

УДК: 546.57+546.87+546.18+546.23

¹Сабов В.І., PhD, пров.фах.  0000-0003-4223-7623;^{1,2}Сабов М.Ю., к.х.н., доц.  0000-0003-0346-0734.

ТЕТРАЕДРАЦІЯ СИСТЕМИ Tl – Sb – P – Se

¹ДВНЗ «Ужгородський національний університет», кафедра неорганічної хімії,
88000, м. Ужгород, вул. Підгірна 46, Україна,²Закарпатський угорський університет імені Ференца Ракоці II,
90202, м. Берегове, пл. Кошута 6, Україна

e-mail: viktoriya.sabov@uzhnu.edu.ua

Почетверна система Tl – Sb – P – Se характеризується наявністю в ній ряду бінарних, тернарних та тетрарної селенідних сполук із перспективним набором напівпровідникових функціональних властивостей, що робить їх перспективними матеріалами для термо- та оптоелектричних пристроїв. У зв'язку із цим були проведені комплексні дослідження по вивченню фазових рівноваг у системах за участю сполук із конгруентним характером плавлення для оптимізації умов синтезу матеріалів із синергетичним ефектом властивостей. Метою даного дослідження було розширити знання щодо характеру фізико-хімічної взаємодії у системі Tl – Sb – P – Se шляхом встановлення вторинних почетверних систем методом поліедрації. Тетраедрація здійснювалась згідно загальноприйнятих правил, за результатом аналізу літературних даних щодо характеру взаємодії компонентів у відповідних системах (подвійних/квазіподвійних, потрійних/квазіпотрійних). За результатом тетраедрації встановлено, що в області існування стабільних сполук реалізуються вторинні почетверні системи двох типів: три системи на основі тетрарної сполуки TlSbP₂Se₆ (TlSbP₂Se₆ – Se – Sb₂Se₃ – Sb₄(P₂Se₆)₃(TlSbSe₂), TlSbP₂Se₆ – Se – TlSbSe₂ – Tl₄P₂Se₆) та шість систем на основі Tl₃PSe₄ (Tl₃PSe₄ – Se – TlSbSe₂ – TlSe(Tl₄P₂Se₆), Tl₃PSe₄ – Tl₂Se – Tl₄P₂Se₆ – TlSbSe₂(Tl₉SbSe₆), Tl₃PSe₄ – Tl₉SbSe₆ – TlSe – Tl₂Se(TlSbSe₂)).

Ключові слова: почетверна система; тетраедрація системи; селеніди; бінарні; тернарні; тетрарні сполуки.

У почетверній системі Tl – Sb – P – Se формується ряд перспективних за своїми властивостями сполук. Частина із них відноситься до класу гексахалькогіподифосфатів. Серед них дві тернарні сполуки: Sb₄(P₂Se₆)₃ та Tl₄P₂Se₆, а також тетрарна TlSbP₂Se₆. Усі вони кристалізуються у моноклінній сингонії, мають спільний структурний мотив у вигляді етанподібних йонів [P₂Se₆]⁴⁻, шарувату структуру, проявляють анізотропію властивостей та схильні до поляризації, що робить їх перспективними матеріалами для оптоелектроніки [1-5]. У системі Tl – P – Se також формується термічно стабільна сполука Tl₃PSe₄ з моноклінною структурою, що робить її перспективним акустооптичним матеріалом [6-8]. Бінарні та тернарні селеніди стибію зокрема, Sb₂Se₃, TlSbSe₂, Tl₉SbSe₆

проявляють високі термоелектричні параметри та фоточутливість. Так, матеріали на основі Sb₂Se₃ (плавиться конгруентно, кристалізується у ромбічній сингонії [9]) проявляють як термоелектричні [10,11] так і фотоелектричні властивості [12]. Сполуки з конгруентним характером плавлення TlSbSe₂ та Tl₉SbSe₆ [13,14] (Tl₉SbSe₆ кристалізується в тетрагональній сингонії, для TlSbSe₂ відомі дві структурні модифікації, низькотемпературна моноклінна та високотемпературна ромбічна) окрім відносно високих значень термоелектричних параметрів [15-17], є перспективними у якості нового типу матеріалів – топологічних діелектриків [18]. Враховуючи значну кількість перспективних напівпровідникових фаз у системі Tl – Sb – P – Se останні роки активно досліджувалася взаємодія

компонентів у ній. Однак, ці дослідження обмежувалися квазіподвійними системами [19-22].

