

А.Г. Кевшин^[0000-0002-3581-8852], В.В. Галяч^[0000-0003-0066-7174], Г.П. Шаварова^[0000-0003-0251-9327], Н.А. Кевшин*Кафедра експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій,
Волинський національний університет імені Лесі Українки***СУЧАСНІ НАПРЯМИ ВИКОРИСТАННЯ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ СТЕКОЛ В
ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА РАДІОЕЛЕКТРОНІЦІ**

У статті проаналізовано сучасні напрями застосування халькогенідних стекол в електроніці та радіоелектроніці. Розглянуто їх використання у фазозмінній пам'яті, нейроморфних системах, сенсорах та пристроях зв'язку 5G/6G. Особливу увагу приділено фотоніці та легуванню іонами ербію для створення компактних оптичних підсилювачів. Визначено ключові технологічні виклики, зокрема питання термічної стабільності та очищення матеріалів.

Ключові слова: халькогенідні стекла, фазозмінна пам'ять, інтегральна фотоніка, нейроморфні системи, іони ербію, оптичні підсилювачі, радіоелектроніка, середній інфрачервоний діапазон.

A.H. Kevshyn, V.V. Halyan, H.P. Shavarova, N.A. Kevshyn

**MODERN TRENDS IN THE APPLICATION OF CHALCOGENIDE GLASSES IN
ELECTRONICS AND RADIO ENGINEERING**

The article provides a comprehensive analysis of modern trends in the application of chalcogenide glasses in electronics and radio engineering. Their key physicochemical properties, which enable a wide range of applications in optoelectronic and electronic devices, are considered. Particular attention is paid to their use in phase-change memory, neuromorphic systems, and sensor technologies. The prospects for integrating chalcogenide glasses into photonic structures, especially in the mid-infrared range, are analyzed. The role of erbium ion doping in the development of efficient waveguide optical amplifiers for telecommunication systems is highlighted. The main technological challenges related to thermal stability, material purification, and compatibility with CMOS technologies are outlined. It is concluded that chalcogenide glasses have significant potential as a fundamental material platform for next-generation electronics and radiophotonics.

Keywords: chalcogenide glasses, phase-change memory, integrated photonics, neuromorphic systems, erbium ions, optical amplifiers, radio electronics, mid-infrared range.

Постановка проблеми. Халькогенідні стекла останніми роками привертають значну увагу завдяки поєднанню унікальних оптичних, електричних та діелектричних властивостей, що робить їх перспективними для сучасної електроніки та радіоелектроніки. Високий потенціал цих матеріалів проявляється у фазових комірках пам'яті, сенсорних пристроях, оптоелектронних компонентах та елементах високочастотної техніки. Разом із тим, практичне застосування халькогенідних стекол у складних електронних системах обмежене через недостатнє розуміння взаємозв'язку їх хімічного складу, структури та електрофізичних характеристик. Тому систематичний огляд сучасних напрямів досліджень і технологічних рішень стає критично важливим для визначення перспектив розвитку та інтеграції цих матеріалів у новітні електронні та радіоелектронні пристрої.

Проблема дослідження. У сучасній електроніці та радіоелектроніці зростає потреба в матеріалах з високою функціональністю, що поєднують електричні, оптичні та теплові властивості, що стимулює інтерес до халькогенідних стекол. Ці аморфні матеріали характеризуються широкою ІЧ прозорістю, високим показником заломлення і можливістю налаштування фізичних параметрів через зміну складу, що робить їх привабливими для фотонних та електронних застосувань [1]. Проте їх складність структури й слабка кореляція між хімічним складом і функціональними властивостями створюють бар'єри для прогнозованого проектування компонентів на їх основі. Через це існує гостра потреба у систематичному узагальненні наукових даних щодо їх властивостей і технологій обробки.

