

УДК: 546.57+546.87+546.18+546.23

¹Сабов В.І., PhD, н.с.; ¹Барчій І.Є., д.х.н., проф.; ²П'ясецькі М., DrSc., проф.;
^{1,3}Філеп М.Й., к.х.н., с.н.с.; ¹Погодін А.І., к.х.н., с.н.с.; ¹Студеняк Я.І., к.х.н., доц.;
^{1,3}Сабов М.Ю., к.х.н., доц.

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛУ $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$

¹ДВНЗ «Ужгородський національний університет», кафедра неорганічної хімії,

88000, м. Ужгород, вул. Підгірна 46, Україна;

²Університет Яна Длугоша в Ченстохові,

42200, Ченстохова, вул. Армії Крайової 13/15, Польща;

¹Закарпатський угорський інститут ім. Ференца Ракоці II,

90202, м. Берегове, пл. Кошута 6, Україна

e-mail: vitasabov@gmail.com

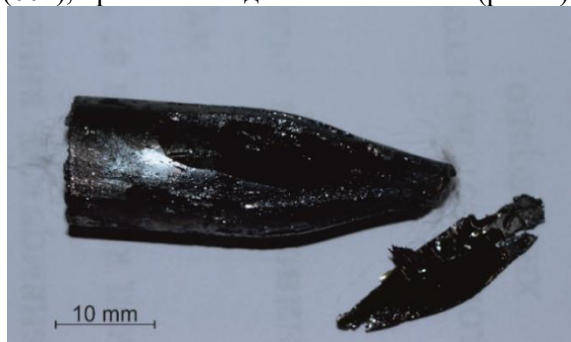
Сполука $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ останнім часом є однією із найбільш досліджуваних серед представників гексахалькогіподифосфатів. Пов'язано це із її чітко вираженою шаруватою структурою, що передбачає можливість одержання моношарів з проявом в них найрізноманітніших квантових ефектів. Разом з тим, ці дослідження головним чином стосуються проведених із перших принципів розрахунків, експериментальні дослідження, як правило, обмежувалися дослідженнями структури, встановленням стехіометричного складу. В даній роботі було частково заповнено прогалини щодо вивчення оптичних властивостей $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$. На монокристалічних зразках $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ було досліджено спектри пропускання в оптичному діапазоні 220 – 1400 нм та Раманівські спектри. За спектрами пропускання графічним методом Тауца визначено ширину забороненої зони, що становить 1.44 еВ. Дане значення добре узгоджується із розрахованим за методикою Пердью-Бурке-Ерзенгорфа (PBE) без врахування коефіцієнту Хаббарда (1.384 еВ). Спектр комбінаційного розсіювання кристалу $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ характеризується п'ятьма чіткими піками близько до 68, 125, 169, 436 та 462 cm^{-1} . Пік при 68 cm^{-1} можна приписати коливальній моді катіонних центрів, 125 та 169 cm^{-1} відповідають деформаціям у системах зв'язків Se-P-P та Se-P-Se із зміною відповідних валентних кутів, а 436 та 462 cm^{-1} відповідають зміні довжин зв'язків у аніонній групі $(\text{P}_2\text{Se}_6)^{4-}$.

Ключові слова: структура; монокристал, ширина забороненої зони; спектри пропускання; Раманівська спектроскопія.

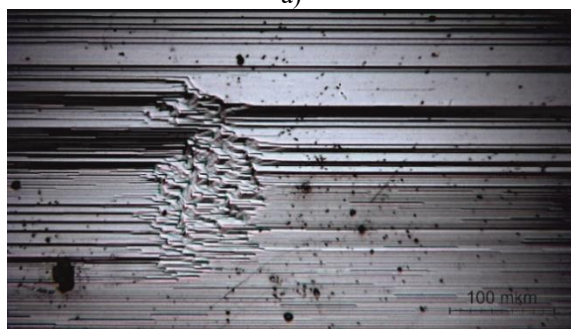
Двовимірні (2D) матеріали інтенсивно досліджуються останні два десятиріччя після відкриття графену [1]. Пов'язано це із їх унікальними оптичними, електричними, механічними і тепловими характеристиками, відмінними від властивостей об'ємних матеріалів із каркасною структурою [2-4]. Зокрема, двовимірні сегнетоелектричні матеріали демонструють величезний потенціал в електротехнічних пристроях [5-7]. На сьогоднішній день 2D сегнетоелектричні матеріали все ще залишаються дуже новим напрямком досліджень. Багато 2D сегнетоелектричних матеріалів теоретично передбачені, але лише декілька матеріалів, таких як WTe_2 , In_2Se_3 , MoTe_2 , CuInP_2S_6 були