Виходячи із вищезгаданого, метою даного дослідження було встановлення вторинних почетверних систем за участю термічно стабільних сполук системи $Tl-Sb-P-Se$. Для досягнення мети необхідно було за результатом аналізу літературних даних провести поліедрацію досліджуваної системи згідно загальноприйнятих правил.

Результати аналізу даних, щодо характеру фізико-хімічної взаємодії у системі $Tl-Sb-P-Se$ узагальнені на рис. 1.

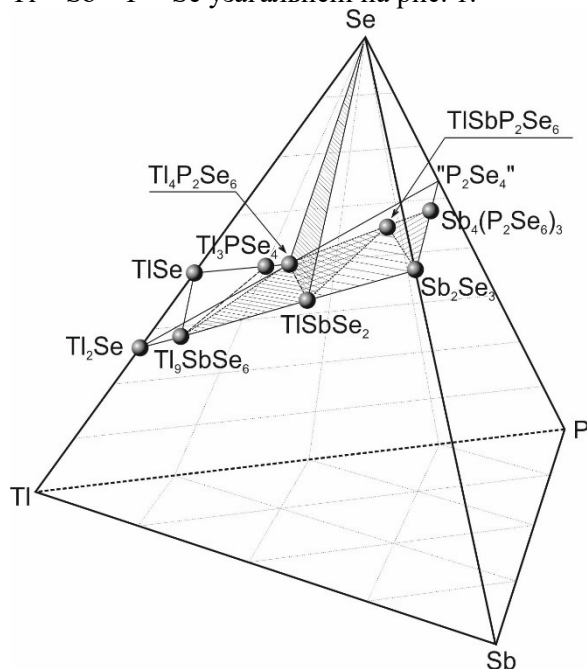


Рис. 1. Узагальнені дані щодо взаємодії компонентів у системі $Tl-Sb-P-Se$ (квазіподвійні системи позначені штрихом перетинають почетверну систему).

Слід зазначити, що у системі реалізуються більше фаз, однак при тетраедрації до уваги бралися лише термічно стабільні та існування яких доведено декількома авторами незалежно один від одного.

Як видно із рисунку всі термічно стабільні бінарні та тернарні фази розташовані на концентраційній площині $Tl_2Se-Sb_2Se_3$ – “ P_2Se_4 ” та вище неї у селеновому куті почетверної системи. Сама концентраційна площина $Tl_2Se-Sb_2Se_3$ – “ P_2Se_4 ” не є квазіпотрійною системою

оскільки P_2Se_4 є сумішшю двох бінарних селенідів фосфору, а не індивідуальною сполукою. Однак, у концентраційній площині наявні ряд квазіподвійних систем за участю двох гексаселеногіподифосфатів: $Tl_4P_2Se_6$ та $TlSbP_2Se_6$, що формують п'ять квазіпотрійних систем.

Із рис. 1 видно, що концентраційний об'єм $Tl_2Se-Sb_2Se_3-Sb_4(P_2Se_6)_3-Se$ поділяється квазіпотрійною системою $Tl_4P_2Se_6-Se-TlSbSe_2$ на дві частини. В тій, що примикає до потрійної системи $Sb-P-Se$ наявні три квазіпочетверні системи за участю $TlSbP_2Se_6$, а саме $TlSbP_2Se_6-Se-Sb_2Se_3-Sb_4(P_2Se_6)_3$, $TlSbP_2Se_6-Se-Sb_2Se_3-TlSbSe_2$ та $TlSbP_2Se_6-Se-TlSbSe_2-Tl_4P_2Se_6$. Друга є вторинною почетверною системою $Se-Tl_2Se-Tl_4P_2Se_6-TlSbSe_2$. Враховуючи, що на квазіподвійних та в одній із квазіпотрійних систем, що її формують наявні стабільні бінарні та тернарні сполуки, що утворюють квазіподвійні перерізи, можливим є її поетапний подальший поділ на квазіпочетверні системи. Зокрема, квазіпотрійна система $TlSe-Tl_4P_2Se_6-TlSbSe_2$ поділяє її на дві квазіпочетверні підсистеми: $Se-TlSe-Tl_4P_2Se_6-TlSbSe_2$ та $Tl_2Se-TlSe-Tl_4P_2Se_6-TlSbSe_2$ (рис. 2).

