

УДК 621.362.1

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-7>

**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, Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0002-9433-7776

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 55595635700

**Павло ШИГОРІН**

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, Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0003-2396-8041

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36024496600

**Богдан ВЕНГРИН**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Ст. Бандери 12, м. Львів, Україна, 79013

**ORCID:** 0000-0003-4071-9506

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 16445102600

**Володимир БОЖКО**

кандидат фізико-математичних наук, доцент, керівник секції фізики, Нововолинський науковий ліцей Волинської обласної ради, вул. Пирогова, 1, м. Нововолинськ, Волинська область, Україна, 45400

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 6601954311

**Олег ШИГОРІН**

здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня, спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

**Бібліографічний опис статті:** Новосад, О., Шигорін, П., Венгрин, Б., Божко, В., Шигорін, О. (2022). Електричні та термоелектричні властивості твердих розчинів  $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ . *Фізика та освітні технології*, 1, 56–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-7>

## ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$

У роботі досліджувались тверді розчини  $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  з вмістом 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Мета роботи полягала у дослідженні електричних та термоелектричних властивостей твердих розчинів  $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ . Визначено тип провідності, питому електропровідність, коефіцієнт Зеєбека твердих розчинів  $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ . Розраховано термоелектричну потужність кристалів  $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ . Проаналізовано залежності цих параметрів від компонентного складу  $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ .

Для визначення коефіцієнта Зеєбека використовувалось неодноразово апробоване обладнання та загальновідомі методики досліджень із використанням сучасного програмного забезпечення. Тип провідності сполук  $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  визначався термоелектричними методами. Для вимірювань опору зразків використовували «Омметр цифровий Щ-34». Дослідження проводились при  $T \approx 300$  К.

Наукова новизна результатів визначається сукупністю сформульованих висновків, основні з яких полягають у тому, що: досліджувані сполуки належать до напівпровідників n-типу провідності; усі тверді розчини виявились низькоомними, з питомим опором, значення якого при кімнатній температурі лежить в межах від  $4,4 \cdot 10^{-4}$  (Ом·м), для зразків з 0 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  до  $6 \cdot 10^{-5}$  (Ом·м), для зразків із 100 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ ; коефіцієнт Зеєбека

в інтервалі температур 290-360 К становив 87, 157, 123, 118, 165, 166 мкВ/К для 100, 80, 60, 40, 20, 0 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  в  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  відповідно; найвище значення термоелектричної потужності мають тверді розчини  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  з вмістом 60 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Завдяки високим значенням коефіцієнта Зеєбека дані сполуки є перспективними для виготовлення чутливих термодатчиків. Показано, що, змінюючи компонентний склад  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , можна змінювати значення коефіцієнта Зеєбека, питомої електропровідності та значення термоелектричної потужності.

**Ключові слова:** тверді розчини, електропровідність, коефіцієнт Зеєбека, термоелектрична потужність.

### **Oleksii NOVOSAD**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor at Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025*

**ORCID:** 0000-0002-9433-7776

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 55595635700

### **Pavlo SHYGORIN**

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

**ORCID:** 0000-0003-2396-8041

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36024496600

### **Bohdan VENHRYN**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, 12 Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013*

**ORCID:** 0000-0003-4071-9506

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 16445102600

### **Volodymyr BOZHKO**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Physics Section, Novovolynsk Scientific Lyceum of the Volyn Regional Council, 1 Pyrogova Str., Novovolynsk, Volyn region, Ukraine, 45400*

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 6601954311

### **Oleg SHYGORIN**

*Student, specialty 105 "Applied physics and nanomaterials", Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025*

**To cite this article:** Novosad, O., Shygorin, P., Venhryn, B., Bozhko, V., Shygorin, O. (2022). Elektrichni ta termoelektrychni vlastyvoli tverdykh rozchyniv  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  [Electrical and thermoelectrical properties of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  solid solutions]. *Physics and Educational Technology*, 1, 56–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-7>