Особливо актуальним є вивчення тонкоплівкових і структурованих халькогенідних систем, здатних забезпечити інтеграцію в мікроелектронні та оптоелектронні пристрої із низькими втратами та високою стабільністю. Розвиток технологій вирощування плівок і композитів на їх основі продовжує розширювати можливості для створення ІЧ фотодетекторів, хвилеводів та активних фотонних елементів [2]. Водночас, відсутність узгоджених моделей поведінки таких шарів у робочих умовах обмежує їх комерціалізацію. Це робить необхідним узагальнення сучасних досягнень і технологічних викликів для подальшого просування галузі.

У радіоелектроніці халькогенідні матеріали мають потенціал для використання в компонентній базі високочастотних пристроїв завдяки їх діелектричним і радіочастотним властивостям. Проте вплив структури стекол на втрати сигналу і їх поведінка під високочастотними навантаженнями досі недостатньо вивчені у порівнянні з традиційними

діелектриками. Через це практичне застосування таких матеріалів у фільтрах, хвилеводах та системах 5G/6G залишається обмеженим і потребує подальших фундаментальних і прикладних досліджень. Таким чином, у науковому співтоваристві постає завдання узагальнити сучасні тренди і критично оцінити їхній потенціал у радіоелектронних застосуваннях. Крім того, інтеграція халькогенідних стекел із традиційними кремнієвими та CMOS технологіями стикається з численними технологічними бар'єрами, пов'язаними з термічною стабільністю та сумісністю процесів виготовлення. Наявні дослідження демонструють обмежений прогрес у створенні надійних міжматеріальних інтерфейсів і контролі дефектів структури, що впливають на надійність пристроїв. Це підкреслює потребу у системному огляді технічних і матеріалознавчих викликів, що стоять на шляху впровадження халькогенідних стекел у практичні електронні рішення. Аналіз актуальних наукових здобутків дозволить окреслити перспективні напрями досліджень і розробок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Халькогенідні склоподібні напівпровідники (ХСН) на сьогодні залишаються одним із найбільш перспективних об'єктів у матеріалознавстві завдяки їхнім унікальним оптичним та електричним властивостям. Сучасні дослідження акцентують увагу на здатності цих матеріалів до швидких фазових переходів під впливом зовнішніх впливів [3]. Основний інтерес вчених зосереджений на сполуках систем Ge-Sb-Te та Ag-In-Sb-Te, які демонструють високу стабільність станів. Саме ці хімічні складі дозволяють створювати енергонезалежну пам'ять нового покоління, що перевершує традиційні кремнієві аналоги за швидкістю запису [4; 5].

Одним із ключових напрямів використання халькогенідів у сучасній радіоелектроніці є розробка оптичних перемикачів та модуляторів для фотонних інтегральних схем. Останні публікації демонструють успішні експерименти з інтеграції халькогенідних плівок у кремнієву фотоніку для керування світловими сигналами на нанорівні. Високий показник заломлення та прозорість в інфрачервоному діапазоні роблять ці стекла незамінними для сенсорів нічного бачення та систем лідарів. Використання тонкопліткових структур на основі халькогенідів дозволяє значно зменшити габарити пристроїв без втрати їхньої чутливості [6].

В роботі [7] описано створення мемристорів на основі ХСН, що здатні до пластичної зміни провідності. Такі пристрої забезпечують апаратну реалізацію штучних нейронних мереж з наднизьким енергоспоживанням, що є критичним для мобільних платформ. Завдяки здатності зберігати континуум станів опору, халькогенідні системи стають базою для архітектур, що виходять за межі класичної моделі фон Неймана.

У сфері гнучкої електроніки халькогенідні стекла відкривають нові горизонти для створення переносних пристроїв та «розумного» одягу. Сучасні дослідження підтверджують, що аморфна структура цих матеріалів дозволяє їм зберігати стабільні характеристики навіть при значних механічних деформаціях. Вчені активно тестують халькогенідні термоелектричні генератори, які здатні перетворювати тепло людського тіла в електроенергію для живлення біосенсорів. Це дозволяє створювати повністю автономні медичні моніторингові системи, що не потребують традиційних акумуляторів [8; 9].

