

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-2-4>

Галина МИРОНЧУК

доктор фізико-математичних наук, професор, директор навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825

SCOPUS-AUTHOR ID: 36245422900

Олександр ЯНЧУК

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

ORCID ID: 0000-0003-0375-0475

SCOPUS-AUTHOR ID: 24287260700

Олег МАРЧУК

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

ORCID ID: 0000-0002-5618-7156

SCOPUS-AUTHOR ID: 57191781842

Юрій ХМАРУК

аспірант, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

Олексій ВИШНЕВСЬКИЙ

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

ORCID ID: 0000-0002-7206-2185

SCOPUS-AUTHOR ID: 36621586300

Ірина МОРОЗ

кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75 м. Луцьк, Україна, 43018

ORCID ID: 0000-0001-9167-4876

SCOPUS-AUTHOR ID: 23489463200

Ярослав ЄНДРИКА

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

ORCID ID: 0000-0002-7047-6624

SCOPUS-AUTHOR ID: 55053482500

Катаржина ОЗГА

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

ORCID ID: 0000-0002-4936-2278

SCOPUS-AUTHOR ID: 8403262900

Артур ВОЙЦЕХОВСЬКИ

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

ORCID ID: 0000-0002-0071-2468

SCOPUS-AUTHOR ID: 16317943600

Бібліографічний опис статті: Мирончук, Г., Янчук, О., Марчук, О., Хмарук, Ю., Вишневецький, О., Мороз, І., Єндрика, Я., Озга, К., Войцеховські, А. (2022). Вплив умов синтезу на властивості наночастинок CdS. *Фізика та освітні технології*, 2, 23–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-2-4>

ВПЛИВ УМОВ СИНТЕЗУ НА ВЛАСТИВОСТІ НАНОЧАСТИНОК CdS

Напівпровідникові нанокристали мають різноманітне практичне застосування, включаючи компоненти оптоелектронних транзисторів, флуоресцентні біологічні мітки, та інші. Відповідні матеріали демонструють хороші фотомеханічні характеристики завдяки добрій фототермічній стабільності у поєднанні з високою фононною ангармонічністю, яка характерна для халькогенідів. Проте все ще залишається проблема отримання дисперсних зразків малого розміру.

У цій роботі ми порівнюємо морфологію нанокристалів (НК) сульфід кадмію (CdS), синтезованих електрохімічним шляхом як з PVS, так і з детергентом ATLAS G3300, тобто методами електролітичного синтезу з детергентом. Представлені структурні особливості НК CdS, а також їх нелінійно-оптичні властивості другого порядку. Описано методологію синтезу нанокристалів CdS, експериментальні методи, які застосовуються при структурних дослідженнях CdS нанопорошків, такі як рентгенівська порошкова дифракція та скануюча електронна мікроскопія. Аналіз показує, що синтезовані НК CdS характеризуються гексагональною або кубічною структурою, що відповідає типу вюрциту або сфалериту відповідно. Наведено приблизний вміст НК вюрциту та сфалериту. В синтезованих порошках явно домінує структура вюрциту (P63mc). Крім того, застосування детергенту ATLAS G3300 при синтезі НК призводить до практично незмінного співвідношення (3:1) вюрциту та сфалериту НК. Густина струму електролізу практично не впливає на співвідношення модифікацій вюрциту і сфалериту в отриманому CdS. У роботі продемонстровано СЕМ зображення нанопорошків CdS. Встановлено, що додавання до електроліту стабілізатора Atlas G3300 сприяє зменшенню розмірів частинок та зменшенню ступеня їх полідисперсності.

Дослідження генерації другої гармоніки було проведене для кращого розуміння нелінійно-оптичних властивостей, які дуже важливі для різних застосувань, наприклад, біосенсорів. Можна побачити, що розмір зерна має досить значний вплив на інтенсивність сигналу SHG. Фракції дрібніших частинок порошку дають нижчі сигнали SHG.

