

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
Website edition: 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

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 Ag_7PS_6</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 Ag_8GeS_6 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 $Ag_7PSe_6-Ag_2Se$</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 $Cu_2Se - Cu_3SbSe_4$</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 Ag_7SiS_5I AND Ag_7GeS_5I 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. IN SILICO ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИМІДИНАРИЛТЕЛУРИДІВ, ЯК ПОТЕНЦІЙНИХ ІНГІБІТОРІВ $PLASMIDIUM FALCIPARUM$ <i>Kut M., Korol N., Onysko M., Lendel V.</i> <i>IN SILICO STUDY OF PYRIMIDINARYLTELURIDES AS POTENTIAL INHIBITORS OF $PLASMIDIUM FALCIPARUM$</i>		50-56
Кут М.М., Кут Д.Ж., Кривов'яз А.О., Онисько М.Ю., Лендел В.Г. КОМПЛЕКСИ n-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+546.289+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., Чундак С.Ю., д.х.н., проф.,
Кайла М.І., к.фіз-мат.н., пров. фах., Скубенич К.В., к.фіз-мат.н., с.н.с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО Ag_8GeS_6

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

Сполуки структури аргіродиту завдяки одночасному співіснуванню «жорсткого» аніонного каркасу та розупорядкованої катіонної підрешітки володіють високими значеннями іонної провідності у твердому стані. У зв'язку з цим аргіродити відносяться до перспективних суперіонних матеріалів для використання у якості робочого елемента твердотільних акумуляторів. У даній роботі представлено результати дослідження електрофізичних параметрів монокристалу Ag_8GeS_6 вирощеного методом спрямованої кристалізації з розплаву. Методом РФА встановлено, що вирощений монокристал Ag_8GeS_6 кристалізується у низькотемпературній орторомбічній модифікації з параметри елементарної комірки: $a = 15.147 \text{ \AA}$, $b = 7.469 \text{ \AA}$, $c = 10.584 \text{ \AA}$. На орієнтованій по площині (011) монокристалічній пластині Ag_8GeS_6 методом імпедансної спектроскопії здійснено дослідження частотної (10 Гц – 0.3 МГц) та температурної (20 – 110°C) залежності електропровідності. На частотних залежностях загальної електропровідності Ag_8GeS_6 спостерігається зростання значень загальної електропровідності із зростанням частоти, що є типовими для змішаних іонно-електронних провідників. Визначено, що загальна провідність монокристалу Ag_8GeS_6 становить $3.82 \times 10^{-5} \text{ См/см}$, а енергія активації – 0.728 eВ.

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

Аргіродити – складні халькогеніди р-елементів із загальною формулою $\text{A}_{[(12-n-y)]}\text{BX}_{(6-y)}\text{Y}_y$, (де А – Li^+ , Ag^+ ; В = Si^{4+} , P^{5+} ; X – S^{2-} , Se^{2-} ; Y = Cl, Br, I), що характеризуються подібною кристалічною структурою на основі тетраедричної щільної упаковки [1-3]. Типовим для представників класу аргіродитів є співіснування «жорсткого» каркасу сформованого на основі багатозарядного катіону та розупорядкованої підрешітки однозарядного катіону. Розупорядкованість катіонної підрешітки забезпечується значною кількістю еквівалентних позицій із частковим заповненням ($KЗП < 1$) [1-4].

Для сполук зі структурою аргіродиту, типовим є відносно високі значення іонної провідності у твердому стані, що обумовлює належність аргіродитів до перспективних суперіонних матеріалів [4-6].

Варто зазначити, що срібло-вмісні аргіродити поряд з високими значення іонної

провідності характеризуються високою стійкістю до гідролізу [2, 6-8]. Тому, метою даної роботи є дослідження електричних властивостей тернарного аргіродиту Ag_8GeS_6 .

Сполука Ag_8GeS_6 плавиться конгруентно при 958°C та зазнає поліморфного перетворення при 227°C [9,10].

Стабільна нижче 227°C низькотемпературна модифікація (НТ)- Ag_8GeS_6 відноситься до орторомбічної сингонії, ПГ $\text{Pna}2_1$ з параметрами комірки $a = 15.149 \text{ \AA}$, $b = 7.476 \text{ \AA}$, $c = 10.589 \text{ \AA}$, $Z = 4$ [10,11]. Вище 227°C утворюється кубічна високотемпературна модифікація (ВТ) Ag_8GeS_6 , ПГ F-43m , $a = 10.70 \text{ \AA}$ [9].