## **ELECTRICAL AND THERMOELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ SOLID SOLUTIONS**

*In the article has been investigated solid solutions of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  with a content of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 mol.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . The purpose of the work was to investigate the electrical and thermoelectric properties of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  solid solutions. The conductivity type, specific electrical conductivity, Seebeck coefficient of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  solid solutions were determined. The thermoelectric power of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  crystals was calculated. The dependence of these parameters on the  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  component composition was analyzed.*

*To determine the Seebeck coefficient, repeatedly tested equipment and well-known methods of research using modern software were used. The conductivity type of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  compounds was determined by thermoelectric methods. «Digital ohmmeter III-34» was used to measure the resistance of the samples. The research was conducted at  $T \approx 300$  K.*

*The scientific novelty of the results is determined by the set of formulated conclusions. The main ones are that it was shown for the first time that the compounds  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  belong to n-type semiconductors. All solid solutions turned out to be low-resistivity, with a specific resistance at room temperature ranging from  $4.4 \cdot 10^{-4}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) for samples with 0 mol.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  to  $6 \cdot 10^{-5}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) for samples with 100 mol.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . The Seebeck coefficient in the temperature range 290-360 K was 87, 157, 123, 118, 165, 166  $\mu\text{V}/\text{K}$ , for samples with 100, 80, 60, 40, 20, 0 mol.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , respectively. The highest value of thermoelectric power has  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  solid solutions with a content of 60 mol.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Due to the high value of the Seebeck coefficient, these compounds are promising for the manufacture of sensitive thermal sensors. It is shown that by changing the component composition of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , it is possible to change the value of the Seebeck coefficient, the specific electrical conductivity, and the value of the thermoelectric power.*

**Key words:** solid solutions, specific electrical conductivity, Seebeck coefficient.

**Актуальність проблеми.** Одним із пріоритетних завдань фізики напівпровідників та напівпровідникового матеріалознавства є розробка нових матеріалів з метою розширення та вдосконалення функціональних можливостей існуючих напівпровідникових електронних елементів та приладів. Серед основних способів вирішення даного завдання є використання нових твердих розчинів на основі багатокомпонентних матеріалів. Дана робота присвячена дослідженню електричних та термоелектричних властивостей твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ .

Напівпровідникові матеріали  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  та  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  та тверді розчини на їх основі використовуються в сучасній напівпровідниковій електроніці та енергетиці. Ці та ряд інших факторів обумовлюють розвиток технологій отримання нових напівпровідникових матеріалів на основі  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  та  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Відповідно до цього необхідно досліджувати фізичні властивості таких матеріалів з метою вивчення електронних процесів і встановлення закономірностей зміни фізичних параметрів і властивостей для практичного та наукового використання, що визначає актуальність проблеми, яка частково вирішується в даній роботі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу літературних джерел можна зробити висновки, що сполуки  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  та  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  є перспективними для розробки фотоелектроперетворювачів. На їх основі виготовляють гетеропереходи сонячних елементів (Shuangchao Zhao, 2022; Isik, 2016), також знаходять інше використання (Li, 2019; Ling, 2017). В останні роки з'являються повідомлення про  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  та  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  як про матеріали перспективні для термоелектричної генерації (Alzahrani, 2021; Rinkle Juneja, 2019). Згідно з (Alzahrani, 2021) для сполук  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  термоелектрична добротність ( $ZT$ ) становила 0,74. В роботі (Rinkle Juneja, 2019) розглянуті електричні та термоелектричні вла-

стивості монокристалів  $\text{AgIn}_5\text{S}_8$  та  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ . Наднизькі значення решіткової складової коефіцієнта теплопровідності, 0,29  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$  для  $\text{AgIn}_5\text{S}_8$  та 0,54  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$  для  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  при  $T=1000$  К (Rinkle Juneja, 2019), свідчать про перспективність даних матеріалів для термоелектричної генерації в високотемпературному інтервалі (Rowe, 1995). Особливістю утворення твердого розчину  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  є збільшення об'єму елементарної комірки при зростанні вмісту атомів Cd (Kozer, 2009).

