

УДК 621.362.1

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-2-4>**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

Бібліографічний опис статті: Новосад, О. (2023). Теплопровідність та термоелектрична добротність твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. *Фізика та освітні технології*, 2, 30–35, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-2-4>

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА ДОБРОТНІСТЬ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$

У роботі досліджено залежність коефіцієнта теплопровідності та термоелектричної добротності монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ із вмістом 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.% CdIn_2S_4 від їх компонентного складу.

Мета роботи полягала в експериментальному визначенні коефіцієнта теплопровідності та розрахунку термоелектричної добротності твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Встановлено, що основний внесок у теплопровідність монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ дає ґраткова складова. Розраховано термоелектричну добротність твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Проаналізовано залежність цих параметрів від компонентного складу $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Для вимірювання коефіцієнта теплопровідності використовували багаторазово перевірене обладнання. Усі дослідження проводили при $T \approx 300$ К.

Збільшення вмісту CdIn_2S_4 у твердому розчині $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ призводить до зростання термоелектричної добротності твердих розчинів. Різка зростання коефіцієнта теплопровідності для монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ з вмістом $\approx 20\text{-}80$ мол.% CdIn_2S_4 може обумовлюватись зростанням дефектності кристалічної решітки монокристалів. Термоелектрична ефективність була найвищою в монокристалах CdIn_2S_4 та становила $ZT \approx 0,046$. Найнижчі значення термоелектричної добротності ($ZT \approx 0,02$) характерні для сполук CuIn_5S_8 та $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ з ≈ 40 мол.% CdIn_2S_4 . Показано, що, змінюючи компонентний склад монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$, можна змінювати значення коефіцієнта теплопровідності та термоелектричної добротності. Плавна зміна коефіцієнта теплопровідності і термоелектричної добротності в монокристалах $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ із збільшенням вмісту атомів Cd може знайти практичне застосування в напівпровідниковому приладобудуванні, де використовують ся напівпровідникові матеріали CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 .

Ключові слова: напівпровідники, тверді розчини, коефіцієнт теплопровідності, термоелектрична добротність.

Oleksii NOVOSAD

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of 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

To cite this article: Novosad, O. (2023). Teploprovodnist' ta termoelektrychna dobrotnist' tverdykh rozchyniv $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. [Thermal conductivity and thermoelectric figure of merit of $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ solid solutions]. *Physics and Educational Technology*, 2, 30–35, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-2-4>

THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMOELECTRIC FIGURE OF MERIT OF $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ SOLID SOLUTIONS

This article is devoted to the studies of the dependence between the thermal conductivity coefficient and thermoelectric figure of merit in $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ single crystals with a content of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 mol.% CdIn_2S_4 on their composition.

The purpose of the work is to investigate the thermal conductivity coefficient and thermoelectric figure of merit of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions. We found that the lattice component provides the main contribution to the thermal conductivity of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 crystals. The thermoelectric figure of merit of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions was calculated. The dependence of these parameters on the CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 component composition was analyzed. To determine the thermal conductivity coefficient, repeatedly tested equipment were used. The research was conducted at $T \approx 300$ K.

An increase in the content of CdIn_2S_4 in the CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solution leads to an increase in the thermoelectric figure of merit of the solid solutions. The growth of the thermal conductivity coefficient for CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 single crystals with a content of ≈ 20 -80 mol.% CdIn_2S_4 can be caused by the growth of defects in the crystal lattice of single crystals. The thermoelectric figure of merit was the highest in CdIn_2S_4 single crystals ($ZT \approx 0,046$). The lowest values of thermoelectric figure of merit are characteristic of compounds CuIn_5S_8 and CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 with ≈ 40 mol.% CdIn_2S_4 ($ZT \approx 0,02$). It is shown that by changing the component composition of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , it is possible to change the value of the thermal conductivity coefficient and thermoelectric figure of merit. The smooth change of thermal conductivity coefficient and thermoelectric figure of merit CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 with a formation in the content of Cd atoms can find practical use in semiconductor instrumentation, where CuIn_5S_8 and CdIn_2S_4 materials are used.