Експериментальна частина

Вирощування монокристалу Ag_8GeS_6 здійснювали згідно технологічного режиму описаного у роботі [10]. З огляду на конгруентний характер плавлення Ag_8GeS_6

виращування проводили спрямованою кристалізацією з розплаву. Одержаний монокристал Ag_8GeS_6 має лінійні розміри $l \sim 3.0$ см та $d \sim 1.2$ см.

Ідентифікацію одержаного монокристалу здійснювали методом рентгенівського фазового аналізу (РФА, ДРОН-4-07, $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання, Ni -фільтр, $\Delta 2\theta = 0.02^\circ$, експозиція 0.5 та 1 с) та диференційного термічного (ДТА, термopари типу S, швидкість нагріву $700^\circ\text{C}/\text{год}$) аналізів.

Результати

Співставлення експериментальної та розрахованої за літературними [9,11] даними

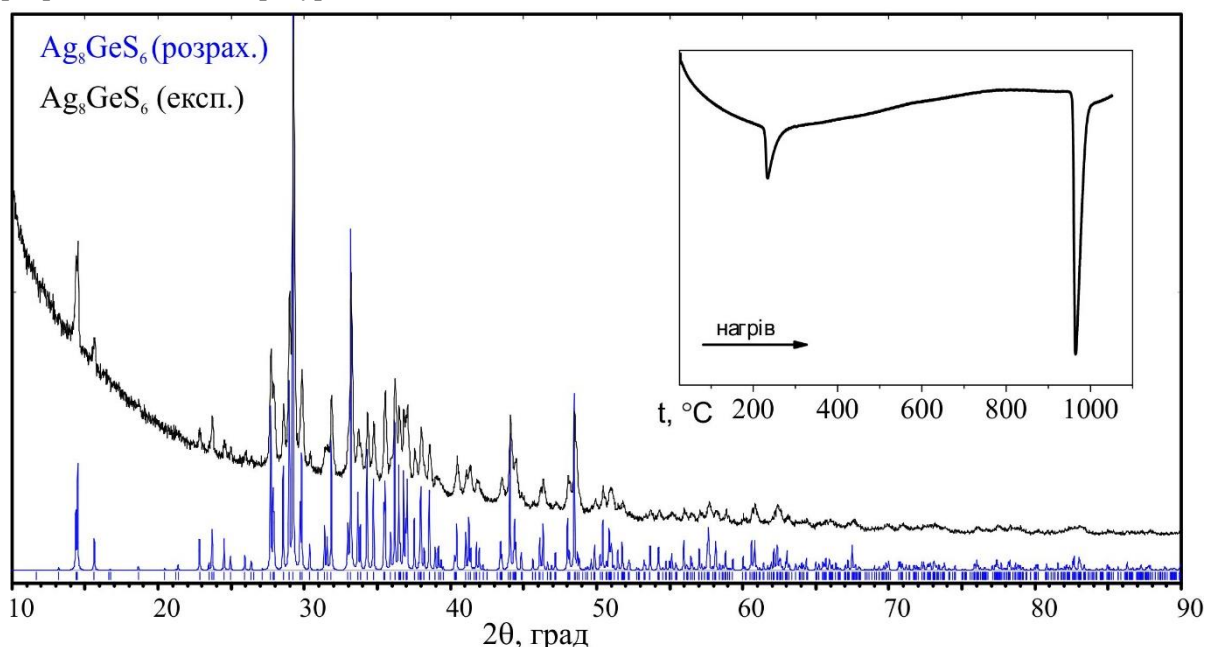


Рис. 1. Експериментальна (експ.) та розрахована (розрах.) за літературними даними [9,11] дифрактограми Ag_8GeS_6 , на вставці – крива нагріву ДТА вирощеного монокристалу Ag_8GeS_6 .

Оскільки монокристал $\text{HT-Ag}_8\text{GeS}_6$ характеризується середнім ступенем спайності [10], то монокристалічну пластину одержано вирізуванням зразку паралельно одному з природніх сколів монокристалу.

Орієнтацію монокристалічної пластини встановлено методом РФА (Рис.2). На одержаній дифрактограмі спостерігається наявність п'яти дифракційних рефлексів, що відповідають площинам (011), (022) ... (055). Це підтверджує, що досліджувана пластинка Ag_8GeS_6 зорієнтована по площині (011). Розміщення площини у елементарній комірці представлено на Рис.3.

дифрактограми (Рис.1) вказує на наявність однієї системи рефлексів, що відповідає низькотемпературній орторомбічній модифікації Ag_8GeS_6 . Додаткові дифракційні піки, що належать іншим фазам не спостерігаються. Одержана дифрактограма проіндексована за допомогою програми EXPO 2014 [12]. Розраховані параметри елементарної комірки нтм- Ag_8GeS_6 становлять $a = 15.147 \text{ \AA}$, $b = 7.469 \text{ \AA}$, $c = 10.584 \text{ \AA}$.