Окремим вектором досліджень є використання халькогенідів у радіочастотних (РЧ) системах та пристроях зв'язку формату 5G/6G. Останні дослідження вказують на високу ефективність фазозмінних перемикачів у фільтрах та антенах з перебудовою частоти. Такі компоненти характеризуються низькими втратами сигналу в міліметровому діапазоні хвиль, що є вирішальним для високошвидкісної передачі даних. Застосування халькогенідів дозволяє реалізувати динамічну конфігурацію радіоканалів у реальному часі, підвищуючи пропускну здатність мереж [10].

Останніми роками зростає інтерес до оптичних матеріалів і волокон для середнього інфрачервоного (СІЧ) діапазону, що обумовлено потребами охорони здоров'я, екології та оборонними застосуваннями. СІЧ-діапазон містить атмосферно прозорі вікна (3–5 μm і 8–12 μm), придатні для тепловізійного зображення у військових та цивільних системах. Халькогенідні мікроструктуровані оптичні волокна (МОВ) поєднують пропускання халькогенідних стекел до 18 μm з унікальними оптичними властивостями завдяки широким можливостям проектування їх геометрії. Сучасні методи лазерного осадження та 3D-друку дозволяють створювати складні геометричні форми з халькогенідів з високою точністю. Це відкриває шлях до масового виробництва дешевих та безпечних компонентів для побутової електроніки та промислової автоматизації [11].

Викладення основного матеріалу. Халькогенідні стекла впродовж останніх двох десятиліть перетворилися з вузькоспеціалізованих матеріалів фізики аморфного стану на одну з ключових матеріальних платформ сучасної електроніки та радіоелектроніки. Їхня наукова й прикладна привабливість зумовлена унікальним поєднанням електричних, оптичних і структурних властивостей, які можуть цілеспрямовано змінюватися шляхом варіювання хімічного складу, способів осадження плівок і термічної обробки. Саме ця керованість робить халькогенідні стекла універсальними функціональними матеріалами для енергонезалежної пам'яті, селекторів кросбар-матриць, мемристивних і нейроморфних елементів, а також для інтегральної фотоніки й mid-IR сенсоріки [12].

Одним із найважливіших напрямів використання халькогенідних стекел є фазозмінна електронна пам'ять. Матеріали системи Ge–Sb–Te, зокрема класичний склад $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, здатні швидко й оборотно переходити між аморфним і кристалічним станами, демонструючи при цьому різницю електричного опору в кілька порядків [13]. Це явище лежить в основі phase-change memory (PCM), яка розглядається як перспективна альтернатива традиційним типам енергонезалежної пам'яті. Сучасні дослідження зосереджені не лише на підвищенні швидкості перемикавання, але й на зниженні енергії програмування, стабілізації аморфного стану та зменшенні дрейфу параметрів під час тривалої експлуатації [14]. Важливою тенденцією є легування GST-матеріалів і розробка нових фазозмінних складів, зокрема на основі систем Ge–Sb–Se–Te, які поєднують прийнятні електричні характеристики з покращеними оптичними властивостями, що відкриває можливості для їх використання в оптоелектроніці та фотоніці [15].

Розвиток щільних масивів пам'яті неминуче пов'язаний із проблемою паразитних струмів у кросбар-архітектурах, тому поряд із PCM активно досліджуються селекторні елементи. У цьому контексті особливе місце займають оновічні порогові перемикачі (ovonic threshold switching, OTS), створені на основі аморфних халькогенідних сплавів. OTS-матеріали характеризуються різким нелінійним переходом у провідний стан при досягненні порогової напруги та поверненню у високорезистивний стан після зняття електричного поля. Така поведінка дозволяє ефективно пригнічувати витoki струму в матрицях пам'яті та підвищувати їх масштабованість. Аналіз сучасної літератури свідчить про те, що халькогенідні OTS-селектори зберігають лідерство серед компонентів, необхідних для масштабування архітектур типу 1S1R чи 1S1M у системах збереження даних [15]. При цьому значна увага приділяється вивченню фізичних механізмів порогового перемикавання, деградації матеріалу при багаторазових циклах, а також розробці арсенік-вільних складів з огляду на екологічні та регуляторні вимоги [16].

