

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.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_4 до $6 \cdot 10^{-5}$ (Ом·м), для зразків із 100 мол.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_4 в CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 відповідно; найвище значення термоелектричної потужності мають тверді розчини CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 з вмістом 60 мол.% CdIn_2S_4 . Завдяки високим значенням коефіцієнта Зеєбека дані сполуки є перспективними для виготовлення чутливих термодатчиків. Показано, що, змінюючи компонентний склад CuIn_5S_8 - CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 [Electrical and thermoelectrical properties of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 SOLID SOLUTIONS

In the article has been investigated solid solutions of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 with a content of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 mol.% CdIn_2S_4 . The purpose of the work was to investigate the electrical and thermoelectric properties of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions. The conductivity type, specific electrical conductivity, Seebeck coefficient of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions were determined. The thermoelectric power of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 crystals was calculated. The dependence of these parameters on the CuIn_5S_8 - CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 - CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 - CdIn_2S_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.% CdIn_2S_4 to $6 \cdot 10^{-5}$ ($\Omega \cdot \text{m}$) for samples with 100 mol.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_4 , respectively. The highest value of thermoelectric power has CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions with a content of 60 mol.% CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 - CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 .

Напівпровідникові матеріали CuIn_5S_8 та CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 та CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 та CdIn_2S_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 CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 як про матеріали перспективні для термоелектричної генерації (Alzahrani, 2021; Rinkle Juneja, 2019). Згідно з (Alzahrani, 2021) для сполук CdIn_2S_4 термоелектрична добротність (ZT) становила 0,74. В роботі (Rinkle Juneja, 2019) розглянуті електричні та термоелектричні вла-

стивості монокристалів AgIn_5S_8 та CuIn_5S_8 . Наднизькі значення решіткової складової коефіцієнта теплопровідності, 0,29 Вт/м·К для AgIn_5S_8 та 0,54 Вт/м·К для CuIn_5S_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 CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 є збільшення об'єму елементарної комірки при зростанні вмісту атомів Cd (Kozar, 2009).

Мета дослідження. Мета дослідження полягала у встановленні термоелектричними методами типу провідності нових твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , експериментальному визначенні питомої електропровідності та коефіцієнта Зеебека сполук CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 ; на основі проведених досліджень розрахувати термоелектричну потужність даних матеріалів та провести аналіз залежностей отриманих результатів від компонентного складу монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 .

Методика та техніка експерименту. Методика вирощування твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , синтез матеріалів та деякі їх кристалографічні параметри представлені в роботі (Kozar, 2009). Тверді розчини CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 відповідали компонентному складу 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.% CdIn_2S_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 $(8-5) \times (2-1) \times (2-1)$ мм³. 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 CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 згадувалось у роботах (Shuangchao Zhao, 2022; Isik, 2016). В (Isik, 2016) повідомлялось про можливість інверсії типу провідності CuIn_5S_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.% CdIn_2S_4 , до $6 \cdot 10^{-5}$ (Ом·м), для зразків із 100 мол.% CdIn_2S_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 CdIn_2S_4 . Із представлених даних видно, що

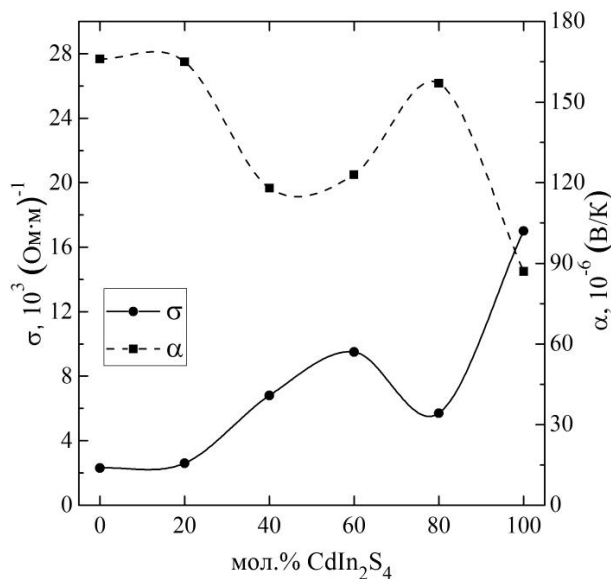


Рис. 1. Залежність питомої електропровідності та коефіцієнта Зеебека твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4

зростання вмісту CdIn_2S_4 до 60 мол.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_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. % CdIn_2S_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, α – коефіцієнт Зеебека, σ – питома електропровідність, T – абсолютна температура, χ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

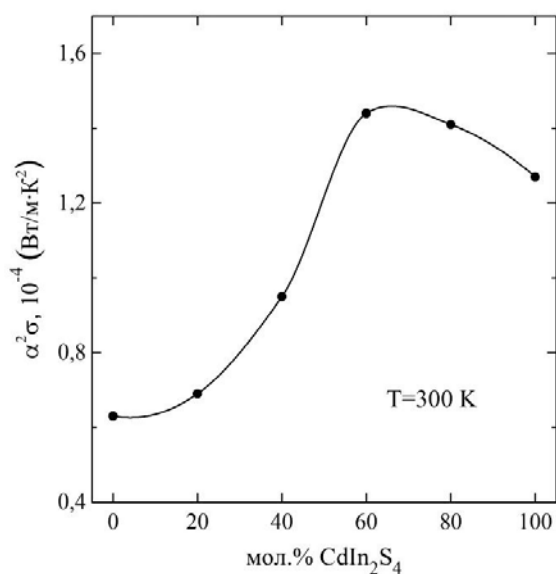


Рис. 2. Залежність термоелектричної потужності твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4

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.% CdIn_2S_4 . Очевидно, що це відбувається за рахунок зростання σ та високих значень α . 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.% CdIn_2S_4 є перспективними для подальших досліджень, зокрема для

визначення χ , 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/м²К) при $T \approx 300$ для CuIn_5S_8 , то можна оцінити ZT досліджуваних зразків. Такі оцінки показують, що найвище значення $ZT \approx 0,05$ матимуть сполуки з 60-80 мол.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_4 , до $6 \cdot 10^{-5}$ (Ом·м), для зразків із 100 мол.% CdIn_2S_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.% CdIn_2S_4 . Залежність властивостей $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_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 CO_2 Conversion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2022. Vol. 14. P. 20375–20384.
2. Isik M., Gasanly N. Optical characterization of CuIn_5S_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 CO_2 reduction to CH_4 mediated by atomically thin CuIn_5S_8 layers. *Nat. Energy*. 2019. № 4. P. 690–699.
4. Ling, C., Ye, X., Zhang, J. *et al.* Solvothermal synthesis of CdIn_2S_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 XIn_2S_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 AgIn_5S_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 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 CO_2 Conversion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 14, 20375–20384 [in English].
2. Isik M., Gasanly N. (2016) Optical characterization of CuIn_5S_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 CO_2 reduction to CH_4 mediated by atomically thin CuIn_5S_8 layers. *Nat. Energy*. 4, 690–699 [in English].
4. Ling, C., Ye, X., Zhang, J. *et al.* (2017). Solvothermal synthesis of CdIn_2S_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 XIn_2S_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 AgIn_5S_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 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].