На кривій нагріву Ag_8GeS_6 (вставка до рис.1) спостерігаються два ендотермічні ефекти, що підтверджують утворення $\text{HT-Ag}_8\text{GeS}_6$ (227°C) з його подальшим плавленням (958°C).

В подальшому, дана монокристалічна пластинка була підготовлена для вимірювання електропровідності. Методом хімічного осадження з розчину, було нанесено золоті контакти на паралельні поверхні зразку.

Дослідження частотної (10 Гц – 0.3 МГц) та температурної (20 – 110°C) залежності електропровідності здійснено методом імпедансної спектроскопії з використанням високоточного LCR метра AT 2818.

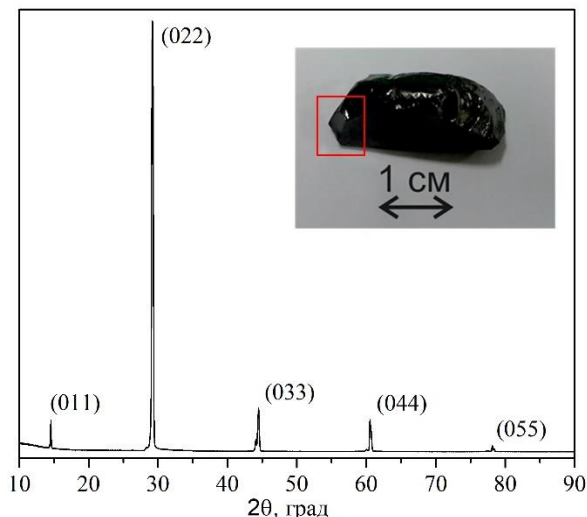


Рис.2. Дифрактограма поверхні природнього сколу Ag_8GeS_6 , на вставці зображено розміщення досліджуваної монокристалічної пластини.

На частотних залежностях загальної електропровідності Ag_8GeS_6 спостерігається зростання значень загальної

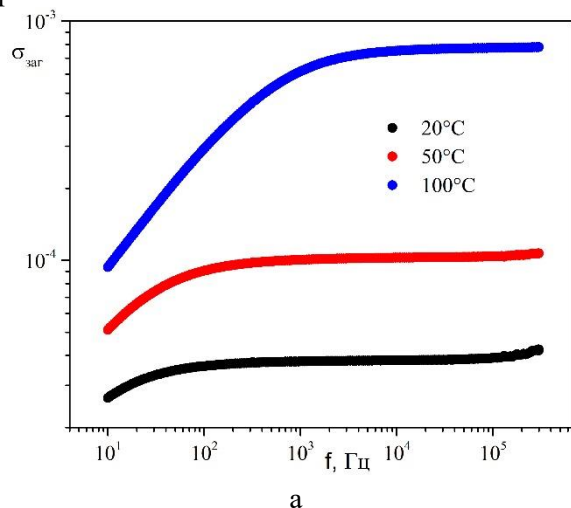


Рис.4. Частотні (а) та температурні (б) залежності загальної електропровідності монокристалічного Ag_8GeS_6 .

Загальна провідність монокристалів Ag_8GeS_6 визначена при 20°C становить 3.82×10^{-5} См/см. Із підвищенням температури до 110°C спостерігається зростання значень загальної провідності у 10^2 разів до рівня 1.12×10^{-3} См/см.

Для визначення енергії активації E_a побудовано залежність електропровідності від температури $\ln \sigma = f(1/T)$ (Рис 4.б). Температурна залежність загальної електропровідності в арреніусовських координатах є лінійною, що вказує на термоактиваційний характер електричної провідності у монокристалічного Ag_8GeS_6 .

