

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2024-1-2>

**Оксана ЗАМУРУЄВА**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-0032-0613>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 56181742100

**Василь САХНЮК**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-9225-7473>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 13405019700

**Юрій ІВАНОВСЬКИЙ**

студент Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**Андрій ФЛЯК**

студент Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**Бібліографічний опис статті:** Замуруєва, О., Сахнюк, В., Івановський, Ю., Фляк, А. (2024). Властивості перспективних композитів для оптоелектронної техніки. *Фізика та освітні технології*, 1, 17–24, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-1-2>

**ВЛАСТИВОСТІ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОМПОЗИТІВ  
ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

*Мета роботи* провести аналіз властивостей перспективних композитів з шаруватою структурою для оптоелектронної техніки. Визначити особливості змін параметрів при зміні компонентів.

Оцінено ширину забороненої зони. Установлено залежність зміни ширини забороненої зони від температури й компонентного вмісту досліджуваних сполук. На основі аналізу частотної залежності коефіцієнта поглинання та фотопровідності запропоновано модель оптичних переходів, яка пояснює зв'язок домішкових максимумів спектрів фотопровідності із відповідними структурними дефектами.

Проаналізовано залежність ширини енергетичних щілин для прямого (H) і непрямого (Z) мінімумів зони провідності від вмісту  $E_g = f(x)$   $\text{SiSe}_2$ ,  $\text{GeSe}_2$ . Схематично пкзано енергетична зонна структура  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_x(\text{Si}, \text{Ge})_x\text{Se}_2$ .

Отже, напівпровідникові кристали твердих розчинів  $\text{TlInSe}_2\text{-D}^{\text{IV}}\text{Se}_2$  ( $\text{D}^{\text{IV}} - \text{Si}, \text{Ge}$ ), ширина забороненої зони яких при кімнатній температурі  $1,12 \div 1,69$  eV, є перспективними в якості функціональних матеріалів сучасної оптоелектронної техніки, для застосування у фотоніці та фотовольтаїці. Зміна фізичних властивостей від молярного вмісту компонент x, пов'язаних з перебудовою зонної структури, значно розширює функціональні можливості кристалічних сполук  $\text{TlInSe}_2\text{-D}^{\text{IV}}\text{Se}_2$  ( $\text{D}^{\text{IV}} - \text{Si}, \text{Ge}$ ).

В статті встановлено при температурі  $T = 300$  K основні фотонні параметри кристалів твердих розчинів  $\text{TlInSe}_2\text{-D}^{\text{IV}}\text{Se}_2$  від молярного вмісту  $\text{SiSe}_2$ ,  $\text{GeSe}_2$ , в якості використання як функціональних матеріалів для оптоелектронних пристроїв. Тому маючи добре налагодженні технології одержання кристалічних сполук можна одержувати багатофункціональні матеріали для оптоелектронних пристроїв. Зміною молярного вмісту компонент x можна прогнозовано змінювати механізми міжзонних переходів напівпровідників, що розширює практичне використання матеріалу для світло- чи фотопристроїв.

**Ключові слова:** напівпровідник, германій, кремній, багатокомпонентні сполуки, ширина забороненої зони.

**Oksana ZAMURUIEVA**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-0032-0613>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 56181742100

**Vasily SAKHNYUK**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-9225-7473>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 13405019700

**Yurii IVANOVSYI**

*Student of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**Andrew FLIAK**

*Student of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**To cite this article:** Zamuruieva, O., Sakhnyuk, V., Ivanovsyi, Y., Fliak, A. (2024). Vlastyivosti perspektyvnykh kompozytiv dlia optoelektronnoi tekhniky [Properties of promising prospective composites for optoelectronic]. *Фізика та освітні технології*, 1, 17–24, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-1-2>

**PROPERTIES OF PROMISING PROSPECTIVE COMPOSITES FOR OPTOELECTRONIC**

*The purpose of the work is to analyze the properties of promising composites with a layered structure for optoelectronic technology. Determine the features of parameter changes when changing components.*

*The width of the forbidden band is estimated. The dependence of the band gap change on temperature and the component content of the studied compounds was established. Based on the analysis of the frequency dependence of the absorption coefficient and photoconductivity, a model of optical transitions is proposed, which explains the connection of the home maxima of the photoconductivity spectra with the corresponding structural defects.*

*The dependence of the width of the energy gaps for the direct (H) and indirect (Z) minima of the conduction band on the content of SiSe<sub>2</sub>, GeSe<sub>2</sub> was analyzed. The energy band structure of Tl<sub>1-x</sub>In<sub>1-x</sub>(Si, Ge)<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> was schematically plotted.*