Key words: *semiconductors, solid solutions, coefficient of thermal conductivity, thermoelectric figure of merit.*

Актуальність проблеми. Близько 60% енергії, що виділяється у вигляді теплової енергії, ніколи не використовується. Безпосереднє перетворення теплової енергії в електричну енергію забезпечують термоелектричні генератори, основою яких є термоелектричні матеріали. Дані матеріали можуть допомогти відновити значну частину енергії, втраченої у вигляді тепла. До речовин, з яких виготовляються високоефективні термоелектроперетворювачі, належать напівпровідники. Тому важливим завданням є дослідження фізичних властивостей нових напівпровідників, перспективних для термоелектричної генерації. Робота присвячена дослідженню коефіцієнта теплопровідності та термоелектричної добротності нових напівпровідникових сполук CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 з вмістом 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.% CdIn_2S_4 .

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з (Alzahrani, 2021; Rinkle, 2019) напівпровідникові сполуки CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 є перспективними матеріалами для термоелектричної генерації. У роботі (Alzahrani, 2021) повідомлялось, що термоелектрична добротність (ZT) для сполук CdIn_2S_4 становить 0,74. Монокристали CuIn_5S_8 завдяки їх низьким значенням решіткової складової коефіцієнта теплопровідності – 0,54 Вт/м·К при $T=1000$ К (Rinkle, 2019) можна віднести до матеріалів, перспективних для термоелектричної генерації у високотемпературному інтервалі. У роботах (Новосад, 2022; Новосад, 2020) досліджувались електричні та термоелектричні властивості твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 . У результаті проведених досліджень показано, що найвищі значення термоелектричної потужності ($\alpha^2 \cdot \sigma$) мають сполуки CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 з вмістом 60-80 мол.% CdIn_2S_4 . Особливістю утворення досліджуваного твер-

дого розчину CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 є збільшення об'єму елементарної комірки при зростанні вмісту атомів Cd (Kozer, 2009).

Мета дослідження. Мета дослідження полягала в експериментальному вимірюванні коефіцієнта теплопровідності твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , розрахунку електронної складової коефіцієнта теплопровідності та розрахунку термоелектричної добротності монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , а також в аналізі отриманих результатів залежно від компонентного складу монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 .

Методика та техніка експерименту. Досліджували тверді розчини CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 відповідали компонентному складу 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.% CdIn_2S_4 . Синтез матеріалів, методика вирощування монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 та деякі їх кристалографічні параметри представлені в роботі (Kozer, 2009). Для експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності використовувались ті ж самі зразки, що і при дослідженні термоелектричної потужності монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 в роботі (Новосад, 2022). У роботі (Новосад, 2022) описана методика підготовки зразків до вимірювань.

Методика визначення коефіцієнта теплопровідності та установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності більш детально описана в наших роботах (Новосад, 2021). У використуваному нами методі оцінки коефіцієнта теплопровідності тепловий потік, що діє на поверхню досліджуваного зразка, створювався променем світла. Слід відмітити, що під час вимірювання коефіцієнта теплопровідності монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 для зменшення втрат світлової енергії поверхня зразка, на яку потрапляло світло, робилась шорсткою та забарвлювалась у чорний колір. Чорний колір

поверхні зразків дав можливість зменшити коефіцієнт відбивання світла практично до 0 та виключити вплив квантів світла на рівноважний розподіл носіїв заряду в монокристалах. Дослідження проводились при $T \approx 300$ К.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ефективність роботи термоелектрогенератора визначається термоелектричною добротністю використаних у ньому матеріалів, яка визначається формулою (Масія, 2015; Rowe, 1995):

$$Z \cdot T = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\chi_{tot}} \cdot T, \quad (1)$$

де $Z \cdot T$ – термоелектрична добротність матеріалу, α – коефіцієнт Зеєбека, σ – питома електропровідність, χ_{tot} – коефіцієнт теплопровідності, T – абсолютна температура.

У формулі (1) величину $\alpha^2 \cdot \sigma$ називають термоелектричною потужністю матеріалу. Числові значення $\alpha^2 \cdot \sigma$ для твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , взяті з роботи (Новосад, 2022), представлені в табл. 1 та графічно на рис. 1.