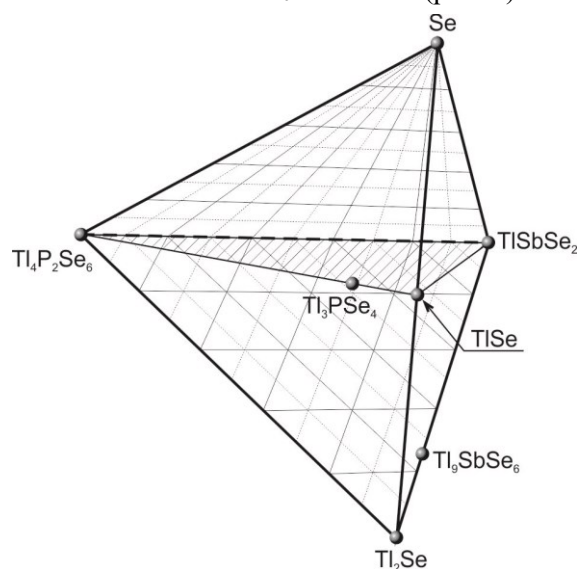


Рис.2. Почетверна система $Se-Tl_2Se-Tl_4P_2Se_6-TlSbSe_2$.

Система $Se-TlSe-Tl_4P_2Se_6-TlSbSe_2$ у свою чергу поділяється квазіпотрійною системою $Se-Tl_3PSe_4-TlSbSe_2$ на дві вторинні почетверні системи $Se-Tl_4P_2Se_6-$

$\text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{TiSbSe}_2$ та $\text{Se} - \text{TiSe} - \text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{TiSbSe}_2$ (рис. 3).

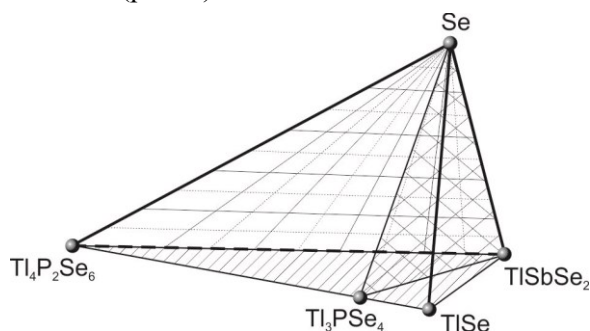


Рис.3. Вторинні почетверні системи у системі $\text{Se} - \text{TiSe} - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{TiSbSe}_2$.

У свою чергу система $\text{Ti}_2\text{Se} - \text{TiSe} - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{TiSbSe}_2$ також може бути поділена на дві підсистеми квазіпотрійною системою $\text{Ti}_2\text{Se} - \text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{TiSbSe}_2$ (рис. 4).

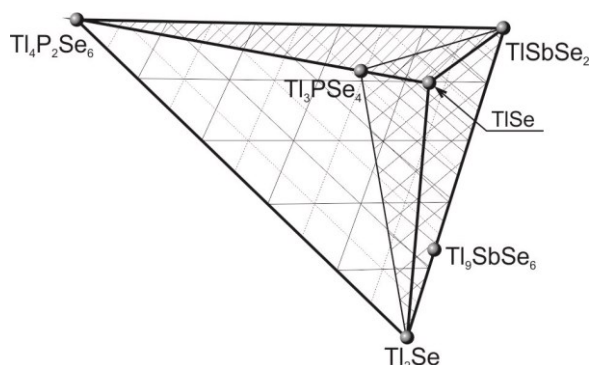


Рис.4. Квазіпочетверна система $\text{Ti}_2\text{Se} - \text{TiSe} - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{TiSbSe}_2$.

