

А.В. Лисиця<sup>1</sup>, М.В. Мороз<sup>2</sup>, Б.Д. Нечипорук<sup>1</sup>, Б.П. Рудик<sup>2</sup>, Б.Ф. Шамсутдинов<sup>1</sup>

## Фізичні властивості нанокристалів сполук цинку отриманих електролітичним методом

<sup>1</sup>Рівненський державний гуманітарний університет, Рівне, Україна

<sup>2</sup>Національний університет водного господарства і природокористування, Рівне, Україна, [b.p.rudyk@nuwm.edu.ua](mailto:b.p.rudyk@nuwm.edu.ua)

Досліджено вплив хімічного складу електроліту і його температури на процес отримання нанокристалів сполук цинку електролітичним методом з використанням цинкових електродів. Проведені рентгеноструктурні дослідження результати яких були використані для визначення складу отриманих зразків та розмірів нанокристалів методами Шеррера та Вільямсона-Холла. Проведено порівняння результатів визначення розмірів нанокристалів обома методами. Обговорюються можливості утворення оксиду цинку, сульфід цинку і гідроцинкиту при використанні електролітичного методу отримання наночастинок. Показано, що в залежності від виду електроліту отримуються нанокристали оксиду цинку, сульфід цинку, гідроцинкиту або їх суміші. Досліджено вплив термічного відпалу на отримані зразки.

**Ключові слова:** оксид цинку, гідроцинкит, рентгеноструктурні дослідження, розміри наночастинок, метод Шеррера, метод Вільямсона-Холла, термічний відпал.

Подано до редакції 02.02.2021; прийнято до друку 05.03.2021.

### Вступ

Створення високоякісних електронних приладів можливе лише при наявності відповідних матеріалів, що володіють необхідними фізичними властивостями, які залежать від їх хімічного складу, чистоти, структурної досконалості, а також від технології їх вирощування та обробки. Перспективними напівпровідниками для застосування в сучасній науці і техніці є сполуки типу  $A^{II}B^{VI}$  й тверді розчини на їх основі [1].

В наш час зріс інтерес до напівпровідникових сполук  $A^{II}B^{VI}$  у зв'язку з отриманням останніх в наноструктурованому вигляді. Оксид цинку (ZnO) є багатофункціональним матеріалом, який широко використовується в напівпровідникових приладах, оптоелектроніці, газових сенсорах, при отриманні діелектричних і магнітних матеріалів. Нанорозмірний оксид цинку має значний потенціал для використання в спінотроніці та фотоніці [2].

Відновлювальні джерела енергії забезпечують виробництво екологічно чистої енергії, яка є

альтернативною до традиційної енергії. Сонячні елементи – широко розповсюджена форма відновлювальної енергії. Сонячні тонкоплівкові елементи на основі  $Cu(In,Ga)Se_2$  вважаються одними з найбільш перспективних для виробництва електричної енергії. В таких сонячних елементах в якості буферних шарів використовується сульфід кадмію (CdS). Якщо в таких сонячних елементах використати, в якості буферного шару, сульфід цинку (ZnS), то зросте коефіцієнт корисної дії такого сонячного елемента [3].

Крім того ZnS знайшов застосування в фотолюмінесцентних і електролюмінесцентних пристроях, оптичних сенсорах, а також з ZnO для виготовлення оптичних вікон в пристроях оптоелектроніки і сонячних елементів [4, 5].

Наночастинок напівпровідників  $A^{II}B^{VI}$  отримують різноманітними методами такими, як: лазерне газофазне напилення, електрохімічне осадження, термічне напилення, магнетронне напилення, механохімічне дроблення, хімічне осадження, молекулярно-пучкова епітаксія, синтез в колоїдних розчинах, гідротермальний синтез,

електричний розряд в воді, тощо. При синтезі наноматеріалів велике значення має розробка способів дослідження і контролю розмірних та структурних характеристик. Основними методами вивчення дисперсності частинок є просвічуюча, скануюча мікроскопія, оптичні дослідження та рентгеноструктурний аналіз [6-8].

Дана робота є фактично продовженням нашої роботи [9] в якій ми досліджували вплив виду електроліту на отримання нанокристалів сполук цинку за кімнатної температури. Метою даної роботи є дослідження впливу температури і складу електроліту на процеси отримання нанокристалів сполук цинку електролітичним методом.

