

**В. Кажукаускас** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики напівпровідників Вільнюського університету (Литва);

**О. В. Новосад** – завідувач лабораторій кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**В. В. Божко** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**Г. Є. Давидюк** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**О. В. Парасюк** – кандидат хімічних наук, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**О. Р. Герасимик** – аспірант Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**Н. Вайнорюс** – співробітник кафедри фізики напівпровідників Вільнюського університету (Литва);

**В. Яноніс** – співробітник кафедри фізики напівпровідників Вільнюського університету (Литва).

## Вплив структурних дефектів технологічного походження на електричні та фотоелектричні властивості твердого розчину $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$

*Роботу виконано у ВНУ ім. Лесі Українки і Вільнюському університеті (Литва)*

Тверді розчини системи  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  належать до катионодефектних матеріалів типу  $\text{B}^{\text{II}}\text{C}_2^{\text{III}}\text{X}_4$ , у яких край смуги власного поглинання описується правилом Урбаха. Монокристали із вмістом компоненти  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ , більшим 15 моль %, є fotocутливими при низьких температурах ( $T \leq 77$  К) напівпровідниками з єдиним вузьким максимумом власної фотопровідності. Температурний коефіцієнт зміни ширини забороненої зони  $E_g$ , незалежно від співвідношення між компонентами твердого розчину, практично однаковий і в інтервалі температур 77–300 К становить  $\sim 6 \cdot 10^{-4}$  еВ/К. Особливістю низькотемпературної фотопровідності досліджуваних сполук є підвищена fotocутливість із боку більш коротких довжин хвиль від максимуму фотопровідності.

Електричні властивості монокристалів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  в області існування однофазного розчину (до 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ ) проявляють риси дефектних неупорядкованих систем із домінуючою стрибковою провідністю.

**Ключові слова:** тверді розчини, дефекти, електропровідність, оптичне поглинання, фотопровідність.

**Кажукаускас В., Новосад А. В., Божко В. В., Давидюк Г. Є., Парасюк О. В., Герасимик О. Р., Вайнорюс Н., Яноніс В.** Влияние структурных дефектов технологического происхождения на электрические и фотоэлектрические свойства твердого раствора  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$ . Твердые растворы системы  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  относятся к катионодефектным материалам типа  $\text{B}^{\text{II}}\text{C}_2^{\text{III}}\text{X}_4$ , в которых край полосы собственного поглощения описывается правилом Урбаха. Монокристаллы с содержанием компоненты  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  больше 15 моль % есть fotocувствительными при низких температурах ( $T \leq 77$  К) полупроводниками с единственным узким максимумом собственной фотопроводности. Температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны  $E_g$ , независимо от соотношения между компонентами твердого раствора, практически одинаков и в интервале температур 77–300 К составляет  $\sim 6 \cdot 10^{-4}$  эВ/К. Особенностью низкотемпературной фотопроводности исследуемых соединений является повышенная fotocувствительность со стороны более коротких длин волн от максимума фотопроводности.

Електрические свойства монокристаллов  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  в области существования однофазного раствора (до 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ ) проявляют черты дефектных неупорядоченных систем с доминирующей прыжковой провідністю.

**Ключевые слова:** твердые растворы, дефекты, электропроводимость, оптическое поглощение, фотопроводимость.

**Kazukauskas V., Novosad O. V., Bozhko V. V., Davydyuk H. YE., Parasyuk O. V., Gerasymyk O. R., Vainorius N., Janonis V. Influence of Structural Defects of Technological Origin on Electrical and Photoelectrical Properties of  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  Solid Solutions.** Solid solutions  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  belong to cation-defective  $\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{III}}\text{X}_4$  materials in which fundamental absorption edge is described by the Urbach rule. Single crystals with a content of  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  more than 15 mol % turned out to be photosensitive at low temperature ( $T \leq 77$  K) semiconductors with a single narrow maximum of intrinsic photoconductivity. The thermal coefficient of the variations of the width of the energy gap independently of the ratio between components of the compounds at temperatures 77–300 K becomes  $\sim 6 \cdot 10^{-4}$  eV/K. The peculiarity of low-temperature photoconductivity of solid solutions is increased photosensitivity at shorter wavelengths from maximum of photoconductivity. Electrical properties of crystals  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  in the existence of single-phase solid solution (to  $\sim 20$  mol %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ ) exhibit properties of defective disordered systems with dominant hopping mechanism of conductivity.