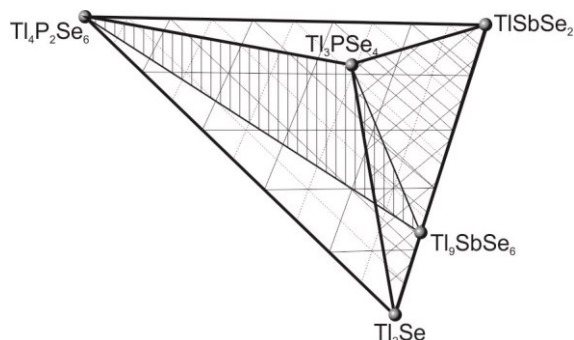


Рис.5. Вторинні почетверні системи у системі $\text{Ti}_2\text{Se} - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{TiSbSe}_2$.

Враховуючи наявність в обидвох новоутворених почетверних системах сполуки Ti_9SbSe_6 , що утворює із сполуками TiSe , $\text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6$ та Ti_3PSe_4 квазіподвійні перерізи, кожна із них поділяється відповідними квазіпотрійними системами: $\text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Ti}_9\text{SbSe}_6$ (рис. 5) та

$\text{Ti}_2\text{Se} - \text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Ti}_9\text{SbSe}_6$ (рис. 6) на дві квазіпочетверні системи. Слід також зазначити, що у системі $\text{Se} - \text{Ti}_2\text{Se} - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{TiSbSe}_2$ всі квазіпочетверні системи формуються за участю сполуки Ti_3PSe_4

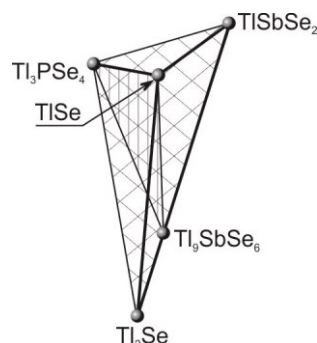


Рис.6. Вторинні почетверні системи у системі $\text{Ti}_2\text{Se} - \text{TiSe} - \text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{TiSbSe}_2$.

Отже, за результатом тетраедрації системи $\text{Ti} - \text{Sb} - \text{P} - \text{Se}$ вперше встановлено наявність дев'яти квазіпочетверних систем. Також виявлено, що вторинні почетверні системи є двох типів: три системи на основі тетрарної сполуки $\text{TiSbP}_2\text{Se}_6$ ($\text{TiSbP}_2\text{Se}_6 - \text{Se} - \text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{Sb}_4(\text{P}_2\text{Se}_6)_3$, $\text{TiSbP}_2\text{Se}_6 - \text{Se} - \text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{TiSbSe}_2$, $\text{TiSbP}_2\text{Se}_6 - \text{Se} - \text{TiSbSe}_2 - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6$) та шість систем на основі Ti_3PSe_4 ($\text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Se} - \text{TiSbSe}_2 - \text{TiSe}$, $\text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Se} - \text{TiSbSe}_2 - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6$, $\text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Ti}_2\text{Se} - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{TiSbSe}_2$, $\text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Ti}_2\text{Se} - \text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{Ti}_9\text{SbSe}_6$, $\text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Ti}_9\text{SbSe}_6 - \text{TiSe} - \text{Ti}_2\text{Se}$, $\text{Ti}_3\text{PSe}_4 - \text{Ti}_9\text{SbSe}_6 - \text{TiSe} - \text{TiSbSe}_2$).

