

УДК 621.362.1

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2021-1-7>**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

**Поліна ПІШОВА**

здобувач вищої освіти першого бакалаврського рівня, спеціальності 124 Системний аналіз, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

**Володимир БОЖКО**

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

**Вікторія ШПАК**

здобувач вищої освіти першого бакалаврського 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., Пішова, П., Божко, В., Шпак, В. (2021) Термоелектрична добротність монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ . *Фізика та освітні технології*, 1, 39–45, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2021-1-7>

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА ДОБРОТНІСТЬ МОНОКРИСТАЛІВ  $(\text{AGSB})_{1-x}\text{PB}_x\text{SE}_2$** 

У роботі досліджено залежність коефіцієнта теплопровідності та термоелектричної добротності монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  від їх компонентного складу. Показано, що основний внесок у теплопровідність сполук  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x=0-0,4$  робить фононна складова теплопровідності. У монокристалах зі значенням  $x=0,92-1$  величина електронної складової теплопровідності стає близькою до фононної. Збільшення вмісту Pb у  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  у межах від  $x=0$  до  $x=0,4$  призводить до зменшення коефіцієнта теплопровідності  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  від  $0,56 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$  до  $0,27 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ , та збільшення  $x$  від  $0,92$  до  $1$  призводить до зростання коефіцієнта теплопровідності у межах від  $0,45 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$  до  $1,11 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ . Найвищими значеннями термоелектричної добротності володіють монокристали  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x=0, 0,1, 0,2, 0,92, 1$  ( $ZT \approx 0,014-0,46$ ). Маючи високе значення термоелектричної добротності, монокристали даного компонентного складу є перспективними матеріалами для термоелектрогенерації. Плавна зміна термоелектричних властивостей  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  із зміною вмісту атомів Pb може знайти практичне використання у напівпровідниковому приладобудуванні, де використовуються матеріали  $\text{AgSbSe}_2$  та  $\text{PbSe}$ .

**Ключові слова:** монокристали, термоелектрика, коефіцієнт теплопровідності, термоелектрична добротність.

**Oleksii NOVOSAD**

PhD in Physical and Mathematical, Senior Lecturer at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-9433-7776

**Polina PISHOVA**

Student, specialty 124 "System analysis", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056

**Volodymyr BOZHKO**

PhD in Physical and Mathematical, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

**Victoria SHPAK**

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

**To cite this article:** 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, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2021-1-7>

**THERMOELECTRIC FIGURE OF MERIT IN  $(\text{AGSB})_{1-x}\text{PB}_x\text{SE}_2$  SINGLE CRYSTALS**

*This article is devoted to studies the dependence of the thermal conductivity coefficient and thermoelectric figure of merit in  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  single crystals on their composition. We found that the lattice component provides the main contribution to the thermal conductivity of solid solutions  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  at  $x=0-0,4$ . The electronic thermal conductivity in single crystals with values of  $x$  at 0,92-1, becomes close to the lattice component. An increase in the Pb fraction of  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  in the range from  $x=0$  to  $x=0,4$  leads to a decrease in the thermal conductivity  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  from  $0,56 \text{ W / K} \cdot \text{m}$  to  $0,27 \text{ W / K} \cdot \text{m}$ , and an increase in  $x$  from 0,92 to 1 leads to an increase in the thermal conductivity in the range from  $0,45 \text{ W / K} \cdot \text{m}$  to  $1,11 \text{ W / K} \cdot \text{m}$ . The thermoelectric figure of merit was the highest in all compositions:  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  at  $x = 0, 0,1, 0,2, 0,92, 1$  ( $ZT \approx 0,014-0,46$ ). Having a high value of the thermoelectric figure of merit, single crystals of such composition are promising materials for thermoelectric energy generation. The smooth change of thermoelectric properties  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ , with a formation in the content of Pb atoms can find practical use in semiconductor instrumentation, where  $\text{AgSbSe}_2$  and  $\text{PbSe}$  materials are used.*

**Key words:** single crystals, thermoelectricity, thermal conductivity coefficient, thermoelectric figure of merit.

**Вступ.** Чи не єдиним методом прямого перетворення теплової енергії в електричну є використання термоелектрогенераторів. Твердотільні термоелектричні генератори використовуються не тільки для перетворення теплової енергії Сонця в електричну, а також для перетворення в електричну енергію тепла, яке виділяється багатьма іншими джерелами, наприклад, автомобільних відпрацьованих газів, термальних вод, промислових процесів, навіть людського тіла [1].

