

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-9>**Олексій НОВОСАД**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS AUTHOR ID: 55595635700

Андрій КЕВШИН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Бібліографічний опис статті: Новосад, О., Кевшин, А. (2025). Фотоелектричні властивості діодних структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. *Фізика та освітні технології*, 1, 69–75, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-9>

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІОДНИХ СТРУКТУР $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ ТА $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$

У роботі представлені результати досліджень фотовольтаїчних властивостей поверхнево-бар'єрних структур на основі монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, отриманих методами термічного вакуумного напилення напівпрозорих плівок In на поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та механічним втиранням In-Ga евтектики в поверхню монокристалічних сколів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. Напівпрозорі індієві плівки наносили термічним вакуумним напиленням у ВУП-5 при тиску $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па і температурі 300 К. Площа поверхні, на яку наносили напівпрозорий шар In , становила $\approx 3 \times 3$ мм².

При освітленні $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 8 мол. % ZnIn_2S_4 зі сторони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ спостерігався один чітко виражений максимум. Енергетичне положення максимуму в спектрі фотонапруги відповідає енергії квантів світла $h\nu \approx 1,53$ еВ. При освітленні зразків зі сторони напівпрозорого шару In спостерігалось два максимуми з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ та $h\nu \approx 1,60$ еВ. Аналогічні результати були і для діодних структур з 12 мол. % ZnIn_2S_4 . В зразках з 12 мол. % ZnIn_2S_4 при освітленні зі сторони монокристалічної підложки спостерігалось зміщення максимуму фотонапруги до 1,56 еВ, що добре узгоджується зі зростанням ширини забороненої зони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ із збільшенням вмісту ZnIn_2S_4 .

Найвищими значеннями фотонапруги серед діодних структур $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ мали структури з 12 мол. % ZnIn_2S_4 . При освітленні зі сторони напівпровідникової підложки спостерігався вузький максимум з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ. При освітленні зі сторони In-Ga евтектики поряд з максимумом, обумовленим власними оптичними переходами ($h\nu \approx 1,68$ еВ), в довгохвильовій області спостерігалась менш виражена сходінка, обумовлена домішковим поглинанням світла, відповідальними за яке є V_{Cu} .

Маючи вузькі максимуми в спектрах фотонапруги, структури $\text{In(In-Ga)/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ можна використовувати як вузькосмугові приймачі світла. Енергетичне положення максимумів у спектрах фотонапруги залежить від складу монокристалів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, від способу одержання двошарової структури та від сторони структури, яка освітлювалась.

Ключові слова: напівпровідники, поверхнево-бар'єрні структури, фотонапруга, вакансії міді.

Oleksii NOVOSAD

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volyn ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS AUTHOR ID: 55595635700

Andriy KEVSHYN

candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of experimental physics, information and educational technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

To cite this article: Novosad, O., Kevshyn, A. (2025). Fotoelektrychni vlastyvoli diodnykh struktur $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. [Photoelectric properties of $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ and $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ diode structures]. *Physics and Educational Technology*, 1, 69–75, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-9>

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ AND $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ DIODE STRUCTURES

The paper presents the results of studies on the photovoltaic properties of surface-barrier structures based on monocrystalline $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ films. These structures were obtained using thermal vacuum deposition of semitransparent In films on the $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ surface and mechanical rubbing of In-Ga eutectic into the surface of monocrystalline $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ fractures. The semitransparent indium films were deposited by thermal vacuum evaporation in a VUP-5 system at a pressure of $1,3 \times 10^{-5}$ Pa and a temperature of 300 K. The surface area onto which the semitransparent In layer was deposited was approximately $\approx 3 \times 3 \text{ mm}^2$.

