

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**

Ужгородського університету

ISSN 2414-0260

*серія*

**ХІМІЯ**

*випуск №1 (49)*

**2023**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

**НАУКОВИЙ ВІСНИК  
УЖГОРОДСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
СЕРІЯ «ХІМІЯ»**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

---

---

**ISSN 2414-0260**

**Засновник і видавець: Державний вищий навчальний  
заклад «Ужгородський національний університет»**

*Виходить 2 рази на рік*

**Заснований у жовтні 1996 року**

**Випуск № 1 (49) 2023**

**Ужгород – 2023**

УДК 54  
Н 34



**Науковий вісник Ужгородського університету.  
Серія «Хімія». 2023, Випуск № 1 (49)**

Збірник наукових праць друкує статті, які містять теоретичні та практичні результати в галузі хімічних наук, охорони навколишнього природного середовища, а також методики викладання хімії та екології у вищій школі. Публікуються також огляди сучасного стану важливіших наукових проблем у галузі хімії та екології, огляди наукових конференцій, які відбулися в ДВНЗ «УжНУ», а також матеріали присвячені ювілеям.

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

**Головний редактор:** Барчій І.Є., д.х.н. (Україна)  
**Заступник головного редактора:** Сухарев С.М., д.х.н. (Україна)  
**Члени редколегії:** Базель Я.Р., д.х.н. (Словаччина); Ворохта М., PhD (Чехія); Драбович Й., д.н. (Польща); Іщенко О.В., д.х.н. (Україна); Лендсел В.Г., д.х.н. (Україна); Марійчук Р.Т., PhD (Словаччина); Мілюкін М.В., д.х.н. (Україна); Онисько М.Ю., д.х.н. (Україна); Онисько П.П., д.х.н. (Україна); П'ясецькі М., д.н. (Польща); Переш Є.Ю., д.х.н. (Україна); Пехньо В.І., д.х.н., академік НАН України (Україна); Сідей В.І., к.х.н. (Україна); Сливка М.В., д.х.н. (Україна); Студеняк Я.І., к.х.н. (Україна); Тананайко О.Ю., д.х.н. (Україна); Федорчук А.О., д.х.н. (Україна)  
**Технічний помічник редактора:** Стерчо І.П., к.х.н. (Україна)

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21056-10856Р від 07.11.2014 року (раніше КВ №7972 від 09.10.2003 року).

Збірник наукових праць «Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Хімія» внесений у Список наукових видань, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт (Наказ МОН України № 1643 від 28.12.2019 р. (категорія Б, спеціальність 102 Хімія); Наказ МОН України № 261 від 06.03.2015 р.; Постанова Президії ВАК України № 1-05/4 від 14.10.2009 р.). Всі статті підлягають незалежному рецензуванню.

**Видання індексується наукометричними базами даних: Camical Abstracts Service (CAS), WordCat, Crossref, BASE, Google Scholar.**

*Рекомендовано до друку Вченою радою Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет» (Протокол № 7 від 20.06.2023 року)  
та редакційно-видавничою радою університету (Протокол № 4 від 16.06.2023 року).*

**Адреса засновника та видавця:** ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 88000, м. Ужгород, вул. Підгірна, 46. тел. (03122)33341, факс: (03122)34202; e-mail: official@uzhnu.edu.ua  
**Веб-сайт видання:** www.visnyk-khim.uzhnu.edu.ua

**Адреса редакції:**  
88000, м. Ужгород, вул. О. Фединця, 53/1  
тел./факс (+380312)631097; e-mail: visnyk-khim@uzhnu.edu.ua

© ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 2023

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCES  
OF UKRAINE  
STATE UNIVERSITY  
«UZHHOROD NATIONAL UNIVERSITY»**

**SCIENTIFIC BULLETIN OF THE  
UZHHOROD UNIVERSITY.**

**Series «Chemistry»  
(Sci. Bull. Uzhh. Univ. Ser. Chem.)**

***NAUKOVIJ VÌSNIK UŽGORODS'KOGO  
UNÌVERSITETU. Serìâ «Himiâ»***

**COLLECTION OF THE SCIENTIFIC WORKS**

---

---

**ISSN 2414-0260**

**Founder and publisher: State University  
«Uzhhorod National University»**

***Periodicity of 2 times per year***

**Founded in October, 1996**

**Issue № 1 (49) 2023**

**Uzhhorod – 2023**

***Scientific Bulletin of the Uzhhorod University.***  
***Series «Chemistry». 2023, Issue № 1 (49)***

***Naukovij visnik Užgorods'kogo unìversitetu.***  
***Seriâ Himiâ. 2023, Issue № 1 (49)***

The collection of scientific works publishes articles that contain theoretical and practical results in the field of chemical sciences and environmental protection. Topics: inorganic chemistry, material science, analytical chemistry, organic chemistry; physical and colloidal chemistry, ecology, environmental safety.