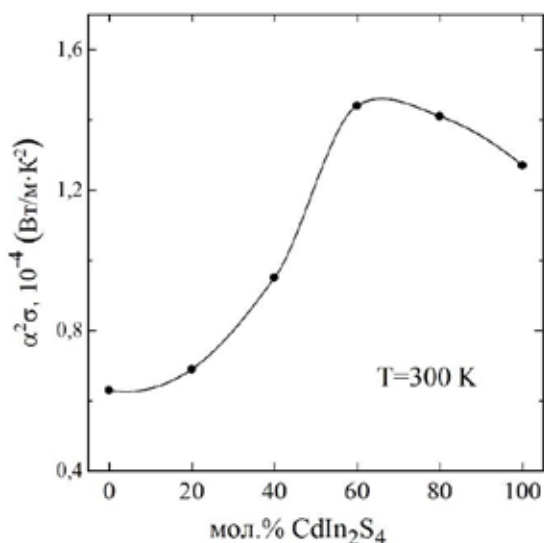


Рис. 1. Залежність термоелектричної потужності твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 від вмісту CdIn_2S_4

З представлених на рис. 1 та в табл. 1 даних видно, що максимальне значення $\alpha^2 \sigma$ властиве сполукам з ≈ 60 - 80 мол.% CdIn_2S_4 , це відбувається за рахунок зростання σ та високих значень α (Новосад, 2022). Як відмічалось в роботі (Новосад, 2022), маючи високі значення $\alpha^2 \sigma$, тверді розчини CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 з вмістом ≈ 60 - 80 мол.% CdIn_2S_4 можуть бути перспективними для подальших досліджень, зокрема для визначення χ_{tot} .

Коефіцієнт теплопровідності напівпровідникового матеріалу, в найбільш загальному випадку, складається з фононної теплопровідності (χ_{ph}) та електронної теплопровідності (χ_e) (Масія, 2015; Третьак, 2007):

$$\chi_{tot} = \chi_{ph} + \chi_e. \quad (2)$$

З (Масія, 2015; Третьак, 2007) відомо, що для оцінки числового значення χ_e можна використати закон Відемана-Франца:

$$\chi_e = L \sigma T, \quad (3)$$

де L – число Лоренца, T – абсолютна температура.

Згідно з (Масія, 2015; Третьак, 2007), для вироджених напівпровідників L можна розрахувати, використовуючи формулу

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2, \quad (4)$$

де k – стала Больцмана, e – елементарний заряд.

Про стан монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , близький до виродженого, свідчать їх високі значення σ (Новосад, 2022), при $T \approx 300$ К. Також на користь даного припущення свідчить висока концентрація вільних носіїв заряду в монокристалах CuIn_5S_8 ($n = 1,49 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) (Rinkle, 2019).

З врахуванням формул (3) та (4) отримаємо вираз для розрахунку χ_e

$$\chi_e = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 \sigma T, \quad (5)$$

Таблиця 1

Термоелектричні параметри твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4

мол. % CdIn_2S_4	$\alpha^2 \sigma, 10^{-4} \text{ Вт/м}\cdot\text{K}^2$	$\chi_e, \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$	$\chi_{tot}, \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$	ZT
0	0,63	0,017	0,93	0,02
20	0,69	0,019	0,88	0,024
40	0,95	0,050	1,36	0,021
60	1,44	0,070	1,22	0,035
80	1,41	0,042	1,12	0,038
100	1,27	0,125	0,82	0,046

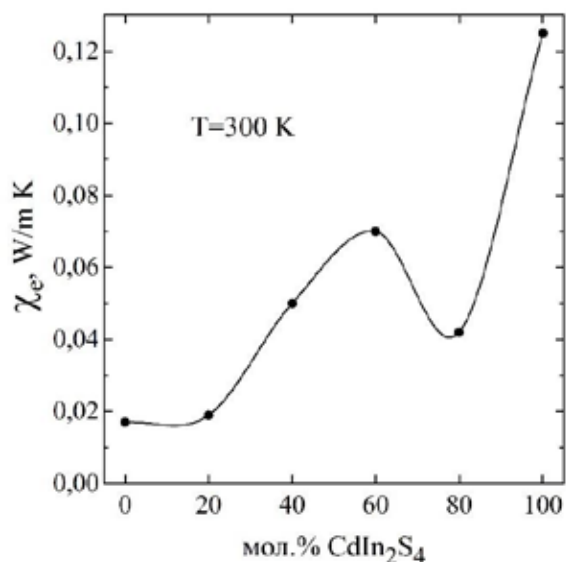


Рис. 2. Залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4

Одержані з формули (5) значення χ_e для $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ представлені в табл. 1 та графічно на рис. 2. Значення σ монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$, які використовувались при розрахунках χ_e , були взяті з роботи (Новосад, 2022).