## I. Експеримент і матеріали

Нанокристали сполук цинку було отримано електролітичним методом в відкритому скляному електролізері об'ємом 1 л з цинковими електродами. Для живлення електролізера використовували стабілізоване джерело постійного струму. Для приготування електроліту використовували дистильовану воду і наступні реактиви: сульфат натрію ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), сульфід натрію 9 водневий ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), карбонат натрію ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Маса реактивів, за винятком карбонату натрію, розраховували таким чином, щоб об'єм 0,8 л електроліту містив однакову кількість сульфуру, а саме 2,581 г. В випадку карбонату натрію використовували 5 г останнього на 0,8 л дистильованої води. Процес електролізу проводили за температури електроліту, яка змінювалася від кімнатної до 100 °С.

Тривалість процесу синтезу нанокристалів складала 3 год., а густина струму –  $1,3 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>. Для рівномірного використання матеріалу електродів

здійснювали реверс напрямку постійного струму через 30 хв. Після закінчення електролізу, електроліт фільтрували за допомогою паперового фільтру, отриманий порошокподібний продукт промивали п'ятикратним об'ємом дистильованої води. Зразки висушували на повітрі за кімнатної температури.

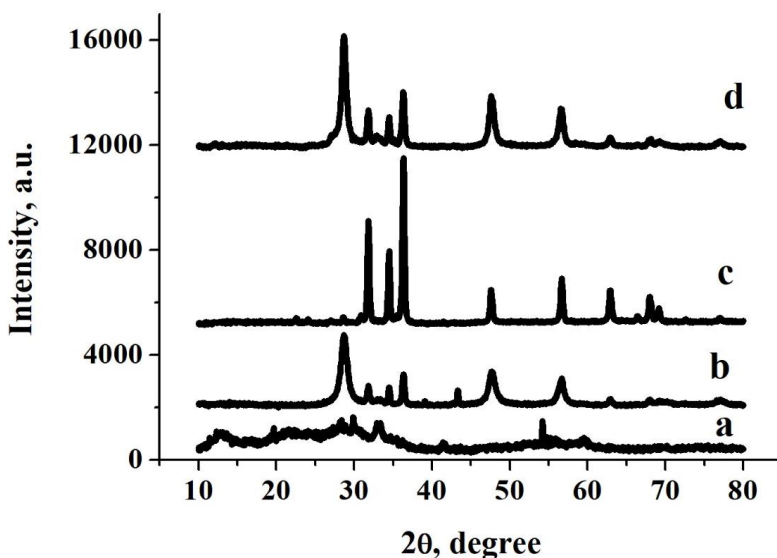
Після висушування частина зразків відпалювалася на повітрі за температури 550 °С впродовж години години. Процес відпалу проводився в електричній печі опору. Температура відпалу контролювалася за допомогою диференціальної хромель-алюмелевої термопари.

Рентгенівські дослідження здійснено на дифрактометрі ДРОН-4 з використанням  $\text{CuK}_\alpha$  випромінювання за кімнатної температури. Сканування дифрактограм виконано за схемою Брегга-Брентано ( $\theta$ - $2\theta$ ). Анодна напруга і сила струму склали 41 кВ і 21 мА відповідно. Крок сканування дифрактограми 0,05°, а час експозиції 5 с.

Для детального аналізу експериментальних дифрактограм їх обробляли наступним чином: кожний експериментальний рефлекс описували функцією Гауса, в результаті чого була отримана наступна інформація: кутове положення  $2\theta$ , півширина (ширина на половині висоти)  $\beta$ , інтегральна інтенсивність  $I$ . Отримані результати використовувалися для інтерпретації експериментальних дифрактограм та розрахунку розмірів нанокристалів і механічних напружень.

## II. Результати дослідження

На рис. 1. наведені експериментальні дифрактограми зразків отриманих електролітичним методом з використанням електроліту приготовленого з  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ . Дифрактограма зразка, отриманого за температури електроліту 19 °С



**Рис. 1.** Рентгенівські дифрактограми зразків отриманих електролітичним методом з електроліту приготовленого з використанням  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ : а – температура електроліту 19 °С; б – температура електроліту 98 °С; с – отриманий за температури електроліту 19 °С і відпалений за температури 550 °С; д – отриманий за температури електроліту 98 °С і відпалений за температури 550 °С.

(рис. 1 а), детально була проаналізована в нашій роботі [9] і на ній присутні рефлекси характерні для сульфиду цинку і гідроцинкиту ( $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ ). Дифрактограма зразка, отриманого за температури електроліту 98 °С (рис. 1 б), суттєво відрізняється від попередньої. Присутні чотири інтенсивні рефлекси з кутовим положенням  $2\theta$ : 28,7°; 47,7°; 56,6°; 77,1°, які індексуються, як (111), (220), (311), (331) кубічної сингонії ZnS.

