

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-2-13>

Юрій ХМАРУК

аспірант, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Олександр ЯНЧУК

кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0375-0475>

SCOPUS AUTHOR ID: 24287260700

Олексій ВИШНЕВСЬКИЙ

кандидат геолого-мінералогічних наук, провідний науковий співробітник, відділ проблем алмазоносності, Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П.Семененка Національної Академії наук України, просп. Академіка Палладіна 34, м. Київ, Україна, 03142

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7206-2185>

SCOPUS AUTHOR ID: 36621586300

Ярослав ЄНДРИКА

доктор інженерії кафедри автоматики, електротехніки і оптоелектроніки, Ченстоховський політехнічний університет, вул. Армії Крайової 19, м. Ченстохова, Польща, 42-200

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7047-6624>

SCOPUS AUTHOR ID: 55053482500

Анна МІГАЛЬСЬКА-ЗАЛАС

доктор габілітований, професор інституту фізики, Університет імені Яна Длугоша в Ченстохові, вул. Армії Крайової, 13/15, м. Ченстохова, Польща, 42-200

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1663-6065>

SCOPUS AUTHOR ID: 6602621194

Бібліографічний опис статті: Хмарук, Ю., Янчук, О., Вишневський, О., Єндрика, Я., Мігальська-Залас, А. (2025). Вплив концентрації вихідних речовин на структурні та морфологічні характеристики електрохімічно синтезованих нанокристалів CdS. *Фізика та освітні технології*, 2, 94–101, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-2-13>

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВИХІДНИХ РЕЧОВИН НА СТРУКТУРНІ ТА МОРФОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНО СИНТЕЗОВАНИХ НАНОКРИСТАЛІВ CdS

У роботі представлено результати комплексного дослідження впливу концентрації хлориду натрію в електrolіті на структурні, морфологічні та нелінійно-оптичні властивості нанокристалів кадмій сульфід (CdS). Нівпровідникові сполуки групи A_2B_6 є перспективними матеріалами для сучасної оптоелектроніки та фотоніки завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям, що виникають внаслідок квантово-розмірних ефектів. Синтез наноструктур здійснювався методом електролізу водного розчину, що містив тіокарбамід та хлорид натрію, з використанням розчинного кадмієвого анода. Процес проводили при температурі 363 K та сталій густині струму 0,192 А/см². Ключовою особливістю роботи є аналіз впливу концентрації NaCl у широкому діапазоні від 0,2 до 2,0 М на формування кристалічної структури осаду.

За допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM) встановлено, що синтезовані нанокристали мають переважно пластівчасту морфологію. Розмірний аналіз виявив полідисперсність зразків: діаметр частинок варіюється в межах 5–70 нм, при цьому середній розмір становить 35–40 нм, а товщина пластівців – 5–25 нм. Важливим експериментальним результатом є те, що зміна концентрації солі-прекурсору не чинить суттєвого впливу на середні геометричні параметри наночастинок, що свідчить про стабільність механізмів зародкоутворення в обраних умовах. Рентгенівська дифрактометрія (XRD) показала, що всі отримані зразки є двофазними системами, що містять суміш метастабільної кубічної фази (сфалерит) та термодинамічно стабільної гексагональної фази (вюрцит). Виявлено нелінійну залежність фазового складу від концентрації NaCl: вміст ацетричної фази вюрциту варіюється в межах 74–90 %, досягаючи максимуму при концентрації 1,4 М.

Особливу увагу приділено дослідженню нелінійно-оптичних властивостей синтезованих нанопорошків методом генерації другої гармонії (ГДГ) під дією лазерного випромінювання. Експериментально підтверджено високу ефективність генерації другої оптичної гармонії. Встановлено чітку кореляцію між фазовим складом нанокристалів та величиною нелінійно-оптичного відгуку. Зразок із максимальним вмістом нецентросиметричної фази вюрциту (90 %) продемонстрував найвищу ефективність перетворення частоти (вихідний сигнал 1150 мВ), тоді як зразки з меншим вмістом цієї фази показали нижчі результати. Отримані дані доводять можливість цілеспрямованого керування функціональними властивостями наноматеріалів шляхом оптимізації складу електроду, що є важливим для створення нових ефективних середовищ для нелінійної оптики.

Ключові слова: нанокристали, електрохімічний синтез, рентгенівська дифракція, морфологія, фазовий склад, генерація другої гармонії.