When illuminating the $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ structure with 8 mol.% ZnIn_2S_4 from the $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ side, a single well-defined maximum was observed. The energy position of the maximum in the photovoltage spectrum corresponds to the photon energy of $h\nu \approx 1,53 \text{ eV}$. When illuminating the samples from the side of the semitransparent In layer, two maxima were observed with energy positions of $h\nu \approx 1,44 \text{ eV}$ and $h\nu \approx 1,60 \text{ eV}$. Similar results were obtained for diode structures with 12 mol.% ZnIn_2S_4 . In samples with 12 mol.% ZnIn_2S_4 , when illuminated from the monocrystalline substrate side, a shift of the photovoltage maximum to 1,56 eV was observed, which correlates well with the increase in the band gap of $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ as the ZnIn_2S_4 content increases.

The highest photovoltage values among the diode structures $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ were observed in structures with 12 mol.% ZnIn_2S_4 . When illuminated from the semiconductor substrate side, a narrow maximum with an energy position of $h\nu \approx 1,44 \text{ eV}$ was observed. When illuminated from the In-Ga eutectic side, alongside the maximum caused by intrinsic optical transitions ($h\nu \approx 1,68 \text{ eV}$), a less pronounced step was observed in the long-wavelength region. This step was attributed to impurity light absorption, primarily caused by V_{Cu} .

Having narrow maxima in the photovoltage spectra, the $\text{In(In-Ga)/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ structures can be used as narrow-band light receivers. The energy position of the maxima in the photovoltage spectra depends on the composition of the $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ monocrystals, the method of obtaining the bilayer structure, and the illuminated side of the structure.

Key words: semiconductors, surface-barrier structures, photovoltage, copper vacancies.

Актуальність проблеми. Відомо [Кудря, 2012; Кудря, 2013], що Сонце щосекунди випромінює $88 \cdot 10^{24}$ кал теплової енергії, що еквівалентно $1,02 \cdot 10^{20}$ кВт-год. На Землю потрапляє тільки частина цієї енергії – біля $1 \cdot 10^{18}$ кВт-год за рік, що майже у 100 разів перевищує енергетичні ресурси всіх розвіданих горючих копалин на Землі. Саме тому сонячна енергетика є одним із найбільш перспективних напрямів використання енергії відновлюваних джерел, що швидко розвивається. Перспективними матеріалами для розробки вискоєфективних сонячних елементів, завдяки високому значенню коефіцієнта поглинання світла та оптимальним значенням ширини забороненої зони, є напівпровідникові сполуки CuInS_2 та ZnIn_2S_4 . В останні роки з'являються наукові статті,

у яких розглядається можливість використання як базового матеріалу при створенні фотоелектроперетворювачів кристалічних твердих розчинів на основі CuInS_2 та ZnIn_2S_4 . Ці та ряд інших факторів обумовлюють розвиток нових технологій отримання та дослідження властивостей різних типів поверхнево-бар'єрних структур на основі даних сполук, саме це визначає актуальність нашої роботи.

Робота присвячена дослідженню фотовольтаїчних властивостей поверхнево-бар'єрних структур на основі монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, отриманих методами термічного вакуумного напилення напівпрозорих плівок In на поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та механічним втиранням In-Ga евтектики в поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед класичних Si та Ge не менш актуальними для розвитку сонячної енергетики є напівпровідникові сполуки CuInS_2 . Експериментально досягнуті значення ефективності фотоелектричного перетворення тонкоплівкових елементів на основі CuInS_2 становлять 11-15 % (Klenk, 2005), а, згідно з теоретичними розрахунками, в *p-n*-гомопереходах на основі CuInS_2 ефективність фотоелектричного перетворення може становити 27-35 % [Meese, 1975]. Важливу роль для CuInS_2 як матеріалу поглинаючого шару фотоелектроперетворювача відіграє те, що CuInS_2 належить до халькопіритних прямозонних напівпровідників. Ширина забороненої зони CuInS_2 $E_g \approx 1,55$ eV, що є дуже близьким до максимуму спектрального розподілу випромінювання Сонця. Важливу роль для практичного використання відіграє високе значення коефіцієнта поглинання світла сполук CuInS_2 $\alpha > 10^5 \text{ см}^{-1}$. Деякі фізичні властивості сполук $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ представлені в роботах (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2015). Згідно з даними робіт (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2015), досліджувані монокристали належали до напівпровідників *n*-типу провідності. У роботі (Новосад, 2020) показано, що досліджувані в даній роботі поверхнево-бар'єрні структури $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з напівпрозорим шаром індію мають випрямні властивості. Числові значення коефіцієнта випрямлення *K*, який визначався відношенням прямого струму до зворотного при сталій напрузі, становили 100, 1,5, 2 відповідно для структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 4, 8 і 12 мол.% ZnIn_2S_4 (Новосад, 2020).