До матеріалів, з яких виготовляються високоефективні термоелектроперетворювачі, належать напівпровідники. Це і є однією з причин того, що значна увага дослідників приділяється пошуку нових перспективних матеріалів як основного джерела розширення та покращення функціональних можливостей термоелектричних матеріалів. Для цього використовуються нові багатокомпонентні сполуки та тверді розчини на їх основі.

Напівпровідникові сполуки типу  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{V}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ , завдяки їх високому коефіцієнту термоелектричної добротності  $ZT$ , відомі як матеріали для приладів термоелектрики. Так, наприклад,

сполука  $\text{AgSbSe}_2$  – перспективний термоелектричний матеріал для високотемпературного діапазону [2].

Поряд із застосуванням  $\text{AgSbSe}_2$  як матеріалів для термоелектричних перетворювачів останнім часом зріс інтерес до  $\text{AgSbSe}_2$  та твердих розчинів на їх основі як до матеріалів, що можуть виконувати функції перемикаючого середовища систем оптичної пам'яті [3]. Також варто зазначити, що одним із методів покращення діючих термоелектричних перетворювачів енергії є включення нанорозмірних частинок у їх склад. Такими матеріалами для  $\text{AgSbSe}_2$  можуть бути тверді розчини на її основі.

Халькогеніди свинцю  $\text{PbX}$ , де  $(X=\text{S}, \text{Se}, \text{Te})$  використовуються як матеріали для створення термоелектричних перетворювачів енергії та елементів оптоелектронних приладів, що функціонують в інфрачервоній області електромагнітного спектру [4, 5]. Задовільні термоелектричні параметри халькогенідів свинцю зумовлені їх специфічними фізичними властивостями: низькими значеннями фонної теплопровідності при порівняно високій рухливості вільних носіїв заряду. У сучасній напівпровідниковій електро-

ніці та фізиці PbX (X=S, Se, Te) знаходять застосування як матеріали для створення гетеропереходів, надрешіток, нанониток та квантових точок [6-10]. **Експериментальна частина**

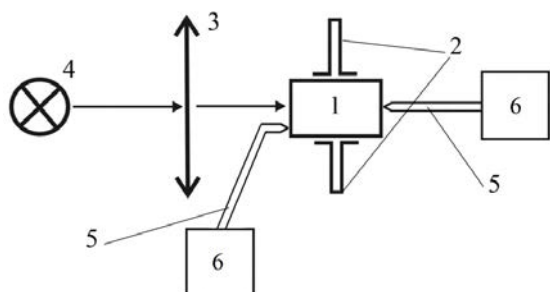
Для дослідження коефіцієнта теплопровідності монокристалів  $(AgSb)_{1-x}Pb_xSe_2$  виготовляли зразки у формі правильних паралелепіпедів зі злитків, отриманих після вирощування монокристалів. Обробку поверхонь здійснювали шляхом полірування й шліфування алмазними пастами різної зернистості. Середні розміри отриманих зразків становили  $(4-3) \times (3-2) \times (1-2)$  мм<sup>3</sup>. Із кожного монокристалічного злитка одного компонентного складу для досліджень виготовлялось по три зразки. Це дало можливість уникнути випадкових помилок та похибок.

Кількість теплоти, що переноситься через деяку поверхню площею  $\Delta S$  у середовищі, що заповнює простір, між по різному нагрітими його частинами за одиницю часу, визначається на основі закону:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta S \cdot \Delta t} = \chi \frac{|\Delta T|}{\Delta x}, \quad (1)$$

де  $\Delta Q$  – кількість теплоти, перенесеної за час  $\Delta t$  через поверхню площею  $\Delta S$  у напрямку, перпендикулярному до цієї поверхні, у бік зменшення температури;  $\Delta T$  – різниця температур;  $\Delta x$  – відстань між частинами середовища, різниця температур між якими  $\Delta T$ ;  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності середовища.