**EDITORIAL BOARD BY:**

**Editor-in-Chief:**

**Barchiy I.**, Dr. Sci., Ukraine

**Deputies of Editor-in-Chief:**

**Sukharev S.**, Dr. Sci., Ukraine

**Members:**

**Bazel Ya.**, Dr. Sci., Slovak Republic; **Drabowicz J.**, Dr. hab., Poland; **Fedorchuk A.**, Dr. Sci., Ukraine; **Ischenko O.**, Dr. Sci., Ukraine; **Lendel V.**, Dr. Sci., Ukraine; **Mariychuk R.**, PhD, Slovak Republic; **Milyukin M.**, Dr. Sci., Ukraine; **Onysko M.**, Dr. Sci., Ukraine; **Onysko P.**, Dr. Sci., Ukraine; **Pekhnyo V.**, Dr. Sci., Academic of Ukrainian National Academy of Sciences, Ukraine; **Peresh E.**, Dr. Sci., Ukraine; **Piasecki M.**, Dr. hab., Poland; **Sidey V.**, PhD, Ukraine; **Slivka M.**, Dr. Sci., Ukraine; **Studeniyak Ya.**, PhD, Ukraine; **Tananaiko O.**, Dr. Sci., Ukraine; **Vorokhta M.**, PhD, Czech Republic

**Technical Assistant Editors**

**Stercho I.**, PhD, Ukraine

**Certificate of state registration number KV 21056-10856R from 07.11.2014 (before KV 7972 from 09.10.2003).**

Papers published in **Scientific Bulletin of the Uzhhorod University. Series «Chemistry»** are considered as publications suitable for Doctoral and PhD thesis (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 28.12.2019, № 1643 (Category B); Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 06.03.2015, № 261; Decree of the Presidium of HAC of Ukraine from 14.10.2009, № 1.05/4). All manuscripts are subject to independent reviewed.

**Indexing: Camical Abstracts Service (CAS), WordCat, Crossref, BASE, Google Scholar.**

*Recommended for printing of Academic Council State University «Uzhhorod National University» (protocol No. 7 from 20.06.2023) and Editorial and Publishing Council State University «Uzhhorod National University» (protocol No. 4 from 16.06.2023).*

**Address of founder and publisher:** State University «Uzhhorod National University», Pidhirna str. 46, Uzhhorod, 88000, Ukraine. Tel.: (03122)33341, fax: (03122)34202; e-mail: [official@uzhnu.edu.ua](mailto:official@uzhnu.edu.ua)  
**Website edition:** [www.visnyk-khim.uzhnu.edu.ua](http://www.visnyk-khim.uzhnu.edu.ua)

**Address of release editing's:**

Fedencja str. 53/1, Uzhhorod, 88000, Ukraine  
tel./fax (+380312)631097; e-mail: [visnyk-khim@uzhnu.edu.ua](mailto:visnyk-khim@uzhnu.edu.ua)