експериментально досліджені [8-11]. У цьому аспекті перспективними є також гексаселеногіподифосфати, переважна більшість яких володіє шаруватою структурою. Серед них особливе місце займає $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$, якому останні роки присвячено ряд теоретичних досліджень, згідно яких її моношар є перспективним як фотокаталізатор [12-13], кандидатом для розробки енергонезалежних запам'ятовуючих пристроїв наступного покоління [14], у спінтроніці [15]. Тонкошарові зразки товщиною 6 нм було отримано лише авторами [16] у вигляді полікристалу. Експериментальні дослідження щодо $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$, в першу чергу, стосувалися

отримання об'ємних зразків, в тому числі монокристалічних, вивчення їх структури, поверхні методами рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФС), скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (СЕМ ЕДРС) [17-20]. Авторами [21] було досліджено електрофізичні властивості зразків $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$, однак структуру отриманого зразку вони ідентифікували як моноклінну (ПГ $C2/m$, $a=6.20(2)$, $b=10.71(3)$, $c=6.90(2)$ Å, $\beta=107.20(7)^\circ$), що суперечить даним [17] та нашим попереднім дослідженням [18-20], згідно яких $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ кристалізується у тригональній сингонії (ПГ $R-3$) із параметрами елементарної комірки $a=6.6524(13)$ Å, $c=39.615(15)$ Å, що добре узгоджується із даними [17]. Слід зазначити, що перспективи застосування даної сполуки (в тому числі його у вигляді моношарів) зумовлено особливостями даної структури, для якої, вздовж кристалографічної площини (001), притаманна ідеальна спайність (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Загальний вигляд (а) та мікроструктура сколу (б) монокристалу $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$.

Характерною рисою структури $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ є наявність в межах елементарної комірки шести шарів сформованих тригональними антипризмами селену,

всередині яких знаходяться атомна пара P-P та йони Ag^+ та Bi^{3+} (рис. 2).

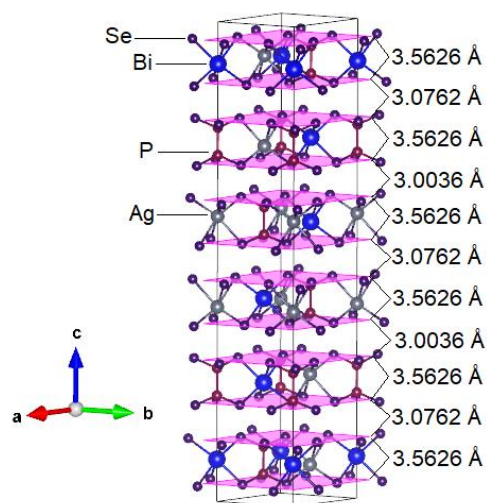


Рис. 2. Шари $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ в її елементарній комірці.

Йони та атомна група в середині тригональних антипризм зміщені відносно центра, що вказує на можливість прояву поляризаційних явищ. Товщина моношарів однакова та становить 3.5626 Å. Віддали між шарами співрозмірні їх товщині і становлять 3.0036 та 3.0762 Å.

Враховуючи, що переважаюча більшість публікацій щодо властивостей $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ містить розраховані квантово-хімічними методами параметри, метою даного дослідження було дослідити оптичні властивості монокристалічних зразків $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ та співставити їх із розрахунковими.