У запропонованому нами методі визначення коефіцієнта теплопровідності  $\chi$  тепловий потік, що діє на поверхню досліджуваного зразка, створювався променем світла, аналогічно, як у роботі [11]. Для цього використовувалась установка, основні функціональні елементи якої зображені на рис. 1.



**Рис. 1. Схема установки для визначення коефіцієнта теплопровідності:**

- 1 – досліджуваний зразок; 2 – кристалотримачі;
- 3 – фокусуюча система; 4 – галогенна лампа;
- 5 – термопари; 6 – реєструючі прилади

Досліджуваний зразок 1 розміщувався у кристалотримачі 2. Сфокусований за допомогою лінз 3, світловий промінь від галогенної лампи 4 направлявся на одну із граней зразка, вирізаного із монокристалічного злитка  $(AgSb)_{1-x}Pb_xSe_2$ , отриманого після вирощування. Різницю температур  $\Delta T$  між нагрітою і холодною гранню зразка визначали за допомогою мідь-константанових термопар 5, які приєднувались до реєструючих приладів 6.

Під час вимірювання коефіцієнта теплопровідності монокристалів  $(AgSb)_{1-x}Pb_xSe_2$  для зменшення втрат світлової енергії поверхня зразка, що освітлювалася, робилась шорсткою та забарвлювалася 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. Після кожного вимірювання значення  $\Delta T$  проводилось вимірювання потужності світлового потоку, який нагрівав зразок. Для цього на місце досліджуваного зразка встановлювалась вимірювальна головка приладу ИМО-2Н. В основі принципу дії вимірювача ИМО-2Н лежить перетворення світлової енергії в теплову за рахунок чорної поверхні вимірювальної термоелектричної секції. Коефіцієнт теплопровідності визначався на основі формули (1).

**Результати та обговорення.** Для оцінки перспективи використання напівпровідникових матеріалів у термоелектричній генерації використовують коефіцієнт термоелектричної добротності ZT. З [12; 13] відомо, що коефіцієнт термоелектричної добротності речовини визначається формулою:

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

де  $T$  – абсолютна температура,  $\alpha$  – коефіцієнт Зеебека,  $\sigma$  – питома електропровідність,  $\chi_{tot}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Результати досліджень  $\sigma$  та  $\alpha$   $(AgSb)_{1-x}Pb_xSe_2$ , а також методика вирощування даних монокристалів, представлені у наших роботах [14-17]. Результати експериментально визначених значень  $\chi_{tot}$  подано в табл. 1. Згідно з формулою (2), перспективні термоелектричні матеріали повинні мати невисоке значення  $\chi_{tot}$ . Із даних, представлених в табл. 1, видно, що наявність атомів Pb та поступове збільшення їх вмісту у монокристалах

AgSbSe<sub>2</sub> (монокристали (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> при x=0) призводить до зменшення  $\chi_{\text{tot}}$ . Аналогічні результати спостерігались для монокристалів PbSe (монокристали (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> при x=1), у яких зменшення  $\chi_{\text{tot}}$  обумовлювалось заміщенням атомів Pb атомами Ag та Sb.

Таблиця 1  
Термоелектричні параметри монокристалів (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>

| x    | $\chi_{\text{tot}}$ , Вт/К·м | $\alpha^2\sigma$ , мкВт/м·К <sup>2</sup> | $\chi_e$ , мВт/К·м | ZT                   |
|------|------------------------------|--|--------------------|----------------------|
| 0    | 0,56                         | 49                                       | 1,10               | 2,6·10 <sup>-2</sup> |
| 0,1  | 0,46                         | 37                                       | 0,66               | 2,4·10 <sup>-2</sup> |
| 0,2  | 0,37                         | 17                                       | 0,25               | 1,4·10 <sup>-2</sup> |
| 0,3  | 0,34                         | 2  | 0,015              | 1,8·10 <sup>-3</sup> |
| 0,4  | 0,27                         | 1,1                                      | 0,007              | 1,0·10 <sup>-3</sup> |
| 0,92 | 0,45                         | 0,71                                     | 16                 | 4,7·10 <sup>-2</sup> |
| 0,95 | 0,62                         | 0,12                                     | 24                 | 5,8·10 <sup>-3</sup> |
| 1    | 1,11                         | 17                                       | 260                | 0,46                 |

Тверді розчини (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> при 0,4<x<0,9 виявились двофазними та не відтворюваними, тому вони не досліджувались.