Мета дослідження. Мета роботи полягала у створенні на поверхні монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ термічним вакуумним напленням In поверхнево-бар'єрних структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$; у створенні механічним втиранням In-Ga евтектики в поверхню монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ поверхнево-бар'єрних структур $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$; дослідженні спектрального розподілу фотонапруги одержаних двошарових поверхнево-бар'єрних структур та фізичній інтерпретації отриманих результатів.

Методика та техніка експерименту. Для одержання поверхнево-бар'єрних структур використовувались монокристалічні

тверді розчини $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з вмістом 4, 8, 12 та 16 мол. % ZnIn_2S_4 . Монокристали $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ були вирощені розчин-розплавним методом, методика вирощування монокристалів та синтез матеріалів описані в роботі (Bozhko, 2014; Bozhko, 2014).

Напівпрозорі індієві плівки наносили термічним вакуумним напленням у ВУП-5 при тиску $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па і температурі 300 К. Площа поверхні, на яку наносили напівпрозорий шар In, становила $\approx 3 \times 3 \text{ мм}^2$. Також нами досліджувались двошарові структури, отримані втиранням In-Ga евтектики в поверхню монокристалічних сколів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. З метою уникнення випадкових похибок та неточностей **із твердих розчинів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ кожного компонентного складу використовувалось 2-3 монокристалічні сколи.** З роботи (Wagner, 1997) відомо, що монокристал CuInS_2 сколюється по кристалографічній площині (112). Саме тому ми вважали, що робочою поверхнею є саме ця кристалографічна площина.

Для експериментальних досліджень на структури наносили точкові електричні контакти зі струмопровідного клею з домішками срібла. Розміщення електричних контактів на поверхні структур та геометрія освітлення під час досліджень спектрального розподілу фотонапруги показані на рис. 1. Спектральний розподіл фотонапруги структур досліджувався при кімнатній температурі ($T \approx 300 \text{ K}$).

Виклад основного матеріалу дослідження. Після одержання поверхнево-бар'єрних структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ під час дослідження якості електричних контактів нами було помічено фотовольтаїчний ефект, який спостерігався при освітленні даних структур як зі сторони монокристалічної підложки, так і зі сторони напівпрозорої плівки металу.

З кристалів твердих розчинів з вмістом з 4 мол. % ZnIn_2S_4 отримати сколи не вдалось, тому зразки вирізались та полірувались механічним методом в довільному кристалографічному напрямку. Саме це, на нашу думку, обумовило дуже низькі значення фотонапруги, які виявились на межі чутливості наших електровимірювальних приладів.

Результати дослідження спектрального розподілу фотонапруги представлено на рис. 2 – рис. 4. З рис. 2 видно, що при освітленні $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 8 мол. % ZnIn_2S_4 зі сторони