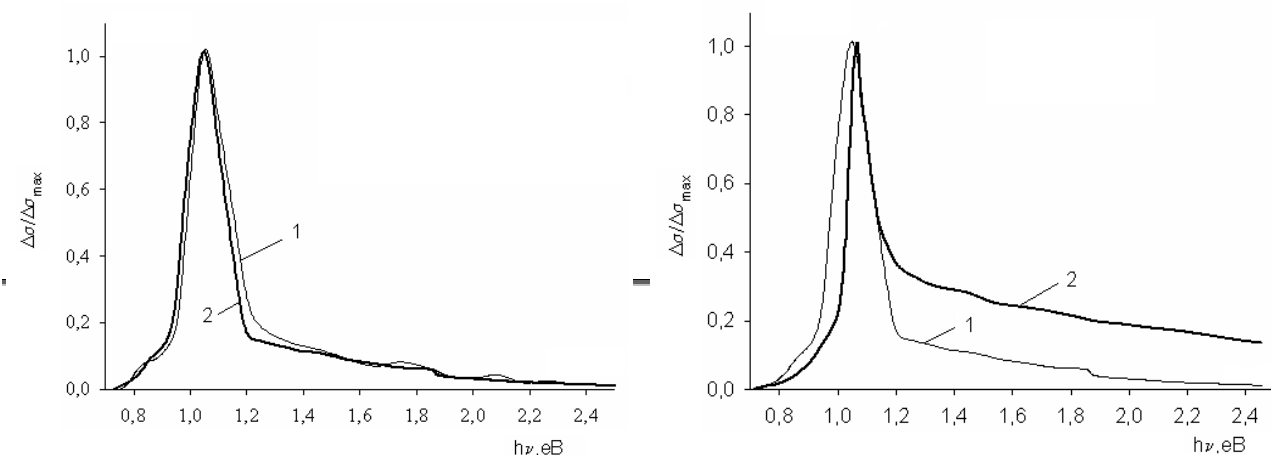
**Key words:** solid solutions, defects, electrical conductivity, optical absorption, photoconductivity.

**Постановка наукової проблеми та її значення.** Серед нових перспективних напівпровідникових сполук можна виділити потрібні халькопїрити  $\text{CuInSe}_2$ . Завдяки високому значенню коефіцієнта поглинання світла і фоточутливості, вони знайшли застосування як матеріали тонкоплівкових гетеропереходів сонячних елементів. Розширення меж застосування потрібних халькопїритів і створення напівпровідникових матеріалів із наперед прогнозованими властивостями робить актуальним вирощування та вивчення твердих розчинів на основі цих сполук. У роботі досліджувались одержані нами однофазні тверді розчини  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  в широкому інтервалі компонентного складу (до 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ ).

**Методика і техніка фізичного експерименту.** Технологія вирощування монокристалів твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  n-типу провідності описана в роботі [1]. Досліджувані тверді розчини відповідали компонентному складові 5, 10, 15 і 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ . Методом рентгено-структурного аналізу встановлено, що при утворенні твердого розчину, внаслідок заміщення одновалентних атомів Cu двохвалентними атомами Zn, зростає концентрація вакансій міді. Тобто на фізичні властивості монокристалів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  впливатиме вакансійна катіонодефектність у їхній структурі, величина якої збільшується із протяжністю твердого розчину в сторону збільшення вмісту компоненти  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ .

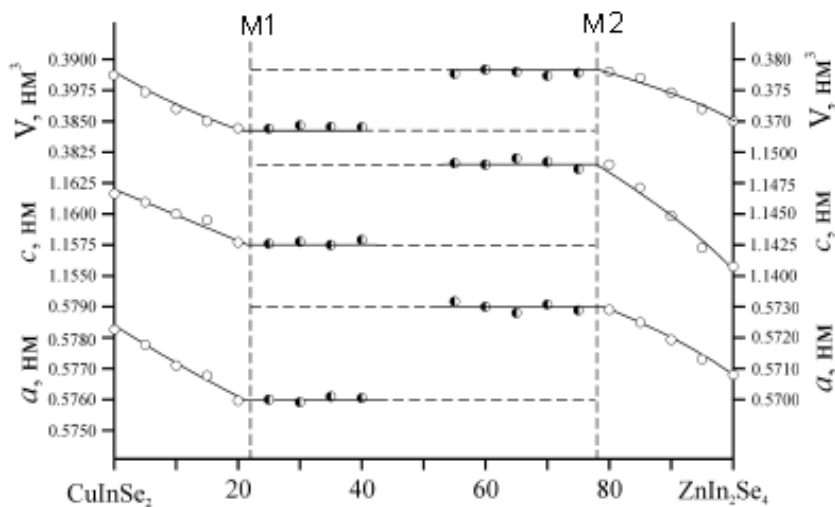
Методику експериментальних досліджень і деякі параметри твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  схарактеризовано в наших наукових розвідках [1; 8]. У цій статті описано експериментальні результати, які доповнюють дані, наведені у вказаних вище роботах.

**Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження. Фотоелектричні та оптичні властивості.** Важливим параметром твердих розчинів на основі  $\text{CuInSe}_2$ , який може визначити перспективність їхнього використання у твердотільній оптоелектроніці, є фоточутливість. Як показали дослідження, тверді низькоомні розчини ( $\sigma \approx 3,3\text{--}3,6 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ) із невисоким умістом (5–10 моль %)  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  практично нефоточутливі (при освітленні  $10^2$  лк), що можна пояснити невисокою концентрацією нерівноважних (фотозбуджених) носіїв порівняно з темною концентрацією рівноважних носіїв заряду. Фоточутливість зразків зростає зі збільшенням умісту компоненти  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ . Очевидно, це пов'язано з деяким збільшенням ширини забороненої зони [1] монокристалів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  і, в основному, зі зменшенням темної електропровідності зразків (до  $\sigma \approx 9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  для розчинів із вмістом 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  [1; 8; 11]). Зменшення  $\sigma$  зі збільшенням вмісту  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  в розчині пов'язано, як повідомлялося вище, зі зростанням концентрації катіонних вакансій, які виконують роль акцепторів. На рис. 1 і 2 представлені спектральні розподіли фотопровідності (СРФ) твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  з 15 і 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ .



**Рис. 1.** Спектральний розподіл фотопровідності при  $T=77$  К твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$ ; 1–15 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ ; 2–20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$

**Рис. 2.** Спектральний розподіл фотопровідності твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  із 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  при різних температурах; 1–77К; 2–27К



**Рис. 3.** Зміна параметрів елементарних комірок перерізу  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  [1]

Характерною особливістю СРФ розчинів є наявність тільки одного (з напівшириною 175 меВ) максимуму з енергетичним положенням  $h\nu \approx 1,05\text{--}1,06$  еВ, яке близьке до ширини забороненої зони, оціненої зі спектрів поглинання світла на краю смуги власного поглинання [1; 8; 11]. Слід відзначити зростання  $E_g$  сплаву (від  $\sim 1$  до 1,08 еВ) в області існування однофазного твердого розчину (від 0 до 22 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ ) з тетрагональною структурою типу халькопірита. Зростання  $E_g$  може бути пов'язане зі зменшенням параметрів елементарної комірки перерізу  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  при наближенні до межі  $M_1$  існування однофазного розчину (рис. 3).

При охолодженні зразків від 77 до 27 К максимум фотопровідності зміщується у високоенергетичну область, що є наслідком температурного збільшення ширини забороненої зони (рис. 2). Значення термічного коефіцієнта зміни  $E_g$  виявилось рівним  $\sim 6 \cdot 10^{-4}$  еВ/К, що близьке до такого в тонких плівках  $\text{Cu}(\text{InZn})\text{Se}_2$  [9] та інших халькогенідних сполуках.