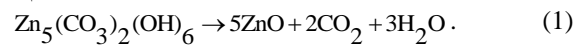
Крім того наявні рефлекси меншої інтенсивності з кутовим положенням  $2\theta$ : 31,8°; 34,5°; 36,3°; 62,9°, які характерні для оксиду цинку, який кристалізується в структурі вюртциту, і мають індекси Міллера (100), (002), (101), (103). Відомо [10], що дифрактограма нанокристалів оксиду цинку отриманих електролітичним методом характеризується рефлексами (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), з кутовим положенням  $2\theta$ : 31,8°; 34,5°; 36,3°; 47,6°; 56,7°; 62,9°; 66,5°; 68,0°; 69,2°. У нашому випадку ми не спостерігаємо рефлексів (102), (110) тому, що їх кутове положення досить близьке до кутового положення рефлексів (220), (311) сульфиду цинку, а їх інтенсивність менша, чим інтенсивність рефлексів ZnS. Рефлекси (200), (112), (201) ZnO мають найменшу інтенсивність і тому вони на дифрактограмі практично не реєструються.

На рис. 2. наведені експериментальні дифрактограми зразків отриманих електролітичним методом з використанням електроліту приготовленого з  $Na_2SO_3$ . Дифрактограма зразка отриманого за температури електроліту 19 °С (рис. 2 а) детально була проаналізована в нашій роботі [9] і на ній присутні рефлекси характерні для оксиду цинку і гідроцинкиту.

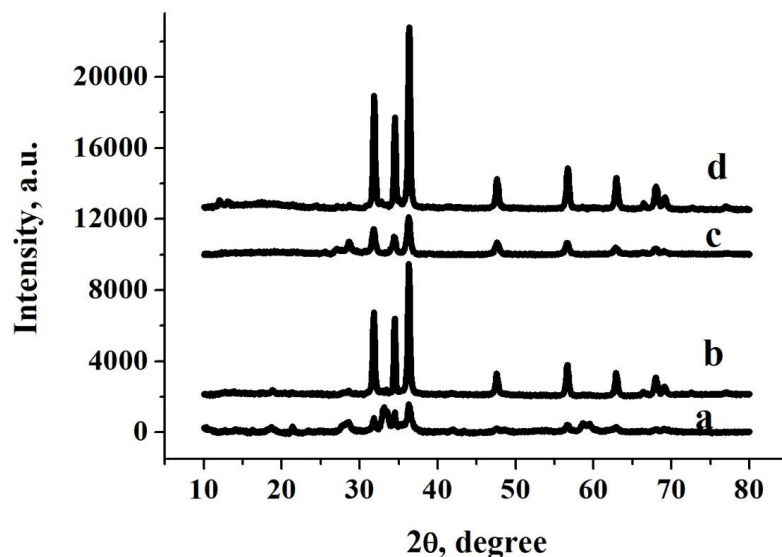
При збільшенні температури синтезу до 98 °С на дифрактограмі (рис. 2 б) спостерігається суттєве збільшення інтенсивності рефлексів характерних для

оксиду цинку і зменшення інтенсивності рефлексів гідроцинкиту. Для експериментального підтвердження утворення гідроцинкиту ми отримали зразки електролітичним методом при використанні електроліту приготовленого з карбонату натрію ( $Na_2CO_3$ ). На рис. 3 показані дифрактограми отриманих зразків за температури електроліту 19 °С і відпалених за температури 550 °С в електричній печі опору на повітрі. Аналіз отриманих дифрактограм і порівняння з літературними даними [11-12] свідчать, що ми отримали електролітичним методом гідроцинкіт.

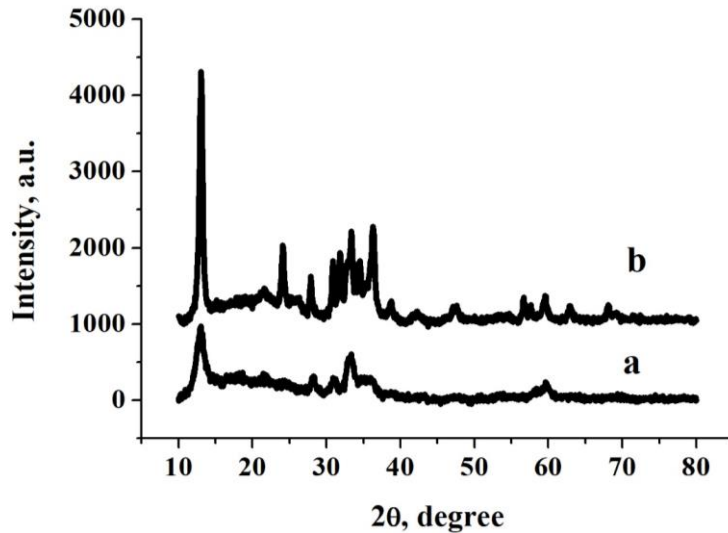
На дифрактограмі зразка відпаленого за температури 550 °С крім рефлексів гідроцинкиту спостерігаються досить слабкі рефлекси характерні для оксиду цинку. Це означає, що в процесі відпалу спостерігається процес розпаду гідроцинкиту за реакцією:



Такий процес ми спостерігали при проведенні диференціального термічного аналізу наших зразків отриманих за температури 19 °С. Вуглекислий газ для утворення гідроцинкиту входить до газів розчинених в дистильованій воді, яка використовується для приготування електроліту, і може поступати в процесі електролізу так, як використовується відкритий електролізер. Крім того, при проведенні синтезу наночастинок за кімнатної температури вміст гідроцинкиту в зразках вищий, ніж за температури 98 °С, про що свідчить інтенсивність рефлексів  $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ . Автори робіт [13-14] спостерігали отримання карбонату кадмію при спробі отримання нанокристалів сполук кадмію, зокрема гідроксиду і сульфиду кадмію електролітичним методом за кімнатної температури. Це підтверджує факт наявності вуглекислого газу в електроліті і можливість його попадання в електролізер в процесі



**Рис. 2.** Рентгенівські дифрактограми зразків отриманих електролітичним методом з електроліту приготовленого з використанням  $Na_2SO_3$ : а – температура електроліту 19 °С; б – температура електроліту 98 °С; с – отриманий за температури електроліту 19 °С і відпалений за температури 550 °С; д – отриманий за температури електроліту 98 °С і відпалений за температури 550 °С.



**Рис. 3.** Рентгенівські дифрактограми зразків отриманих електролітичним методом з електроліту приготовленого з використанням  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ : а – температура електроліту  $19^\circ\text{C}$ ; б – отриманий за температури електроліту  $19^\circ\text{C}$ , відпалений за температури  $550^\circ\text{C}$ .

синтезу наночастинок.

Відпал зразка отриманого за температури електроліту  $19^\circ\text{C}$ , який готувався з використанням  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , приводить істотних змін рентгенівської дифрактограми (рис. 1 с). На дифрактограмі присутні інтенсивні рефлекси оксиду цинку і практично відсутні рефлекси гідроксиду і сульфиду цинку. При відпалі зразка отриманого за температури  $98^\circ\text{C}$  на дифрактограмі (рис. 1 d) спостерігається лише зростання інтенсивності рефлексів оксиду і сульфиду цинку. Відпал зразків отриманих з електроліту з використанням  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  приводить до зростання інтенсивності рефлексів  $\text{ZnO}$  і суттєвого зменшення інтенсивності рефлексів  $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$  (рентгенівські дифрактограми рис. 2 с, рис. 2 d).

Отримані результати обробки експериментальних дифрактограм використовувалися для розрахунку розмірів нанокристалів з використанням формули Дебая–Шеррера [15]:

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cdot \cos \theta}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі рентгенівського випромінювання;  $\beta$  – півширина рефлексу;  $\theta$  – кут дифракції. Фізичне значення півширини обчислено за формулою:

$$\beta = (\beta_1^2 - \beta_2^2)^2, \quad (3)$$

де  $\beta_1$  – експериментальне значення півширини рентгенівського рефлексу;  $\beta_2$  – інструментальне значення півширини рентгенівського рефлексу.

Інструментальне значення півширини рентгенівських рефлексів визначалося на основі аналізу рентгенівських дифрактограм еталонних порошків кремнію і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , які були отримані за таких

самих умов.

Використання формули Дебая–Шеррера ґрунтується на залежності півширини рентгенівського рефлексу від розміру частинки, причому з зменшенням розміру півширина зростає. Крім того відомо, що на півширину впливають механічні напруження, які виникають за рахунок дефектів кристалічної структури. В випадку наночастинок дефекти можуть проявлятися за рахунок того, що в них значна частина атомів знаходиться на поверхні, крім того вклад поверхневих атомів буде зростати з зменшенням розмірів.