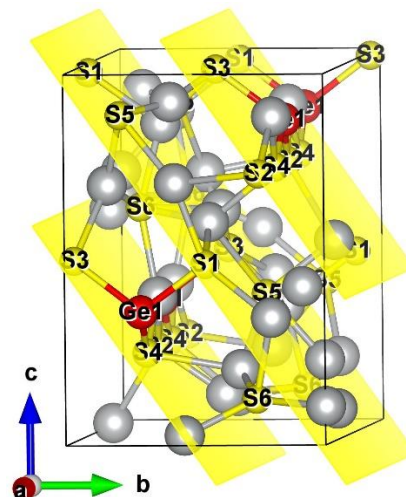
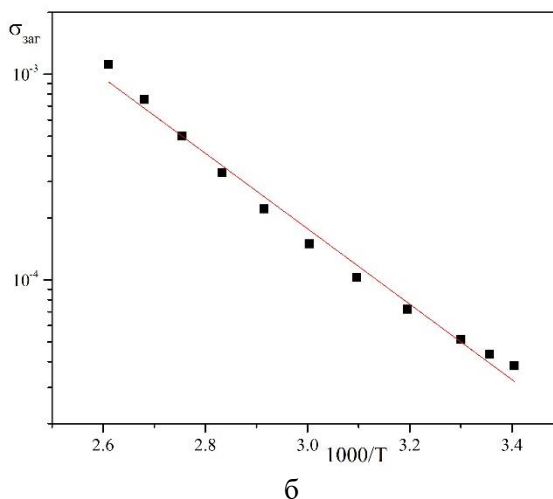


Рис.3. Елементарну комірку Ag_8GeS_6 зображенням сімейства площин (001).

електропровідності із зростанням частоти, що є типовими [13] для змішаних іонно-електронних провідників (Рис.4.а).



На основі побудованого графіку встановлено енергію активації, яка становить $E_a = 0.728$ eВ.

Висновки

Методом спрямованої кристалізації з розплаву вирошено монокристал Ag_8GeS_6 . На орієнтованій та спеціально підготовленій кристалічній пластинці Ag_8GeS_6 здійснено вимірювання частотної та температурної залежності загальної електричної провідності. Загальна провідність

монокристалу Ag_8GeS_6 становить 3.82×10^{-5} См/см, а енергія активації – 0.728 еВ.

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

Список використаних джерел

1. 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.
2. Laqibi M., Cros B., Peytavin S., Ribes M. New silver superionic conductors $\text{Ag}_7\text{XY}_5\text{Z}$ (X = Si, Ge, Sn; Y = S, Se; Z = Cl, Br, I)–synthesis and electrical studies. *Solid State Ionics.* 1987, 23(1-2), 21–26. Doi: 10.1016/0167-2738(87)90077-4.
3. 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 Li^+ mobility. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2008, 47(4), 755–758. Doi: 10.1002/anie.200703900.
4. 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.
5. Deiseroth H.-J., Maier J., Weichert K., Nickel V., Kong S.-T., Reiner C. Li_7PS_6 and $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ (X: Cl, Br, 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.
6. 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 $\text{Cu}_6\text{PSe}_5\text{X}$

- (X=Br, I) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids.* 2005, 66(5), 882–886. Doi: 10.1016/j.jpcs.2004.10.010.
7. Beeken R.B., Garbe J.J., Petersen N.R., Stoneman M.R. Electrical properties of the $\text{Ag}_6\text{PSe}_5\text{X}$ (X=Cl, Br, I) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids.* 2004, 65, 1011–1014. Doi: 10.1016/j.jpcs.2003.10.060.
8. Малаховська Т.О., Погодін А.І., Філеп М.Й., Поп М.М., Шендер І.О., Кохан О.П., Жукова Ю.П., Студеняк Я.І., Сусліков Л.М. Отримання та властивості керамічних матеріалів у системі $\text{Ag}_6\text{PS}_5\text{I}$ – $\text{Ag}_7\text{GeS}_5\text{I}$. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. Хімія.* 2022, 2(48), 16–22. Doi: 10.24144/2414-0260.2022.2.16-22.
9. Abbasova V.A., Alverdiyev I.J., Rahimoglu E., Mirzoyeva R.J., Babanly M.B. Phase relations in the Cu_8GeS_6 – Ag_8GeS_6 system and some properties of solid solutions. *Azerbaijan chemical journal.* 2017, 2, 25–29.
10. Погодін А.І., Філеп М.Й., Малаховська Т.О., Кохан О.П., Поп М.М. Вирощування монокристалів аргіродиту Ag_8GeS_6 . *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. Хімія.* 2022, 1(47), 53–57. Doi: 10.24144/2414-0260.2022.1.53-57.
11. Eulenberg G. Die Kristallstruktur der Tieftemperaturmodifikation von Ag_8GeS_6 . *Monatsh. Chem.* 1977, 108, 901–913. Doi: 10.1007/BF00898056.
12. Altomare A., Cuocci C., Giacovazzo, C. Moliterni A., Rizzi R., Corriero N., Falcicchio A. EXPO2013: a kit of tools for phasing crystal structures from powder data. *J. Appl. Crystallogr.* 2013, 46, 1231–1235. Doi: 10.1107/S0021889813013113.
13. 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 PROPERTIES INVESTIGATION OF Ag_8GeS_6 SINGLE CRYSTAL

Filep M.J., Pogodin A.I., Malakhovska T.O., Kokhan O.P., Chundak S.Yu., Kayla M.I., Skubenyh K.V.