Слід відзначити наявність помітної fotocутливості твердих розчинів із короткохвильової сторони спектральної залежності ( $h\nu > E_g$ ). Зі зниженням температури (77  $\rightarrow$  27 К), крім зменшення напівширини максимуму власної фотопровідності зі 175 до 110 меВ, спостерігається деяке ( $\sim$  в 3 рази) збільшення  $\Delta\sigma$  в короткохвильовій ділянці спектра (крива 2, рис. 2). Короткохвильова фотопровідність зумовлена світлом, яке поглинається в приповерхневій області кристала товщиною  $d=1/k$ , де  $k \approx 10^3$   $\text{cm}^{-1}$  – коефіцієнт поглинання світла в області короткохвильової фотопровідності (рис. 4). Подібна поведінка СРФ спостерігається і при  $T \approx 292$  К [12]. Для встановлення механізму такої провідності потрібні додаткові експериментальні дані.

Зменшення напівширини піку власної фотопровідності твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  зі знизенням температури, очевидно, крім усіх інших причин, можна пояснити перезарядкою дефектних центрів при захопленні носіїв заряду і, відповідно, зменшенням потенціалу випадкового електричного поля, пов'язаного із флуктуаціями концентрації дефектів (вакансій у катіонній підґратці) у зразку. Подібний процес спостерігався в роботі [10].

На межі  $M_1$  (рис. 3) відбувається перехід однофазного твердого розчину зі структурою типу халькопіриту у двофазний розчин, у якому до попереднього розчину добавляється новий твердий розчин зі структурою типу тіоганату. Тому у сплавах  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  біля межі  $M_1$  можуть існувати два типи твердих розчинів, що, відповідно, впливатиме на фізичні параметри твердих зразків.

На рис. 4 представлено спектри поглинання світла  $k$  в області краю власних оптичних переходів (КП). Як видно із цього рисунка, КП у короткохвильовій частині спектра (II) добре описується правилом Урбаха, що свідчить про участь хвостів щільності станів, зумовлених дефектністю кристалічної ґратки, у формуванні власних оптичних переходів (докладніше проаналізовані в роботі [1]).

Сполуки  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  характеризуються значним поглинанням світла в білякрайовій області I (рис. 4). Уважають, що таке поглинання світла зумовлене крупномасштабними дефектами (КД) кристалічної ґратки, які викликають збурення потенціального рельєфу, – дислокаціями, скупченнями дефектів, границями двійникування та ін. [7]. Біля межі переходу від однофазного до двофазного твердого розчину (рис. 3,  $M_1$ ) у білякрайовій області I спектральної кривої поглинання світла виникає структура у вигляді сходинки, короткохвильова сторона якої екстраполюється прямою, що свідчить про виконання правила Урбаха в цій частині кривої поглинання (рис. 4, крива 2). В інших зразках із малим вмістом компоненти  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  (далеко від межі  $M_1$ ) структури білякрайового поглинання не проявляється (крива 1). Ми вважаємо, що в зразках із вмістом компоненти  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ , близьким до межі  $M_1$  (20 моль %), з боку однофазного розчину з'являються окремі острівки іншої фази з дещо іншим типом структури (тіоганату) і, відповідно, з іншою шириною забороненої зони, що зумовлює появу структури білякрайового поглинання світла (область I). Тому можна стверджувати, що білякрайове поглинання світла в області I зумовлене не тільки природою КД, перелічених вище, але також крупномасштабними дефектами, які є включеннями в структуру кристала окремих острівків іншої фази.