Список використаних джерел

1. Ruck M. Darstellung Und Kristallstruktur Der Hexaselenodiphosphate(IV) von Antimon Und Bismut. *Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie*. 1995, 621 (8). 1344–1350. Doi: 10.1002/zaac.19956210812.
2. Brockner W., Ohse L., Pätzmann U., Eisenmann B., Schäfer H. Kristallstruktur Und Schwingungsspektrum Des Tetra-Thallium-Hexaselenidohypodiphosphates $\text{Ti}_4\text{P}_2\text{Se}_6$. *Zeitschrift Für Naturforschung*. 1985, 40 (12). 1248–1252. Doi: 10.1515/zna-1985-1210.
3. Seidlmayer, S. Strukturchemische Untersuchungen an Hexachalkogenohypodiphosphaten Und Verwandten Verbindungen. *Thesis for: Ph.D, Technische Universität München*, 2009. P. 288. Doi: 10.5283/epub.13427.

4. Galdámez A., Manríquez V., Kasaneva J., Ávila R. E. Synthesis, Characterization and Electrical Properties of Quaternary Selenodiphosphates: AMP_2Se_6 with $\text{A} = \text{Cu}, \text{Ag}$ and $\text{M} = \text{Bi}, \text{Sb}$. *Materials Research Bulletin* 2003, 38 (6). 1063–1072. Doi: 10.1016/s0025-5408(03)00068-0.
5. Vu T.V., Lavrentyev A.A., Gabrelian B.V., Sabov V.I., Sabov M.Y., Pogodin A.I., Barchiy I.E., Fedorchuk A.O., Balinska A., Bak Z., Khyzhun O.Y., Piasecki M. $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$ - a new layered single crystal: growth, structure and electronic properties. *J. Alloys Compd.* 2020, 848. 156485. Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156485.
6. Alkire R. W., Vergamini P. J., Larson A. C., Morosin B. Trithallium Tetrarselenophosphate, Tl_3PSe_4 , and Trithallium Tetrathioarsenate, Tl_3AsS_4 , by Neutron Time-of-Flight Diffraction. *Acta Crystallographica Section C: Structural Chemistry*. 1984, 40 (9). 1502–1506. Doi: 10.1107/s0108270184008520.
7. Isaacs T. J., Gottlieb M., Feichtner J. D. Optoacoustic properties of thallium phosphorous selenide, Tl_3PSe_4 . *Appl. Phys. Lett.* 1974, 24, 107–109. Doi: 10.1063/1.1655113.
8. Martynyuk-Lototska I., Roman I., Gomonnai O., Kryvyy T., Mys O., Vlokh R. Acoustic and Elastic Anisotropies of Acoustooptic Tl_3PSe_4 Crystals. *Acta Acustica United with Acustica*. 2018, 104. 956–962. Doi: 10.3813/AAA.919261.
9. Voutsas G.P., Papazoglou A.G., Rentzeperis P.J. The crystal structure of antimony selenide, Sb_2Se_3 . *Zeitschrift fuer Kristallographie*. 1985, 171. 261–268. Doi: 10.1524/zkri.1985.171.3-4.261.
10. An D., Chen S., Lu Z., Li R., Chen W., Fan W., Wang W., Wu Y. Low Thermal Conductivity and Optimized Thermoelectric Properties of p-Type TeSb_2Se_3 : Synergistic Effect of Doping and Defect Engineering. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2019, 11(31). 27788–27797. Doi: 10.1021/acsami.9b07313.
11. Hernandez J.A., Fonseca L.F., Pettes M.T., Jose-Yacamán M. Thermoelectric properties of antimony selenide hexagonal nanotubes. *Nanotechnology*. 2021, 32(9). 095705. Doi: 10.1088/1361-6528/abcb31.
12. Xue D.-J., Shi H.-J., Tang J. Recent progress in material study and photovoltaic device of Sb_2Se_3 . *Acta Phys. Sin.*, 2015, 64(3). 038406. Doi: 10.7498/aps.64.038406.
13. Gäumann A., Boháč P. Das Thermische Zustandsdiagramm $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{Tl}_2\text{Se}$. *Journal of the Less Common Metals*. 1973, 31(2). 314–316. Doi: 10.1016/0022-5088(73)90167-7.
14. Mucha I. Reinvestigation of Phase Equilibria in the Thallium(I) Selenide–Antimony(III) Selenide System. *Thermochimica Acta*. 2013, 563. 6–11. Doi: 10.1016/j.tca.2013.03.043.
15. Kalkan N., Yildirim S., Ulutas K. *et al.* Electrical Switching in TlSbSe_2 Chalcogenide Semiconductors. *J. Electron. Mater.* 2008, 37. 157–160. Doi: 10.1007/s11664-007-0318-y.
16. Baş H., Kalkan N., Deger D. Anisotropic and dielectric properties of TlSbSe_2 chalcogenide compounds. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2016, 27. 7518–7523. Doi: 10.1007/s10854-016-4731-y.
17. Guo Q., Chan M., Kuropatwa B.A., Kleinke H. Enhanced Thermoelectric Properties of Variants of Tl_9SbTe_6 and Tl_9BiTe_6 . *Chem. Mater*. 2013, 25(20). 4097–4104. Doi: 10.1021/cm402593f.
18. Babanly M.B., Jafarov Y.I., Aliev Z.S., Amiraslanov I.R. Chemistry of Thallium-Based Topological Insulators. *Chemical Science International Journal*. 2015, 10(1). 1–13. Doi: 10.9734/ACSJ/2016/21362.
19. Сабов В.І., Поторій М.В., Кітик І.В., Філеп М.Й., Погодін А.І., Сабов М.Ю. Взаємодія компонентів в системі Tl_3PSe_4 – $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. "Хімія"*. 2017, 38(2). 48–52.
20. Сабов В.І., Поторій М.В., Кітик І.В., Філеп М.Й., Погодін А.І., Сабов М.Ю. Квазібінарні перерізи в системі Tl – Sb – P – Se . *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. "Хімія"*. 2018, 39(1), 30–33.
21. Сабов В.І., Поторій М.В., Кітик І.В., Філеп М.Й., Сабов М.Ю. Взаємодія у квазіподвійних системах на основі $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$ та сполук системи Tl_2Se – Sb_2Se_3 . *УХЖ*. 2019, 85(3). 20–26. Doi: 10.33609/0041-6045.85.3.2019.20-26.
22. Сабов В.І., Поторій М.В., П'ясецькі М., Федорчук А.А., Філеп М.Ю., Погодін А.І., Сабов М.Ю. Фазові рівноваги в системі $\text{Tl}_4\text{P}_2\text{Se}_6$ – $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. "Хімія"*. 2020, 43 (1). 23–26. Doi: 10.24144/2414-0260.2020.1.23-26.