Графічно залежність  $\chi_{\text{tot}}$  від складу монокристалів представлено на рис. 2, з якого видно, що зростання x призводить до плавної зміни  $\chi_{\text{tot}}$ . Зменшення  $\chi_{\text{tot}}$  при зростанні x у монокристалах (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> при x=0-0,4 може обумовлюватись тим, що атоми Pb є значно важчими від атомів Ag та Sb, що зменшує решіткову складову коефіцієнта теплопровідності внаслідок зменшення інтенсивності теплових коливань більш важких атомів Pb. Зростання  $\chi_{\text{tot}}$  при x в межах від 0,92 до 1 обумовлюється збільшенням електронної складової  $\chi_{\text{tot}}$ , яка детальніше буде розглянута нижче.

За різними даними [2, 3, 18]  $\chi_{\text{tot}}$  для монокристалів AgSbSe<sub>2</sub> змінюється в межах 0,3–0,81 Вт·К<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, що добре узгоджується з результатами наших експериментальних досліджень ( $\chi_{\text{tot}}=0,56$  Вт·К<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>).

Коефіцієнт теплопровідності напівпровідникового матеріалу, в найбільш загальному випадку, складається з фононної ( $\chi_{\text{ph}}$ ) та електронної ( $\chi_e$ ) складових[19]:

$$\chi_{\text{tot}} = \chi_{\text{ph}} + \chi_e \quad (3).$$

Для оцінки електронної складової теплопровідності можна використати закон Відемана-Франца [19]:

$$\chi_e = L \sigma T \quad (4),$$

де T – абсолютна температура,  $\sigma$  – питома електропровідність, L – число Лоренца.

Оскільки, згідно з [14, 15], досліджувані монокристали при кімнатних температурах проявляють властивості вироджених напівпровідників, то, згідно з [19], для визначення L можна використовувати формулу

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

де k – стала Больцмана, e – заряд електрона.

Одержані з (4) та (5) значення  $\chi_e$  для (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> наведені в табл. 1 та графічно представлені на рис. 3. Для розрахунків  $\chi_e$  та термоелектричної потужності ( $\alpha^2\sigma$ ) використовувались значення  $\alpha$  та  $\sigma$ , взяті з наших робіт [14-17].

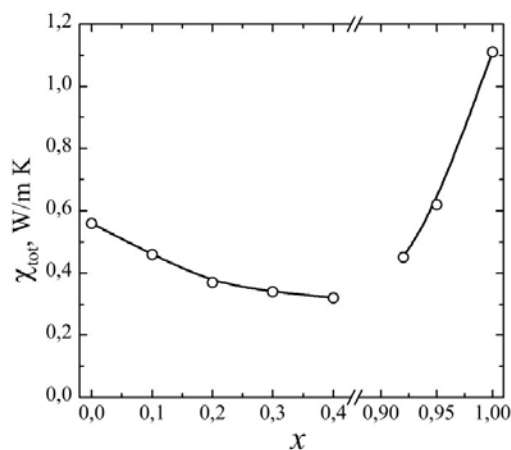


Рис. 2. Залежність коефіцієнта теплопровідності монокристалів (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> від їх складу

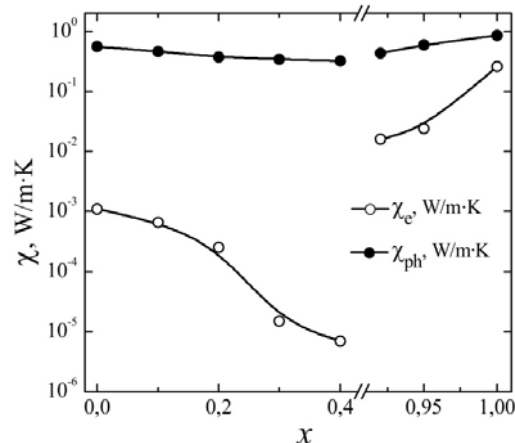


Рис. 3. Залежність електронної та фононної складових коефіцієнта теплопровідності монокристалів (AgSb)<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> від їх складу