*Therefore, semiconductor crystals of TlInSe<sub>2</sub>-D<sup>IV</sup>Se<sub>2</sub> (D<sup>IV</sup>-Si, Ge) solid solutions, whose band gap at room temperature is 1.12–1.69 eV, are promising as functional materials of modern optoelectronic technology, for use in photonics and photovoltaics. The change in physical properties from the molar content of components x, associated with the rearrangement of the band structure, significantly expands the functionality of crystalline compounds TlInSe<sub>2</sub>-D<sup>IV</sup>Se<sub>2</sub> (D<sup>IV</sup>-Si, Ge).*

*In the article, the basic photonic parameters of TlInSe<sub>2</sub>-D<sup>IV</sup>Se<sub>2</sub> solid solution crystals from the molar content of SiSe<sub>2</sub>, GeSe<sub>2</sub>, as functional materials for optoelectronic devices, were established at a temperature of T = 300 K. Therefore, having well-established technologies for obtaining crystalline compounds, it is possible to obtain multifunctional materials for optoelectronic devices. By changing the molar content of components x, it is possible to predictably change the mechanisms of interband transitions of semiconductors, which expands the practical use of the material for light or photo devices.*

**Key words:** semiconductor, germanium, silicon, multicomponent compounds, band gap width.

**Актуальність дослідження.** Визначення можливостей застосування нових напівпровідників матеріалів у фізиці напівпровідників вимагає зростання та дослідження фізичних властивостей матеріалів. Деякі подвійні та

трьохкомпонентні напівпровідники з шаруватою кристалічною структурою, такі як халькогеніди III групи (InSe, GaSe, GaTe, TlInSe<sub>2</sub>, TlInS<sub>2</sub>, TlGaSe<sub>2</sub> тощо) є ретельно досліджено і вже доведено їх застосовність у фізиці

твердого тіла, наприклад, для оптоелектронних пристроїв (Kerimova, 2000).

Однак інтерес як науковців, так і практиків до таких напівпровідників зростає з кожним роком. Тому розширення класу шаруватих напівпровідників, зокрема типу  $A^{III}B^{III}C^{VI}$ , таких як  $TlInSe_2$ , отримання високоякісних кристалів і подальше дослідження їх комплексу фізичних властивостей є актуальними завданнями у сучасній фізиці твердого тіла. Один із методів модифікації їх фізичних властивостей є отримання твердих розчинів цих напівпровідників.

Експериментальні дослідження, проведені на  $TlGaSe_2$  і  $TlInSe_2$  демонструють, що дослідження фізичні властивості системи  $TlInSe_2-D^{IV}Se_2$  є досить перспективними з огляду на створення нових матеріалів для оптичних приладів видимого діапазону (Orudzhev, 2003).

Сполуки напівпровідників типу  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  мають властивості, які є привабливими для використання в різних оптоелектронних пристроях через їхню технологічну перевагу. Кристали з цієї групи є доступними на ринку і використовуються в виробництві пристроїв нелінійної оптики та сонячних елементів. Наприклад, кристали  $TlInSe_2$  мають властивості, які забезпечують високу чутливість до ближнього інфрачервоного випромінювання та стійкість до радіації. Ці характеристики роблять їх перспективними для створення детекторів і приймачів випромінювання, а також для функціональних пристроїв, що можуть керуватися електричним полем навіть в умовах високої радіаційної активності (Kerimova, 2000).

**Мета дослідження.** Дослідження зміни фізичних властивостей від молярного вмісту перспективних композитів для оптоелектронної техніки.

**Викладення основного матеріалу.** Оптичні вимірювання є найважливішими методами для визначення зонної структури напівпровідників. Один з основних методів дослідження дефектного стану напівпровідника – це вивчення енергетичної залежності коефіцієнта поглинання світла. Електронні переходи, ініційовані фотонами, можуть відбуватися між різними зонами, що призводить до визначення енергії забороненої зони, або в межах однієї зони, що відображає поглинання на вільних носіях. Оптичні вимірювання

також можуть використовуватися для аналізу коливань решітки, таких як фонони.

Для держання інформації про структуру енергетичних досліджують спектри поглинання світла напівпровідником. Як наслідок особливостей напівпровідники прийнято поділяти на прямозонні та непрямозонні. Фотон може поглинутись у результаті переходу електрона з заповненого стану валентної зони в вільний стан зони провідності. Цей процес є основним у фотодетекторах або сонячних батареях. У світлодіодах цей процес є зворотнім. Для фотонів, які поглинаються або випромінюються, загальна теорія для оптичних переходів між валентною і зоною провідності заснована на так званому правилі  $\vec{k}$ -відбору ( $\vec{k}_1 = \vec{k}_2$ ).