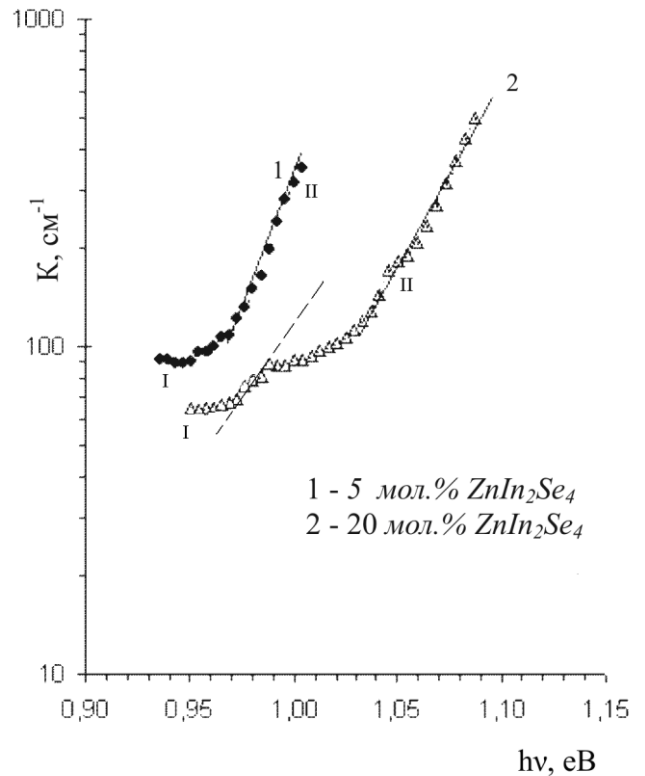


Рис. 4. Енергетичний розподіл коефіцієнта поглинання світла в твердих розчинах  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  при 292 К [1]

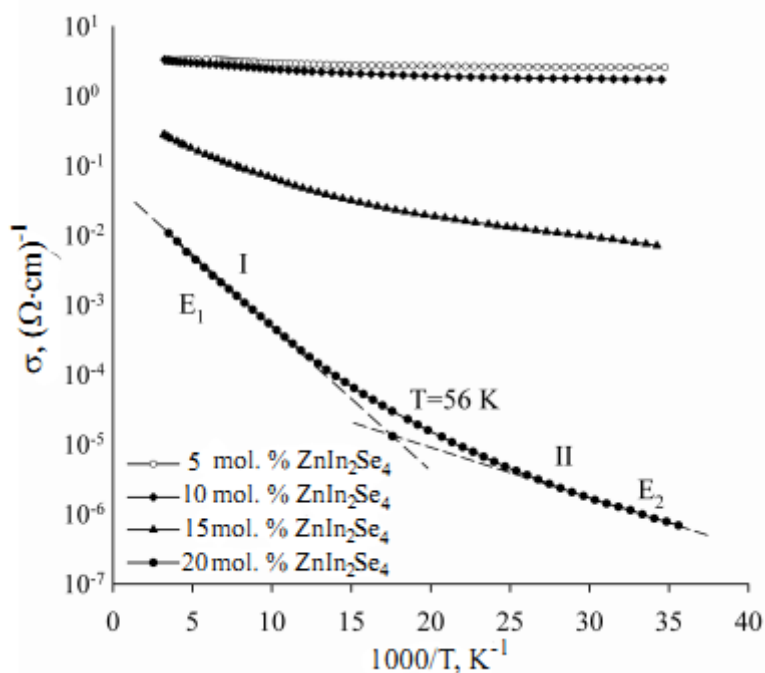


Рис. 5. Температурна залежність питомої електропровідності зразків твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$

$\text{CuInSe}_2$  може бути також порушення стехіометричного складу зразка [13]. Збагачення кристалів катіонами, зокрема атомами міді, веде до появи міжвузлових атомів  $\text{Cu}$  і  $\text{In}$ , а також вакансій селену ( $V_{\text{Se}}$ ), що грають роль мілких донорів у сполуці  $\text{CuInSe}_2$ , про що зазначалося для потрійних сполук  $\text{CdGaS}_4$  у роботі [13], які подібні до досліджуваних нами розчинів типу  $\text{V}^{\text{I}}\text{C}^{\text{III}}\text{D}^{\text{VI}}_2 - \text{V}^{\text{II}}\text{C}^{\text{III}}\text{D}^{\text{VI}}_4$ . Повідомлення про донорний характер центрів  $V_{\text{Se}}$  і  $\text{In}_{\text{Cu}}$  у сполуках  $\text{CuInSe}_2$  зустрічаються в роботах [2; 5].