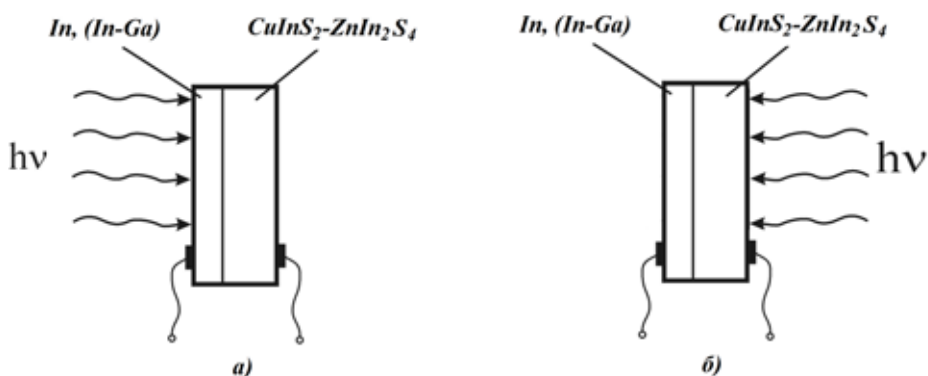


Рис. 1. Геометрія освітлення та розміщення електричних контактів поверхнево-бар'єрних структур на основі монокристалів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. а) освітлення зі сторони металу, б) освітлення зі сторони монокристалічної підложки

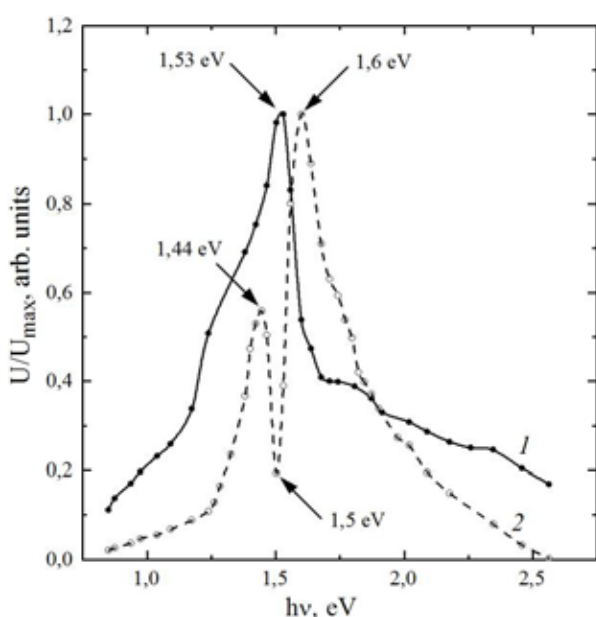


Рис. 2. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 8 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони плівки напівпрозорого In

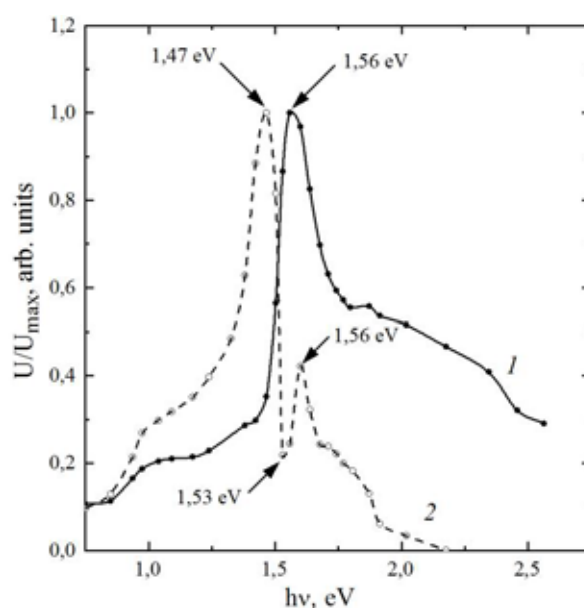


Рис. 3. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони плівки напівпрозорого In

$\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ особливістю спектрального розподілу фотонапруги є один чітко виражений максимум. Обчислене нами значення ширини максимуму на половині висоти становило ~ 175 меВ. Енергетичне положення максимуму спектра фотонапруги відповідає енергії квантів світла $h\nu \approx 1,53$ еВ. При освітленні зразків зі сторони напівпрозорого шару In спостерігалось два максимуми з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ та $h\nu \approx 1,60$ еВ (рис. 2).