**Мета дослідження.** Мета дослідження полягала у встановленні термоелектричними методами типу провідності нових твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , експериментальному визначенні питомої електропровідності та коефіцієнта Зеебека сполук  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ ; на основі проведених досліджень розрахувати термоелектричну потужність даних матеріалів та провести аналіз залежностей отриманих результатів від компонентного складу монокристалів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ .

**Методика та техніка експерименту.** Методика вирощування твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , синтез матеріалів та деякі їх кристалографічні параметри представлені в роботі (Kozer, 2009). Тверді розчини  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ - $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  відповідали компонентному складу 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ .

Для досліджень фізичних властивостей виготовляли зразки у формі правильних паралелепіпедів зі злитків, отриманих після вирощування. Поверхні зразків оброблялись шліфуванням та поліруванням алмазними пастами різної зернистості. Середні розміри зразків становили  $(8-5) \times (2-1) \times (2-1)$   $\text{мм}^3$ . З метою уникнення випадкових похибок та неточностей із кожного монокристалічного злитка певного компонентного складу виготовляли 3-5 зразків.

Під час вимірювань значень питомої електропровідності використовували контакти, отримані вплавленням в торцеві грані зразків

чистого індію. Значення питомої електропровідності вимірювали при  $T \approx 300\text{K}$ . Для вимірювань опору зразків використовували «Омметр цифровий Щ-34». Для того, щоб переконатися, що електричні контакти є симетричними та омічними, досліджувались вольт-амперні характеристики зразків з контактами. Дослідження вольт-амперних характеристик показали, що контакти є нейтральними по відношенню до освітлення.

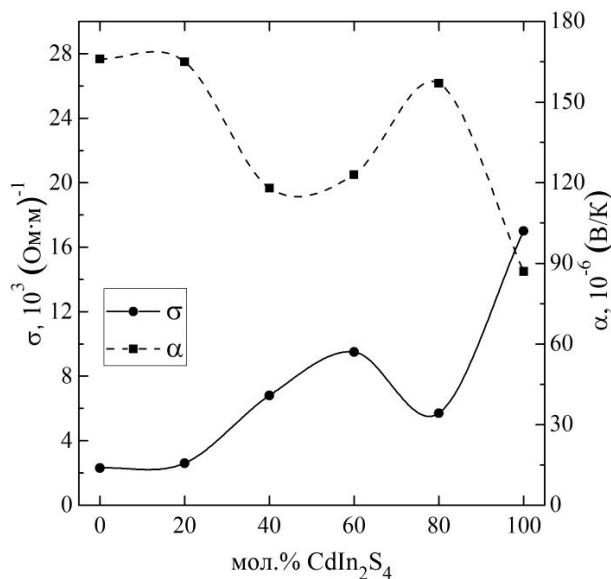
Для забезпечення омичності електричних контактів під час досліджень термоелектричних властивостей та визначення типу провідності кристалів використовували прижимні контакти, сформовані на основі галій-індієвої евтектики. Дослідження проводились в інтервалі температур 290-360 К. Методика вимірювання та схема установки для визначення коефіцієнта Зеебека та типу провідності описана в (Novosad, 2022).

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

У табл. 1. представлені результати досліджень електричних та термоелектричних властивостей твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  різного компонентного складу.

Термоелектричними методами встановлено, що тверді розчини  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  належать до напівпровідників *n*-типу провідності. Про *n*-тип провідності сполук  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  та  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  згадувалось у роботах (Shuangchao Zhao, 2022; Isik, 2016). В (Isik, 2016) повідомлялось про можливість інверсії типу провідності  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ .

Усі сполуки виявились низькоомними з питомим опором, значення якого при кімнатній температурі лежить в межах від  $4,4 \cdot 10^{-4}$  (Ом·м), для зразків з 0 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , до  $6 \cdot 10^{-5}$  (Ом·м), для зразків із 100 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . У табл. 1. вказані значення питомої електропровідності. На рис. 1 зображено залежність питомої електропровідності твердих  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  від вмісту  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Із представлених даних видно, що



**Рис. 1. Залежність питомої електропровідності та коефіцієнта Зеебека твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  від вмісту  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$**

зростання вмісту  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  до 60 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  в  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  призводить до плавного зростання питомої електропровідності твердих розчинів. Різке зменшення питомої електропровідності при вмісті  $\approx 60\text{-}80$  мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  може обумовлюватись зростанням дефектності кристалічної решітки твердих розчинів даного компонентного складу, що призводить до зменшення рухливості вільних носіїв заряду.

Високе значення коефіцієнта Зеебека  $\alpha \approx 86\text{-}166$  мкВ/К (Табл. 1.) дає можливість стверджувати, що тверді розчини  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  можна віднести до матеріалів, перспективних для створення термодатчиків.

На рис. 1 графічно представлено залежність коефіцієнта Зеебека від складу  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ . Особливістю представленої графічної залежності є різке зменшення коефіцієнта Зеебека  $\approx 20\text{-}60$  мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Цей важливий експериментальний факт потребує більш детального

Таблиця 1

**Еклектичні та термоелектричні параметри твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$**

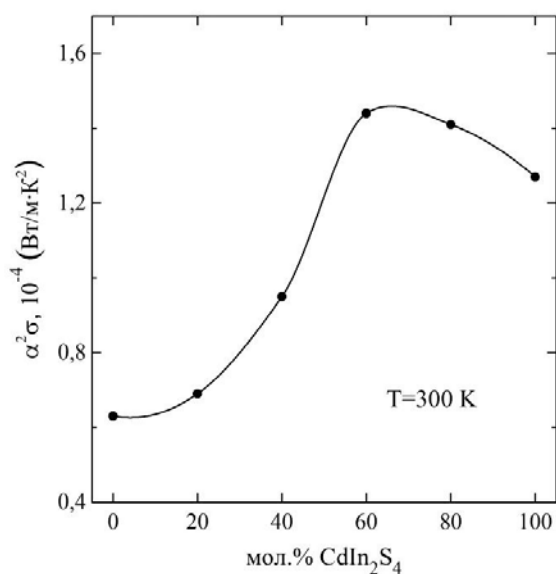
мол. % $\text{CdIn}_2\text{S}_4$	Тип провідності	$\sigma, 10^3 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	$\alpha, 10^{-6} (\text{В/К})$	$\alpha^2\sigma, 10^{-4} (\text{Вт/м}\cdot\text{К}^2)$
0	n	2,3	166	0,63
20	n	2,6	165	0,69
40	n	6,8	118	0,95
60	n	9,5	123	1,44
80	n	5,7	157	1,41
100	n	17	87	1,27

аналізу та теоретичного обґрунтування, що буде основою наших подальших досліджень.

Ефективність роботи термоелектрогенераторів визначається термоелектричною добротністю використаних у ньому матеріалів. З (Rowe, 1995) відомо, що термоелектрична добротність визначається формулою:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\chi} T, \quad (1)$$

де  $ZT$  – термоелектрична добротність,  $\alpha$  – коефіцієнт Зеебека,  $\sigma$  – питома електропровідність,  $T$  – абсолютна температура,  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.



**Рис. 2.** Залежність термоелектричної потужності твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  від вмісту  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$

У формулі (1) величина  $\alpha^2 \cdot \sigma$  – термоелектрична потужність матеріалу. Значення термоелектричної потужності для твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  представлені в табл. 1. На рис. 2 та в табл. 1 представлена залежність  $\alpha^2 \sigma$  від складу твердих розчинів  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ . Із цих даних видно, що максимальне значення  $\alpha^2 \sigma$  властиве сполукам з  $\approx 60\text{-}80$  мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Очевидно, що це відбувається за рахунок зростання  $\sigma$  та високих значень  $\alpha$ . Подібні дослідження проводились для твердих розчинів  $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$  (Новосад, 2020).