Згідно з (Davydyuk, 2013), для кристалів  $Tl_{1-x}In_xD^{IV}Se_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ) залежності  $\alpha = f(h\nu)$  мають складний характер. Також із зменшенням вмісту  $x$  (зменшенням вмісту  $D^{IV}Se_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ )) край смуги фундаментального поглинання зміщується в область менших енергій. Відповідальні за зміщення два процеси (Davydyuk, 2013; Mozolyuk, 2011) – статичне заміщення атомів індію атомами кремнію (чи германію, олова) і збільшення концентрації вакансій талію  $V_{Tl}$ . Саме ці процеси є домінуючими в зміні ширини забороненої зони (Тауц, 1966). Внаслідок заміщення атомів індію ( $In^{+3}$ ) атомами  $D^{IV}$  ( $D^{IV} - Si^{+4}, Ge^{+4}$ ) утворюються донорні центри. У результаті утворення позитивно заряджених іонів (донорів) та негативно заряджених іонів ( $V_{Tl}$  – акцепторів) зростає енергія іонного зв'язку між ними. Збільшення енергії зв'язку між атомами кристала веде до зростання  $E_g$  і зменшення міжатомної відстані, а отже, об'єму елементарної комірки сплавів (Mozolyuk, 2011).

Для оцінення величини оптичної ширини забороненої зони було використано метод Тауца (Piasecki, 2016). Аналіз спектрів поглинання при  $T = 300$  К показав, що у різних енергетичних діапазонах експериментальні залежності  $\alpha = f(h\nu)$  в усіх твердих розчинах спрямлюються в координатах  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  та  $(\alpha h\nu)^2$ . Це свідчить про реалізацію в даних твердих розчинах одночасно як непрямих, так і прямих дозволених переходів (Myronchuk, 2014; Zamurueva, 2014).

За оптичними вимірюваннями встановлено залежності значень величин енергетичної

щільності від молярного вмісту  $x$  компонент  $\text{SiSe}_2$ ,  $\text{GeSe}_2$  для кристалічних сполук  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$ ,  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$  ( $x \leq 0,2$ ). На рис. 1 зображені для залежності енергетичної щільності від молярної частки  $x$ .

Для  $0 \leq x < 0,1$  усі досліджувані напівпровідники є прямозонними. При  $x \geq 0,1$  непрямоzonні,  $E_g$  збільшується наступним чином:

Від $E_g$	при $x$	до $E_g$	при $x$	Для матеріалів
1,53	0,1	1,73	0,2	$\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$
1,56	0,1	1,58	0,2	$\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$

На рисунку 2 показані відповідні діаграми енергії-імпульсу для досліджуваних сполук в залежності від вмісту. Зазначено, що зона провідності має два мінімуми: один вздовж  $H$ -осі, який є прямим мінімумом, та інший вздовж  $Z$ -осі, який є непрямим мінімумом (Zamirueva, 2014). Така структура енергетичної зони не суперечить вказаним джерелам. Електрони в прямому мінімумі зони провідності та дірки в максимумі валентної зони мають однакові імпульси, в той час як електрони в непрямому мінімумі мають інший імпульс. Для прямоzonних напівпровідників, таких як  $\text{TlInSe}_2$ ,  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$ ,  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$  ( $x < 0,1$ ), імпульс при міжзонних переходах зберігається, тому ці переходи характеризуються високим ступенем

ймовірності. У прямоzonних матеріалах процес випромінювальної рекомбінації є домінуючим. У той час для  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$ ,  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$  при  $x \geq 0,1$ , у яких заборонена зона непряма, ймовірність міжзонних переходів надзвичайно мала, оскільки в цьому випадку для збереження імпульсу при переході необхідна участь фононів або інших факторів розсіювання. Тому для підсилення випромінювальних переходів у непрямоzonних напівпровідниках спеціально створюють рекомбінаційні центри.

Як показано на рис. 1, кристалічні сполуки  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$ ,  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$  ( $x \leq 0,2$ ) охоплюють широкий спектр від інфрачервоного до початку видимого спектра ( $1,07 \div 0,72$  мкм). Прямий і непрямий переходи в забороненій зоні відбуваються приблизно при 1,40-1,45 eV ( $\text{SiSe}_2$ ,  $\text{GeSe}_2$ ), а ефективність для генерації довжин хвиль при непрякій забороненій зоні дуже мала.