Із наведених в табл. 1 даних слідує, що для монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x=0-0,4$   $\chi_e/\chi_{\text{tot}} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$ , тобто можна стверджувати, що  $\chi_{\text{tot}} \approx \chi_{\text{ph}}$ . Подібні результати мають місце і для інших сильнолегованих напівпровідників [20], наприклад, для Si *n*-типу провідності з концентрацією донорів  $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Для твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2$ - $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$  з 5 та 10 мол%  $\text{ZnIn}_2\text{Se}_4$ , стан яких був близький до виродженого, отримано аналогічні результати в [21].

Зменшення  $\chi_e$ , згідно з формулою (4), відбувається за рахунок зменшення питомої електропровідності монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  [14-17], що, очевидно, обумовлюється зменшенням рухливості вільних носіїв заряду внаслідок зростання дефектності кристалічної решітки та зменшення концентрації вільних носіїв заряду.

Маючи експериментально визначені значення  $\chi_{\text{tot}}$  та теоретично розраховані значення  $\chi_e$ , на основі формули (3) ми визначили  $\chi_{\text{ph}}$ . Результати розрахунку представлені графічно на рис. 3.

Теоретично розрахувати фонону складову коефіцієнта теплопровідності для халькогенідів свинцю  $\text{PbX}$  ( $X=\text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ) можна з емпірично встановленого виразу для коефіцієнта Зеебека [4],

$$\alpha = 2 \left( \frac{k}{e} \right) \left( 1 + \frac{\chi_e}{\chi_{\text{ph}}} \right) \quad (6).$$

Коефіцієнт фононної теплопровідності для монокристалів  $\text{PbSe}$ , визначений з формули (6), виявився  $\chi_{\text{ph}}=0,93 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ . Варто зазначити, що, згідно з даними роботи [22],  $\chi_{\text{ph}}$  для халькогенідів свинцю становить  $\approx 2,09 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ , що виявилось близьким до розрахованого нами значення. Для розрахунку  $\chi_{\text{ph}}$  використовувались значення  $\alpha$ , взяті з [14, 15].

Маючи теоретично розраховані значення  $\chi_{\text{ph}}$  та  $\chi_e$  для  $\text{PbSe}$ , можна визначити  $\chi_{\text{tot}}$ :  $\chi_{\text{tot}} = \chi_{\text{ph}} + \chi_e = 0,93 + 0,26 = 1,19 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ , що узгоджується з експериментально визначеним значенням  $\chi_{\text{tot}}=1,11 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ .

На основі значень  $\alpha^2\sigma$  (табл. 1) та експериментально виміряних значень  $\chi_{\text{tot}}$  розраховано значення  $ZT$  монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ . Розраховані величини  $ZT$  наведені в табл. 1. Найвищими значеннями  $ZT=0,46$  володіли монокристали  $\text{PbSe}$ . Завдяки високим значенням  $ZT$ , до перспективних термоелектричних матеріалів можна віднести монокристали  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x=0$ ,

0,1, 0,2 0,92. Графічно залежність  $ZT$  від складу  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  подано на рис. 4.

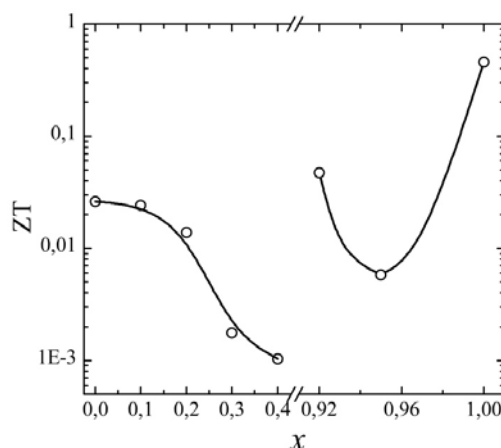


Рис. 4. Термоелектрична добротність монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$

Різде зменшення  $ZT$  монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x \approx 0,2-0,4$  обумовлюється зменшенням  $\alpha^2\sigma$ . Згідно з [14, 15], особливістю досліджуваних монокристалів при  $x=0,95$  є те, що вони виявились напівпровідниками *n*-типу провідності, решта досліджуваних кристалів були напівпровідниками *p*-типу провідності. З [14, 15] відомо, що тип провідності халькогенідів свинцю визначається або надлишком  $\text{Pb}$  по відношенню до стехіометричного складу (*n*-тип провідності), або надлишком халькогеніду (*p*-тип провідності). На нашу думку, саме надлишок атомів  $\text{Pb}$  призвів до інверсії типу провідності та різкого зменшення термоелектричної потужності внаслідок зростання ступеня скомпенсованості монокристалів  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x=0,95$ .