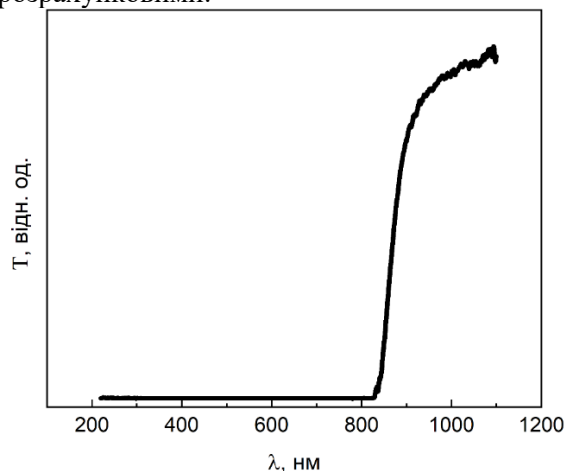


Рис. 3. Спектр пропускання $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$.

Дослідження проводили на плоскопаралельних монокристалічних зразках $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$, по площині спайності. Дифрактограма поверхні сколу монокристалу доводила її приналежність до площини (001).

Спектр пропускання (рис. 3) вивчали за допомогою спектрофотометра Shimadzu UV-2600 обладнаного інтегруючою сферою ISR-2600Plus із вимірювальним діапазоном 220 -1400 нм. Крок сканування складав 1 нм, еталоном слугував BaSO_4 .

Одна прямолінійна ділянка на спектрі пропускання в області різкої зміни коефіцієнту пропускання, що відповідає краю оптичного поглинання, дозволяла визначити ширину забороненої зони за побудовою Тауца. Була використана побудова у координатах $(ah\nu)^2$ від $h\nu$, що відповідає моделі прямого дозволеного переходу (рис. 4).

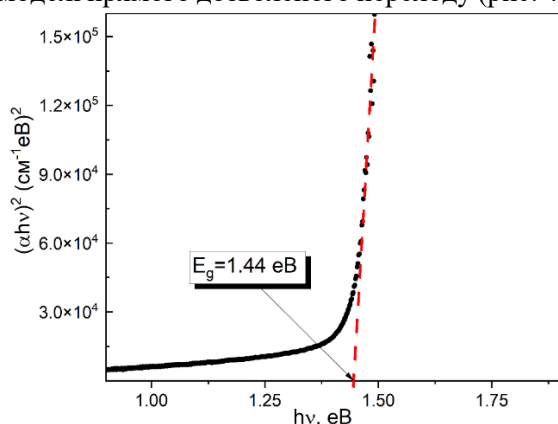


Рис. 4. Графічна залежність Тауца для прямого дозволеного переходу кристалу $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$.

Наявність однієї прямої ділянки спектральної залежності $(ah\nu)^2$ від $h\nu$ в області її різкої зміни та її хід паралельно осі $h\nu$ в області пропускання доводить наявність прямого дозволеного переходу у зонній структурі кристалу із шириною забороненої зони 1.44 eV.

Отримані дані добре корелюють із даними квантово-хімічного розрахунку в межах теорії функціоналу густини (DFT) здійсненого за допомогою програми WIEN2k [22] за методикою Пердью-Бурке-Ерзенгорфа (PBE) без врахування коефіцієнту Хаббарда (1.384 eV). Врахування коефіцієнту Хаббарда (PBE+U) призводить до заниження значення ширини забороненої зони (1.321 eV) [19].

Раманівські спектри (рис. 5) досліджувалися за допомогою спектрометра Renishaw InVia™ –оснащеного мікроскопом Leica Microsystems. Дослідження проводилися на монокристалічних зразках розмірами приблизно 2x2x1 мм, при збуджуючому випромінюванні з довжинами хвиль 532 нм та 830 нм.

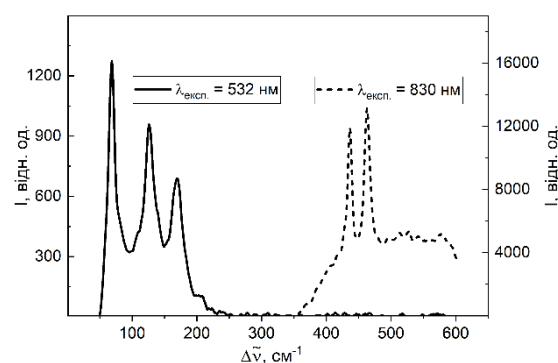


Рис. 5. Раманівський спектр кристалу $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$.