Особливістю залежності χ_e від складу монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ є різке зменшення χ_e для монокристалів з 80 мол. % CdIn_2S_4 . Очевидно, що це обумовлено низьким значенням σ ($\sigma \approx 5,7 \cdot 10^3$ (Ом·м)⁻¹) в порівнянні з монокристалами іншого компонентного складу. Причиною такої поведінки монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ з 80 мол. % CdIn_2S_4 може бути зростання дефектності кристалічної решітки та, відповідно, ступеня скомпенсованості монокристалів, внаслідок чого зменшується концентрація вільних носіїв заряду.

З наведених в табл. 1 даних слідує, що для монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ $\chi_e/\chi_{tot} \approx 10^{-1} - 10^{-2}$, тобто з певним наближенням можна стверджувати, що $\chi_{tot} \approx \chi_{ph}$, що свідчить про те, що основний внесок в χ_{tot} даватиме χ_{ph} . Подібні результати спостерігались в твердих розчинах $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ (Novosad, 2022) та $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ (Bozhko, 2010).

У табл. 1 представлені значення χ_{tot} монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$, виміряні експериментально. Графічно залежність χ_{tot} монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від їх складу представлена на рис. 3. З представленої графічної залежності можна зробити висновки про різке зростання

χ_{tot} для сполук з вмістом $\approx 20\text{-}80$ мол.% CdIn_2S_4 . Оскільки для даних монокристалів $\chi_e/\chi_{tot} \approx 10^{-1} - 10^{-2}$, то зростання коефіцієнта теплопровідності обумовлене зростанням χ_{ph} . Зростання χ_{ph} в даному випадку може обумовлюватись зростанням дефектності кристалічної решітки монокристалів при переході до середини перерізу $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ як зі сторони CuIn_5S_8 , так і зі сторони CdIn_2S_4 .

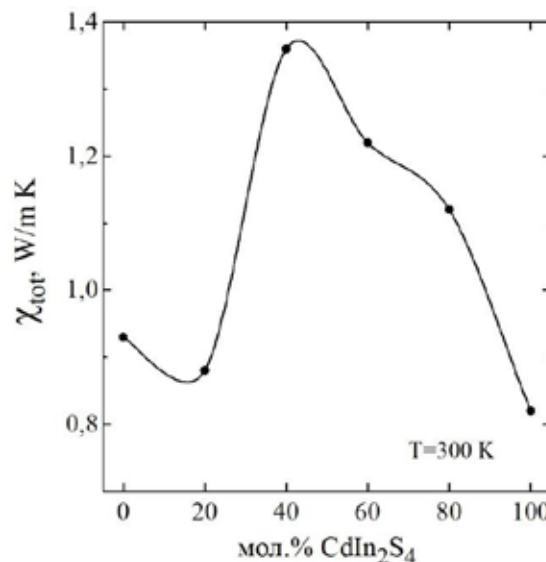


Рис. 3. Залежність коефіцієнта теплопровідності монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4

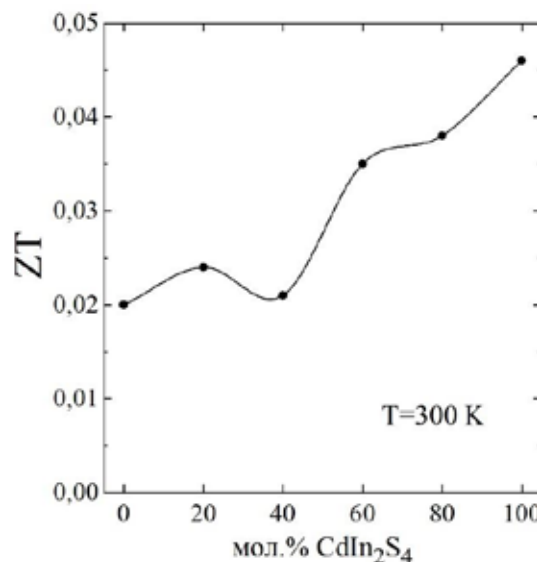


Рис. 4. Залежність термоелектричної добротності монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$

На основі відомих значень термоелектричної потужності $\alpha^2 \cdot \sigma$ та виміряних значень χ_{tot} за формулою (1) розраховано зна-

чення ZT . Графічно залежність ZT від складу монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ показано на рис. 4. З представлених даних видно, що збільшення вмісту другої компоненти в монокристалах $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ призводить до зростання ZT .