Слід відмітити, що значення $h\nu \approx 1,53$ еВ та $h\nu \approx 1,60$ еВ виявилось близьким до значення ширини забороненої зони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$

з 8 мол. % ZnIn_2S_4 , яка оцінювалась зі спектрів фотопровідності в (Novosad, 2015). Тому можна припустити, що відповідальними за формування цих максимумів фотонапруги є власні оптичні переходи. З аналізу джерел (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2014) можна припустити, що відповідальними за формування максимуму з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ є переходи електронів акцепторний рівень-зона провідності. Акцепторні рівні з таким енергетичним положенням обумовлюються вакансіями міді (V_{Cu}) (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2014).

Подібні результати при дослідженні спектрів фотонапруги спостерігались і для структур з вмістом $\text{In}/\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 (рис. 3). При освітленні зі сторони монокристалічної підложки спостерігалось зміщення максимуму фотонапруги до 1,56 еВ, що добре узгоджується зі зростанням ширини забороненої зони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ із збільшенням вмісту ZnIn_2S_4 (Novosad, 2015).

На рис. 4 представлений спектральний розподіл фотонапруги для однієї зі структур $\text{In}/\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 16 мол. % ZnIn_2S_4 . Згідно з даними робіт (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2014), кристали твердих розчинів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 16 мол. % ZnIn_2S_4 виявились двофазними та невідтворюваними. Проте ми вважали за потрібне дослідити і ці структури. Ідентичність спектрів фотонапруги при освітленні зі сторони підложки та металевої плівки може обумовлюватись відсутністю потенціального бар'єра, обумовленого V_{Cu} , які, на нашу думку, майже відсутні у двофазних твердих розчинах.

На рис. 5 представлені результати досліджень спектрів фотонапруги однієї із найкращих структур $\text{In-Ga}/\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 , отриманої втиранням In-Ga евтектики

в поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. При освітленні зі сторони напівпровідникової підложки (крива 1) спостерігався вузький максимум з енергетичним положенням 1,44 еВ. На нашу думку, цей максимум обумовлюється переходами з акцепторних рівнів V_{Cu} в зону провідності. Ширина спектра фотонапруги на половині висоти становить 180 меВ.

Крива 2 на рис. 5 відповідає спектральному розподілу фотонапруги при освітленні зі сторони In-Ga евтектики. Поряд з максимумом, обумовленим власними оптичними переходами ($h\nu \approx 1,68$ еВ), в довгохвильовій області спостерігалась менш виражена сходинка, обумовлена домішковим поглинанням світла, відповідальними за яке є V_{Cu} .

Висновки і перспективи подальших досліджень. Показано, що втиранням In-Ga в поверхню монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та напиленням напівпрозорого шару індію на сколи $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ можна одержати двошарові поверхнево-бар'єрні структури. Поверхнево-бар'єрні структури $\text{In(In-Ga)}/\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, отримані запропонованими методами, проявляють фотовольтаїчні властивості. Маючи вузькі максимуми в спектрах фотонапруги, структури $\text{In(In-Ga)}/$

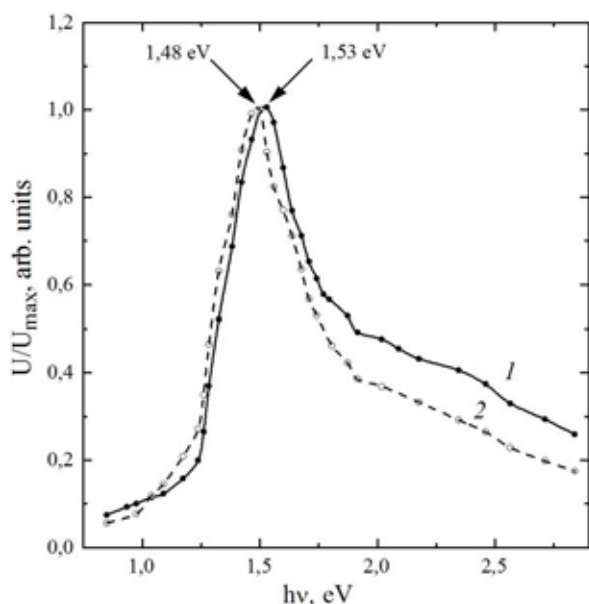


Рис. 4. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In}/\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 16 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони плівки напівпрозорого In