Поза межами класичної пам'яті халькогенідні стекла дедалі активніше застосовуються в мемристивних і нейроморфних системах. Їхня здатність реалізовувати багаторівневі стани провідності, а також поступові й керовані зміни опору робить такі матеріали придатними для моделювання синаптичних ваг у апаратних нейромережах і для концепцій обчислень у пам'яті (in-memory computing). У сучасних роботах наголошується, що ключовими параметрами для таких застосувань є лінійність перемикавання, рівень шуму, стабільність проміжних станів і відтворюваність характеристик у великих масивах [17]. Водночас активно застосовуються методи машинного навчання та високопродуктивного моделювання для пошуку нових халькогенідних складів із заданими властивостями, що свідчить про перехід від емпіричного до дано-орієнтованого матеріального дизайну [18].

Не менш важливим є використання халькогенідних стекел у радіоелектроніці та фотоніці, зокрема, в середньому інфрачервоному діапазоні. Завдяки високому показнику заломлення, широкій прозорості в області приблизно 2–20 мкм і можливості формування тонкопліткових хвилеводів ці матеріали стали однією з базових платформ для mid-IR інтегральної фотоніки [19]. У численних оглядових роботах халькогенідні стекла розглядаються поряд із кремнієвими та германієвими технологіями як ключові матеріали для створення компактних спектрометрів, сенсорів газів і біомедичних діагностичних систем. Практичні дослідження зосереджені на зниженні оптичних втрат у хвилеводах, оптимізації технологій осадження та травлення, а також на інтеграції з mid-IR джерелами випромінювання, зокрема квантово-каскадними лазерами [20; 21].

Окремий і швидко зростаючий напрям пов'язаний із використанням фазозмінних халькогенідних матеріалів в оптичних і фотонних пристроях. Перехід між аморфним і кристалічним станами супроводжується значною зміною оптичних констант, що дозволяє створювати програмовані фотонні елементи, такі як фазові модулятори, перемикачі та реконфігуровані резонатори. На відміну від електронної пам'яті, тут особливо ціниться здатність матеріалу зберігати заданий оптичний стан без додаткового енергоспоживання, що відкриває шлях до енергоефективних фотонних схем [17]. Досліджуються також альтернативні методи обробки,

© А.Г. Кевшин, В.В. Галян, Г.П. Шаварова, Н.А. Кевшин

зокрема розчинні та низькотемпературні технології формування оптичних фазозмінних плівок, які можуть бути привабливими для масштабного виробництва [22].

Хоча основна увага в електроніці зосереджена на електронному перенесенні заряду, варто відзначити й суміжний напрям використання халькогенідних склоподібних матеріалів як іонних провідників у твердотільних акумуляторах. Сульфідні системи на основі $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ та модифіковані склади демонструють високу іонну провідність і хорошу технологічну сумісність, що робить їх перспективними для живлення автономних електронних і сенсорних пристроїв [23]. Хоча ці матеріали не виконують безпосередньо функцій активних елементів радіоелектроніки, вони формують матеріальну основу для інтегрованих електронних систем нового покоління.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій, спрямований на підвищення швидкодії обробки даних та подальшу мініатюризацію компонентів, призводить до того, що традиційна кремнієва електроніка наближається до фундаментальних фізичних обмежень. Це сприяє активному пошуку нових матеріальних платформ, які забезпечують ефективну взаємодію між електронними та фотонними процесами в інтегрованих системах. Зокрема, халькогенідні стекла, леговані рідкоземельними іонами, такими як ербій (Er^{3+}), розглядаються як перспективний матеріал для фотонних пристроїв високої продуктивності. Такі системи досліджуються як потенційна основа для інтегрованих хвилевідних підсилювачів та оптичних сенсорів у ближньому і середньому інфрачервоному діапазонах [24].