Зі збільшенням вмісту другої компоненти  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  питома електропровідність твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  зменшується (рис. 5). Це легко пояснити, врахувавши, що наближення твердого розчину до межі  $M_1$  (рис. 3) веде до зростання катіонодефектності, тобто збільшення концентрацій катіонних вакансій, які в халькогенідних напівпровідниках грають роль акцепторів, що компенсують мілкі донори. Найбільш скомпенсованими і дефектними розчинами є тверді розчини складу 80 моль %  $\text{CuInSe}_2\text{-}20$  моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  (рис. 5). Підтвердженням сказаного є збільшення розмиття і нахилу краю власного поглинання світла розчином зі збільшенням вмісту  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  (рис. 4), що свідчить про зростання розупорядкування кристалічної ґратки розчину.

Температурна залежність  $\sigma$  твердих розчинів добре описується кривою, яка є характерною для неупорядкованих систем (до яких належать кристали з великою концентрацією дефектів) [3; 6]. Для аналізу залежність  $\sigma(T)$  було вибрано розчин із 20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ , близький до межі  $M_1$  із найбільшою концентрацією катіонних вакансій.  $\sigma(T)$  такого розчину можна представити двома лінійними (у системі координат  $\ln\sigma\text{-}10^3/T$ ) участками в області I і II (рис. 5):

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\frac{E_1}{kT}} + \sigma_2 e^{-\frac{E_2}{kT}}, \quad (1)$$

де  $E_1$  і  $E_2$  – енергії активації провідності в температурних областях I ( $T > 56$  K) і II ( $T < 56$  K), відповідно. При цьому виявилось, що  $\sigma_1 \approx 10^{-1}\text{-}10^{-2} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ,  $\sigma_2 \approx 10^{-4}\text{-}5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . Енергії активації, визначені з нахилу залежності  $\ln\sigma$  від  $10^3/T$ , становили  $E_1 \approx 0,04$  eV і  $E_2 \approx 0,013$  eV.

Як відомо [6], експоненціальна залежність провідності (яка має місце в області I) із передекспоненціальним множником  $\sigma_1 \approx 10^{-1}\text{-}10^{-2} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  характерна для більшості неупорядкованих напівпровідників при не дуже високих температурах і зумовлена термозбудженням носіїв із лока-

**Електричні властивості.** На рис. 5 представлено температурну залежність питомої (темнової) електропровідності зразків в області існування однофазних твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$ .

Як видно з рисунка, низькоомні зразки з малим умістом  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  (5–10 моль %) проявляють слабку температурну залежність  $\sigma$ , подібну до металічної провідності. Це можна пояснити наявністю в твердих розчинах, які складаються в основному з компоненти  $\text{CuInSe}_2$ , мілких донорних центрів. Такими центрами, на нашу думку, могли б бути антиструктурні дефекти  $\text{In}_{\text{Cu}}$ , що добре узгоджується з іонними радіусами міді, яка входить у формулу сполуки як одновалентний елемент  $\text{Cu}^+ = 0,98$  нм і тривалентний атом індію  $\text{In}^{3+} = 0,92$  нм [4], при цьому добре виконується критерій Гольдшміда для твердих розчинів. Ідея наявності антиструктурних дефектів у потрійних халькогенідних сполуках висловлювалась авторами багатьох робіт і одержала своє експериментальне підтвердження методом ЕРП у потрійній сполуці  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  [14].

Причиною появи мілких донорів у сполуці

лізованих станів біля рівня Фермі в забороненій зоні в локалізовані стани у хвості (у цьому разі  $n$ -провідності) зони провідності. При цьому  $E_1$  можна представити як

$$E_1 = E_A - \Delta E, \quad (2)$$

де  $E_A$  – положення краю хвоста щільності енергетичних станів зони провідності (відрахованого від  $E_F$ ),  $\Delta E$  – енергія активації перескоків по локалізованих станах хвоста зони провідності.

Множник  $\sigma_2$  температурної залежності провідності в області II (рис. 5) приймає мале значення  $\sim 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , що є характерним для термічно активованих перескоків електронів між локалізованими станами в забороненій зоні біля рівня Фермі. Якщо положення  $E_F$  у забороненій зоні стабілізується зоною дефектних локалізованих станів, то ширина такої зони  $\Delta E_3$ , як правило, рівна подвійній енергії активації перескоків:  $\Delta E_3 = 2 E_2$ ;  $\Delta E_3 = 0,026 \text{ eV}$ .