Yurii KHMARUK

Postgraduate Student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Oleksandr YANCHUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Chemistry and Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0375-0475>

SCOPUS AUTHOR ID: 24287260700

Oleksii VYSHNEVSKIY

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Department of Diamond Problems, M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NAS of Ukraine, 34 Academician Paladin ave., Kyiv, Ukraine, 03142

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7206-2185>

SCOPUS AUTHOR ID: 36621586300

Jaroslav JEDRYKA

Doctor of Engineering at the Department of Automation, Electrical Engineering, and Optoelectronics, Częstochowa University Of Technology, 17 Academician Paladin ave., Częstochowa, Poland, 42-200

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7047-6624>

SCOPUS AUTHOR ID: 55053482500

Anna MIGALSKA-ZALAS

Doktor Habilitatus, Professor of Institute of Physics, Jan Dlugosz University in Częstochowa, 13/15 Armii Krajowej str., Częstochowa, Poland, PL-42-200

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1663-6065>

SCOPUS AUTHOR ID: 6602621194

To cite this article: Khmaruk, Yu., Yanchuk, O., Vyshnevskiy, O., Jedryka, J., Migalska-Zalas, A. (2025). Vplyv kontsentratsii vykhidnykh rehovyn na strukturni ta morfolohichni kharakterystyky elektrokhimichno syntezyovanykh nanokrystaliv CdS [Influence of precursor concentration on structural and morphological characteristics of electrochemically synthesized CdS nanocrystals]. *Physics and Educational Technology*, 2, 94–101, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-2-13>

INFLUENCE OF PRECURSOR CONCENTRATION ON STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ELECTROCHEMICALLY SYNTHESIZED CDS NANOCRYSTALS

The paper presents the results of a comprehensive study on the influence of sodium chloride concentration in the electrolyte on the structural, morphological, and nonlinear optical properties of cadmium sulfide (CdS) nanocrystals. A_2B_6 semiconductor compounds are promising materials for modern optoelectronics and photonics due to unique physicochemical properties arising from quantum confinement effects. The synthesis of nanostructures was carried out by electrolysis of an aqueous solution containing thiourea and sodium chloride, using a soluble cadmium anode. The process was conducted at a temperature of 363 K and a constant current density of 0.192 A/cm². A key feature of the work is the analysis of the NaCl concentration influence in a wide range from 0.2 to 2.0 M on the formation of the precipitate crystal structure.

Using scanning electron microscopy (SEM), it was established that the synthesized nanocrystals possess predominantly flake-like morphology. Size analysis revealed the polydispersity of the samples: the particle diameter varies within 5–70 nm, with an average size of 35–40 nm, and the flake thickness is 5–25 nm. An important experimental result is that the change in precursor salt concentration does not exert a significant influence on the average geometric parameters of nanoparticles, indicating the stability of nucleation mechanisms under the chosen conditions. X-ray diffraction (XRD) showed that all obtained samples are two-phase systems containing a mixture of metastable cubic phase (sphalerite) and thermodynamically stable hexagonal phase (wurtzite). A nonlinear dependence of the phase composition on NaCl concentration was revealed: the content of the acentric wurtzite phase varies within 74–90 %, reaching a maximum at a concentration of 1.4 M.

Particular attention is paid to the study of the nonlinear optical properties of the synthesized nanopowders using the Second Harmonic Generation (SHG) method under laser radiation. High efficiency of second optical harmonic generation was experimentally confirmed. A clear correlation between the phase composition of nanocrystals and the magnitude of the nonlinear optical response was established. The sample with the maximum content of the non-centrosymmetric wurtzite phase (90 %) demonstrated the highest frequency conversion efficiency (output signal 1150 mV), whereas samples with a lower content of this phase showed lower results. The obtained data prove the possibility of targeted control of the functional properties of nanomaterials by optimizing the electrolyte composition, which is important for creating new effective media for nonlinear optics.

Key words: nanocrystals, electrochemical synthesis, X-ray diffraction, morphology, phase composition, second harmonic generation.

Вступ. Напівпровідникові нанокристали (НК) або квантові точки привертають значну увагу дослідників завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям, які суттєво відрізняються від властивостей об'ємних матеріалів. Ці матеріали знаходять широке практичне застосування в сучасній наноелектроніці та фотоніці, зокрема як компоненти оптоелектронних транзисторів, сонячних елементів, світлодіодів та флуоресцентних біологічних міток для довготривалої візуалізації живих клітин (Jaiswal, 2003; Brown 2002; Chan, 2002; Sweeney, 2004). Серед широкого класу напівпровідників сполуки групи A_2B_6 , зокрема сульфід кадмію (CdS), займають особливе місце завдяки своїй ширині забороненої зони (~2.42 eV), що робить їх перспективними для роботи у видимій області спектра (Alivisatos, 1996).