Іони ербію мають внутріцентрові оптичні переходи, що відповідають довжині хвилі близько 1,55 мкм – спектральній області, де оптичні волокна демонструють найнижчі втрати. Це робить Er^{3+} -леговані середовища ключовими для активних компонентів у телекомунікаціях. Зокрема, в якості таких матеріалів можна використовувати сульфідні та селенідні ХСН.

На рис. 1 представлено спектр фотолюмінесценції склоподібних сплавів системи $(\text{X})(\text{Er}_2\text{Se}_3) - (100-\text{X})(20 \text{ мол.}\% \text{Ga}_2\text{Se}_3 - 80 \text{ мол.}\% \text{GeSe}_2)$. Як видно, зміна вмісту іонів ербію дає змогу керувати інтенсивністю люмінесценції, що сприяє розширенню можливостей їх практичного використання.

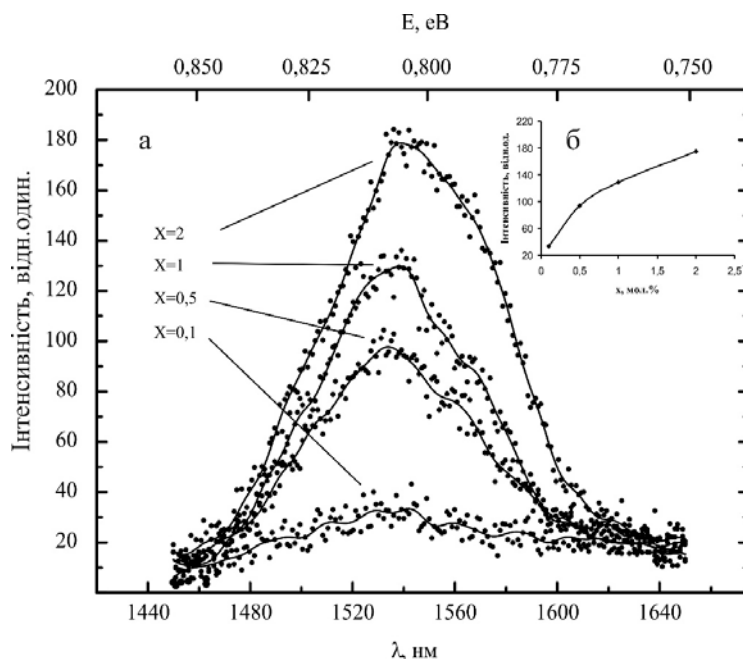


Рис. 1. а) Спектри фотолюмінесценції склоподібних сплавів системи $(\text{X})(\text{Er}_2\text{Se}_3) - (100-\text{X})(20 \text{ мол.}\% \text{Ga}_2\text{Se}_3 - 80 \text{ мол.}\% \text{GeSe}_2)$; б) залежність інтенсивності люмінесценції в максимумі (~1530 нм) від концентрації Er_2Se_3 , мол.%. Температура вимірювання 298 К [25].

Інтеграція ербію безпосередньо в халькогенідні матриці дозволяє створювати компактні хвилевідні підсилювачі, що можуть бути реалізовані безпосередньо у світловодах на кремнієвих чипах. Такі підсилювачі демонструють суттєвий коефіцієнт підсилення в декілька дБ/см у С-діапазоні (біля 1,54–1,55 мкм), що підтверджується експериментальними даними [26]. Це особливо важливо для радіофотонних систем, де радіочастотні сигнали передаються та обробляються в оптичному домені, що дозволяє суттєво зменшити рівень електромагнітних завад і забезпечити значне розширення смуги пропускання, зокрема для мереж стандартів 5G та перспективних 6G.