Стаття надійшла до редакції: 30.10.2025 р.

TETRAHEDRATION of the Tl – Sb – P – Se SYSTEM

¹Sabov V.I., ^{1,2}Sabov M.Yu.¹*Uzhhorod National University, Department of inorganic chemistry,
Uzhhorod, Pidhirna str.46, 88000, Ukraine,*²*Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University,
Kossuth Sq. 6, Beregove, 90202, Ukraine
e-mail: viktoriya.sabov@uzhnu.edu.ua*

The Tl–Sb–P–Se quaternary system is characterized by the presence of a number of binary, ternary, and quaternary selenide compounds with a promising set of semiconductor functional properties, which makes them promising materials for thermo- and optoelectronic devices. In this regard, a series of studies have been conducted in recent years to investigate phase equilibria in systems involving compounds with congruent melting characteristics in order to optimize the conditions for synthesizing materials with synergistic properties. The aim of this study was to expand knowledge about the nature of physicochemical interactions in the Tl–Sb–P–Se system by establishing secondary quaternary systems using the polyhedration method. Tetrahedration was carried out in accordance with generally accepted rules, based on the analysis of literature data on the nature of interactions between components in the corresponding systems (double/quasi-double, triple/quasi-triple). The results of tetrahedration showed that in the region of stable compounds, two types of secondary quaternary systems are realized: three systems based on the tetran compound $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$ ($\text{TlSbP}_2\text{Se}_6 - \text{Se} - \text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{Sb}_4(\text{P}_2\text{Se}_6)_3(\text{TlSbSe}_2)$, $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6 - \text{Se} - \text{TlSbSe}_2 - \text{Tl}_4\text{P}_2\text{Se}_6$) and six systems based on Tl_3PSe_4 ($\text{Tl}_3\text{PSe}_4 - \text{Se} - \text{TlSbSe}_2 - \text{TlSe}(\text{Tl}_4\text{P}_2\text{Se}_6)$, $\text{Tl}_3\text{PSe}_4 - \text{Tl}_2\text{Se} - \text{Tl}_4\text{P}_2\text{Se}_6 - \text{TlSbSe}_2(\text{Tl}_9\text{SbSe}_6)$, $\text{Tl}_3\text{PSe}_4 - \text{Tl}_9\text{SbSe}_6 - \text{TlSe} - \text{Tl}_2\text{Se}(\text{TlSbSe}_2)$).