Ефективні центри випромінювальної рекомбінації можуть бути створені шляхом введення спеціальних домішок. Введені у напівпровідник атоми вуглецю, заміщують деякі атоми  $\text{Si}$ ,  $\text{Ge}$  у вузлах кристалічної решітки. Вуглець і кремній обидва елементи IV групи в таблиці Менделєєва і мають однакову зовнішню електронну структуру, а структури їх внутрішніх оболонок суттєво відрізняються. Ця різниця призводить до виникнення поблизу зони провідності

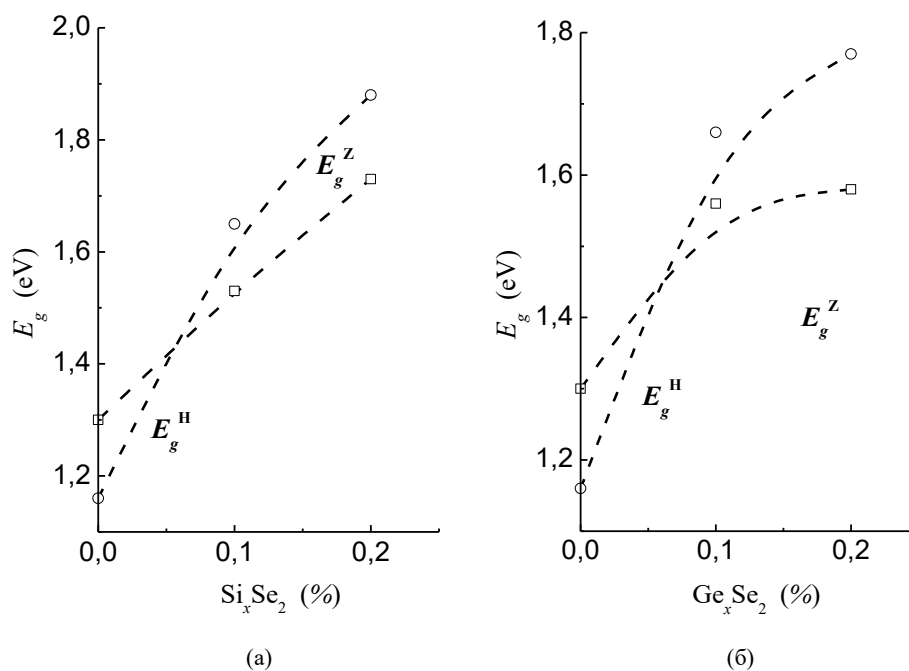


Рис. 1. Зміна  $E_g$  прямих (H) і непрямих переходах зони провідності зі зміною вмісту (а)  $\text{SiSe}_2$ , (б)  $\text{GeSe}_2$  при  $T=300^\circ\text{C}$

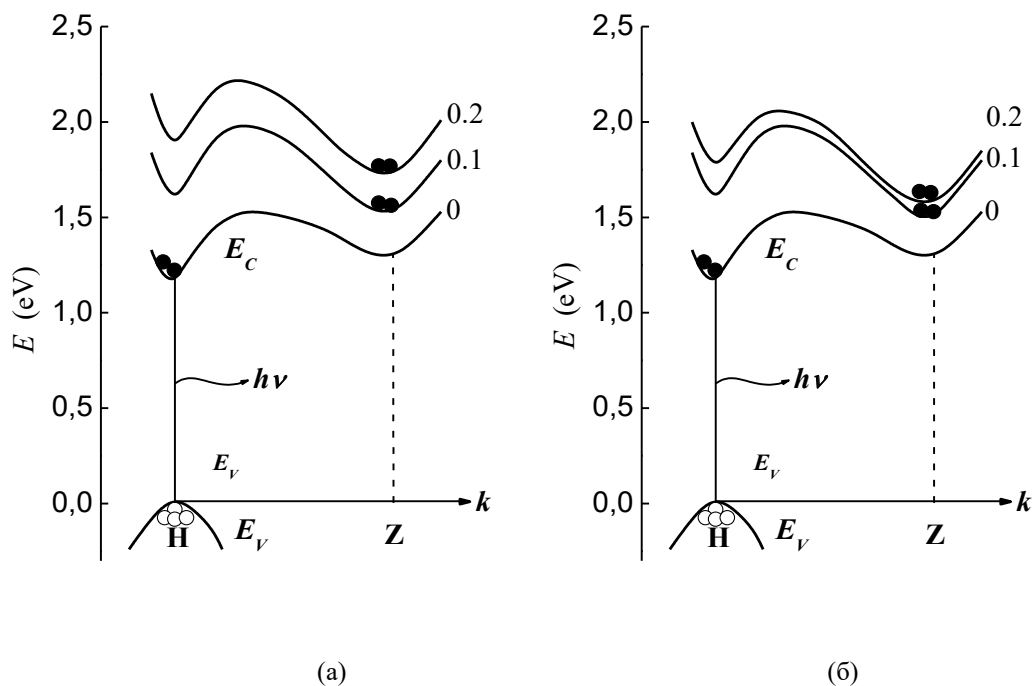


Рис. 2. Енергетична зонна структура при  $T=300^{\circ}\text{C}$  (а)  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{SiSe}_2$ , (б)  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{GeSe}_2$