Тому для визначення розміру і механічних напружень, які діють в нанокристалах  $\text{ZnO}$  ми використали метод Вільямсона-Холла [15-16]. В цьому методі півширина рефлексу описується формулою:

$$\beta = \frac{0.89\lambda}{D \cos \theta} + 4\epsilon \tan \theta, \quad (4)$$

де  $\epsilon$  – відносне видовження. В останній формулі перший доданок показує, який вклад в півширину вносить розмірний ефект, а другий – обумовлений вкладом механічних напружень. Залежність (4) запишемо у вигляді:

$$\beta \cos \theta = \frac{0.89\lambda}{D} + 4\epsilon \sin \theta. \quad (5)$$

За законом Гука при пружних деформаціях механічна напруга дорівнює:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (6)$$

де  $E$  – модуль Юнга. Визначивши відносне видовження згідно закону Гука, отримаємо залежність:

$$\beta \cos \theta = \frac{0.89\lambda}{D} + \frac{4\sigma \sin \theta}{E}. \quad (7)$$

Якщо графік цієї залежності побудувати в системі координат  $4\sin\theta/E$ ,  $\beta\cos\theta$ , то отримаємо пряму лінію, з якої можна знайти розмір нанокристалів  $D$  і механічну напругу  $\sigma$ . Для

монокристалічних тіл модуль Юнга буде залежати від напрямку всередині монокристалу, тобто від значень індексів Міллера ( $h, k, l$ ), і від виду кристалічної системи. Ця залежність для оксиду цинку, який належить до гексагональної системи, описується формулою [17]:

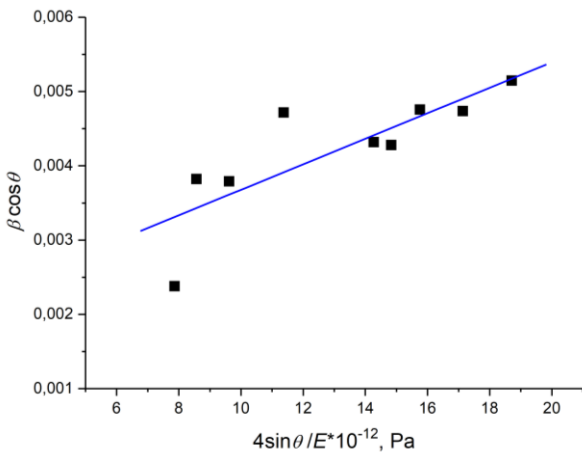
$$E^{-1} = \frac{(h^2 + k^2 - hk)^2 a^4 s_{11} + l^4 c^4 s_{33} + (h^2 + k^2 - hk) l^2 a^2 c^2 (s_{44} + 2s_{13})}{((h^2 + k^2 - hk) a^2 + l^2 c^2)^2}, \quad (8)$$

де  $S_{11}, S_{13}, S_{33}, S_{44}$  – коефіцієнти пружної податливості, а  $i, c$  параметри елементарної комірки ZnO. Для сульфїду цинку, який кристалізується в кубічній сингонії, ця залежність має вигляд [17]:

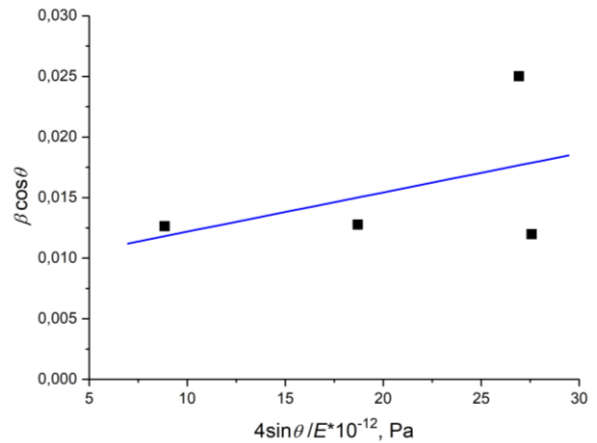
$$E^{-1} = s_{11} - \frac{(2s_{11} - 2s_{12} - s_{44})(h^2 k^2 + k^2 l^2 + l^2 h^2)}{(h^2 + k^2 + l^2)}, \quad (9)$$

де  $S_{11}, S_{12}, S_{44}$  – коефіцієнти пружної податливості ZnS.

Використавши відомі коефіцієнти пружної податливості, параметри елементарних комірок [18] оксиду і сульфїду цинку, а також індекси Міллера рефлексів, які спостерігаються на експериментальних дифрактограмах, ми розраховали значення модуля Юнга для наших рефлексів. На рис. 4 і рис. 5 показано приклади використання методу Вільямсона-Холла для оксиду цинку зразка отриманого з електроліту ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) за температури 98 °C і сульфїду цинку зразка отриманого з електроліту ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) за температури 98 °C і відпаленого на повітрі при температурі 550 °C відповідно. Видно що спостерігається відхилення експериментальних точок від прямої лінії, тому для отримання достовірних значень величини  $0.89 \lambda/D$  і механічної напруги був



**Рис. 4.** Результати використання методу Вільямсона-Холла для нанокристалів ZnO, отриманих з електроліту з використанням  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  і за температури електроліту 98 °C.