Keywords: quaternary system; tetrahedral system; selenides; binary; ternary; tetranary compounds.

References

1. Ruck M. Darstellung Und Kristallstruktur Der Hexaselenodiphosphate(IV) von Antimon Und Bismut. *Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie*. 1995, 621 (8). 1344–1350. Doi: 10.1002/zaac.19956210812.
2. Brockner W., Ohse L., Pätzmann U., Eisenmann B., Schäfer H. Kristallstruktur Und Schwingungsspektrum Des Tetra-Thallium-Hexaselenidohypodiphosphates $\text{Tl}_4\text{P}_2\text{Se}_6$. *Zeitschrift Für Naturforschung*. 1985, 40 (12). 1248–1252. Doi: 10.1515/zna-1985-1210.
3. Seidlmayer, S. Strukturchemische Untersuchungen an Hexachalkogenohypodiphosphaten Und Verwandten Verbindungen. *Thesis for: Ph.D, Technische Universität München*, 2009. Doi: 10.5283/epub.13427.
4. Galdámez A., Manríquez V., Kasaneva J., Ávila R. E. Synthesis, Characterization and Electrical Properties of Quaternary Selenodiphosphates: AMP_2Se_6 with A = Cu, Ag and M = Bi, Sb. *Materials Research Bulletin* 2003, 38 (6). 1063–1072. Doi: 10.1016/s0025-5408(03)00068-0.
5. Vu T.V., Lavrentyev A.A., Gabrelian B.V., Sabov V.I., Sabov M.Y., Pogodin A.I., Barchiy I.E., Fedorchuk A.O., Balinska A., Bak Z., Khyzhun O.Y., Piasecki M. $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$ - a new layered single crystal: growth, structure and electronic properties. *J. Alloys Compd.* 2020, 848. 156485. Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156485.
6. Alkire R.W., Vergamini P.J., Larson A.C., Morosin B. Trithallium Tetraselenophosphate, Tl_3PSe_4 , and Trithallium Tetrathioarsenate, Tl_3AsS_4 , by Neutron Time-of-Flight Diffraction. *Acta Crystallographica Section C: Structural Chemistry*. 1984, 40 (9). 1502–1506. Doi: 10.1107/s0108270184008520.
7. Isaacs T.J., Gottlieb M., Feichtner J.D. Optoacoustic properties of thallium phosphorous selenide, Tl_3PSe_4 . *Appl. Phys. Lett.* 1974, 24. 107–109. Doi: 10.1063/1.1655113.
8. Martynyuk-Lototska I., Roman I., Gomonnai O., Kryvyy T., Mys O., Vlokh R. Acoustic and Elastic Anisotropies of Acoustooptic Tl_3PSe_4 Crystals. *Acta Acustica United with Acustica*. 2018, 104. 956–962. Doi: 10.3813/AAA.919261.