## ЗМІСТ (CONTENTS)

2023, Випуск № 1 (49)	1023, Issue № 1 (49)	Стор.
Філеп М.Й., Погодін А.І., Малаховська Т.О., Кохан О.П., Кайла М.І., Скубеніч К.В., Росоха І.В. ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО $Ag_7PS_6$ <i>Filep M.J., Pogodin A.I., Malakhovska T.O., Kokhan O.P., Kayla M.I., Skubenych K.V., Rosokha I.V.</i> <i>ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SINGLE CRYSTALLINE <math>Ag_7PS_6</math></i>		5-9
Філеп М.Й., Погодін А.І., Малаховська Т.О., Кохан О.П., Чундак С.Ю., Кайла М.І., Скубеніч К.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО $Ag_8GeS_6$ <i>Filep M.J., Pogodin A.I., Malakhovska T.O., Kokhan O.P., Chundak S.Yu., Kayla M.I., Skubenych K.V.</i> <i>ELECTRICAL PROPERTIES INVESTIGATION OF <math>Ag_8GeS_6</math> SINGLE CRYSTAL</i>		10-14
Сабов В.І., Барчий І.Є., П'ясецькі М., Філеп М.Й., Погодін А.І., Сабов М.Ю. КВАЗІБІНАРНА СИСТЕМА $Ag_7PSe_6-Ag_2Se$ <i>Sabov V.I., Barchiy I.Ye. M.B., Piasecki M., Filep M.J., Pogodin A.I., Sabov M.Yu.</i> <i>QUASIBINARY SYSTEM <math>Ag_7PSe_6-Ag_2Se</math></i>		15-19
Чорба О.Й., Сабов М.Ю., Філеп М.Й., Погодін А.І., Малаховська Т.О. ФАЗОВІ РІВНОВАГИ НА ПЕРЕРІЗІ $Cu_2Se - Cu_3SbSe_4$ <i>Chorba O.J., Sabov M.Yu., Filep M.J., Pogodin A.I., Malakhovska T.O.</i> <i>PHASE EQUILIBRIA IN THE SECTION <math>Cu_2Se - Cu_3SbSe_4</math></i>		20-24
Шендер І.О., Погодін А.І., Філеп М.Й., Малаховська Т.О., Поп М.М., Кохан О.П., Сусліков Л.М. ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛІВ $Ag_7SiS_5I$ ТА $Ag_7GeS_5I$ <i>Shender I.O., Pogodin A.I., Filep M.J., Malakhovska T.O., Pop M.M., Kokhan O.P., Suslikov L.M.</i> <i>OPTICAL PROPERTIES OF <math>Ag_7SiS_5I</math> AND <math>Ag_7GeS_5I</math> SINGLE CRYSTALS</i>		25-29
Фершал М.В. Студеняк Я.І. ПОТЕНЦІОМЕТРІЯ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ УМОВ УТВОРЕННЯ ТЕТРАФТОРБОРАТУ ЯК АНАЛІТИЧНОЇ ФОРМИ БОРУ <i>Fershal M., Studenyak Ya.</i> <i>POTENTIOMETRY IN DETERMINING THE CONDITIONS FOR THE FORMATION OF TETRAFLUORBORATE AS AN ANALYTICAL FORM OF BORON</i>		30-38
Галега О.В., Повідайчик М.В., Комаровська-Порохнявець О.З., Онисько М.Ю., Сухарев С.М. СИНТЕЗ ТА АНТИМІКРОБНА АКТИВНІСТЬ СЕЛЕНО(МЕРКУРІЙ)ГАЛОГЕНОВМІСНИХ ПОХІДНИХ БЕНЗОТІАЗОЛУ <i>Haleha O.V., Povidaichyk M.V., Komarovska-Porokhnyavets O.Z., Onysko M.Yu., Sukharev S.M.</i> <i>SYNTHESIS AND ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF SELENO(MERCURY)HALOGEN-CONTAINING BENZOTHAZOLE DERIVATIVES</i>		39-44
Король Н.І., Кут М.М., Лендел В.Г., Сливка М.В., Онисько М.Ю., Кривов'яз А.О., Русин І.Ф., Фаринюк Ю.І. ВПЛИВ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НА ПРОМІЖНІ РЕЗУЛЬТАТИ СТУДЕНТІВ-МЕДИКІВ <i>Korol N., Kut M., Lendel V., Slivka M., Onysko M., Kryvovjaz A., Rusyn I., Faryniuk Yu.</i> <i>INFLUENCE OF ASSESSMENT METHODS ON INTERMEDIATE RESULTS OF MEDICAL STUDENTS</i>		45-49
Кут М.М., Король Н.І., Онисько М.Ю., Лендел В.Г. ІN SILICO ДОСЛІДЖЕННЯ ПІРИМІДИНАРИЛТЕЛУРИДІВ, ЯК ПОТЕНЦІЙНИХ ІНГІБІТОРІВ <i>PLASMODIUM FALCIPARUM</i> <i>Kut M., Korol N., Onysko M., Lendel V.</i> <i>IN SILICO STUDY OF PYRIMIDINARYLTELURIDES AS POTENTIAL INHIBITORS OF <i>PLASMODIUM FALCIPARUM</i></i>		50-56
Кут М.М., Кут Д.Ж., Кривов'яз А.О., Онисько М.Ю., Лендел В.Г. КОМПЛЕКСИ <i>n</i> -МЕТОКСИФЕНІЛТЕЛУРТРИХЛОРИДУ З АЛІЛЬНИМИ ТІОЕТЕРАМИ 5-АРИЛ-1,3,4-ОКСАДІАЗОЛУ <i>Kut M., Kut D., Krivovjaz A., Onysko M., Lendel V.</i> <i>COMPLEXES OF p-METHOXYPHENYLTELLURIUM TRICHLORIDE WITH ALLYL THIOETHERS OF 5-ARYL-1,3,4-OXADIAZOLE</i>		57-61
Глух О.С., Симканич О.І., Качаєв В.М., Глюдзик Е.І. ЗМІНА NDVI-ІНДЕКСУ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ ПРОТЯГОМ 2000-2022 РОКІВ <i>Glukh O.S., Symkanych O.I., Kachaiev V.M., Hliudzyk E.I.</i> <i>THE NDVI INDEX CHANGE OF THE CARPATHIAN REGION OF UKRAINE DURING 2000-2022</i>		62-67
Русин В.М. МОЖЛИВІСТЬ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ОСНОВНИХ БАРВНИКІВ ТОРГОВОЇ МАРКИ «БАЗАКРИЛ» ПРИ ВИЗНАЧЕННІ АНІОННИХ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН <i>Rusyn V.M.</i> <i>THE POSSIBILITY OF EFFECTIVE USE OF BASIC DYES OF THE "BAZAKRYL" TRADEMARK IN THE DETERMINATION OF ANIONIC SURFACTANTS</i>		68-75
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ		76-79
ЗМІСТ		80

УДК 546.571+546.18+546.15+548.5

**Філеп М.Й.**, к.х.н., с.н.с., **Погодін А.І.**, к.х.н., с.н.с., **Малаховська Т.О.**, к.х.н., с.н.с.,  
**Кохан О.П.**, к.х.н., доц., **Кайла М.І.**, к.фіз-мат.н., пров. фах.,  
**Скубенич К.В.**, к.фіз-мат.н., с.н.с., **Росоха І.В.**, асп.

## ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО $\text{Ag}_7\text{PS}_6$

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,  
88000, м. Ужгород, вул. Підгірна 46;  
e-mail: [mykhaylo.filep@uzhnu.edu.ua](mailto:mykhaylo.filep@uzhnu.edu.ua)

Пошук та дослідження нових матеріалів придатних для використання у новітніх твердотільних батареях є актуальним напрямком сучасної іоніки твердого тіла. Серед потенційних матеріалів варто згадати сполуки сімейства аргіродитів. Особливістю даних фаз є наявність розупорядкованої катіонної підрешітки, що забезпечує значну катіонну провідність у твердому стані. Дана робота представляє результати досліджень електричної провідності монокристалічного зразку нтм- $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ . Монокристал  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  вирощено методом спрямованої кристалізації з розплаву. Ідентифікацію кристалу здійснено методом РФА. Встановлено, що одержаний зразок  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  кристалізується у низькотемпературній модифікації у примітивній кубічній комірці. На орієнтованій та спеціально підготовленій кристалічній пластинці нтм- $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  (з використанням золотих контактів) здійснено вимірювання частотної ( $1 \times 10^1 - 3 \times 10^5$  Гц) та температурної (25–100°C) залежності загальної електричної провідності. Загальна провідність монокристалів  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  становить  $6.51 \times 10^{-7}$  См/см ( $t = 25^\circ\text{C}$ ). За результатами температурних досліджень залежності загальної провідності встановлено термоактиваційний характер провідності.

**Ключові слова:** аргіродити; монокристали; фазовий аналіз; електрична провідність.

На сьогоднішній день значна увага приділяється розвитку нових та безпечних акумуляторів. Одним з напрямків підвищення безпеки акумуляторів є використання суперіонних матеріалів, для заміни легкозаймистого рідкого електроліту, та створення повністю твердотільних акумуляторів (all-solid-state batteries) [1-3]. Твердотільні електроліти підвищують безпечність батарей та є альтернативою сучасним рідким електролітам. Використання полікристалічних, керамічних або композитних матеріалів дозволяє також спростити конструкцію батарей [1,4].

Аргіродити проявляють широкий спектр властивостей: термоелектричні [5,6], фотовольтаїчні [6] та суперіонні [8-10], серед яких найбільш дослідженими є  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Li}^+$  - вмісні аргіродити [8-11]. Однак варто зазначити, що на сьогодні основним напрямком дослідження аргіродитів є їх використання у якості твердотільних електролітів. Це пов'язано із значною розупорядкованістю катіонної підрешітки,

що зумовлена наявністю великої кількості еквівалентних кристалографічних позицій  $\text{Me}^+$  [11-13]. Це обумовлює відмінні іон-провідні властивості аргіродитів.

Тернарна сполука  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  володіє конгруентним характером плавлення (802°C) [14,15], а при 271°C зазнає структурного фазового перетворення: нтм P2<sub>1</sub>3 ( $a = 10.36 \div 10.42$  Å)  $\leftrightarrow$  втм F-43m ( $a = 10.485$  Å) [14,15].

У даній роботі представлені результати дослідження електричних властивостей монокристалічного зразку нтм- $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ .

### Експериментальна частина

Монокристал  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  вирощено методом спрямованої кристалізації з розплаву у вакуумованих (0.13 Па) кварцових ампулах згідно методики детально описаної у [15]. Ріст монокристалів здійснювали з попередньо синтезованого полікристалічного сплаву  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ . В результаті одержано монокристал  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  довжиною  $\sim 40$  мм та діаметром 12 мм. Одержаний

монокристалічний зразок ідентифікували методом РФА (РФА, ДРОН-4-07,  $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання,  $\text{Ni}$ -фільтр,  $\Delta 2\theta = 0.02^\circ$ , інтервал кутів  $2\theta = 10-90^\circ$ , експозиція 0.5 с та 1 с).

### Результати

Результати досліджень одержаного зразку  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  методом РФА (Рис.1), вказують на узгодження експериментальної та розрахованої за літературними даними [16] дифрактограм  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ . Це підтверджує, що вирошений монокристал  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$

кристалізується у низькотемпературній кубічній модифікації (ПГ  $\text{P}2_13$ ) з параметрами комірки  $a = 10.392 \text{ \AA}$ ) та не містить сторонніх домішок (Рис.1).

З одержаного монокристалу було виготовлено монокристалічну пластинку (площею  $\sim 0.8 \text{ cm}^2$ ). Монокристалічність та орієнтацію пластини  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  підтверджували методом РФА (Рис.2). На одержаній дифрактограмі спостерігається лише один дифракційний пік, що відповідає кристаліграфічній площині (432). Таким чином встановлено, що підготовлена пластинка є монокристалічною.