**Рис. 5.** Результати використання методу Вільямсона-Холла для нанокристалів ZnS, отриманих з електроліту з використанням  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (температура електроліту 98 °C) і відпаленого за температури 550 °C.

використаний метод найменших квадратів.

Результати розрахунків розмірів нанокристалів методом Дебая-Шерера для зразків, отриманих з використанням різних електролітів і після термічного відпалу наведені в табл. 1. Для визначення розмірів нанокристалів конкретної речовини використовувалися декілька рефлексів, а тому в табл. 1. наведені середні арифметичні значення розмірів отриманих з різних рефлексів. З таблиці видно, що якщо для приготування електроліту використовувати сульфїт натрію, то при кімнатній температурі отримується суміш оксиду цинку і гідроцинкїту. Підвищення температури електроліту до 98 °C, а також відпал приводить практично до утворення лише ZnO і зміни розмірів останнього.

Якщо для приготування електроліту використати

Таблиця 1

Результати визначення розмірів нанокристалів досліджуваних зразків методом Дебая-Шерера

Електроліт	Температура		Речовина		
	синтез	відпал	ZnS	ZnO	Zn <sub>5</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
			D, нм	D, нм	D, нм
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	19°C	-	-	25,1	5,6
	19°C	550°C	-	17,0	-
	98°C	-	-	34,1	-
	98°C	550°C	-	26,8	-
Na <sub>2</sub> S·9H <sub>2</sub> O	19°C	-	1,6	-	2,3
	19°C	550°C	-	33,2	-
	98°C	-	8,9	24,1	-
	98°C	550°C	9,6	18,2	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	19°C	-	-	-	1,6
	19°C	550°C	-	15,0	2,3

Таблиця 2

Результати використання методу Вільямсона-Холла для дослідження нанокристалів отриманих зразків

Електроліт	Температура		Речовина			
	синтез	відпал	ZnS		ZnO	
			D, нм	$\sigma \cdot 10^8$ , Па	D, нм	$\sigma \cdot 10^8$ , Па
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	19°C	-	-	-	52,1	3,4
	19°C	550°C	-	-	13,7	-1,2
	98°C	-	-	-	69,0	1,7
	98°C	550°C	-	-	66,0	2,5
Na <sub>2</sub> S·9H <sub>2</sub> O	19°C	-	-	-	-	-
	19°C	550°C	-	-	33,1	0,18
	98°C	-	7,2	-1,6	25,5	0,98
	98°C	550°C	20,9	0,53	15,3	3,2

Na<sub>2</sub>S·9H<sub>2</sub>O, то за температури останнього 19 °С, отримується сульфід цинку і гідроцинкіт. Підвищення температури електроліту до 98 °С приводить до отримання сульфідів і оксиду цинку (рефлекси гідроцинкіту на дифрактограмі відсутні).

Відпал зразка отриманого за кімнатної температури приводить до появи нанокристалів ZnO розміром 33,2 нм. Цей факт може бути пояснений окисленням сульфідів цинку і розпадом гідроцинкіту, як було вказано вище.

В табл. 2 наведені результати використання методу Вільямсона-Холла для визначення розмірів нанокристалів і механічних напружень для речовин отриманих електролітичним методом.

Для зразка отриманого з використанням електроліту на основі Na<sub>2</sub>S·9H<sub>2</sub>O за температури 19°C метод Вільямсона-Холла не використовували так, як інтенсивність рефлексів кубічного ZnS досить мала. Крім того, цей метод не використовувався для гідроцинкіту.

В роботах [19-20] автори досліджували фізичні властивості нанокристалів отриманих електролітичним методом з використанням електроліту на основі тіосульфату натрію. Було встановлено, що при зміні температури електроліту від кімнатної до 85 °С отримуються нанокристали сульфідів цинку і гідроцинкіту, а в інтервалі

температур (85 - 100) °С – нанокристали оксиду і сульфідів цинку. За кімнатної температури електроліту розміри нанокристалів ZnS склали 1,6 нм, за температури 98°C – 1,8 нм (ZnS) і 98 нм (ZnO). В нашому випадку розміри нанокристалів сульфідів цинку з використанням формули Дебая-Шеррера складають також 1,6 нм (електроліт на основі Na<sub>2</sub>S·9H<sub>2</sub>O, температура 19°C), а розміри наночастинок оксиду цинку менші. Збільшення температури синтезу до 98°C в останньому випадку приводить до росту розмірів ZnS до 8,9 нм.