Маючи високі значення термоелектричної потужності, тверді розчини  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  із вмістом  $\approx 60\text{-}80$  мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  є перспективними для подальших досліджень, зокрема для

визначення  $\chi$ , аналогічно як це було зроблено в роботі (Новосад, 2021). Знаючи цей параметр, можна буде визначити величину  $ZT$  та зробити висновки про придатність  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  для створення термоелектрогенераторів.

Якщо з роботи (Rinkle Juneja, 2019) скористатись значенням  $\chi \approx 1$  (Вт/м<sup>2</sup>К) при  $T \approx 300$  для  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$ , то можна оцінити  $ZT$  досліджуваних зразків. Такі оцінки показують, що найвище значення  $ZT \approx 0,05$  матимуть сполуки з 60-80 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , проте така оцінка є наближеною та умовною.

**Висновки і перспективи подальших досліджень**

У результаті проведених досліджень встановлено, що тверді розчини  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  належать до напівпровідників  $n$ -типу провідності. Коефіцієнт Зеебека при температурах, близьких до кімнатних, становив 166, 165, 118, 123, 157, 87 мкВ/К, для зразків з вмістом 0, 20, 40, 60, 80, 100 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  відповідно. Завдяки високим значенням коефіцієнта Зеебека дані сполуки є перспективними для виготовлення термодатчиків. Монокристали  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  виявились низькоомними з питомим опором, значення якого при кімнатній температурі лежить в межах від  $4,4 \cdot 10^{-4}$  (Ом·м), для зразків з 0 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , до  $6 \cdot 10^{-5}$  (Ом·м), для зразків із 100 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Показано, що, змінюючи склад  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ , можна змінювати значення коефіцієнта Зеебека, питомої електропровідності та значення термоелектричної потужності.

Слід відмітити, що найвище значення термоелектричної потужності мають тверді розчини  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  з вмістом 60 мол.%  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Залежність властивостей  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  від вмісту  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  можна використати в напівпровідниковому приладобудуванні. Результати представлених у статті досліджень можуть виявитися корисними в побудові й теоретичному обґрунтуванні моделей електронних процесів в інших складних халькогенідних сполуках.

Остаточню стверджувати про застосовність  $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$  для термоелектричної генерації можна за значеннями коефіцієнта термоелектричної добротності. Тому актуальним залишається вимірювання коефіцієнта теплопровідності. Визначення коефіцієнта теплопровідності та розрахунок термоелектричної добротності стане основою наших майбутніх досліджень.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Shuangchao Zhao, Keyan Li, Jiaming Wu. Metal–Organic Framework-Derived Tubular  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C/CdIn}_2\text{S}_4$  Heterojunction for Efficient Solar-Driven  $\text{CO}_2$  Conversion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2022. Vol. 14. P. 20375–20384.
2. Isik M., Gasanly N. Optical characterization of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  crystals by ellipsometry measurements. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2016. Vol. 91. P. 13–17.
3. Li, X., Sun, Y., Xu, J. *et al.* Selective visible-light-driven photocatalytic  $\text{CO}_2$  reduction to  $\text{CH}_4$  mediated by atomically thin  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  layers. *Nat. Energy*. 2019. № 4. P. 690–699.
4. Ling, C., Ye, X., Zhang, J. *et al.* Solvothermal synthesis of  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  photocatalyst for selective photosynthesis of organic aromatic compounds under visible light. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article number: 27.
5. Alzahrani, J., Al-Qaisi, S., Mahmood, Q., & Ghrib, T. First Principle Study of Structural, Electronic, and Optical Properties of  $\text{XIn}_2\text{S}_4$  ( $\text{X} = \text{Zn, Cd, Hg}$ ). *Journal of Materials and Physical Sciences*. 2021. Vol. 2. № 2. P. 69–77.
6. Rinkle Juneja, Abhishek K. Singh Rattling-Induced Ultralow Thermal Conductivity Leading to Exceptional Thermoelectric Performance in  $\text{AgIn}_5\text{S}_8$ . *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 33894–33900.
7. Rowe D. M., *Handbook of thermoelectrics*. New York, CRC Press, 1995.
8. Kozer V.R., Parasyuk O.V. Phase equilibria in the quasi-ternary system  $\text{Cu}_2\text{S-In}_2\text{S}_3\text{-CdS}$ . *Chem. Met. Alloys*. 2009. № 2/ P. 102–107.
9. Novosad O., Shygorin P., Bozhko V., Pishova P., Venhryn B., Goldun V. Electrical and Thermoelectrical Properties of  $\text{PbSe-AgSbSe}_2$  Monocrystals. *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, Lviv-Slavske, Ukraine, February 22-26. 2022*. P. 798–801.
10. Новосад О.В., Божко В.В., Федосов С.А., Шигорін П.П. Термоелектричні властивості монокристалів  $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$ . *Перспективні технології та прилади*. 2020. №. 17. С. 183–189.
11. Новосад О., Пішова П., Божко В., Шпак В. Термоелектрична добротність монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ . *Фізика та освітні технології*. 2021. №. 1. С. 39–45.