9. Voutsas G.P., Papazoglou A.G., Rentzeperis P.J. The crystal structure of antimony selenide, Sb_2Se_3 . *Zeitschrift fuer Kristallographie*. 1985, 171. 261–268. Doi: 10.1524/zkri.1985.171.3-4.261.
10. An D., Chen S., Lu Z., Li R., Chen W., Fan W., Wang W., Wu Y. Low Thermal Conductivity and Optimized Thermoelectric Properties of p-Type $\text{Te-Sb}_2\text{Se}_3$: Synergistic Effect of Doping and Defect Engineering. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2019, 11(31). 27788–27797. Doi: 10.1021/acsami.9b07313.
11. Hernandez J.A., Fonseca L.F., Pettes M.T., Jose-Yacamán M. Thermoelectric properties of antimony selenide hexagonal nanotubes. *Nanotechnology*. 2021, 32(9). 095705. Doi: 10.1088/1361-6528/abcb31.
12. Xue D.-J., Shi H.-J., Tang J. Recent progress in material study and photovoltaic device of Sb_2Se_3 . *Acta Phys. Sin.*, 2015, 64(3). 038406. Doi: 10.7498/aps.64.038406.
13. Gäumann A., Boháč P. Das Thermische Zustandsdiagramm $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{Tl}_2\text{Se}$. *Journal of the Less Common Metals*. 1973, 31(2). 314–316. Doi: 10.1016/0022-5088(73)90167-7.
14. Mucha I. Reinvestigation of Phase Equilibria in the Thallium(I) Selenide–Antimony(III) Selenide System. *Thermochimica Acta*. 2013, 563. 6–11. Doi: 10.1016/j.tca.2013.03.043.
15. Kalkan N., Yildirim S., Ulutas K. *et al.* Electrical Switching in TlSbSe_2 Chalcogenide Semiconductors. *J. Electron. Mater.* 2008, 37. 157–160. Doi: 10.1007/s11664-007-0318-y.
16. Baş H., Kalkan N., Deger D. Anisotropic and dielectric properties of TlSbSe_2 chalcogenide compounds. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2016, 27. 7518–7523. Doi: 10.1007/s10854-016-4731-y.
17. Guo Q., Chan M., Kuropatwa B.A., Kleinke H. Enhanced Thermoelectric Properties of Variants of Tl_9SbTe_6 and Tl_9BiTe_6 . *Chem. Mater*. 2013, 25(20). 4097–4104. Doi: 10.1021/cm402593f.
18. Babanly M.B., Jafarov Y.I., Aliev Z.S., Amiraslanov I.R. Chemistry of Thallium-Based Topological Insulators. *Chemical Science International Journal*. 2015, 10(1). 1–13. Doi: 10.9734/ACSJ/2016/21362.
19. Sabov V.I., Potorii M.V., Kityk I.V., Filep M.Y., Pohodin A.I., Sabov M.Yu. Vzaiemodiia komponentiv v systemi $\text{Tl}_3\text{PSe}_4\text{–TlSbP}_2\text{Se}_6$. *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. "Khimiiia"*. 2017, 38(2). 48–52. (in Ukr.).
20. Sabov V.I., Potorii M.V., Kityk I.V., Filep M.Y., Pohodin A.I., Sabov M.Yu. Kvazibinarni pererizy v systemi Tl–Sb–P–Se . *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. "Khimiiia"*. 2018, 39(1). 30–33. (in Ukr.).
21. Sabov V.I., Potorii M.V., Kityk I.V., Filep M.Y., Sabov M.Yu. Vzaiemodiia u kvazipodviinykh systemakh na osnovi $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$ ta spoluk systemy $\text{Tl}_2\text{Se–Sb}_2\text{Se}_3$. *UKhZh*. 2019, 85(3). 20–26. Doi: 10.33609/0041-6045.85.3.2019.20-26. (in Ukr.).
22. Sabov V.I., Potorii M.V., Piasetski M., Fedorchuk A.A., Filep M.Y., Pohodin A.I., Sabov M.Yu. Fazovi rivnovahy v systemi $\text{Tl}_4\text{P}_2\text{Se}_6\text{–TlSbP}_2\text{Se}_6$. *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. "Khimiiia"*. 2020, 43 (1). 23–26. Doi:10.24144/2414-0260.2020.1.23-26. (in Ukr.).