На спектрі комбінаційного розсіювання кристалу $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ простежуються п'ять чітких піків близько до 68, 125, 169, 436 та 462 cm^{-1} . 68 cm^{-1} можна приписати коливальній моді катіонних центрів, 125 та 169 cm^{-1} можуть відповідати деформаціям у системах зв'язків Se-P-P та Se-P-Se із зміною відповідних валентних кутів, а 436 та 462 cm^{-1} відповідають зміні довжин зв'язків у аніонній групі $(\text{P}_2\text{Se}_6)^{4-}$.

Отже, враховуючи результати аналізу літературних даних та експериментальних досліджень встановлено, що сполука $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ належить до прямозонних напівпровідників із шириною забороненої зони близько 1.44 eV. Враховуючи його прозорість у ближній та середній ІЧ області та схильність до поляризації моношарів структури, він може бути рекомендований як матеріал для оптоелектронних пристроїв, що працюють у даному оптичному діапазоні.

Список використаних джерел

- Susner M.A., Chyasnavichyus M., McGuire M. A., Ganesh P., Maksymovych P. Metal Thio- and Selenophosphates as Multifunctional van der Waals Layered Materials. *Adv. Mater.* 2017, 29 (38), 1602852. Doi:10.1002/adma.201602852.
- Raza S., Ghasali E., Orooji Y., Lin H., Karaman C., Dragoi E.N., Erk N. Two dimensional (2D) materials and biomaterials for water desalination; structure,