Крім того, халькогенідні нанокристали демонструють відмінні фотомеханічні характеристики для лазерного застосування. Це зумовлено їхньою високою фототермічною стабільністю під дією зовнішнього лазерного випромінювання (Ozga, 2018) у поєднанні з високим ангармонізмом фононів, що

є типовим для халькогенідів (Parasyuk, 2017; Krymus, 2017). Нелінійно-оптичні властивості таких структур, зокрема генерація другої та третьої гармонік, активно досліджуються з метою створення нових матеріалів для лазерних модулаторів та оптичних перемикачів (Ebothé, 2018; Tan, 2016; Wang, 2009; Misra, 2016).

Відомо, що оптичні та електронні властивості нанокристалів критично залежать від їхніх геометричних параметрів, таких як розподіл частинок за розмірами та їхня форма (Peng, 2000). Зменшення розмірів частинок до нанометрового діапазону призводить до прояву квантово-розмірних ефектів, що дозволяє керувати шириною забороненої зони та спектрами поглинання (Banerjee, 2000). Тому ключовим викликом у синтезі напівпровідникових нанокристалів є точний контроль цих властивостей шляхом маніпулювання параметрами синтезу (Li, 2005).

Існує багато методів отримання наночастинок CdS, включаючи хімічне осадження, сольвотермальний синтез, мікрохвильове опромінення та золь-гель метод (Karan, 2007). Проте, серед різноманітних підходів, електрохімічні

методи (електроліз) виглядають особливо перспективними завдяки своїй гнучкості, відносній простоті апаратурного оформлення та можливості точного контролю процесу (Yanchuk, 2012). Електрохімічний синтез дозволяє отримувати нанопорошки високої чистоти, регулюючи такі параметри, як густина струму, температура, природа розчинника та склад електроліту (Kityk, 1996; Tkaczyk, 2008). Цей метод, захищений патентом України (Янчук, 2014), дозволяє отримувати наноструктури з контрольованою морфологією.

Важливу роль у формуванні наночастинок відіграють умови середовища, зокрема наявність полімерних матриць (наприклад, полівінілового спирту – ПВС) або поверхнево-активних речовин, які запобігають агломерації та стабілізують ріст кристалів (Fediv, 2010). Водночас концентрація прекурсорів (вихідних речовин) в електроліті є фундаментальним фактором, що визначає кінетику зародкоутворення та росту кристалів, а отже, і кінцевий фазовий склад та дисперсність продукту. Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених синтезу CdS, вплив концентрації солі-прекурсора (зокрема NaCl) при електрохімічному синтезі на структурно-морфологічні характеристики нанокристалів залишається вивченим недостатньо.

Метою даної роботи є встановлення впливу концентрації хлориду натрію в електроліті на фазовий склад, морфологію та дисперсність нанокристалів CdS, отриманих методом електрохімічного синтезу, а також аналіз їхньої структурної якості методами рентгенівської дифракції та електронної мікроскопії.

Методика експерименту. Нанорозмірні частинки кадмій сульфід (CdS) отримували методом електролізу водного розчину хлориду натрію та тіокарбаміду (концентрація 15,22 г/л або 0,20 М) з використанням розчинного кадмієвого анода. Синтез проводили при температурі 363 К та сталій густині струму 0,192 А/см². Тривалість електролізу становила 20 хвилин для всіх експериментів.

Для дослідження впливу концентрації прекурсору на властивості наночастинок було проведено серію з 10 дослідів, у яких концентрація натрій хлориду варіювалася в інтервалі від 0,2 до 2,0 М з кроком 0,2 М. Основні параметри синтезу наведено в Таблиці 1.

Процедура синтезу. Вихідні компоненти (хлорид натрію та тіокарбамід) розчиняли у гарячій дистильованій воді у мірній колбі, доводячи об'єм до мітки при температурі експерименту (90 °C). Отриманий розчин переносили у термостатований електролізер об'ємом 400 мл. У розчин занурювали два циліндричні електроди: кадмієвий анод та сталевий катод (площа поверхні кожного 5,0 см²), підключені до джерела живлення В5-46.