Ключові слова: Халькогеніди, наноструктури, генерація другої гармоніки.

Galyna MYRONCHUK

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825

SCOPUS-AUTHOR ID: 36245422900

Oleksandr YANCHUK

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

ORCID ID: 0000-0003-0375-0475

SCOPUS-AUTHOR ID: 24287260700

Oleg MARCHUK

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

ORCID ID: 0000-0002-5618-7156

SCOPUS-AUTHOR ID: 57191781842

Yurii KHMARUK

graduate student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Oleksii VYSHNEVSKIY

M.P.Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation NAS of Ukraine Kyiv, Academician Paladin 34, Kyiv, Ukraine, 03142

ORCID ID: 0000-0002-7206-2185

SCOPUS-AUTHOR ID: 36621586300

Iryna MOROZ

Department of Materials Science, Lutsk National Technical University 75 L'vivs'ka Str., Lutsk 43018, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-9167-4876

SCOPUS-AUTHOR ID: 23489463200

Jaroslav JEDRYKA

dr inż., Department of Automatic Control, Electrical Engineering and Optoelectronics, Częstochowa University Of Technology, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, Poland, 42-200

ORCID ID: 0000-0002-7047-6624

SCOPUS-AUTHOR ID: 55053482500

Katarzyna OZGA

Dr Hab., Prof. Częstochowa University Of Technology, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, Poland, 42-200

ORCID ID: 0000-0002-4936-2278

SCOPUS-AUTHOR ID: 8403262900

Artur WOJCIECHOWSKI

dr inż., Department of Automatic Control, Electrical Engineering and Optoelectronics, Częstochowa University Of Technology, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, Poland, 42-200

ORCID ID: 0000-0002-0071-2468

SCOPUS-AUTHOR ID: 16317943600

To cite this article: Myronchuk, G., Yanchuk, O., Marchuk, O., Khmaruk, Y., Vyshnevskyi, O., Moroz, I., Jedryka, J., Ozga, K., Wojciechowski, A. (2022). Vplyv umov syntezy na vlastyvoli nanochastynok CdS [Influence of synthesis conditions on the properties of CdS nanoparticles]. *Physics and Educational Technology*, 2, 23–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-2-4>

INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF CdS NANOPARTICLES

Semiconductor nanocrystals have diverse practical applications, including optoelectronic transistor components and fluorescent biological labels. Relevant materials exhibit good photomechanical features for laser operation basically due to good photo-thermal stability against external laser radiation combined with high phonon anharmonicity being typical for chalcogenides.

In this work, we compare the morphology of cadmium sulfide (CdS) nanocrystallines (NCs) synthesized electrochemically both with PVS and ATLAS G3300 detergent, i.e. detergent electrolytic synthesis methods. Presents the structural and morphological features of CdS NCs as well as their second-order nonlinear optical properties explored in SHG experiments. Describes the methodology of CdS NC synthesis, experimental techniques applied in structural studies of Cd NCs, such as X-ray powder diffraction and scanning electron microscopy. Analysis shows that synthesized CdS NCs are characterized either hexagonal or cubic structures corresponding to wurtzite or sphalerite type, respectively. An approximate content of wurtzite and sphalerite NCs is given. CdS of wurtzite structure (P63mc) evidently dominates here. Moreover, an applying of ATLAS G3300 detergent in NC synthesis results to practically constant ratio (3:1) of wurtzite to sphalerite NCs. The electrolysis current density, practically does not affect the ratio of wurtzite and sphalerite modifications in the resulting CdS. In with work demonstrate SEM images of CdS NC powders. It was established that the addition of Atlas G3300 stabilizer to the electrolyte contributes to the reduction of particle size and the degree of polydispersity. The nonlinear optical responses of CdS were investigated to better understand the nonlinear optical properties, which are very important for applications (e.g., biosensors). One may see that the grain size exhibits rather significant effect on the intensity of the SHG signal. Fractions of finer powder particles give lower SHG signals.