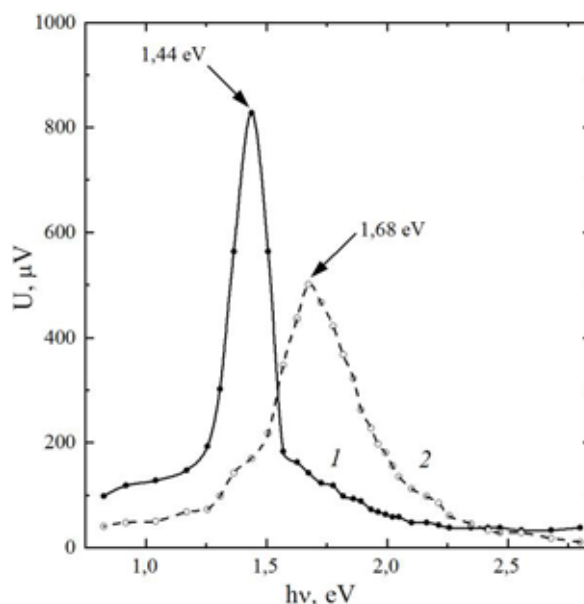


Рис. 5. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In-Ga}/\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони In-Ga евтектики.

$\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ можна використовувати як вузько-космугові приймачі світла. Енергетичне положення максимумів в спектрах фотонапруги залежало від складу монокристалів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, від способу одержання двошарової структури

та від сторони структури, яка освітлювалась. Монокристали $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та поверхнево-бар'єрні структури на їх основі можуть знайти використання при розробці фотоелектроперетворювачів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2012. 495 с.
2. Кудря С. О., Будько В. І. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії [Електронний ресурс] : курс лекцій. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 387 с.
3. Klenk R., Klaer J., Scheer R., Lux-Steiner M.Ch., Luck I., Meyer N., Ruhle U. Solar cells based on CuInS_2 – an overview. *Thin Sol. Films*. 2005. Vol. 509, P. 480–481.
4. Meese J.M., Manthuruthil J.K., Locker D.R. CuInS_2 diodes for solar-energy conversion. *Bull. Amer. Phys. Soc.* 1975. Vol. 20. P. 696.
5. Bozhko V.V., Novosad A.V., Parasyuk O.V., Vainorius N., Vertelis V., Nekrošius A., and Kažukauskas V. Enhanced persistent photoconduction in $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ alloys single crystals and processes of its relaxation. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2016. Vol. 627. P. 153–162.
6. Bozhko V.V., Novosad A.V., Parasyuk O.V., Vainorius N., Vertelis V., Nekrošius A., Kažukauskas V. Photoconductivity relaxation processes in $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ solid solutions. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015. Vol. 39. P. 665–670.
7. Bozhko V.V., Novosad A.V., Parasyuk O.V., Khyzhun O.Y., Vainorius N., Nekrošius A., Vertelis V., Kažukauskas V. Electrical properties and electronic structure of $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ and $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ single crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2015. Vol. 82. P. 42–49.
8. Новосад О.В., Федосов С.А., Божко В.В. Вольт-амперні характеристики поверхнево-бар'єрних структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. *Наукові нотатки*. 2020. №. 69. С. 63–67.
9. Bozhko V.V., Novosad A.V., Davidyuk G.E., Kozer V.R., Parasyuk O.V., Vainorius N., Sakavicius A., Janonis V., Kažukauskas V. $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ solid solutions: Growth, physical and photo-electrical properties. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2014. Vol. 604, № 1. P. 164–173.
10. Bozhko V.V., Novosad A.V., Davidyuk G.E., Kozer V.R., Parasyuk O.V., Vainorius N., Sakavicius A., Janonis V., Kažukauskas V. Solid-state solutions of copper indium disulfide and zinc indium tetrasulfide: Growth, crystallography and opto-electronic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2014. Vol. 24. P. 231–236.
11. Wagner S. Defect physics of the CuInS_2 chalcopyrite semiconductor *Top. Appl. Phys.* 1997. Vol. 17. P. 171–176.
12. Novosad O.V., Bozhko V.V., Kityk I.V., Vertelis V., Photoelectrical and piezooptical properties of $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ solid solutions. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2015. Vol. 12. P. 53–62.