електронного рівня пастки. Створений таким чином рекомбінаційний центр називається *ізоелектронним центром*. Можливий і інший тип ізоелектронного центра для  $\text{SiSe}_2$ ,  $\text{GeSe}_2$ . У нормальному стані ізоелектронні центри нейтральні. Інжектований електрон спочатку захоплюється на центр, а потім негативно заряджений центр захоплює дірку з валентної зони для формування зв'язаного екситону. Подальша анігіляція цієї електронно-діркової пари породжує фотон з енергією, яка приблизно дорівнює різниці між шириною забороненої зони і енергією зв'язку центра. Така система і такий процес показані на  $E - k$  діаграмі (рис. 3а). Так як захоплений електрон сильно локалізований на центрі, його імпульс розсіюється. Таким чином забезпечується перетворення квазіімпульсу (не порушується закон збереження імпульсу), внаслідок чого ймовірність прямого переходу суттєво зростає. У непрямозонних матеріалах описаний механізм випромінювальної рекомбінації є переважаючим.

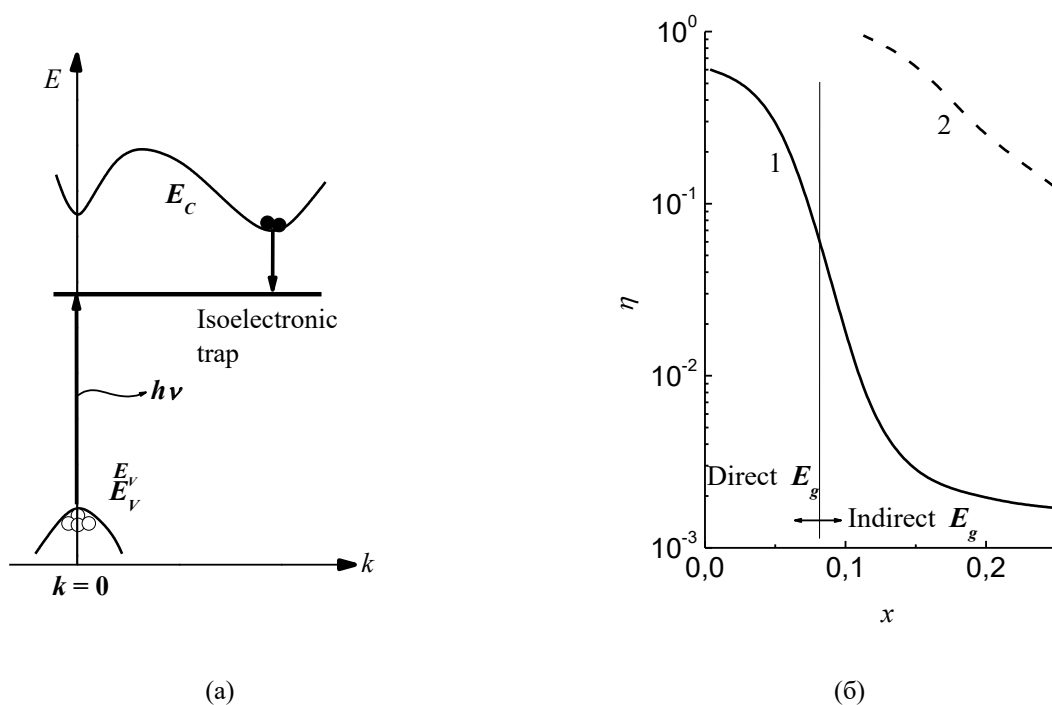
На рис. 3б показана залежність квантової ефективності від вмісту сполуки  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}(\text{Si}, \text{Ge})_x\text{Se}_2$   $\eta = f(x)$  з і без ізоелектронної домішки. Ефективність без домішки різко падає в діапазоні вмісту  $0,06 < x < 0,09$  через близький прямий-непрямий  $E_g$  перехід. Ефективність з ізоелектронною домішкою значно більша при

$x > 0,1$ , але все ж продовжує зменшуватись зі збільшенням значення  $x$ , це відбувається через різницю в імпульсі між прямою і непрямую забороненими зонами (рис. 2).