На сьогодні активні халькогенідні матеріали застосовуються у низці пріоритетних науково-технологічних напрямів. В інтегральній фотоніці вони використовуються для реалізації оптичних підсилювачів і комутаційних елементів у центрах обробки даних, де швидкості передавання інформації досягають терабітного рівня [27]. У сфері сенсорики та систем нічного бачення прозорість халькогенідних стекел у середньому інфрачервоному діапазоні дає змогу створювати лазерні сенсори з високою спектральною чутливістю, придатні для детекції газових домішок або використання в навігаційних і прицільних системах [28]. Окремий інтерес становлять нейроморфні обчислювальні системи, де фазові переходи в халькогенідних структурах під дією електричного струму або оптичного випромінювання дозволяють реалізувати елементи пам'яті, функціонально подібні до біологічних нейронів [29].

Разом із тим, практичне впровадження халькогенідних стекел, легованих ербієм, супроводжується низкою технологічних труднощів. Ключовою проблемою залишається необхідність глибокого очищення матеріалу від домішок кисню та гідроксильних груп, які навіть у надзвичайно малих концентраціях призводять до суттєвого пригнічення люмінесценції іонів Er^{3+} [28]. Крім того, тривають дослідження, спрямовані на підвищення механічної надійності та термічної стабільності халькогенідних структур з метою їх сумісності зі стандартними CMOS-технологіями виробництва мікроелектронних схем [29].

Висновки. Проведений аналіз підтверджує, що халькогенідні стекла сьогодні є фундаментальною платформою для розробки енергонезалежної пам'яті PCM та нейроморфних систем, що базуються на здатності матеріалу до швидких фазових переходів. Завдяки унікальній прозорості в ІЧ-діапазоні та високому показнику заломлення ці сполуки відкривають шлях до створення надчутливих сенсорів і компактної інтегральної фотоніки. Особливу цінність має легування матриць іонами ербію, яке дозволяє виготовляти ефективні хвилевідні підсилювачі для оптичних мереж 5G/6G безпосередньо на кремнієвих чипах. Крім того, аморфна природа халькогенідів робить їх перспективними для гнучкої електроніки та нових типів твердотільних акумуляторів. У підсумку, успішна комерціалізація таких пристроїв прямо залежить від вирішення технологічних проблем очищення сировини та забезпечення термічної сумісності з сучасними CMOS-процесами.

Список використаних джерел:

1. Halyan V.V., Kevshyn A.H., Ivashchenko I.A. *et al.* Near- and Mid-Infrared Emissions from $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$: Er, Nd Glasses. *Ukr. J. Phys.* 2025. Vol. 70, № 1. P. 48–55. DOI: [10.15407/ujpe70.1.48](https://doi.org/10.15407/ujpe70.1.48)
2. Soumya Suresh, Sheenu Thomas. Studies on chalcogenide glass solution-processed films towards IR photonics applications. *Materials Today: Proceedings.* 2023. Vol. 93, № 2. P. 9–12. DOI: [10.1016/j.matpr.2023.08.086](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.086)
3. Xiaozhang Chen, Yuan Xue, Yibo Sun *et al.* Neuromorphic Photonic Memory Devices Using Ultrafast, Non-Volatile Phase-Change Materials. *Adv. Mater.* 2023. Vol. 35, № 37. e2203909. DOI: [10.1002/adma.202203909](https://doi.org/10.1002/adma.202203909)
4. Hanyi Zhang, Xudong Wang, Wei Zhang. First-principles investigation of amorphous Ge-Sb-Se-Te optical phase-change materials. *Optical Materials Express.* 2022. Vol. 12, № 7. P. 2497–2506. DOI: [10.1364/OME.462846](https://doi.org/10.1364/OME.462846)
5. Dasol Kim, Taek Sun Jung, Hanjin Park *et al.* Phase-change mechanism and role of each element in Ag-In-Sb-Te: Chemical bond evolution. *Applied Surface Science.* 2021. Vol. 544, № 1. 148838. DOI: [10.1016/j.apsusc.2020.148838](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148838)
6. Kangjian Bao, Boshu Sun, Kunhao Lei *et al.* Interlayer Silicon-Chalcogenide waveguide coupler for heterogeneous integration photonics. *Optical Materials.* 2025. Vol. 159. 116622. DOI: [10.1016/j.optmat.2024.116622](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116622)
7. Su Yeon Lee, Jin Joo Ryu, Hyun Kyu Seo *et al.* Ag-dispersive chalcogenide media for readily activated electronic memristor. *Applied Surface Science.* 2024. Vol. 644. 158747. DOI: [10.1016/j.apsusc.2023.158747](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158747)
8. Shiliang Kang, Yanqing Fu, Hao Gu, Changgui Lin. Chalcogenide glass for thermoelectric application. *Journal of Non-Crystalline Solids: X.* 2022. Vol. 15. 100111. DOI: [10.1016/j.nocx.2022.100111](https://doi.org/10.1016/j.nocx.2022.100111)
9. Yimei Deng, Meng Wei, Yan Lei *et al.* Advances in silver-based chalcogenide flexible thermoelectric materials. *CrystEngComm.* 2025. Vol. 27. P. 1055–1077. DOI: [10.1039/D4CE00915K](https://doi.org/10.1039/D4CE00915K)
10. Chen K. *et al.* Chalcogenide phase-change material advances programmable terahertz metamaterials: a non-volatile perspective for reconfigurable intelligent surfaces. *Nanophotonics.* 2024. Vol. 13, № 12. P. 2101–2105. DOI: [10.1515/nanoph-2023-0645](https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0645)