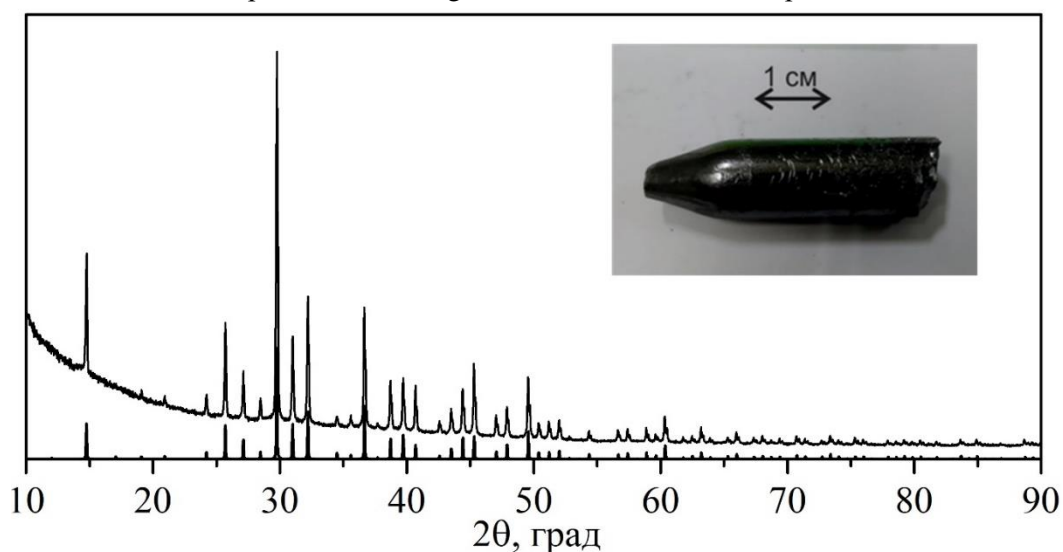


Рис. 1. Порівняння дифрактограми синтезованого та розрахованої та літературними даними [16]  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ , на вставці зображено загальний вигляд монокристалу  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ .

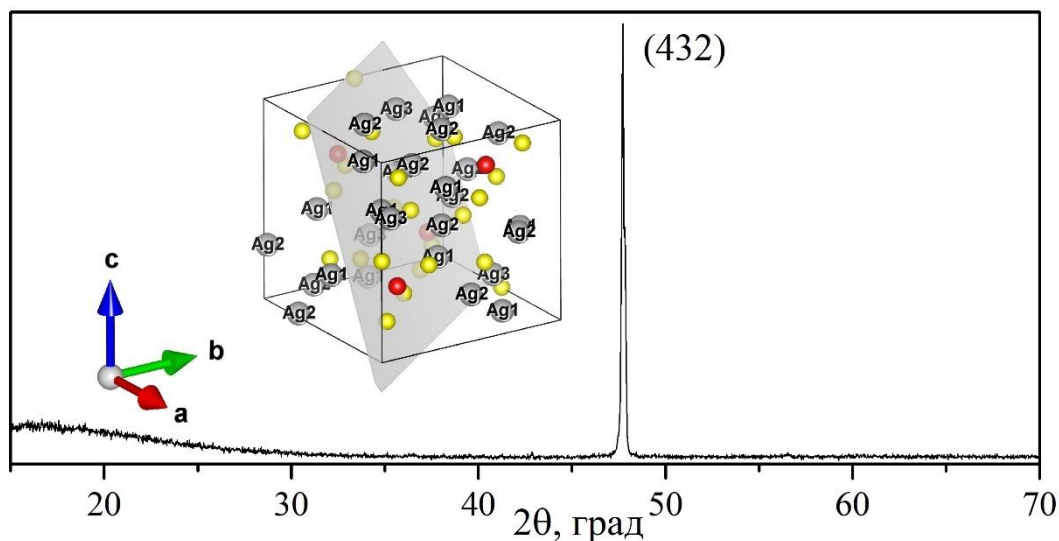


Рис. 2. Дифрактограма поверхні монокристалічної пластини  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ , на вставці зображено елементарну комірку  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  із зображенням площини (432).



Шляхом шліфування та полірування монокристалічну пластину  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ , було підготовлено для нанесення золотих контактів.

Дослідження електричних параметрів монокристалу  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  проводили методом імпедансної спектроскопії [17] у частотному ( $1 \times 10^1$ – $3 \times 10^5$  Гц) та температурному (25–100°C) діапазонах з використанням високоточного LCR метра AT 2818.