**Висновки.** Основний внесок у теплопровідність  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x=0-0,4$  робить фононна складова. У монокристалах зі значенням  $x=0,92-1$  електронна складова теплопровідності стає по величині близькою до фононної. Збільшення вмісту  $\text{Pb}$  в  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  в межах від  $x=0$  до  $x=0,4$  призводить до зменшення коефіцієнта теплопровідності  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  від  $0,56 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$  до  $0,27 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ , та збільшення  $x$  від  $0,92$  до  $1$  призводить до зростання коефіцієнта теплопровідності в межах від  $0,45 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$  до  $1,11 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ . Найвищим значенням термоелектричної добротності володіють монокристали  $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$  при  $x=0, 0,1, 0,2, 0,92, 1$  ( $ZT \approx 0,014-0,46$ ). Маючи високе значення термоелектричної добротності, монокристали даного компонентного складу є перспектив-

ними матеріалами для термоелектрогенерації. знайти практичне використання в напівпровідниковому приладобудуванні, де використовуються матеріали  $\text{AgSbSe}_2$  та  $\text{PbSe}$ .

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Freik D.M., Nykyruy L.I., Krynytskiy O.S. Achievements and Problems of Thermoelectricity a. Historical Aspects (Review). *Physics and chemistry of solid state*. 2012. № 2. P. 297–318.
2. Wojciechowski K., Tobola J., Schmidt M., Zybal R. Crystal structure, electronic and transport properties of  $\text{AgSbSe}_2$  and  $\text{AgSbTe}_2$ . *J. of Phys. Chem. Solids*. 2008. № 11. P. 2748–2755.
3. Kumar Ravhi S., Sekar A., Jaya N. Victor, Natarajan S. Synthesis and high pressure studies of the semiconductor  $\text{AgSbSe}_2$ . *J. Alloys Compd.* 1999. № 1-2. P. 48–50.
4. Равич Ю.И., Ефимова Р.А., Смирнов И.А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца  $\text{PbTe}$ ,  $\text{PbSe}$ ,  $\text{PbS}$ . М. : Наука, 1995. 384 с.
5. Rowe D.M. Handbook of thermoelectrics. New York : CRC Press, 1995. 703 p.
6. Gavrikova T.A., Zykov V.A. Electrical and photoelectrical properties of anisotypic  $\text{Pb}_{0.93}\text{Sn}_{0.07}\text{Se}/\text{PbSe}$  heterojunctions. *Semiconductors*. 1997. № 11. P. 1342–1346.
7. Rogacheva E.I., Grigorov S.N., Nashchekina O.N. Growth mechanism and thermoelectric properties of  $\text{PbTe}/\text{SnTe}/\text{PbTe}$  heterostructures. *Thin Solid Films*. 2005. № 1-2. P. 41–48.
8. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Grigorov S.N. Oscillatory behavior of the transport properties in  $\text{PbTe}$  quantum wells. *Nanotechnology*. 2003. № 1. P. 53–58.
9. Qiu X., Lou Y., Samia A.C.S.  $\text{PbTe}$  Nanorods by Sonochemistry. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005. № 36. P. 5855–5857.
10. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Meriuts A.V. Quantum size effects in n- $\text{PbTe}/\text{p-SnTe}/\text{n-PbTe}$  heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 2005. № 6. P. 238–243.
11. Gurbaniyazov M.A., Kurbanov M.A. Technique and installation for determination to semiconductors heat conduction with the use of radiant energy. *Technology and design in electronic equipment*. 2011. № 5. P. 25–26.
12. Анагычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. К. : Наук. Думка, 1979. 768 с.
13. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1960. 188 с.
14. Новосад О., Божко Н., Змій О., Остапюк Т., Віскунець Л. Електричні, гальваноманітні та термоелектричні властивості твердих розчинів  $\text{PbSe-AgSbSe}_2$ . *Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки: Фіз. науки*. 2013. № 26. С. 21–26.
15. Федосов С., Божко Н., Новосад О., Остап'юк Т., Змій О., Торчинюк П., Олексеюк І., Іллюшко Н. Взаємодія компонентів  $\text{AgSbSe}_2$  і  $\text{PbSe}$  та термоелектричні властивості твердих розчинів на їх основі. *Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки: Фіз. науки*. 2014. № 17. С. 8–14.
16. Пішова П.В., Календа В.С., Новосад О.В. Термоелектрична добротність твердих розчинів  $\text{PbSe-AgSbSe}_2$ . *Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень* : матеріали XIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Луцьк, 14–15 травн. 2019 р.) Луцьк : Вежа-Друк, 2019. С. 857–860.
17. Пішова П.В., Новосад О.В., Коленда В.С. Теплопровідність монокристалів  $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$ . *Актуальні проблеми фундаментальних наук* : III Міжнар. наук. конф. (м. Луцьк, 1–5 червня 2019 р.) Луцьк, 2019. С. 92–94.
18. Satya N. Guin, Arindom Chatterjee, Devendra Singh Negi. High thermoelectric performance in tellurium free p-type  $\text{AgSbSe}_2$ . *Energy & Environmental Science*. 2013. № 9. P. 2603–2608.
19. Зеєгер К. Фізика полупроводников. М. : Мир, 1977. 629 с.
20. Фистуль В.И. Сильно легированные полупроводники. М. : Наука, 1967. 416 с.
21. Божко В.В., Давидюк Г.Є., Новосад О.В. Козер В.Р., Парасюк О.В. Особливості електропровідності, термоЕРС та оптичного поглинання твердих розчинів  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  та  $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ . *Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фізичні науки*. 2008. № 18. С. 3–10.
22. Freik D.M., Nykyruy L.I., Dzumedzey R.O., Voznyak O.M., Lysak A.V. Thermoelectric Figure of Merit Optimization of  $\text{PbX}$  ( $X = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ) Crystals. *Physics and chemistry of solid state*. 2013. № 2. P. 383–389.