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

The compounds of the argyrodite structure have high conductivity values in the solid state due to the simultaneous coexistence of a "rigid" anionic framework and disordered cationic sublattice. In this regard, argyrodites are considered to be promising superionic materials for use as a working element of solid-state batteries. This work presents the results of the study of the electrophysical parameters of Ag_8GeS_6 single crystal grown by directional crystallization from the melt technique. It

was found by the XRD method that the grown Ag_8GeS_6 single crystal crystallizes in a low-temperature orthorhombic modification with unit cell parameters: $a = 15.147 \text{ \AA}$, $b = 7.469 \text{ \AA}$, $c = 10.584 \text{ \AA}$. The frequency (10 Hz - 0.3 MHz) and temperature (20 - 110°C) dependence of the electrical conductivity was studied on a single crystal plate of Ag_8GeS_6 oriented in the (011) plane by impedance spectroscopy. The frequency dependence of the total electrical conductivity of Ag_8GeS_6 shows an increase in the total electrical conductivity with increasing frequency, which is typical for mixed ionic-electronic conductors. It was determined that the total conductivity of the Ag_8GeS_6 single crystal is $3.82 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$, and the activation energy is 0.728 eV.

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

References

1. 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.
2. Laqibi M., Cros B., Peytavin S., Ribes M. New silver superionic conductors $\text{Ag}_7\text{XY}_5\text{Z}$ (X = Si, Ge, Sn; Y = S, Se; Z = Cl, Br, I)–synthesis and electrical studies. *Solid State Ionics.* 1987, 23(1-2), 21–26. Doi: 10.1016/0167-2738(87)90077-4.
3. 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 Li^+ mobility. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2008, 47(4), 755–758. Doi: 10.1002/anie.200703900.
4. 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.
5. Deiseroth H.-J., Maier J., Weichert K., Nickel V., Kong S.-T., Reiner C. Li_7PS_6 and $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ (X: Cl, Br, 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.
6. 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 $\text{Cu}_6\text{PSe}_5\text{X}$ (X=Br, I) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids.* 2005, 66(5), 882–886. Doi: 10.1016/j.jpcs.2004.10.010.
7. Beeken R.B., Garbe J.J., Petersen N.R., Stoneman M.R. Electrical properties of the $\text{Ag}_6\text{PSe}_5\text{X}$ (X=Cl, Br, I) argyrodites. *J. Phys. Chem. Solids.* 2004, 65, 1011–1014. Doi: 10.1016/j.jpcs.2003.10.060.
8. Malakhovska T.O., Pogodin A.I., Filep M.I., Pop M.M., Shender I.O., Kokhan O.P., Zhukova Yu.P., Studeniak Ya.I., Suslikov L.M. Otrymannia ta vlastyivosti keramichnykh materialiv u systemi $\text{Ag}_6\text{PS}_5\text{I}$ – $\text{Ag}_7\text{GeS}_5\text{I}$. *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. Khimiia.* 2022, 2(48), 16–22. Doi: 10.24144/2414-0260.2022.2.16-22 (in Ukr.).
9. Abbasova V.A., Alverdiyev I.J., Rahimoglu E., Mirzoyeva R.J., Babanly M.B. Phase relations in the Cu_8GeS_6 – Ag_8GeS_6 system and some properties of solid solutions. *Azerbaijan chemical journal.* 2017, 2, 25–29.
10. Pogodin A.I., Filep M.I., Malakhovska T.O., Kokhan O.P., Pop M.M. Vyroshchuvannia monokystaliv arhirodytu Ag_8GeS_6 . *Nauk. visnyk Uzhhorod. un-tu. Ser. Khimiia.* 2022, 1(47), 53–57. Doi: 10.24144/2414-0260.2022.1.53-57 (in Ukr.).
11. Eulenberger G. Die Kristallstruktur der Tieftemperaturmodifikation von Ag_8GeS_6 . *Monatsh. Chem.* 1977, 108, 901–913. Doi: 10.1007/BF00898056.
12. Altomare A., Cuocci C., Giovacazzo, C. Moliterni A., Rizzi R., Corriero N., Falcicchio A. EXPO2013: a kit of tools for phasing crystal structures from powder data. *J. Appl. Crystallogr.* 2013, 46, 1231–1235. Doi: 10.1107/S0021889813013113.
13. 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.