- properties, and recent advances. *Environ. Res.* 2022, 219, 114998. Doi:10.1016/j.envres.2022.114998.
3. Luo S., Guo G., Liu W., Qi X., Liu W., Tang H., Bao Q., Zhong J.. Crested 2D materials for optoelectronics and photonics. *Prog. Quantum Electron.* 2022, 86, 100436. Doi:10.1016/j.pquantelec.2022.100436.
4. Fatemi V., Wu S., Cao Y., Bretheau L., Gibson Q. D., Watanabe K., Taniguchi T., Cava R. J., Jarillo-Herrero P. Electrically tunable low-density superconductivity in a monolayer topological insulator. *Science.* 2018, 362, 926–929. Doi:10.1126/science.aar4642.
5. Martin. L.W., Rappe A.M. Thin-film ferroelectric materials and their application. *Nat. Rev. Mater.* 2016, 2, 16087. Doi:10.1038/natrevmats.2016.87.
6. Liu Zh., Deng L., Peng B. Ferromagnetic and ferroelectric two-dimensional materials for memory application. *Nano Res.* 2021, 14, 1802–1813. Doi:10.1007/s12274-020-2860-3.
7. Xue F., Ma Y., Wang H., Mario Lanza, Yu B. Two-dimensional ferroelectricity and anti-ferroelectricity for next-generation computing paradigms. *Matter.* 2022, 5, 1999–2014. Doi:10.1016/j.matt.2022.05.021.
8. Fei Z.Y., Zhao W.J., Palomaki T.A., Sun B.S., Miller M.K., Zhao Z.Y., Yan J.Q., Xu X.D., Cobden D.H., Ferroelectric switching of a two-dimensional metal. *Nature.* 2018, 560, 336–339. Doi:10.1038/s41586-018-0336-3.
9. Zheng C.X., Yu L., Zhu L., Collins J.L., Kim D., Lou Y.D., Xu C., Li M., Wei Z., Zhang Y. P., Edmonds M.T., Li Sh., Seidel J., Zhu Y., Liu J.Zh, Tang W.-X., Fuhrer M.S. Room temperature in-plane ferroelectricity in van der Waals In_2Se_3 . *Sci. Adv.* 2018, 4, 7720. Doi:10.1126/sciadv.aar7720.
10. Yuan S.G., Luo X., Chan H.L., Xiao C.C., Dai Y.W., Xie M.H., Hao J.H. Room-temperature ferroelectricity in MoTe_2 down to the atomic monolayer limit. *Nat. Commun.* 2019, 10, 1775. Doi:10.1038/s41467-019-09669-x.
11. Belianinov A., He Q., Dziaugys A., Maksymovych P., Eliseev E., Borisevich A., Morozovska A., Banys J., Vysochanskii Y., Kalinin S.V. CuInP_2S_6 Room Temperature Layered Ferroelectric. *Nano Lett.* 2015, 15(6), 3808–3814. Doi:10.1021/acs.nanolett.5b00491.
12. Xu B., Xiang H., Xia Y., Jiang K., Wan X., He J., Yin J., Liu Zh., Monolayer $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$: an atomically thin ferroelectric semiconductor with out-plane polarization. *Nanoscale.* 2017, 9, 8427–8434. Doi:10.1039/C7NR02461D.
13. Quan Ch., Ji Sh., Yao R., Liu W., Yang J., Li X. Two-dimensional Janus $\text{AgBiP}_2\text{X}_3\text{X}'_3$ ($\text{X}, \text{X}' = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$): Efficient intrinsic electric field regulatory strategy for photocatalytic overall water-splitting. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2024, 56, 1227. Doi:10.1016/j.ijhydene.2023.12.260.
14. Shang J., Xia C., Tang Ch., Li Ch., Ma Ya., Gu Yu., Kou L. Mechano-ferroelectric coupling: stabilization enhancement and polarization switching in bent $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ monolayers. *Nanoscale Horiz.* 2021, 6, 971–978. Doi:10.1039/D1NH00402F.
15. Zhou B. Ferroelectric Rashba semiconductors, AgBiP_2X_6 ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ and Te), with valley polarization: an avenue towards electric and nonvolatile control of spintronic devices. *Nanoscale.* 2020, 12, 5533–5542. Doi:10.1039/C9NR10865C.
16. Lv Sh., Wang J., Wei B., Wang Zh. Synthesis, atomic structure and electronic properties of ferroelectric $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ ultrathin flakes. *Journal of Alloys and Compounds.* 2024, 996, 174803. Doi:10.1016/j.jallcom.2024.174803.
17. Seidlmayer S. Strukturchemische Untersuchungen an Hexachalkogenohypodiphosphaten Und Verwandten Verbindungen. Thesis for: Ph.D, Technische Universität München, 2009. Doi:10.13140/RG.2.2.15263.00162.
18. Сабов В.І., Погодін А.І., Поторій М.В., Сабов М.Ю. Вирощування монокристалів сполук $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$, $\text{AgSbP}_2\text{Se}_6$ та $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. "Хімія".* 2017, 37 (1), 17–19.
19. Vu T.V., Khyzhun O.Y., Lavrentyev A.A., Gabrelian B.V., Sabov V.I., Sabov M.Y., Filep M.Y., Pogodin A.I., Barchiy I.E., Fedorchuk A.O., Andriyevsky B., Piasecki M. Highly anisotropic layered crystal $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$: growth, electronic band-structure and optical properties. *Mater. Chem. Phys.* 2022, 277, 125556. Doi:10.1016/j.matchemphys.2021.125556.
20. Патент України на корисну модель № 153137. Спосіб вирощування монокристалів вісмут (III) гексаселеногіподифосфату $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ методом спрямованої кристалізації з розплаву. Сабов В.І., Погодін А.І., Філеп М.Й., Малаховська Т.О., Барчій І.Є., Сабов М.Ю. Опубліковано бюлетень № 21 від 24.05.2023.
21. 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.
22. Blaha P., Schwarz K., Madsen G.K.H., Kvasnicka D., Luitz J. WIEN2k: An APW+lo program for calculating the properties of solids. *J. Chem. Phys.* 2020, 152, 074101. Doi:10.1063/1.5143061.

Стаття надійшла до редакції: 30.10.2024

OPTICAL PROPERTIES OF THE $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ SINGLE CRYSTAL

¹Sabov V.I., ¹Barchiy I.Ye., ²Piasecki M., ^{1,3}Filep M.J., ¹Pogodin A.I., ¹Studeniyak Ya.I.,
^{1,3}Sabov M.Yu.