Автори роботи [21] використовували змішування розчинів ацетату цинку і сульфідів натрію для отримання ZnS в магнітній мішалці за кімнатної температури. В результаті вони отримали наночастинку сульфідів цинку розмірами 1,8 нм. В роботі [22] автори досліджували суміші наночастинок сульфідів і оксидів цинку. Нанокристали сульфідів і оксидів цинку отримали в магнітній мішалці за кімнатної температури використовуючи розчини хлоридів цинку і сульфідів натрію, а також розчини ацетату цинку і гідроксидів натрію відповідно. Розміри отриманих наночастинок визначали за формулою Дебая-Шеррера склали 5,34 і 2,1 нм відповідно для ZnO і ZnS. Досліджували суміші отримані змішуванням суспензій наночастинок в етанолі з молярним відношенням

ZnO до ZnS: 1:5 і 5:1. При відношенням ZnO до ZnS 1:5 на дифрактограмі реєструвалися рефлекси характерні, як для оксиду так і для сульфїду цинку. При відношенням ZnO до ZnS 5:1 на дифрактограмі реєструвалися рефлекси характерні тільки для оксиду цинку. Подібні результати ми отримали за використання електроліту на основі  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ .

$\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , за кімнатної температури обов'язково утворюються наночастинки гідроцинку.

3. Якщо використовувати електроліт з  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , то синтезуються наночастинки оксиду цинку.

4. За використання електроліту на основі  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  за температури  $98^\circ\text{C}$  синтезуються нанокристали сульфїду і оксиду цинку.

## Висновки

1. Склад електроліту і його температура суттєво впливають на процеси утворення нанокристалів сполук цинку за використання електролітичного методу.

2. При використанні електроліту, приготовленого з використанням  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  і

*Лисиця А.В.* – д.б.н., доцент;

*Мороз М.В.* – к.ф.-м.н., доцент;

*Нечипорук Б.Д.* – к.ф.-м.н., доцент;

*Рудик Б.П.* – завідувач навчальними лабораторіями кафедри хімії та фізики;

*Шамсутдинов Б.Ф.* – доцент.