Фотодетектори відіграють важливу роль в оптико-волоконних системах зв'язку ближнього ІЧ-діапазону ( $0,8 \div 1,6$  мкм). Вони детектують оптичні сигнали, тобто перетворюють зміни оптичного випромінювання в електричні коливання. Фотодетектори повинні задовольняти жорсткі вимоги, такі як, висока чутливість для робочих довжин хвиль, висока швидкість фотовідгуку (швидкодія) і мінімальний шум.

Коли падаюче світло потрапляє на поверхню фотопровідника, носії генеруються внаслідок збудження або зона-зонних переходів (власне збудження), або переходів між енергетичними рівнями в забороненій зоні (домішкове збудження), що призводить до збільшення провідності  $\sigma_i > \sigma_d$  ( $\sigma_d$  – темнова провідність). Провідність власного фотопровідника визначається  $\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$  і збільшується при освітленні, в основному, за рахунок збільшення кількості носіїв. Довгохвильова границя визначається

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{1,24}{\Delta E(\text{eV})} \text{ мкм, де } \Delta E - \text{ширина забороненої зони. Оскільки енергія фотона } hv > \Delta E \text{ теж може викликати збудження, то } \lambda - \text{це максимальна довжина хвилі для детектування.}$$



**Рис. 3. (а) випромінювальна рекомбінація через ізоелектронну пастку в непрямозонному матеріалі, (б) залежність квантової ефективності від вмісту сполуки  $\eta = f(x)$  при 1 – відсутності, 2 – наявності ізоелектронної домішки**

Падаюче випромінювання коротших довжин хвиль, поглинається напівпровідником і генеруються електронно-діркові пари. Для домішкового фотопровідника фотозбудження відбувається між краєм зони і домішковим енергетичним рівнем.

Кристали  $Tl_{1-x}In_{1-x}D^{IV}_xSe_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ) – фоточутливі матеріали (Zamurueva, 2014). Але зміна опору відбувається по різному при кімнатній температурі в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = 0,4 \div 1,4$  мкм (рис. 4).

Для  $TlInSe_2$  максимум фотопровідності знаходиться при  $\lambda \approx 0,9$  мкм, а ширина забороненої зони становить 1,12 еВ (Hancias, 1989). При додаванні  $D^{IV}_xSe_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ) та зростанні їх молярного вмісту максимум фотопровідності зміщується у короткохвильову область. При температурі 300 К для  $Tl_{1-x}In_{1-x}Si_xSe_2$   $\lambda \approx 0,91$  і  $0,81$  мкм (рис. 4а, криві 1' і 1''). Енергії даних переходів оцінювалися по довгохвильовому краю фотопровідності і виявилися  $\approx 1,26$  і  $1,42$  еВ. Таким переходам можуть відповідати непрямі переходи електронів із валентної зони в долини зони провідності (з випромінюванням фононів) (рис. 2а). Для  $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$   $\lambda \approx 1,03$  і  $0,95$  мкм (рис. 4а, криві 2' і 2''), а відповідно  $E \approx 1,15$  і  $1,17$  еВ.

При температурі 300 К максимуми фотопровідності для усіх сполук знаходяться в області фундаментальних переходів або близької до неї. Від молярного вмісту та типу додаючої компоненти змінюються довгохвильова границя фотопровідності  $\lambda = f(x)$  (рис. 5а) і фоточутливість  $\sigma_i/\sigma_d = f(x)$  (рис. 5б). Довгохвильова границя фотопровідності змінюється від  $\lambda \approx 1,12$  мкм до  $\lambda \approx 0,87$  мкм для  $SiSe_2$ ,  $\lambda \approx 1,06$  мкм для  $GeSe_2$ . Фоточутливість  $\sigma_i/\sigma_d = f(x)$  кристалічних сполук  $Tl_{1-x}In_{1-x}Si_xSe_2$ ,  $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$  ( $x \leq 0,2$ ) зменшується.

**Висновки.** Напівпровідникові кристали твердих розчинів  $TlInSe_2-D^{IV}Se_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ), перспективні матеріали сучасної оптоелектронної техніки, для застосування у фотоніці та фотovoltaїці. Оцінена ширина забороненої зони складає 1,12 та 1,69 еВ. Зміна фізичних характеристик від молярного вмісту компоненту  $x$ , що пов'язана зі зміною зонної структури, істотно розширює функціональні можливості кристалічних сполук  $TlInSe_2-D^{IV}Se_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ).