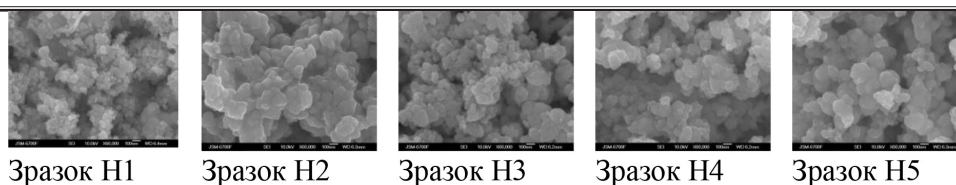
Після досягнення заданої температури вмикали джерело живлення та таймер. Внаслідок розчинення анода в об'ємі електроліту утворювалися частинки оранжевого кольору, які осідали на дно. Після завершення синтезу електролізер охолоджували до кімнатної температури. Вміст переносили у більшу ємність з дистильованою водою для відстоювання осаду протягом доби. Процедуру декантації та промивання осаду дистильованою водою повторювали 5 разів до повного видалення залишків електроліту. Отриманий порошок висушували у сушильній шафі при 50 °C. Кадмієві електроди промивали, висушували та зважували для контролю витрати матеріалу [посилання на патент].

Методи дослідження. Фазовий склад синтезованих порошків досліджували методом рентгенівської дифракції на дифрактометрі DRON-4-13 (випромінювання Cu-K α). Морфологію та розміри частинок визначали за допомогою польового скануючого електронного мікроскопа JSM-6700F («JEOL») (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України). Перед зйомкою на поверхню зразків методом наплення наносили плівку платини товщиною 30 Å. Зйомку проводили в режимі вторинних електронів (SE) при прискорювальній напрузі 10 кВ та струмі пучка 0,65 нА.

Таблиця 1

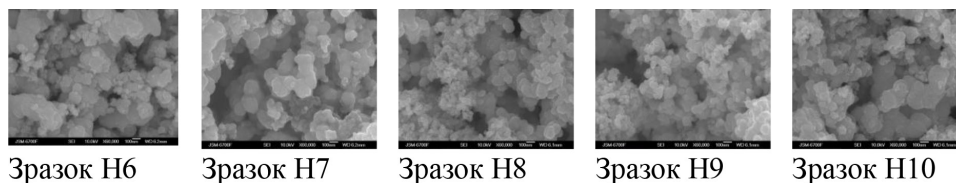
Умови електрохімічного синтезу досліджуваних зразків CdS (серія Н)

Зразок	Н1	Н2	Н3	Н4	Н5	Н6	Н7	Н8	Н9	Н10
[NaCl], М	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Напруга, В	8,7	6,1	3,9	4,0	3,4	3,8	3,5	2,3	2,3	2,1



Зразок Н1 Зразок Н2 Зразок Н3 Зразок Н4 Зразок Н5

Рис. 1. SEM-зображення зразків сульфідів кадмію, синтезованих за однакової температури (90 °C), часу електролізу (20 хв), густини струму (0,192 А/см²), концентрації тіокарбаміду (0,2 моль/л), але різної концентрації NaCl (моль/л): Н1 – 0,2; Н2 – 0,4; Н3 – 0,6; Н4 – 0,8; Н5 – 1,0



Зразок Н6 Зразок Н7 Зразок Н8 Зразок Н9 Зразок Н10

Рис. 2. SEM-зображення зразків сульфідів кадмію, синтезованих за однакової температури (90 °C), часу електролізу (20 хв), густини струму (0,192 А/см²), концентрації тіокарбаміду (0,2 моль/л), але різної концентрації NaCl (моль/л): Н6 – 1,2; Н7 – 1,4; Н8 – 1,6; Н9 – 1,8; Н10 – 2,0

Експериментальні результати та їх обговорення. Як показано на рис. 1 і 2, частинки мають форму переважно пластівців. Частинки порошку мають розміри в широкому діапазоні від 5 до 70 нм. Діаметр пластівців – 15 ÷ 70 нм, а товщина – 5 ÷ 25 нм. Середні діаметри частинок знаходяться в діапазоні 35–40 нм. Вплив концентрації натрій хлориду на діаметр частинок-пластівців незначний.

Детальний аналіз геометричних параметрів показав, що діаметр пластівців становить 15–70 нм, а їх товщина – 5–25 нм. Середній діаметр частинок для всієї серії зразків (Н1–Н10) знаходиться в межах 35–40 нм.

Важливим результатом є те, що зміна концентрації натрій хлориду в електроліті в діапазоні від 0,2 до 2,0 М практично не впливає на середній розмір та форму частинок-пластівців. Це

вказує на те, що механізм росту кристалітів та їх агрегація в даних умовах синтезу визначаються переважно природою розчинника та стабілізатора, а не іонною силою розчину прекурсору.