- [1] H.M. Okrepka, V.M. Tomashyk, *Physics and Chemistry of Solid State* 16(4), 711 (2015) (DOI: [10.15330/pcss.16.4.711-715](https://doi.org/10.15330/pcss.16.4.711-715)).
- [2] J. Shah, R. Kumar Kotnala, *J. of Physics and Chemistry of Solids* 108, 15 (2017) (DOI: [10.1016/j.jpccs.2017.04.007](https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2017.04.007)).
- [3] M.W. Bouabdelli, F. Rogti, N. Lakhdar, M. Maache, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 12(3), 03002 (2020) (DOI: [10.21272/jnep.12\(3\).03002](https://doi.org/10.21272/jnep.12(3).03002)).
- [4] A. Gadalla, M.S. Abd El-Sadek, R. Hamood, *Chalcogenide Letters* 15(5), 281 (2018).
- [5] Ankita, S. Kumar, S. Saralch, D. Pathak, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 11(4), 04027 (2019) (DOI: [10.21272/jnep.11\(4\).04027](https://doi.org/10.21272/jnep.11(4).04027)).
- [6] O.Z. Didenko, P.E. Strizhak, G.R. Kosmambetova, N.S. Kalchuk, *Physics and Chemistry of Solid State* 10(1), 106 (2009).
- [7] V.S. Burakov, A.A. Nevar, M.I. Nedel'ko et al, *Tech. Phys. Lett.* 34, 679 (2008). (DOI: [10.1134/S1063785008080166](https://doi.org/10.1134/S1063785008080166)).
- [8] C. Chen, B. Yu, Ping Liu, J. Liu and L. Wang, *Journal of ceramic processing research* 12(4), 420 (2011).
- [9] N.B. Danilevskaya, A.V. Lysytsya, M.V. Moroz et al, *Tech. Phys.* 63, 411 (2018) (DOI: [10.1134/S1063784218030076](https://doi.org/10.1134/S1063784218030076)).
- [10] N.B. Danilevska, M.V. Moroz, B.D. Nechyporuk, N.Y. Novoseletsky, B.P. Rudyk, *Journal of Physical Studies* 20(3), 3601 (2016), (DOI: [10.30970/jps.20.3601](https://doi.org/10.30970/jps.20.3601)).
- [11] N.A. Salahuddin, M. El-Kemary, E.M. Ibrahim, *Nanoscience and Nanotechnology* 5(4), 82 (2015) (DOI: [10.5923/j.nn.20150504.02](https://doi.org/10.5923/j.nn.20150504.02)).
- [12] W. Wen-Zhong, L. Yu-Jie, S. Hong-Long, Z. Gu-Ling, *Chinese Physics Letters* 31(9), 097802-1 (2014) (DOI: [10.1088/0256-307X/31/9/097802](https://doi.org/10.1088/0256-307X/31/9/097802)).
- [13] S.YU. Kapitula, B.D. Nechyporuk, N.B. Danilevs'ka, B.A. Tataryn, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 7, 03050 (2015).
- [14] N.B. Danilevs'ka, M.V. Moroz, B.D. Nechyporuk, M.Yu. Novoselets'kyu, V.O. Yukhymchuk, *J. Nano-Electron. Phys.* 8, 02041 (2016).
- [15] V.D. Mote, Y. Purushotham, B.N. Dole, *Journal of theoretical and applied physics* 6, 1, 2251, (2012) (DOI: [10.1186/2251-7235-6-6](https://doi.org/10.1186/2251-7235-6-6)).
- [16] K. Karthik, S. Dhanuskodi, *AIP Conference Proceedings* 1731, 050021 (2016) (DOI: [10.1063/1.4947675](https://doi.org/10.1063/1.4947675)).
- [17] Yu.I. Sirotnin, M.P. Shaskol'skaya, *Osnovy kristalofiziki* (Nauka, Moscow, 1975).
- [18] S. Adachi, *Handbook on physical properties of semiconductors Vol. 3, II-VI Compound Semiconductor* (Springer, Boston, 2004) (DOI: [10.1007/1-4020-7821-8](https://doi.org/10.1007/1-4020-7821-8)).
- [19] K. Ozga, J. Michel, J. Ebothé, B.D. Nechyporuk, I.V. Kityk, A.A. Albassam, A.M. El-Naggar, A.O. Fedorchuk, *Physica E*, 81, 281 (2016) 289 (DOI: [10.1016/j.physe.2016.03.041](https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.03.041)).
- [20] N.B. Danilevskaya, N.V. Moroz, B.D. Nechyporuk, B.P. Rudyk, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 8(1), 01006 (2016) (DOI: [10.21272/jnep.8\(1\).01006](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01006)).
- [21] A. Jain, S. Panwar, T.W. Kang, S. Kumar, *J Mater Sci: Mater Electron* 24, 5147 (2013) (DOI: [10.1007/s10854-013-1537-z](https://doi.org/10.1007/s10854-013-1537-z)).
- [22] P.V. Raleaooaa, A. Roodt, G.G. Mhlongoc, D.E. Motaungc, R.E. Kroona, O.M. Ntwaeborwad, *Physica B* 507, 13 (2017) (DOI: [10.1016/j.physb.2016.11.031](https://doi.org/10.1016/j.physb.2016.11.031)).

A.V. Lysytsya<sup>1</sup>, M.V. Moroz<sup>2</sup>, B.D. Nechporuk<sup>1</sup>, B.P. Rudyk<sup>2</sup>, B.F. Shamsutdinov<sup>1</sup>

## Physical Properties of Zinc Compounds Obtained by Electrolytic Method

<sup>1</sup> Rivne State University of Humanities, Rivne, Ukraine, [info@rshu.edu.ua](mailto:info@rshu.edu.ua)

<sup>2</sup> National University of Water Management and Environmental Management, Rivne, Ukraine, [mail@nuwm.edu.ua](mailto:mail@nuwm.edu.ua)

The influence of the chemical composition of the electrolyte and its temperature on the process of synthesis of nanosized zinc compounds by electrolytic method using zinc electrodes was investigated. X-ray studies have been conducted and its results were used to determine the composition of the obtained nanocrystal samples and its dimensioning using the Debye and the Williamson Hall methods. Comparisons of the results of dimensioning of nanocrystals by both methods were made. Also discussed the possibilities of synthesis of nanoparticles of zinc oxide, zinc sulfide and hydrozincite by electrolytic method. It is shown, that depending on the electrolyte composition, nanocrystals of zinc oxide, zinc sulfide, hydrozincite or their mixture are obtained. The effect of thermal annealing on the samples composition and dimensioning was investigated.

**Keywords:** zinc oxide, zinc sulfide, hydrozincite, XRD analysis, nanoparticles dimensioning, Debye-Sherrer formula, Williamson Hall method, thermal annealing.