11. Troles J., Carcreff J., Chevire F. *et al.* Fabrication of chalcogenide microstructured optical preforms and fibers by additive manufacturing of chalcogenide glasses. *Proceedings Vol. 12417, Optical Components and Materials XX*. 2023. 1241702. DOI: [10.1117/12.2651253](https://doi.org/10.1117/12.2651253)
12. Pengfei Liu, Jae Won Heo, Hyeonmin Bong *et al.* Synthesis of functional chalcogenide materials for memory/sensing devices and their integration into artificial sensory systems. *Int. J. Extrem. Manuf.* 2026. Vol. 8., № 2. 022003. DOI: [10.1088/2631-7990/ae1db9](https://doi.org/10.1088/2631-7990/ae1db9)
13. Gerislioglu B., Bakan G., Ahuja R. *et al.* The role of Ge₂Sb₂Te₅ in enhancing the performance of functional plasmonic devices. *Materials Today Physics*. 2020. Vol. 12. 100178. DOI: [10.1016/j.mtphys.2020.100178](https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100178)
14. Neeru Bala, Bheem Khan, Kamaljit Singh *et al.* Recent advances in doped Ge₂Sb₂Te₅ thin film based phase change memories. *Mater. Adv.* 2023. Vol. 4. P. 747–768. DOI: [10.1039/D2MA01047J](https://doi.org/10.1039/D2MA01047J)
15. Zihao Zhao, Sergiu Clima, Daniele Garbin *et al.* Chalcogenide Ovonic Threshold Switching Selector. *Nano-Micro Lett.* 2024. Vol. 16, № 1. 81. DOI: [10.1007/s40820-023-01289-x](https://doi.org/10.1007/s40820-023-01289-x)
16. Sanghyun Ban, Jangseop Lee, Yoori Seo *et al.* Advances in Ovonic Threshold Switch Selector Technologies for Storage Class Memory: From Fundamentals to Development and Beyond. *Adv. Electron. Mater.* 2025. Vol. 11. 2400665. DOI: [10.1002/aelm.202400665](https://doi.org/10.1002/aelm.202400665)
17. Yi-Siou Huang, Chih-Yu Lee, Ichiro Takeuchi and Carlos A. Ríos Ocampo. Optical Phase Change Materials. *Annual Review of Materials Research*. 2025. Vol. 25. P. 255–283. DOI: [10.1146/annurev-matsci-080522-094849](https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-080522-094849)
18. Shivani Bhawsar and Eui-Hyeok Yang. Recent advances in machine learning and deep learning-enabled studies on transition metal dichalcogenides. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2024. Vol. 58, № 7. 073005. DOI: [10.1088/1361-6463/ad9933](https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad9933)
19. Jean-Luc Adam, Laurent Calvez, Johann Troles, Virginie Nazabal. Chalcogenide Glasses for Infrared Photonics. *International Journal of Applied Glass Science*. 2015. Vol. 6, №3. P. 287–294. DOI: [10.1111/ijag.12136](https://doi.org/10.1111/ijag.12136)
20. Jordan Goldstein, Hongtao Lin, Skylar Deckoff-Jones *et al.* Waveguide-integrated mid-infrared photodetection using graphene on a scalable chalcogenide glass platform. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. 3915. DOI: [10.1038/s41467-022-31607-7](https://doi.org/10.1038/s41467-022-31607-7)
21. Abdolnasser Zakery, S. R. Elliott. Optical Properties and Applications of Chalcogenide Glasses: A Review. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023. Vol. 330, № 1–3. P. 1–12. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2003.08.064](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2003.08.064)
22. Daniel Wiedeman, Rashi Sharma, Eric Bissell *et al.* Solution-based processing of Ge₂Sb₂Se₄Te optical phase change materials. *Optical Materials Express*. 2024. Vol. 14, №12. P. 2874–2883. DOI: [10.1364/OME.542387](https://doi.org/10.1364/OME.542387)
23. Jihun Roh, Namgyu Do, Hyungjin Lee *et al.* Towards practical all-solid-state batteries: structural engineering innovations for sulfide-based solid electrolytes. *Energy Mater.* 2025. Vol. 5. 500061. DOI: [10.20517/energymater.2024.219](https://doi.org/10.20517/energymater.2024.219)
24. Halyan V.V., Kityk I.V., Kevshyn A.H. *et al.* Effect of temperature on the structure and luminescence properties of Ag_{0.05}Ga_{0.05}Ge_{0.95}S₂–Er₂S₃ glasses. *Journal of Luminescence*. 2017. Vol. 181. P. 315–320. DOI: [10.1016/j.jlumin.2016.09.022](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.09.022)
25. Давидюк Г.Є., Галян В.В., Парасюк О.В., Кевшин А.Г., Когут Ю. Оптичне поглинання і фотолюмінісценція склоподібних сплавів системи Er₂Se₃–Ga₂Se₃–GeSe₂. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2010. Т. 11, № 1. С. 68–71.
26. Tamilarasan Sabapathy, Arunbabu Ayiriveetil, Ajoy K. Kar *et al.* Direct ultrafast laser written C-band waveguide amplifier in Er-doped chalcogenide glass. *Optical Materials Express*. 2012. Vol. 2, № 11. P. 1556–1561. DOI: [10.1364/OME.2.001556](https://doi.org/10.1364/OME.2.001556)
27. Yan K. Rare-earth ion doped chalcogenide waveguide amplifiers : diss. ... PhD : 01.04.05 / Kunlun Yan ; The Australian National University. Canberra, 2018. 174 p.
28. Legang Li, Junyi Bian, Qing Jiao *et al.* GeS₂–In₂S₃–CsI Chalcogenide Glasses Doped with Rare Earth Ions for Near- and Mid-IR Luminescence. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 37577. DOI: [10.1038/srep37577](https://doi.org/10.1038/srep37577)
29. Chandresh Kumari, S.C. Katyal, Pankaj Sharma. Role of rare earth on the spectral properties of chalcogenide glassy alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 80, № 3. P. 1882–1884. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.05.632](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.632)

Дата надходження статті до видання: 23.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026