#### REFERENCES:

1. Freik, D.M., Nykyruy, L.I., Krynytskiy, O.S. (2012) Achievements and Problems of Thermoelectricity a. Historical Aspects (Review). *Physics and chemistry of solid state*. 2, 297–318 [in English].
2. Wojciechowski, K., Tobola, J., Schmidt, M., Zybal, R. (2008) Crystal structure, electronic and transport properties of  $\text{AgSbSe}_2$  and  $\text{AgSbTe}_2$ . *J. of Phys. Chem. Solids*. 11, 2748–2755 [in English].

3. Kumar, Ravhi, S., Sekar, A., Jaya, N., Victor, Natarajan, S. (1999) Synthesis and high pressure studies of the semiconductor  $\text{AgSbSe}_2$ . *J. Alloys Compd.* 1-2, 48–50 [in English].
4. Ravich, Iu.I., Efimova, R.A., Smirnov, I.A. (1995) *Methods for studying semiconductors as applied to lead chalcogenides PbTe, PbSe, PbS*. Moscow: Science [in Russian].
5. Rowe, D.M. (1995) *Handbook of thermoelectrics*. New York: CRC Press [in English].
6. Gavrikova, T.A., Zykov, V.A. (1997) Electrical and photoelectrical properties of anisotypic  $\text{Pb}_{0.93}\text{Sn}_{0.07}\text{Se/PbSe}$  heterojunctions. *Semiconductors*. 11, 1342–1346 [in English].
7. Rogacheva, E.I., Grigorov, S.N., Nashchekina, O.N. (2005) Growth mechanism and thermoelectric properties of  $\text{PbTe/SnTe/PbTe}$  heterostructures. *Thin Solid Films*. 1-2, 41–48 [in English].
8. Rogacheva, E.I., Nashchekina, O.N., Grigorov, S.N. (2003) Oscillatory behavior of the transport properties in  $\text{PbTe}$  quantum wells. *Nanotechnology* 1, 53–58 [in English].
9. Qiu, X., Lou, Y., Samia, A.C.S. (2005)  $\text{PbTe}$  Nanorods by Sonoelectrochemistry. *Angew. Chem. Int. Ed.* 36, 5855–5857 [in English].
10. Rogacheva, E.I., Nashchekina, O.N., Meriuts, A.V. (2005) Quantum size effects in  $\text{n-PbTe/p-SnTe/n-PbTe}$  heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 6, 238–243 [in English].
11. Gurbanniyazov, M.A., Kurbanov, M.A. (2011) Technique and installation for determination to semiconductors heat conduction with the use of radiant energy. *Technology and design in electronic equipment*. 5, 25–26 [in English].
12. Anatychuk, L.I. (1979) *Thermoelements and thermoelectric devices*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
13. Ioffe, A.F. (1960) *Semiconductor thermocouples*. Moscow ; Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR [in Russian].
14. Novosad, O., Bozhko, N., Zmii, O., Ostapiuk, T., Viskunets, L. (2013) Elektrychni, halvanomahnitni ta termoelektrychni vlastyvoli tverdykh rozchyniv  $\text{PbSe-AgSbSe}_2$  [Electrical, galvanomagnetic and thermoelectric properties of  $\text{PbSe-AgSbSe}_2$  solid solutions]. *Naukovyi visnyk Skhidnoevropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Fizychni nauky – Lesia Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin. Series: Physical sciences*. 26, 21–26 [in Ukrainian].