**REFERENCES:**

1. Shuangchao Zhao, Keyan Li, Jiaming Wu. (2022) Metal–Organic Framework-Derived Tubular  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C/CdIn}_2\text{S}_4$  Heterojunction for Efficient Solar-Driven  $\text{CO}_2$  Conversion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 14, 20375–20384 [in English].
2. Isik M., Gasanly N. (2016) Optical characterization of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  crystals by ellipsometry measurements. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 91, 13–17 [in English].
3. Li, X., Sun, Y., Xu, J. *et al.* (2019) Selective visible-light-driven photocatalytic  $\text{CO}_2$  reduction to  $\text{CH}_4$  mediated by atomically thin  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  layers. *Nat. Energy*. 4, 690–699 [in English].
4. Ling, C., Ye, X., Zhang, J. *et al.* (2017). Solvothermal synthesis of  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  photocatalyst for selective photosynthesis of organic aromatic compounds under visible light. *Scientific Reports*. 7, 27 [in English].
5. Alzahrani, J., Al-Qaisi, S., Mahmood, Q., & Ghrib, T. (2021) First Principle Study of Structural, Electronic, and Optical Properties of  $\text{XIn}_2\text{S}_4$  ( $\text{X} = \text{Zn, Cd, Hg}$ ). *Journal of Materials and Physical Sciences*. 2, 69–77 [in English].
6. Rinkle Juneja, Abhishek K. Singh (2019) Rattling-Induced Ultralow Thermal Conductivity Leading to Exceptional Thermoelectric Performance in  $\text{AgIn}_5\text{S}_8$ . *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 11, 33894–33900 [in English].
7. Rowe D. M. (1995) *Handbook of thermoelectrics*. New York, CRC Press, [in English].
8. Kozer V.R., Parasyuk O.V. (2009) Phase equilibria in the quasi-ternary system  $\text{Cu}_2\text{S-In}_2\text{S}_3\text{-CdS}$ . *Chem. Met. Alloys*. 2, 102-107 [in English].
9. Novosad O., Shygorin P., Bozhko V., Pishova P., Venhryn B., Goldun V. (2022) Electrical and Thermoelectrical Properties of  $\text{PbSe-AgSbSe}_2$  Monocrystals. *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering* (pp. 798–801). Lviv-Slavske [in English].
10. Novosad O.V., Bozhko V.V., Fedosov S.A., Shygorin P.P. (2020) Termoelektrychni vlastyivosti monokrystaliv  $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$  [Thermoelectric properties of  $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$  single crystals]. *Perspektyvni tekhnolohiyi ta prylady – Prospective technologies and devices*. 17. 183–189 [in Ukrainian].
11. Novosad, O., Pishova, P., Bozhko, V. & Shpak, V. (2021) Termoelektrychna dobrotnist monokrystaliv  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  [Thermoelectric figure of merit in  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  single crystals]. *Physics and educational technology*, 1, 39–45 [in Ukrainian].