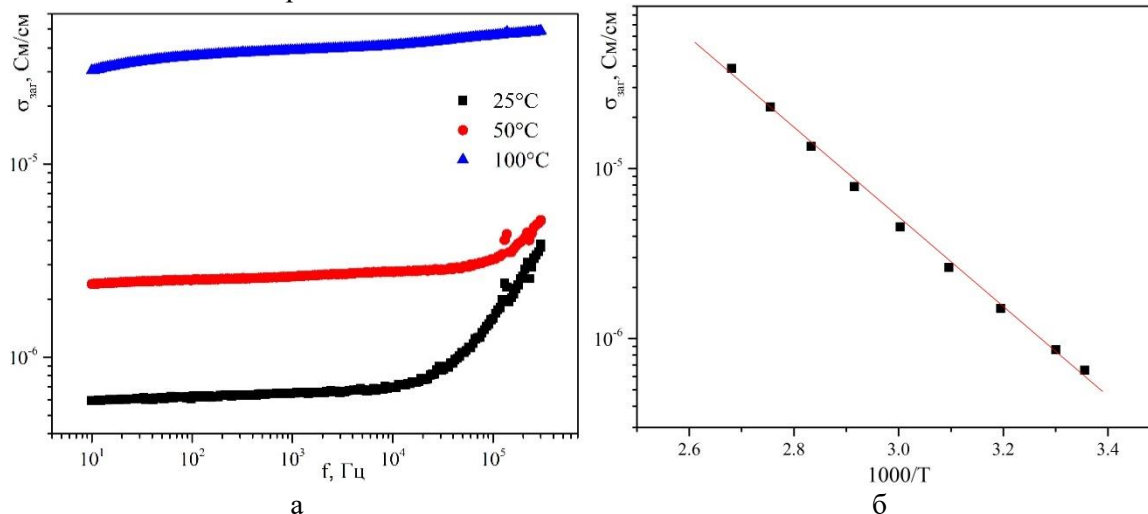


Рис.3. Частотні (а) та температурні (б) залежності загальної електропровідності монокристалічного  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ .

Загальна провідність монокристалів  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  становить  $6.51 \times 10^{-7}$  См/см при 25°C. Підвищення температури (100°C) приводить до зростання електричної провідності до значень  $3.87 \times 10^{-5}$  См/см.

Для детального дослідження температурної залежності загальної електропровідності проаналізовано залежність  $\ln \sigma$  від  $T$  у арреніусовських координатах. Одержані результати підтверджують термоактиваційний характер провідності у монокристалічного  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ . Визначена енергія активації становить 1.046 еВ.

### Висновки

Методом спрямованої кристалізації з розплаву вирошено монокристал  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$ . На орієнтованій та спеціально підготовленій кристалічній пластинці  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  здійснено вимірювання частотної та температурної залежності загальної електричної провідності. Загальна провідність монокристалів  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  становить  $6.51 \times 10^{-7}$

Одержані частотні залежності загальної електропровідності для монокристалів  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  характеризуються зростанням електропровідності із зростанням частоти (Рис.3 а), що є характерним для іонних провідників.

Встановлено, що температурні залежності загальної провідності носять лінійний характер (Рис.3 б).

См/см ( $t = 25^\circ\text{C}$ ), а енергія активації становить 1.046 еВ.

Дослідження здійснені в рамках науково-дослідного проекту, що фінансуються в межах фонду державного бюджету ДР №0122U000934.

### Список використаних джерел

1. Wu F., Maier J., Yu Y. Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries. *Chem. Soc. Rev.* 2020, 49, 1569–1614. Doi: 10.1039/c7cs00863e.
2. Kim M.-J., Choi I.-H., Jo S.C., Kim B.G., Ha Y.-C., Lee S.-M., Kang S., Baeg K.-J., Park J.-W. A Novel Strategy to Overcome the Hurdle for Commercial All-Solid-State Batteries via Low-Cost Synthesis of Sulfide Solid Electrolytes. *Small Methods.* 2021, 5(11), 2100793. Doi: 10.1002/smt.202100793
3. Wang L., Li J., Lu G., Li W., Tao Q., Shi C., Jin H., Chen G., Wang S. Fundamentals of Electrolytes for Solid-State Batteries: Challenges and Perspectives. *Front. Mater.* 2020, 7, 111. Doi: 10.3389/fmats.2020.00111.
4. Chen J., Wu J., Wang X., Zhou A., Yang Z. Research Progress and Application Prospect of Solid-

state Electrolytes in Commercial Lithium-ion. Power Batteries. *Energy Storage Materials*. 2020, 35, 70–87. Doi: 10.1016/j.ensm.2020.11.017.

5. Lin S., Li W., Pei Y. Thermally insulative thermoelectric argyrodites, *Mater. Today*. 2021, 48, 198–213. Doi: 10.1016/j.mattod.2021.01.007.

6. Філеп М.Й., Погодін А.І., Лучинець М.М., Когутич А.А., Малаховська Т.О., Кохан О.П., Сабов М.Ю., Студеняк І.П. Термоелектричні параметри монокристалів зі структурою аргіродиту в системах  $\text{Cu}_7\text{PS}_6\text{-Cu}_6\text{PS}_5\text{Br}$  та  $\text{Cu}_7\text{PS}_6\text{-Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ . *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. Фізика*. 2020, 47, 44–54. Doi: 10.24144/2415-8038.2020.47.44-54.

7. Boon-on P., Aragaw B.A., Lee C.Y., Shi J.B., Lee M.W.  $\text{Ag}_8\text{SnS}_6$ : a new IR solar absorber material with a near optimal bandgap. *RSC Adv*. 2018, 69, 39470–39476. Doi: 10.1039/C8RA08734B.