**Висновки.** Отже, монокристали твердих розчинів системи  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  проявляють властивості неупорядкованих систем із краєм смуги власного поглинання, який описується правилом Урбаха. Розчини із вмістом 15–20 моль %  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  є фоточутливими при низьких температурах ( $T \leq 77 \text{ K}$ ) напівпровідниками. Електричні властивості монокристалів носять характерні особливості провідності неупорядкованих систем із домінуючою стрибковою провідністю з різною енергією активації при температурах  $T > 56 \text{ K}$  і  $T < 56 \text{ K}$ .

#### Список використаної літератури

1. Виготовлення, електричні та оптичні властивості твердих розчинів  $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$  ( $x=0,05\text{--}0,2$ ) / В. В. Божко, Г. Є. Давидюк, О. В. Парасюк [та ін.] // Укр. фіз. журн. – 2010. – Т. 55, № 3. – С. 313–317.
2. Влияние отклонений от стехиометрии на электропроводность и фотопроводимость кристаллов  $\text{CuInSe}_2$  / М. А. Абдуллаев, Дж. Х. Магомедова, Р. М. Гаджиева [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 8. – С. 906–908.
3. Электронная теория неупорядоченных полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, И. П. Звягин, Р. Кайпер [и др.]. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
4. Ефимов А. И. Свойства неорганических соединений: справочник / А. И. Ефимов, Л. П. Белорукова, И. В. Василькова, В. Я. Чечев. – Л.: Химия, 1983. – 390 с.
5. Катодолюминесценция р-п-р-микроструктур в кристаллах  $\text{CuInSe}_2$  / С. Г. Конников, Г. А. Медведкин, М. М. Соболев, С. А. Соловьев // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31, № 1. – С. 114–119.
6. Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Девис. – М.: Мир, 1974. – 652 с.
7. Нелинейное краевое поглощение  $\text{CdSe}$  / Н. Р. Кулиш, М. П. Лисица, М. И. Мальш, Б. М. Булах // Физика и техника полупроводников. – 1990. – Т. 24, № 1. – С. 25–28.
8. Особливості електропровідності, термо-ЕРС та оптичного поглинання твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  та  $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$  / В. В. Божко, Г. Є. Давидюк, О. В. Новосад [та ін.] // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки. – 2008. – № 18. – С. 3–10.
9. Оптические свойства тонких пленок  $\text{Cu(InZn)Se}_2$ , полученных методом селенизации: сб. тр. междунар. науч. конф. [«Актуальные проблемы физики твердого тела»], (Минск, 26–28 окт. 2005 г.) / В. А. Иванов, В. Ф. Гременок, Е. П. Зарецкая, [и др.]. – Минск, 2005. – С. 426–429.
10. Роль ефектів структурного розупорядкування монокристалів  $\text{CdS}$ , викликаних нейтронною радіацією / Г. Є. Давидюк, В. В. Галян, А. Г. Кевшин [та ін.] // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки. – 2008. – № 9. – С. 19–28.
11. Фізичні властивості тетрагних халькогенідів / Давидюк Г. Є., Булатецька Л. В., Божко В. В. [та ін.]. – Луцьк: РВВ «Вежа» ВНУ ім. Лесі Українки, 2009. – 212 с.
12. Фотоелектричні властивості та магнітоопір твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  та  $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$  / Г. Є. Давидюк, В. В. Божко, О. В. Новосад [та ін.] // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки. – 2009. – № 18. – С. 19–25.
13. The Contribution of Iodine Impurity to the Formation of Centers in  $\text{CdGa}_2\text{Se}_4$  Single Crystals / A. N. Georgobiani, A. N. Gruzintsev, I. M. Radantsan, I. M. Tiginyanu // Physica Status Solidi (a). – 1983 – V. 80, № 1. – P. K 45–K48.
14. Schlaak M. Electron Paramagnetic Resonance (EPR) of Divalent Mn in  $\text{CdGa}_2\text{Se}_4$  and  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  / M. Schlaak, A. Weiss // Verlog der Zeitschrift fur Naturforschung. – 1972. – V. 27a, № 11 – P. 1624–1633.

Стаття надійшла до редколегії  
08.10.2012 р.