Рентгеноструктурний аналіз (XRD) підтвердив, що отримані порошки є чистим кадмій сульфідом (рис. 3).

На дифрактограмах усіх зразків присутні рефлекси, характерні для двох кристалічних модифікацій: гексагональної (вюрцит, просторова група $P6_3mc$); кубічної (сфалерит, просторова група $F43m$). Таким чином, одержаний порошкоподібний продукт є чистим кадмій сульфідом зі змішаною гексагональною та кубічною структурою типу вюрциту та сфалериту відповідно. Розрахунок кількісного співвідношення фаз (Таблиця 2) показав, що у всіх зразках домінує фаза вюрциту.

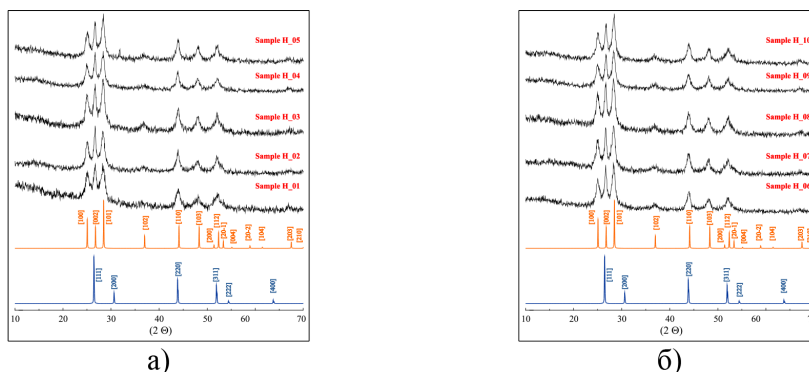


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні порошкограми зразків кадмій хлориду, синтезованих за однакової температури (90 °C), часу електролізу (20 хв), густини струму (0,192 А/см²), концентрації тіокарбаміду (0,2 моль/л), але різної концентрації NaCl (моль/л): а) Н1 – 0,2; Н2 – 0,4; зразок Н3 – 0,6; Н4 – 0,8; Н5 – 1,0; б) Н6 – 1,2; Н7 – 1,4; зразок Н8 – 1,6; Н9 – 1,8; Н10 – 2,0

Вміст вюрциту та сфалериту

Зразок	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
Вміст вюрциту, %	82	85	84	86	87	74	90	86	77	80
Вміст сфалериту, %	18	15	16	14	13	26	10	14	23	20

Вміст гексагональної фази варіюється в межах 74–90 %.

Встановлено, що концентрація натрій хлориду впливає на фазовий баланс нелінійно. Найвищий вміст ацентричної фази вюрциту (90 %) зафіксовано для зразка H7 ($[\text{NaCl}] = 1,4 \text{ M}$), тоді як при концентрації 1,2 M (зразок H6) спостерігається мінімум (74 %). Це свідчить про складну залежність кінетики кристалізації від складу електроліту.

Для оцінки ефективності використання отриманих наноструктур в оптоелектроніці було досліджено ефект генерації другої гармоніки (ГДГ) лазерного випромінювання. Експериментальні дані залежності вихідного сигналу ГДГ (у мВ) від енергії накачки (в мДж) для вибраних зразків наведено на рис. 4.

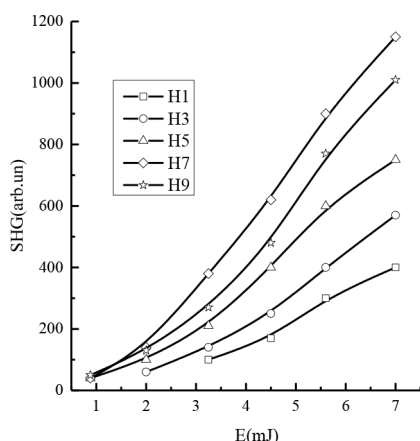


Рис. 4. Інтенсивність генерації другої гармоніки синтезованих нанопорошків CdS

Найвищу ефективність перетворення частоти продемонстрував зразок H7, для якого максимальний сигнал склав 1150 відн.од при енергії накачки 7 мДж. Цей результат добре узгоджується з даними рентгеноструктурного аналізу, згідно з якими саме зразок H7 містить найбільшу частку нецентросиметричної фази вюрциту (90 %). Оскільки ГДГ є ефектом другого порядку, що дозволений лише в ацентричних середовищах, збільшення вмісту гексагональної фази $P6_3mc$

безпосередньо сприяє підсиленню нелінійно-оптичного відгуку.