¹*Uzhhorod National University, Department of inorganic chemistry,
Uzhhorod, Pidhirna str.46, 88000, Ukraine;*

²*Jan Dlugosz University in Czestochowa,
Armii Krajowej St., 13/15, Czestochowa, 42200, Poland;*

³*Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian College of Higher Education,
Kossuth Sq. 6, Beregove, 90202, Ukraine
e-mail: vitasabov@gmail.com*

The $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ compound has emerged as one of the most studied hexachalcophosphates in recent years. This interest is driven by its distinctive layered structure, which implies the possibility of obtaining monolayers and the observation of various quantum effects. Most studies to date, however, have focused on first-principles calculations, while experimental investigations have primarily been limited to structural analysis and stoichiometric composition determination. This work partially addresses the gap in research by exploring the optical properties of $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$. Transmission spectra within the optical range of 220–1400 nm, as well as Raman spectra, were obtained from single crystalline $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ samples. The band gap, determined from the transmission spectra using the graphical Tauc method, was found to be 1.44 eV. This value aligns closely with the DFT band-structure calculations using the Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) model without a Hubbard correction parameter (1.384 eV). The Raman spectrum of the $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ crystal reveals five distinct peaks at approximately 68, 125, 169, 436, and 462 cm^{-1} . The peak at 68 cm^{-1} can be attributed to the vibrational mode of the cationic centers; the peaks at 125 and 169 cm^{-1} can correspond to deformations within the Se-P-P and Se-P-Se bonding systems involving changes in bond angles; and the peaks at 436 and 462 cm^{-1} reflect bond length changes within the anionic $(\text{P}_2\text{Se}_6)^{4-}$ group.

Keywords: structure; single crystal; band gap; transmission spectra; Raman spectroscopy.

References

1. Susner M.A., Chyasnachyus M., McGuire M. A., Ganesh P., Maksymovych P. Metal Thio- and Selenophosphates as Multifunctional van der Waals Layered Materials. *Adv. Mater.* 2017, 29 (38), 1602852. Doi:10.1002/adma.201602852.
2. Raza S., Ghasali E., Orooji Y., Lin H., Karaman C., Dragoi E.N., Erk N. Two dimensional (2D) materials and biomaterials for water desalination; structure, properties, and recent advances. *Environ. Res.* 2022, 219, 114998. Doi:10.1016/j.envres.2022.114998.
3. Luo S., Guo G., Liu W., Qi X., Liu W., Tang H., Bao Q., Zhong J.. Crested 2D materials for optoelectronics and photonics. *Prog. Quantum Electron.* 2022, 86, 100436. Doi:10.1016/j.pquantelec.2022.100436.
4. Fatemi V., Wu S., Cao Y., Bretheau L., Gibson Q. D., Watanabe K., Taniguchi T., Cava R. J., Jarillo-Herrero P. Electrically tunable low-density superconductivity in a monolayer topological insulator. *Science.* 2018, 362, 926–929. Doi:10.1126/science.aar4642.
5. Martin. L.W., Rappe A.M. Thin-film ferroelectric materials and their application. *Nat. Rev. Mater.* 2016, 2, 16087. Doi:10.1038/natrevmats.2016.87.
6. Liu Zh., Deng L., Peng B. Ferromagnetic and ferroelectric two-dimensional materials for memory application. *Nano Res.* 2021, 14, 1802–1813. Doi:10.1007/s12274-020-2860-3.
7. Xue F., Ma Y., Wang H., Mario Lanza, Yu B. Two-dimensional ferroelectricity and anti-ferroelectricity for next-generation computing paradigms. *Matter.* 2022, 5, 1999–2014. Doi:10.1016/j.matt.2022.05.021.
8. Fei Z.Y., Zhao W.J., Palomaki T.A., Sun B.S., Miller M.K., Zhao Z.Y., Yan J.Q., Xu X.D., Cobden D.H., Ferroelectric switching of a two-dimensional metal. *Nature.* 2018, 560, 336–339. Doi:10.1038/s41586-018-0336-3.