Висновки і перспективи подальших досліджень

Збільшення вмісту атомів Cd у твердому розчині $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ призводить до зростання термоелектричної добротності твердих розчинів. Змінюючи компонентний склад монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$, можна керувати їх термоелектричними властивостями. Основний внесок у теплопровідність монокристалів робить фононна складова. Різке зростання χ_{ph}

для монокристалів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ з вмістом $\approx 20\text{-}80$ мол.% CdIn_2S_4 може обумовлюватись зростанням дефектності кристалічної решітки монокристалів при переході до середини перерізу $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ як зі сторони CuIn_5S_8 , так і зі сторони CdIn_2S_4 . Найвище значення ZT при $T \approx 300$ К мають монокристали CdIn_2S_4 . Найменші значення ZT властиві сполукам CuIn_5S_8 та $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ з ≈ 40 мол.% CdIn_2S_4 . Залежність фізичних властивостей $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від компонентного складу даних сполук можна використовувати в напівпровідниковому приладобудуванні. Актуальним завданням залишається створення лабораторної термоелектричної комірки на основі даних сполук та визначення її ККД.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Alzahrani, J., Al-Qaisi, S., Mahmood, Q., & Ghrib, T. First Principle Study of Structural, Electronic, and Optical Properties of XIn_2S_4 ($X=\text{Zn, Cd, Hg}$). *Journal of Materials and Physical Sciences*. 2021. Vol. 2. № 2. P. 69–77.
2. Rinkle Juneja, Abhishek K. Singh Rattling-Induced Ultralow Thermal Conductivity Leading to Exceptional Thermoelectric Performance in AgIn_5S_8 . *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 33894–33900.
3. Новосад, О., Шигорін, П., Венгрин, Б., Божко, В., Шигорін, О. Електричні та термоелектричні властивості твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. *Фізика та освітні технології*. 2022. № 1. С. 56–61.
4. 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.
5. Kozier 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.
6. 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.
7. Enrique Macia. Thermoelectric Materials: Advances and Applications. CRC Press, 2015. 364 p.
8. Rowe D. M., Handbook of thermoelectrics. New York, CRC Press, 1995. 703 p.
9. Третяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників: Підручник. У 2 т. Т. 2. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. 338 с.
10. Novosad O., Shygorin P., Bozhko V., Pishova P., Venhryn B., Goldun V. Electrical and Thermoelectrical Properties of 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.
11. Bozhko V.V., Davydyuk G.Ye., Parasyuk O.V., Novosad O.V., Kozier V.R. Electrical and optical properties of solid solutions $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ ($x=0,05\text{-}0,2$). *Ukrainian Journal of Physics*. 2010. Vol. 55, № 3. P. 312–316.

REFERENCES:

1. Alzahrani, J., Al-Qaisi, S., Mahmood, Q., & Ghrib, T. (2021) First Principle Study of Structural, Electronic, and Optical Properties of XIn_2S_4 ($X= \text{Zn, Cd, Hg}$). *Journal of Materials and Physical Sciences*. 2, 69–77 [in English].
2. Rinkle Juneja, Abhishek K. Singh (2019) Rattling-Induced Ultralow Thermal Conductivity Leading to Exceptional Thermoelectric Performance in AgIn_5S_8 . *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 11, 33894–33900 [in English].
3. Novosad, O., Shygorin, P., Venhryn, B., Bozhko, V., Shygorin, O. (2022). Elektrichni ta termoelektrychni vlastyivosti 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 [in Ukrainian].
4. 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]. *Prospective technologies and devices*. 17, 183–189 [in Ukrainian].
5. Kozier 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].

6. 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].
7. Enrique Macia. (2015) *Thermoelectric Materials: Advances and Applications*. CRC Press [in English].
8. Rowe D. M. (1995) *Handbook of thermoelectrics*. New York, CRC Press [in English].
9. Tretyak O.V., Lozovsky V.Z. (2007). *Osnovy fizyky napivtsiv: Pidruchnyk* [Fundamentals of semiconductor physics: Textbook.] Kyiv. Kyiv University Publishing and Printing Center. 338 s. [in Ukrainian].
10. Novosad O., Shygorin P., Bozhko V., Pishova P., Venhryn B., Goldun V. (2022) Electrical and Thermoelectrical Properties of 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].
11. Bozhko V.V., Davydyuk G.Ye., Parasyuk O.V., Novosad O.V., Kozer V.R. (2010) Electrical and optical properties of solid solutions $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ ($x=0,05-0,2$). *Ukrainian Journal of Physics*. 3, 312–316 [in Ukrainian].