Зразок H1, що має менший вміст вюрциту (82 %), показав найнижчу ефективність ГДГ (400 мВ). Таким чином, оптимізація концентрації прекурсору (NaCl) дозволяє керувати фазовим складом нанокристалів і, як наслідок, суттєво підвищувати їхню функціональну ефективність для задач нелінійної оптики.

Висновки. Методом електрохімічного синтезу в водному розчині тіокарбаміду успішно одержано нанокристалічний сульфід кадмію (CdS) при варіюванні концентрації електроліту (NaCl) в межах 0,2–2,0 M. Рентгенофазовий аналіз підтвердив, що всі синтезовані зразки є двофазними системами, що містять суміш гексагональної (вюрцит, $P6_3mc$) та кубічної (сфалерит, $F43m$) модифікацій.

Встановлено, що концентрація солі-прекурсору (NaCl) не є визначальним фактором для розмірних характеристик наночастинок у досліджуваному діапазоні. Методом скануючої електронної мікроскопії показано, що для всіх зразків характерна пластівчаста морфологія із середнім діаметром частинок 35–40 нм та товщиною 5–25 нм.

Виявлено нелінійну залежність фазового складу нанокристалів від концентрації натрій хлориду. Вміст ацентричної фази вюрциту варіюється від 74 % до 90 %. Максимальна частка гексагональної фази (90 %) досягається при концентрації NaCl 1,4 M.