15. Fedosov, S., Bozhko, N., Novosad, O., Ostapiuk, T., Zmii, O., Torchyniuk, P., Olekseiuk, I., Illiushko, N. (2014) Vzaiemodiia komponentiv  $\text{AgSbSe}_2$  i  $\text{PbSe}$  ta termoelektrychni vlastyvoli tverdykh rozchyniv na yikh osnovi [Interaction of  $\text{AgSbSe}_2$  and  $\text{PbSe}$  components and thermoelectric properties of solid solutions based on them]. *Naukovyi visnyk Skhidnoevropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Fizychni nauky – Lesia Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin. Series: Physical sciences*. 17, 8–14 [in Ukrainian].
16. Pishova, P.V., Kalenda, V.S., Novosad, O.V. (2019) Thermoelectric quality factor of solid solutions of  $\text{PbSe-AgSbSe}_2$ . *Young science of Volyn: priorities and prospects of research: materials of the XIII International scientific-practical conference* (pp. 857–860). Lutsk: Tower-Print [in Ukrainian].
17. Pishova, P.V., Novosad, O.V., Kolenda, V.C. (2019) Thermal conductivity of  $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$  single crystals. *Actual problems of basic sciences: materials of the XIII International scientific-practical conference* (pp. 857–860). Lutsk [in Ukrainian].
18. Satya, N. Guin, Arindom, Chatterjee, Devendra, Singh, Negi. (2013) High thermoelectric performance in tellurium free p-type  $\text{AgSbSe}_2$ . *Energy & Environmental Science*. 9, 2603–2608 [in English].
19. Zeeger, K. (1977) *Semiconductor physics*. Moscow: Mir [in Russian].
20. Fistul, V.I. (1967) *Heavily doped semiconductors*. Moscow: Science [in Russian].
21. Bozhko, V.V., Davydiuk, H.Ie., Novosad, O.V. Kozar, V.R., Parasiuk, O.V. (2008) Osoblyvosti elektroprovodnosti, termo-ERS ta optychnoho pohlynannia tverdykh rozchyniv  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  ta  $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$  [Features of electrical conductivity, thermo-EMF and optical absorption of solid solutions  $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$  and  $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ ]. *Naukovyi visnyk Skhidnoevropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Fizychni nauky – Lesia Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin. Series: Physical sciences*. 18, 3–10 [in Ukrainian].
22. Freik, D.M., Nykyruy, L.I., Dzumedzey, R.O., Voznyak, O.M., Lysak, A.V. (2013) Thermoelectric Figure of Merit Optimization of  $\text{PbX}$  ( $\text{X}=\text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ) Crystals. *Physics and chemistry of solid state*. 2, 383–389 [in English].