REFERENCES:

1. Kudria, S.O. (2012). *Netradytsiyni ta vidnovlyuvani dzhерела енерhiyi. Pidruchnyk. [Non-Traditional and Renewable Energy Sources. Textbook]*. Kyiv: National Technical University of Ukraine “KPI”, 2012. 495 s. [in Ukrainian].
2. Kudria, S. O., & Budko, V. I. *Netradytsiyni ta vidnovlyuvani dzhерела енерhiyi [Elektronnyy resurs]: kurs lektsiy [Non-traditional and renewable energy sources [Electronic resource]: course of lectures]*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2013. 387 s. [in Ukrainian].
3. Klenk, R., Klaer, J., Scheer, R., Lux-Steiner, M.Ch., Luck, I., Meyer, N., & Ruhle, U. (2005). Solar cells based on CuInS_2 – an overview. *Thin Sol. Films*. Vol. 509, P. 480–481
4. Meese, J.M., Manthuruthil, J.K., & Locker, D.R. (1975). CuInS_2 diodes for solar-energy conversion. *Bull. Amer. Phys. Soc.* Vol. 20. P. 696.
5. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Vertelis, V., Nekrošius, A., & Kažukauskas, V. (2016). Enhanced persistent photoconduction in $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ alloys single crystals and processes of its relaxation. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. Vol. 627. P. 153–162.
6. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Vertelis, V., Nekrošius, A., & Kažukauskas, V. (2015). Photoconductivity relaxation processes in $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ solid solutions. *Materials Science in Semiconductor Processing*. Vol. 39. P. 665–670.
7. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Parasyuk, O.V., Khyzhun, O.Y., Vainorius, N., Nekrošius, A., Vertelis, V., & Kažukauskas, V. (2015). Electrical properties and electronic structure of $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ and $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ single crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. Vol. 82. P. 42–49.

8. Novosad, O.V., Fedosov, S.A., & Bozhko, V.V. (2020). *Vol't-amperni kharakterystyky poverkhnevo-bar'yernykh struktur In/CuInS₂-ZnIn₂S₄*. [Current-voltage characteristics of surface-barrier structures In/CuInS₂-ZnIn₂S₄]. Scientific notes. No. 69. P. 63–67.
9. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Davidiuk, G.E., Kozer, V.R., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Sakavicius, A., Janonis, V., & Kazukauskas, V. (2014). CuInS₂-ZnIn₂S₄ solid solutions: Growth, physical and photo-electrical properties. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. Vol. 604, № 1. P. 164–173.
10. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Davidiuk, G.E., Kozer, V.R., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Sakavičius, A., Janonis, V., & Kazukauskas, V. (2014). Solid-state solutions of copper indium disulfide and zinc indium tetrasulfide: Growth, crystallography and opto-electronic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*. Vol. 24. P. 231–236.
11. Wagner, S. (1997). Defect physics of the CuInSe₂ chalcopyrite semiconductor *Top. Appl. Phys.* Vol. 17. P. 171–176.
12. Novosad, O.V., Bozhko, V.V., Kityk, I.V., Vertelis, V. (2015). Photoelectrical and piezooptical properties of Cu_{1-x}Zn_xInS₂ solid solutions. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. Vol. 12. P. 53–62.