Дослідження нелінійно-оптичних властивостей показало, що синтезовані нанопорошки ефективно генерують другу оптичну гармоніку під дією лазерного випромінювання. Встановлено пряму кореляцію між фазовим складом та інтенсивністю вихідного сигналу ГДГ: зразок із найвищим вмістом нецентросиметричної фази вюрциту (H7) продемонстрував максимальну ефективність перетворення (1150 відн. од). Це відкриває можливості для керування нелінійно-оптичним відгуком матеріалу шляхом оптимізації складу електроліту.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Jaiswal J. K., Mattoussi H., Mauro J. M., Simon S. M. Long-term multiple color imaging of live cells using quantum dot bioconjugates. *Nat. Biotechnol.* 2003. Vol. 21. P. 47–51.
2. Brown K. R., Lidar D. A., Whaley K. B. Quantum computing with quantum dots on quantum linear supports. *Phys. Rev. A*. 2002. Vol. 65. 012307.
3. Chan W. C. W., Maxwell D. J., Gao X. H., Bailey R. E., Han M. Y., Nie S. M. Luminescent quantum dots for multiplexed biological detection and imaging. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2002. Vol. 13. P. 40–46.
4. Sweeney R. Y., Mao C., Gao X., Burt J. L., Belcher A. M., Georgiou G., Iverson B. L. Bacterial Biosynthesis of Cadmium Sulfide Nanocrystals // *Chem. Biol.* 2004. Vol. 11. P. 1553–1559.
5. Alivisatos A. P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *Science*. 1996. Vol. 271. P. 933–937.
6. Ozga K., Yanchuk O. M., Tsurkova L. V., Marchuk O. V., Urubkov I. V., Romanyuk Y. E., Fedorchuk O., Lakshminarayana G., Kityk I. V. Operation by optoelectronic features of cadmium sulphide nanocrystallites embedded into the photopolymer polyvinyl alcohol matrices. *Appl. Surf. Sci.* 2018. Vol. 446. P. 209–214.
7. Parasyuk O. V., Babizhetskyy V. S., Khyzhun O. Y., Levytskyy V. O., Kityk I. V., Myronchuk G. L., Tsisar O. V., Piskach L. V., Jedryka J., Maciag A., Piasecki M. Novel Quaternary TlGaSn2Se6 Single Crystal as Promising Material for Laser Operated Infrared Nonlinear Optical Modulators. *Crystals*. 2017. Vol. 7. P. 341.
8. Krymus A. S., Myronchuk G. L., Parasyuk O. V., Lakshminarayana G., Fedorchuk A. O., El-Naggar A., Albassam A., Kityk I. V. Photoconductivity and nonlinear optical features of novel $\text{Ag}_x\text{Ga}_x\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_2$ crystals. *Mater. Res. Bull.* 2017. Vol. 85. P. 74–79.
9. Ebothe J., Michel J., Kityk I. V., Lakshminarayana G., Yanchuk O. M., Marchuk O. V. Influence of CdS nanoparticles grain morphology on laser-induced absorption. *Physica E*. 2018. Vol. 100. P. 69–72.
10. Tan D., Sharafudeen K. N., Yue Y., Qiu J. Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: fundamentals and applications. *Prog. Mater. Sci.* 2016. Vol. 76. P. 154–228.
11. Wang C.-X., Fu S.-S., Gu Y.-Z. Large third-order optical nonlinearity of cadmium sulphide NC embedded in polymer thin films. *Chin. Phys. Lett.* 2009. Vol. 26. 097804.
12. Misra N., Rapolu M., Venugopal Rao S., Varshney L., Kumar V. Nonlinear optical studies of inorganic NC-polymer nanocomposite coatings fabricated by electron beam curing. *Opt. Laser Technol.* 2016. Vol. 79. P. 24–31.
13. Peng X., Manna L., Yang W., Wickham J., Scher E., Kadavanich A., Alivisatos A. P. Shape control of CdSe nanocrystals. *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 59–61.
14. Banerjee R., Jayakrishnan R., Ayyub P. Effect of the size-induced structural transformation on the band gap in CdS nanoparticles. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2000. Vol. 12. P. 10647–10654.
15. Li Y., Liu E. C. Y., Pickett N., Skabara P. J., Cummins S. S., Ryley S., Sutherland A. J., O'Brien P. Synthesis and characterization of CdS quantum dots in polystyrene microbeads. *J. Mater. Chem.* 2005. Vol. 15. P. 1238–1243.
16. Karan S., Mallik B. Tunable Visible-Light Emission from CdS Nanocrystallites Prepared under Microwave Irradiation. *J. Phys. Chem. C*. 2007. Vol. 111. P. 16734–16741.
17. Yanchuk O. M., Prots D. L., Tsurkova L. V. et al. Electrochemical synthesis of cadmium sulfide nanopowders. *Science Bulletin Volin. Nats. Univ. Lesia Ukrainka*. 2012. Vol. 17(242). P. 84–89.
18. Kityk I. V., Mervinskii R. I., Kasperczyk J., Jossi S. Synthesis and properties of nm-sized single crystals embedded in photopolymeric host. *Mater. Lett.* 1996. Vol. 27. P. 233–237.
19. Tkaczyk S., Galceran M., Kret S., Pujol M. C., Aguilo M., Diaz F., Reshak A. H., Kityk I. V. UV-excited piezooptical effects in oxide nanocrystals incorporated into PMMA matrices. *Acta Mater.* 2008. Vol. 56. P. 5677–5684.
20. Пат. 93471U Україна, МПК С 01G 11/00. Спосіб отримання нанопорошків кадмій сульфіді шляхом електролізу водного розчину індиферентного електроліту / О. М. Янчук та ін. ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 9.
21. Fediv V. I., Kovalchuk A. O., Gule Ye. G., Rudko G. Yu. Investigation of the non-radiation energy transfer in the nanoscale composite of CdS/PVS during the polymerization of a polymer. *NaUKMA Scientific Notes. Physics and mathematics*. 2010. Vol. 100. P. 50–54.

REFERENCES:

1. Jaiswal, J. K., Mattoussi, H., Mauro, J. M., & Simon, S. M. (2003). Long-term multiple color imaging of live cells using quantum dot bioconjugates. *Nature Biotechnology*, 21, 47–51.
2. Brown, K. R., Lidar, D. A., & Whaley, K. B. (2002). Quantum computing with quantum dots on quantum linear supports. *Physical Review A*, 65, 012307.
3. Chan, W. C. W., Maxwell, D. J., Gao, X. H., Bailey, R. E., Han, M. Y., & Nie, S. M. (2002). Luminescent quantum dots for multiplexed biological detection and imaging. *Current Opinion in Biotechnology*, 13, 40–46.
4. Sweeney, R. Y., Mao, C., Gao, X., Burt, J. L., Belcher, A. M., Georgiou, G., & Iverson, B. L. (2004). Bacterial biosynthesis of cadmium sulfide nanocrystals. *Chemistry & Biology*, 11, 1553–1559.