9. Zheng C.X., Yu L., Zhu L., Collins J.L., Kim D., Lou Y.D., Xu C., Li M., Wei Z., Zhang Y. P., Edmonds M.T., Li Sh., Seidel J., Zhu Y., Liu J.Zh, Tang W.-X. , Fuhrer M.S. Room temperature in-plane ferroelectricity in van der Waals In_2Se_3 , *Sci. Adv.* 2018, 4, 7720. Doi:10.1126/sciadv.aar7720.
10. Yuan S.G., Luo X., Chan H.L., Xiao C.C., Dai Y.W., Xie M.H., Hao J.H. Room-temperature ferroelectricity in MoTe_2 down to the atomic monolayer limit. *Nat. Commun.* 2019, 10, 1775. Doi:10.1038/s41467-019-09669-x.
11. Belianinov A., He Q., Dziaugys A., Maksymovych P., Eliseev E., Borisevich A., Morozovska A., Banyas J., Vysochanskii Y., Kalinin S.V. CuInP_2S_6 Room Temperature Layered Ferroelectric. *Nano Lett.* 2015, 15(6), 3808–3814. Doi:10.1021/acs.nanolett.5b00491.
12. Xu B., Xiang H., Xia Y., Jiang K., Wan X., He J., Yin J., Liu Zh., Monolayer $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$: an atomically thin ferroelectric semiconductor with out-plane polarization. *Nanoscale.* 2017, 9, 8427-8434. Doi:10.1039/C7NR02461D.
13. Quan Ch., Ji Sh., Yao R., Liu W., Yang J., Li X. Two-dimensional Janus $\text{AgBiP}_2\text{X}_3\text{X}'_3$ ($\text{X}, \text{X}' = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$): Efficient intrinsic electric field regulatory strategy for photocatalytic overall water-splitting. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2024, 56, 1227. Doi:10.1016/j.ijhydene.2023.12.260.
14. Shang J., Xia C., Tang Ch., Li Ch., Ma Ya., Gu Yu., Kou L. Mechano-ferroelectric coupling: stabilization enhancement and polarization switching in bent $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ monolayers. *Nanoscale Horiz.* 2021, 6, 971–978. Doi:10.1039/D1NH00402F.
15. Zhou B. Ferroelectric Rashba semiconductors, AgBiP_2X_6 ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ and Te), with valley polarization: an avenue towards electric and nonvolatile control of spintronic devices. *Nanoscale*, 2020, 12, 5533-5542. Doi:10.1039/C9NR10865C.
16. Lv Sh., Wang J., Wei B., Wang Zh. Synthesis, atomic structure and electronic properties of ferroelectric $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ ultrathin flakes. *Journal of Alloys and Compounds.* 2024, 996, 174803. Doi:10.1016/j.jallcom.2024.174803.
17. Seidlmayer, S. Strukturchemische Untersuchungen an Hexachalkogenohypodiphosphaten Und Verwandten Verbindungen. Thesis for: Ph.D, Technische Universität München, 2009. Doi:10.13140/RG.2.2.15263.00162.
18. Sabov V.I., Pohodin A.I., Potorii M.V., Sabov M.Yu. Vyroshchuvannia monokryystaliv spoluk $\text{TlSbP}_2\text{Se}_6$, $\text{AgSbP}_2\text{Se}_6$ ta $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$. *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. "Khimiia"*. 2017, 37 (1), 17-19.
19. Vu T.V., Khyzhun O.Y., Lavrentyev A.A., Gabrelian B.V., Sabov V.I., Sabov M.Y., Filep M.Y., Pogodin A.I., Barchiy I.E., Fedorchuk A.O., Andriyevsky B., Piasecki M. Highly anisotropic layered crystal $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$: growth, electronic band-structure and optical properties. *Mater. Chem. Phys.* 2022, 277, 125556. Doi:10.1016/j.matchemphys.2021.125556.
20. Patent Ukrainy na korysnu model No. 153137. Sposib vyroshchuvannia monokryystaliv vismut (III) heksaselenohipodyfosfatu $\text{AgBiP}_2\text{Se}_6$ metodom spriamovanoi krystalizatsii z rozplavu. Sabov V.I., Pohodin A.I., Filep M.Y., Malakhovska T.O., Barchii I.Ye., Sabov M.Yu. Opublikovano biuleten No. 21 vid 24.05.2023. (In Ukr)
21. 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.
22. Blaha P., Schwarz K., Madsen G.K.H., Kvasnicka D., Luitz J. WIEN2k: An APW+lo program for calculating the properties of solids. *J. Chem. Phys.* 2020, 152, 074101. Doi:10.1063/1.5143061.