Встановлено при  $T = 300$  К основні фотонні параметри кристалів твердих розчинів  $TlInSe_2-D^{IV}Se_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ) від молярного вмісту  $SiSe_2, GeSe_2$ , в якості використання як функціональних матеріалів для оптоелектронних

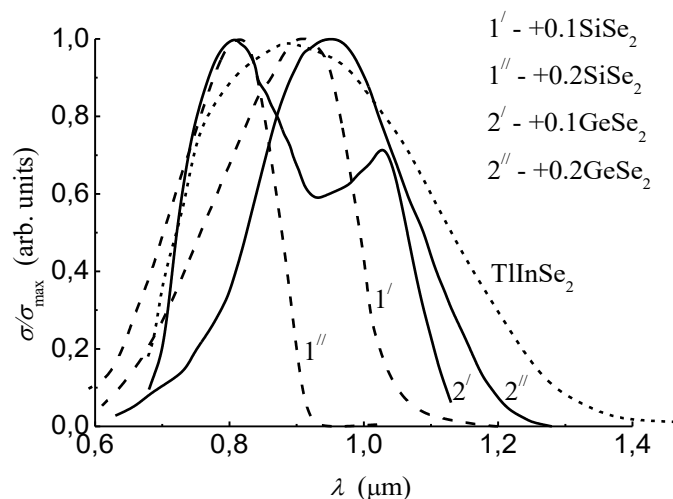


Рис. 4. Спектральний розподіл фотопровідності  $\sigma/\sigma_{\max} = f(\lambda)$  для  $Tl_{1-x}In_{1-x}D^{IV}_xSe_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ )

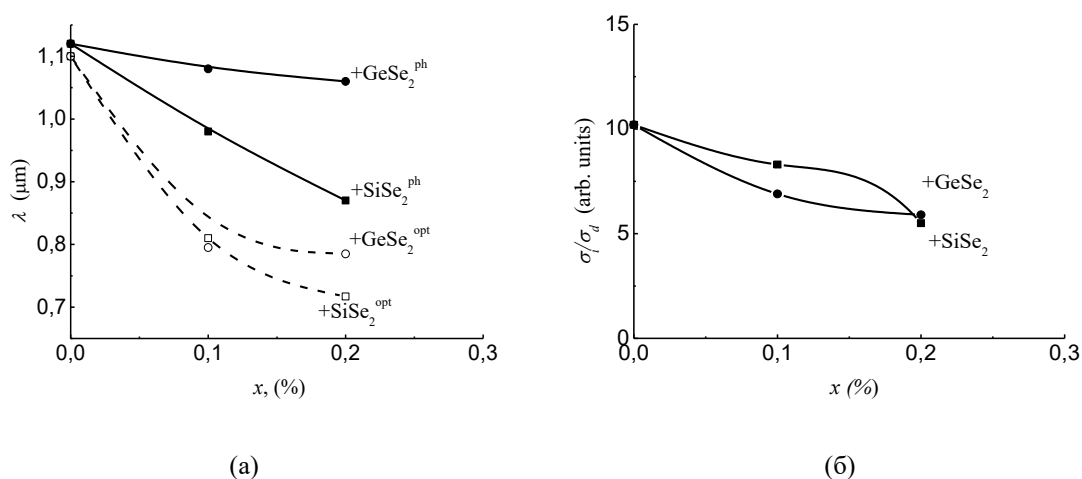


Рис. 5. Залежність від молярного вмісту  $SiSe_2$ ,  $GeSe_2$  для сполук  $Tl_{1-x}In_{1-x}D^{IV}_xSe_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ) при  $T = 300$  К (а) довгохвильової границі фотопровідності  $\lambda = f(x)$ , (б) максимуму фоточутливості  $\sigma_i/\sigma_d = f(x)$

пристроїв. Тому, маючи добре налагодженні технології одержання кристалічних сполук  $Tl_{1-x}In_{1-x}D^{IV}_xSe_2$  ( $D^{IV} - Si, Ge$ ), можна одержувати багатофункціональні матеріали для оптоелектронних пристроїв. Шляхом зміни молярного

вмісту компонентів  $x$  можна передбачити, як зміниться механізм міжзонних переходів у напівпровідниках, що розширює можливості практичного використання цього матеріалу для світлочувливих або фотопристроїв.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Kerimova E., Mustafaeva S., Guseinova D., et al. The Influence of Hydrostatic Pressure on the Electrical Conductivity and Optical Properties of Chain-Layered  $TlInSe_2$  and  $TlInSe_2-TlInS_2$ . *Solid Solutions Phys. Status Solidi A*, 2000. Vol. 179(1). 199.
2. Orudzhev G., Mamedov N., Uchiki H., et al. Band structure and optical functions of ternary chain  $TlInSe_2$ . *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2003. Vol. 64 (9–10). 1703.
3. Davydyuk G. E., Khyzhun O. Y., Reshak A. H., et al. Photoelectrical properties and the electronic structure of  $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$  ( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.25$ ) single crystalline alloys. *Physical Chemistry Chemical Physics* 2013. Vol. 15. 6965.
4. Davydyuk G.E., Piasecki M., Parasyuk O.V., et al. Two-photon absorption of  $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$  ( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.25$ ) single crystalline alloys and their nanocrystallites. *Optical Materials* 2013. Vol. 35(12). 2514.