5. Alivisatos, A. P. (1996). Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *Science*, 271, 933–937.
6. Ozga, K., Yanchuk, O. M., Tsurkova, L. V., Marchuk, O. V., Urubkov, I. V., Romanyuk, Y. E., Fedorchuk, O., Lakshminarayana, G., & Kityk, I. V. (2018). Operation by optoelectronic features of cadmium sulphide nanocrystallites embedded into the photopolymer polyvinyl alcohol matrices. *Applied Surface Science*, 446, 209–214.
7. Parasyuk, O. V., Babizhetskyy, V. S., Khyzhun, O. Y., Levytskyy, V. O., Kityk, I. V., Myronchuk, G. L., Tsisar, O. V., Piskach, L. V., Jedryka, J., Maciag, A., & Piasecki, M. (2017). Novel quaternary $\text{TlGaSn}_2\text{Se}_6$ single crystal as promising material for laser operated infrared nonlinear optical modulators. *Crystals*, 7, 341.
8. Krymus, A. S., Myronchuk, G. L., Parasyuk, O. V., Lakshminarayana, G., Fedorchuk, A. O., El-Naggar, A., Albassam, A., & Kityk, I. V. (2017). Photoconductivity and nonlinear optical features of novel $\text{Ag}_x\text{Ga}_x\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_2$ crystals. *Materials Research Bulletin*, 85, 74–79.
9. Ebothé, J., Michel, J., Kityk, I. V., Lakshminarayana, G., Yanchuk, O. M., & Marchuk, O. V. (2018). Influence of CdS nanoparticles grain morphology on laser-induced absorption. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 100, 69–72.
10. Tan, D., Sharafudeen, K. N., Yue, Y., & Qiu, J. (2016). Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, 76, 154–228.
11. Wang, C.-X., Fu, S.-S., & Gu, Y.-Z. (2009). Large third-order optical nonlinearity of cadmium sulphide NC embedded in polymer thin films. *Chinese Physics Letters*, 26, 097804.
12. Misra, N., Rapolu, M., Venugopal Rao, S., Varshney, L., & Kumar, V. (2016). Nonlinear optical studies of inorganic NC-polymer nanocomposite coatings fabricated by electron beam curing. *Optics & Laser Technology*, 79, 24–31.
13. Peng, X., Manna, L., Yang, W., Wickham, J., Scher, E., Kadavanich, A., & Alivisatos, A. P. (2000). Shape control of CdSe nanocrystals. *Nature*, 404, 59–61.
14. Banerjee, R., Jayakrishnan, R., & Ayyub, P. (2000). Effect of the size-induced structural transformation on the band gap in CdS nanoparticles. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 12, 10647–10654.
15. Li, Y., Liu, E. C. Y., Pickett, N., Skabara, P. J., Cummins, S. S., Ryley, S., Sutherland, A. J., & O'Brien, P. (2005). Synthesis and characterization of CdS quantum dots in polystyrene microbeads. *Journal of Materials Chemistry*, 15, 1238–1243.
16. Karan, S., & Mallik, B. (2007). Tunable visible-light emission from CdS nanocrystallites prepared under microwave irradiation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111, 16734–16741.
17. Yanchuk, O. M., Prots, D. L., Tsurkova, L. V., Marchuk, O. V., Urubkov, I. V., & Pekhnyo, V. I. (2012). Electrochemical synthesis of cadmium sulfide nanopowders. *Scientific Bulletin of Volyn National University of Lesya Ukrainka*, 17(242), 84–89.
18. Kityk, I. V., Mervinskii, R. I., Kasperczyk, J., & Jossi, S. (1996). Synthesis and properties of nm-sized single crystals embedded in photopolymeric host. *Materials Letters*, 27, 233–237.
19. Tkaczyk, S., Galceran, M., Kret, S., Pujol, M. C., Aguilo, M., Diaz, F., Reshak, A. H., & Kityk, I. V. (2008). UV-excited piezooptical effects in oxide nanocrystals incorporated into PMMA matrices. *Acta Materialia*, 56, 5677–5684.
20. Yanchuk, O. M., Prots, D. L., Tsurkova, L. V., Marchuk, O. V., Urubkov, I. V., & Pekhnyo, V. I. (2014). *Sposib otrymannia nanoporoshkiv kadmii sulfidu shliakhom elektrolizu vodnoho rozchynu indyferentnoho elektrolitu* [Method for obtaining cadmium sulfide nanopowders by electrolysis of an aqueous solution of an indifferent electrolyte] (Patent No. 93471U). Ukraine Patent Office.
21. Fediv, V. I., Kovalchuk, A. O., Gule, Ye. G., & Rudko, G. Yu. (2010). Investigation of the non-radiation energy transfer in the nanoscale composite of CdS/PVS during the polymerization of a polymer. *NaUKMA Scientific Notes. Physics and Mathematics*, 100, 50–54.

Дата надходження статті: 30.09.2025

Дата прийняття статті: 19.10.2025

Опубліковано: 30.12.2025