8. Beeken R.B., Garbe J.J., Gillis J.M., Petersen N.R., Podoll, B.W., Stoneman M.R. Electrical conductivities of the  $\text{Ag}_6\text{PS}_5\text{X}$  and the  $\text{Cu}_6\text{PSe}_5\text{X}$  ( $\text{X}=\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids*. 2005, 66(5), 882–886. Doi: 10.1016/j.jpcs.2004.10.010.

9. Beeken R.B., Garbe J.J., Petersen N.R., Stoneman M.R. Electrical properties of the  $\text{Ag}_6\text{PSe}_5\text{X}$  ( $\text{X}=\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids*. 2004, 65, 1011–1014. Doi: 10.1016/j.jpcs.2003.10.060.

10. Deiseroth H.-J., Kong S.-T., Eckert H., Vannahme J., Reiner C., Zaiss T., Schlosser M.  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ : a class of crystalline Li-rich solids with an unusually high  $\text{Li}^+$  mobility. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2008, 47(4), 755–758. Doi: 10.1002/anie.200703900.

11. Nilges T., Pfitzner A. A structural differentiation of quaternary copper argyrodites: Structure – property relations of high temperature ion conductors. *Z. Kristallogr.* 2005, 220, 281–294. Doi: 10.1524/zkri.220.2.281.59142.

12. Kuhs W.F., Nitsche R., Scheunemann K. The argyrodites – a new family of the tetrahedrally close-packed structures. *Mat. Res. Bull.* 1979, 14, 241–248. Doi: 10.1016/0025-5408(79)90125-9.

13. Deiseroth H.-J., Maier J., Weichert K., Nickel V., Kong S. - T., Reiner C.  $\text{Li}_7\text{PS}_6$  and  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$  ( $\text{X}=\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ): possible three-dimensional diffusion pathways for lithium ions and temperature dependence of the ionic conductivity by impedance measurements. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2011, 637, 1287–1294. Doi: 10.1002/zaac.201100158.

14. Andrae H., Blachnik R. Metal sulphide-tetraphosphorusdekasulphide phase diagrams. *J. Alloys Compd.* 1992, 189(2), 209–215. Doi: 10.1016/0925-8388(92)90709-1.

15. Погодін А.І., Філеп М.Й., Малаховська Т.О., Кохан О.П., Чундак С.Ю. Вирощування монокристалів  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  методом спрямованої кристалізації. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. Хімія*. 2022, 1(47), 28–32. Doi: 10.24144/2414-0260.2022.1.28-32.

16. Toffoli P., Khodadad P. Sur les composés  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  et  $\text{Ag}_7\text{PSe}_6$ . *C. R. Acad. Sc. Paris, Serie C*. 1978, 286, 349–351.

17. Huggins R.A. Simple method to determine electronic and ionic components of the conductivity in mixed conductors a review. *Ionics*. 2002, 8, 300–313. Doi: 10.1007/BF02376083.

Стаття надійшла до редакції: 07.06.2023.

## ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SINGLE CRYSTALLINE $\text{Ag}_7\text{PS}_6$

**Filep M.J., Pogodin A.I., Malakhovska T.O., Kokhan O.P., Kayla M.I., Skubenykh K.V., Rosokha I.V.**

*Uzhhorod National University, Pidgirna St. 46, 88000, Uzhhorod; Ukraine,  
e-mail: mykhaylo.filep@uzhnu.edu.ua*

The search and study of new materials suitable for use in the newest solid-state batteries is an important direction of modern solid-state ionics. Among the potential materials, it is worth mentioning compounds of the argyrodite family. The characteristic feature of these phases is the presence of a disordered cationic sublattice, which provides significant cationic conductivity in the solid state. This work presents the results of studies of the electrical conductivity of a single crystalline sample of  $\text{I}^{\text{tm}}\text{-Ag}_7\text{PS}_6$ . The single crystal of  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  was grown by the method of directional crystallization from the melt. The crystal was identified by means of XRD method. It was found that the grown  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  sample crystallizes in a low-temperature modification in a primitive cubic cell. The frequency ( $1 \times 10^1\text{--}3 \times 10^5$  Hz) and temperature (25–100°C) dependence of the total electrical conductivity was measured on an oriented and specially prepared  $\text{I}^{\text{tm}}\text{-Ag}_7\text{PS}_6$  single crystalline plate (using gold contacts). The total

conductivity of  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  single crystals is  $6.51 \times 10^{-7}$  S/cm ( $t = 25^\circ\text{C}$ ). According to the results of temperature studies of the dependence of the total conductivity, the thermal activation nature of the conductivity was established.

