніці.

#### Список літератури

1. The future of work in the electronics industry Advancing decent work in more inclusive, sustainable and resilient electronics supply chains: report. Geneva: International Labour Office, 2024. 57 p. URL: <https://researchrepositary.ilo.org/esploro/outputs/995626056202676> (date of access: 07.03.2025).
2. Averikhina T., Buriachenko M., Vasylieva V. Modern trends of the world market of electrical equipment. *Economics. Finances. Law*. 2021. No. 6/1. P. 5–9. [http://dx.doi.org/10.37634/efp.2021.6\(1\).1](http://dx.doi.org/10.37634/efp.2021.6(1).1)
3. Ceramics Market Size, Statistics, Scope & Growth Drivers By 2031. *Market Research Business Consulting and Strategy Planning Firm | Data Bridge Market Research Private Ltd.* URL: [https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-ceramics-market?srsId=AfmBOoqdoblr-0G8WZJthTrhk-ZjYV6s4fignA7XbYRFH5nmJK2U7C\\_j](https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-ceramics-market?srsId=AfmBOoqdoblr-0G8WZJthTrhk-ZjYV6s4fignA7XbYRFH5nmJK2U7C_j) (date of access: 01.03.2025).

4. Gopinath S.C.B., Ramanathan S., Yasin M.N.M., Razak M.I.S., Ismail Z. H., Salleh S., Sauli Z., Malarvili M.B., Subramaniam S. Failure Analysis on Silicon Semiconductor Device Materials: Optical and High-resolution Microscopic Assessments. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 3451–3461. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.116>
5. Marimuthu S., Malathi A.C.J., Raghavan V., Grace A.N. Fundamentals of electronic ceramics. *Advanced Ceramics for Energy Storage, Thermoelectrics and Photonics*. 2023. P. 3–17. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90761-3.00017-6>
6. Letz M. Glasses and Glass Ceramics for Applications in High Frequency Electronics. 2019 *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Bochum, Germany, 16–18 July 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/imws-amp.2019.8880114>
7. Savvova O.V., Blinova N.K., Fesenko O.I., Voronov G.K., Babich O.V., Riabinin S.O. High-strength aluminosilicate glass composite materials with special electrophysical properties. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 279–286. <https://doi.org/10.15407/fm28.02.279>
8. Savvova O.V., Lyahovskiy A.F., Blinova N.K., Voronov G.K., Ryabinin S.A., Topchyi V.L. Development of impact-resistant glass-ceramic materials for radio-transparent armor elements. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2019. No. 3. P. 151–157. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-151-157>
9. Savvova O.V., Lyahovskiy A.F., Blinova N.K., Voronov G.K., Ryabinin S.A., Topchyi V.L. Alumina silicate glass-ceramic materials for electrical purposes. *Scientific research on refractories and technical ceramics*. 2020. Vol. 120. P. 174–185. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.120.17>
10. Nazir A., Gokcekaya O., Billah K. Md M., Ertugrul O., Jiang J., Sun J., Hussain S. Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D Printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*. 2023. P. 111661. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>
11. Dadkhah M., Tulliani J.-M., Saboori A., Iuliano L. Additive Manufacturing of Ceramics: Advances, Challenges, and Outlook *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. P. 6635–6664. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.033>
12. Khater G.A., Safwat E.M., Kang J., Yue Y., Khater A.G. Some Types of Glass-Ceramic Materials and their Applications. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 2020. Vol. 7, Iss. 3. P. 1–16.
13. Chakrabarti A., Menon S., Tarafder A., Molla A. R. Glass–ceramics: A Potential Material for Energy Storage and Photonic Applications. *Advanced Structured Materials*. Singapore, 2022. P. 265–304. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5821-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5821-2_10)
14. Huo W., Dai L., Hu B., Luo R., Wang G., Yuan B., Yu T., Lin B. Exploring the effect of facile i-line photolithography on the structure and physicochemical properties of photosensitive glass ceramics. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, Iss. 21, P. A. P. 40722–40728. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.082>
15. Hamzawy E.M.A., El-Bassyouni G.T., Azooz M.A., Turkey G.M. Electrical properties of Lithium silicate-based glasses and their Glass-ceramics *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2024. Vol. 35, No. 3. 253. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-11981-2>
16. Jakovac M., Žic M., Pavić L., Klasner T. Electrical Properties of Two Types of Lithium-Based Glass Ceramics. *Acta Stomatologica Croatica*. 2022. Vol. 56, No. 3. P. 281–287. <https://doi.org/10.15644/asc56/3/6>
17. Tian S., Shen H.Y., Huang J.J., Zhang H., Liu K.G., He B., Zhao J., Kong L.B. Sintering behaviors, microstructure and properties of Li<sub>2</sub>O–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> glass-ceramics for LTCC applications. *Materials Chemistry and Physics*. 2025. Vol. 330. P. 130163. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130163>
18. Liang T., Zhang J., Chen H., Gao L., Gan G., Qu S., Wu C., Harris V.G. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on structural dynamics and dielectric properties of lithium metasilicate photoetchable glasses as an interposer technology for microwave integrated circuits. *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, No. 11. P. 18032–18036. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.119>