5. Mozolyuk M. Yu., Piskach L. V., Fedorchuk A. O., et al. Phase diagram of the quasi-binary system  $\text{TlInSe}_2\text{-SnSe}_2$ . *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509(6). 2693.
6. Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. *Physica Status Solidi B*. 1966. Vol. 15(2), 627.
7. Piasecki M., Myronchuk G.L., Zamurueva O.V., et al. Huge Operation by Energy Gap of Novel Narrow Band Gap  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{Se}_2$  (B=Si, Ge): DFT, X-ray Emission and Photoconductivity Studies. *Mater. Res. Express*. 2016. Vol. 3(2). 025902.
8. Myronchuk G.L., Zamurueva O.V., Parasyuk O.V., et al. Structural and optical properties of novel optoelectronic  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$  single crystals. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2014. Vol. 25(7). 3226.
9. Zamurueva O.V., Myronchuk G.L., Lakshminarayana G., et al. Structural and optical features of novel  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$  chalcogenide crystals. *Optical Materials*. 2014. Vol. 37. 614.
10. Haniyas M., Anagnostopoulos A.N., Kambas K. On the non-linear properties of  $\text{TlInX}_2$  (X = S, Se, Te) ternary compounds. *Physica B: Condensed Matter*. 1989. Vol. 160(2). 154.

#### REFERENCES:

1. Kerimova, E., Mustafaeva, S., Guseinova, D., et al. (2000). The Influence of Hydrostatic Pressure on the Electrical Conductivity and Optical Properties of Chain-Layered  $\text{TlInSe}_2$  and  $\text{TlInSe}_2\text{-TlInS}_2$ . *Solid Solutions Phys. Status Solidi A*, Vol. 179(1). 199.
2. Orudzhev, G., Mamedov, N., Uchiki, H., et al. (2003). Band structure and optical functions of ternary chain  $\text{TlInSe}_2$ . *Physical Chemistry Chemical Physics*. Vol. 64(9-10). 1703.
3. Davydyuk, G.E., Khyzhun, O.Y., Reshak, A.H., et al. (2013). Photoelectrical properties and the electronic structure of  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$  (x = 0, 0.1, 0.2, 0.25) single crystalline alloys. *Physical Chemistry Chemical Physics*. Vol. 15. 6965.
4. Davydyuk, G.E., Piasecki, M., Parasyuk, O.V., et al. (2013). Two-photon absorption of  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$  (x = 0, 0.1, 0.2, 0.25) single crystalline alloys and their nanocrystallites. *Optical Materials*. Vol. 35(12). 2514.
5. Mozolyuk, M.Yu., Piskach, L.V., Fedorchuk, A.O., et al. (2011). Phase diagram of the quasi-binary system  $\text{TlInSe}_2\text{-SnSe}_2$ . *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 509(6). 2693.
6. Tauc, J., Grigorovici, R., & Vancu, A. (1966). Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. *Physica Status Solidi B*. Vol. 15(2), 627.
7. Piasecki, M., Myronchuk, G.L., Zamurueva, O.V., et al. (2016). Huge Operation by Energy Gap of Novel Narrow Band Gap  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{Se}_2$  (B=Si, Ge): DFT, X-ray Emission and Photoconductivity Studies. *Mater. Res. Express*. Vol. 3(2). 025902.
8. Myronchuk, G.L., Zamurueva, O.V., Parasyuk, O.V., et al. (2014). Structural and optical properties of novel optoelectronic  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$  single crystals. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Vol. 25(7). 3226.
9. Zamurueva, O.V., Myronchuk, G.L., Lakshminarayana, G., et al. (2014). Structural and optical features of novel  $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$  chalcogenide crystals. *Optical Materials*. Vol. 37. 614.
10. Haniyas, M., Anagnostopoulos, A.N., Kambas, K. (1989). On the non-linear properties of  $\text{TlInX}_2$  (X = S, Se, Te) ternary compounds. *Physica B: Condensed Matter*. Vol. 160(2). 154.