**Keywords:** argyrodites; single crystals; phase analysis; electrical conductivity.

### References

1. Wu F., Maier J., Yu Y. Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries. *Chem. Soc. Rev.* 2020, 49, 1569–1614. Doi: 10.1039/c7cs00863e.
2. Kim M.-J., Choi I.-H., Jo S.C., Kim B.G., Ha Y.-C., Lee S.-M., Kang S., Baeg K.-J., Park J.-W. A Novel Strategy to Overcome the Hurdle for Commercial All-Solid-State Batteries via Low-Cost Synthesis of Sulfide Solid Electrolytes. *Small Methods.* 2021, 5(11), 2100793. Doi: 10.1002/smt.202100793
3. Wang L., Li J., Lu G., Li W., Tao Q., Shi C., Jin H., Chen G., Wang S. Fundamentals of Electrolytes for Solid-State Batteries: Challenges and Perspectives. *Front. Mater.* 2020, 7, 111. Doi: 10.3389/fmats.2020.00111.
4. Chen J., Wu J., Wang X., Zhou A., Yang Z. Research Progress and Application Prospect of Solid-state Electrolytes in Commercial Lithium-ion. Power Batteries. *Energy Storage Materials.* 2020, 35, 70–87. Doi: 10.1016/j.ensm.2020.11.017.
5. Lin S., Li W., Pei Y. Thermally insulative thermoelectric argyrodites, *Mater. Today.* 2021, 48, 198–213. Doi: 10.1016/j.mattod.2021.01.007.
6. Filep M.I., Pogodin A.I., Luchynets M.M., Kohutych A.A., Malakhovska T.O., Kokhan O.P., Sabov M.Iu., Studeniak I.P. Termoelektrychni parametry monokystaliv zi strukturoiu arhirodytu v systemakh  $\text{Cu}_7\text{PS}_6$ – $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{Br}$  ta  $\text{Cu}_7\text{PS}_6$ – $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ . *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. Fizyka.* 2020, 47, 44–54. Doi: 10.24144/2415-8038.2020.47.44-54 (in Ukr.).
7. Boon-on P., Aragaw B.A., Lee C.Y., Shi J.B., Lee M.W.  $\text{Ag}_3\text{SnS}_6$ : a new IR solar absorber material with a near optimal bandgap. *RSC Adv.* 2018, 69, 39470–39476. Doi: 10.1039/C8RA08734B.
8. Beeken R.B., Garbe J.J., Gillis J.M., Petersen N.R., Podoll, B.W., Stoneman M.R. Electrical conductivities of the  $\text{Ag}_6\text{PS}_5\text{X}$  and the  $\text{Cu}_6\text{PSe}_5\text{X}$  ( $\text{X}=\text{Br}, \text{I}$ ) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids.* 2005, 66(5), 882–886. Doi: 10.1016/j.jpcs.2004.10.010.
9. Beeken R.B., Garbe J.J., Petersen N.R., Stoneman M.R. Electrical properties of the  $\text{Ag}_6\text{PSe}_5\text{X}$  ( $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids.* 2004, 65, 1011–1014. Doi: 10.1016/j.jpcs.2003.10.060.
10. Deiseroth H.-J., Kong S.-T., Eckert H., Vannahme J., Reiner C., Zaiss T., Schlosser M.  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ : a class of crystalline Li-rich solids with an unusually high  $\text{Li}^+$  mobility. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2008, 47(4), 755–758. Doi: 10.1002/anie.200703900.
11. Nilges T., Pfitzner A. A structural differentiation of quaternary copper argyrodites: Structure – property relations of high temperature ion conductors. *Z. Kristallogr.* 2005, 220, 281–294. Doi: 10.1524/zkri.220.2.281.59142.
12. Kuhs W.F., Nitsche R., Scheunemann K. The argyrodites – a new family of the tetrahedrally close-packed structures. *Mat. Res. Bull.* 1979, 14, 241–248. Doi: 10.1016/0025-5408(79)90125-9.
13. Deiseroth H.-J., Maier J., Weichert K., Nickel V., Kong S. - T., Reiner C.  $\text{Li}_7\text{PS}_6$  and  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$  ( $\text{X}: \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ): possible three-dimensional diffusion pathways for lithium ions and temperature dependence of the ionic conductivity by impedance measurements. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2011, 637, 1287–1294. Doi: 10.1002/zaac.201100158.
14. Andrae H., Blachnik R. Metal sulphide-tetraphosphorusdekasulphide phase diagrams. *J. Alloys Compd.* 1992, 189(2), 209–215. Doi: 10.1016/0925-8388(92)90709-1.
15. Pogodin A.I., Filep M.I., Malakhovska T.O., Kokhan O.P., Chundak S.Iu. Vyroshchuvannia monokystaliv  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  metodom spriamovanoi krystalizatsii. *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. Khimiia.* 2022, 1(47), 28–32. Doi: 10.24144/2414-0260.2022.1.28-32 (in Ukr.).
16. Toffoli P., Khodadad P. Sur les composés  $\text{Ag}_7\text{PS}_6$  et  $\text{Ag}_7\text{PSe}_6$ . *C. R. Acad. Sc. Paris, Serie C.* 1978, 286, 349–351.
17. Huggins R.A. Simple method to determine electronic and ionic components of the conductivity in mixed conductors a review. *Ionics.* 2002, 8, 300–313. Doi: 10.1007/BF02376083.