#### References (transliterated)

1. The future of work in the electronics industry Advancing decent work in more inclusive, sustainable and resilient electronics supply chains: report. Geneva: International Labour Office, 2024. 57 p. URL: <https://researchrepository.ilo.org/esploro/outputs/995626056202676> (date of access: 07.03.2025).
2. Averikhina T., Buriachenko M., Vasylijeva V. Modern trends of the world market of electrical equipment. *Economics. Finances. Law*. 2021. No. 6/1. pp. 5–9. [http://dx.doi.org/10.37634/efp.2021.6\(1\).1](http://dx.doi.org/10.37634/efp.2021.6(1).1)
3. Ceramics Market Size, Statistics, Scope & Growth Drivers By 2031. *Market Research Business Consulting and Strategy Planning Firm | Data Bridge Market Research Private Ltd.* URL: [https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-ceramics-market?srsltid=AfmBOOqdoblr-0G8WZJthTrhk-ZjYV6s4fignA7XbYRFH5nmJK2U7C\\_j](https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-ceramics-market?srsltid=AfmBOOqdoblr-0G8WZJthTrhk-ZjYV6s4fignA7XbYRFH5nmJK2U7C_j) (date of access: 01.03.2025).
4. Gopinath S.C.B., Ramanathan S., Yasin M.N.M., Razak M.I.S., Ismail Z. H., Salleh S., Sauli Z., Malarvili M.B., Subramaniam S. Failure Analysis on Silicon Semiconductor Device Materials: Optical and High-resolution Microscopic Assessments. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. pp. 3451–3461. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.116>
5. Marimuthu S., Malathi A.C.J., Raghavan V., Grace A.N. Fundamentals of electronic ceramics. *Advanced Ceramics for Energy Storage, Thermoelectrics and Photonics*. 2023. P. 3–17. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90761-3.00017-6>
6. Letz M. Glasses and Glass Ceramics for Applications in High Frequency Electronics. 2019 *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Bochum, Germany, 16–18 July 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/imws-amp.2019.8880114>
7. Savvova O.V., Blinova N.K., Fesenko O.I., Voronov G.K., Babich O.V., Riabinin S.O. High-strength aluminosilicate glass composite materials with special electrophysical properties. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28, No. 2. pp. 279–286. <https://doi.org/10.15407/fm28.02.279>
8. Savvova O.V., Lyahovskiy A.F., Blinova N.K., Voronov G.K., Ryabinin S.A., Topchyi V.L. Development of impact-resistant glass-ceramic materials for radio-transparent armor elements. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2019. No. 3. pp. 151–157. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-151-157>
9. Savvova O.V., Lyahovskiy A.F., Blinova N.K., Voronov G.K., Ryabinin S.A., Topchyi V.L. Alumina silicate glass-ceramic materials for electrical purposes. *Scientific research on refractories and technical ceramics*. 2020.

Vol. 120. pp. 174–185. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.120.17>

10. Nazir A., Gokcekaya O., Billah K. Md M., Ertugrul O., Jiang J., Sun J., Hussain S. Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D Printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*. 2023. pp. 111661. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>

11. Dadkhah M., Tulliani J.-M., Saboori A., Iuliano L. Additive Manufacturing of Ceramics: Advances, Challenges, and Outlook *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. pp. 6635–6664. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.033>

12. Khater G.A., Safwat E.M., Kang J., Yue Y., Khater A.G. Some Types of Glass-Ceramic Materials and their Applications. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 2020. Vol. 7, Iss. 3. pp. 1–16.

13. Chakrabarti A., Menon S., Tarafder A., Molla A. R. Glass-ceramics: A Potential Material for Energy Storage and Photonic Applications. *Advanced Structured Materials*. Singapore, 2022. pp. 265–304. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5821-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5821-2_10)

14. Huo W., Dai L., Hu B., Luo R., Wang G., Yuan B., Yu T., Lin B. Exploring the effect of facile i-line

photolithography on the structure and physicochemical properties of photosensitive glass ceramics. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, Iss. 21, P. A. pp. 40722–40728. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.082>

15. Hamzawy E.M.A., El-Bassouni G.T., Azooz M.A., Turkey G.M. Electrical properties of Lithium silicate-based glasses and their Glass-ceramics *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2024. Vol. 35, No. 3. 253. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-11981-2>

16. Jakovac M., Žic M., Pavić L., Klaser T. Electrical Properties of Two Types of Lithium-Based Glass Ceramics. *Acta Stomatologica Croatica*. 2022. Vol. 56, No. 3. pp. 281–287. <https://doi.org/10.15644/asc56/3/6>

17. Tian S., Shen H.Y., Huang J.J., Zhang H., Liu K.G., He B., Zhao J., Kong L.B. Sintering behaviors, microstructure and properties of  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  glass-ceramics for LTCC applications. *Materials Chemistry and Physics*. 2025. Vol. 330. pp. 130163. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130163>

18. Liang T., Zhang J., Chen H., Gao L., Gan G., Qu S., Wu C., Harris V.G. Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on structural dynamics and dielectric properties of lithium metasilicate photoetchable glasses as an interposer technology for microwave integrated circuits. *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, No. 11. pp. 18032–18036. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.119>

### Відомості про авторів / About the Authors

**Савцова Оксана Вікторівна (Savvova Oksana)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6664-2274>, e-mail: [savvova\\_oksana@ukr.net](mailto:savvova_oksana@ukr.net)

**Фесенко Олексій Ігорович (Fesenko Oleksii)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3888-9493>, e-mail: [oleksii.fesenko@kname.edu.ua](mailto:oleksii.fesenko@kname.edu.ua)

**Тимошук Максим Ігорович (Tymoshchuk Maksym)** – аспірант кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6449-5741>, e-mail: [maksym.tymoshchuk@kname.edu.ua](mailto:maksym.tymoshchuk@kname.edu.ua)

**Білоус Вячеслав Богданович (Bilous Viacheslav)** – магістрант кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0900-3509>, e-mail: [vyacheslav.bilous@kname.edu.ua](mailto:vyacheslav.bilous@kname.edu.ua)

**Скрипинець Анна Василівна (Skripinets Anna)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3845-8303>, e-mail: [anna.skrypynets@kname.edu.ua](mailto:anna.skrypynets@kname.edu.ua)