Key words: Chalcogenides, nanostructures, second harmonic generation.

Напівпровідникові нанокристали CdS мають різноманітне практичне застосування, включаючи компоненти оптоелектронних транзисторів, флуоресцентні біологічні мітки, та інше [1-4]. Відповідні матеріали демонструють хороші фотомеха-

нічні характеристики завдяки добрій фототермічній стабільності [5] у поєднанні з високою фонною ангармонічністю, яка характерна для халькогенідів [6-7]. Проте все ще залишається проблема отримання дисперсних зразків малого розміру.

Відомо, що структура, розміри й оптичні властивості наночастинок залежать від природи прекурсорів, стабілізаторів і розчинників. Важливу роль тут відіграють стабілізатори, за допомогою яких контролюють розмір і форму наночастинок, запобігають їх агрегації та поверхневому окисненню. Для синтезу нанорозмірних частинок широко використовуються водорозчинні полімери або інші поверхнево-активні речовини (полівініловий спирт, поліетиленоксид, полівінілпірролідон, желатин, пометакрилову кислоту тощо). Вибір цих сполук зумовлений тим, що будучи оптимальними матричними матеріалами, вони проявляють високу інтегрованість із неорганічними речовинами та мають низьку вартість [8].

В нашій роботі синтез кадмій сульфідів проводиться шляхом електролізу водного розчину натрій хлориду (58,44 г/л або 1,0 М) і тіокарбаміду (15,22 г/л або 0,20 М) у присутності полівінілового спирту (ПВС, 10 г/л) (зразки серії А) або Atlas G3300 (1,0 г/л) (зразки серії D) з розчинним кадмієвим анодом за 363,2 К та різної густини струму. AtlasG3300 – торгова марка аніонної поверхнево-активної речовини, яка є сумішшю 2-додецилбензенсульфонові кислоти і 2-пропанаміну у співвідношенні 1:1. Вона має хімічну формулу ($C_{21}H_{38}NO_3S$) із молярною масою 384,596. Електроліз тривав 20 хвилин у всіх експериментах. Деякі основні параметри синтезу представлені в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Умови електрохімічного синтезу досліджуваного кадмій сульфідів у присутності полівінілового спирту

Зразок	A01	A02	A03	A04
Сила струму, А	2,5	2,0	1,5	1,0
Густина струму, А/см ²	0,5	0,4	0,3	0,2
Напруга, В	7,9	7,4	5,2	4,0

Таблиця 2

Умови електрохімічного синтезу досліджуваного кадмій сульфідів у присутності AtlasG3300

Зразок	D03	D05	D07	D09	D11
Сила струму, А	0,56	0,93	1,4	1,8	2,2
Густина струму, А/см ²	0,112	0,186	0,28	0,36	0,44
Напруга, В	2,2	3,8	5,7	6,4	8,2

Хлорид натрію, тіокарбамід і ПВС/Atlas G3300 зважували та переносили в мірну колбу

на 200 мл і розчиняли у гарячій дистильованій воді. Вміст колби доводили до мітки за температури експерименту (90 °С) в термостаті. Отриманий розчин переносили в стакан на 400 мл (електролізер), а циліндричні кадмієвий і сталевий електроди з площею поверхні 5,0 см² були занурені в розчин та підключені до джерела живлення В5-46. На один експеримент потрібно близько 200 мл приготованого розчину. Електролізер із зануреними електродами та контактним і звичайним термометром поміщали в термостат. Після нагрівання до потрібної температури одночасно вмикали джерело живлення та секундомір. Після розчинення анода відразу почали утворюватися і осідати на дно стакана помаранчеві частинки. Коли час синтезу було вичерпано, електролізер розмонтували, а стакан з утвореною суспензією виймали з термостата і залишали охолоджуватися до температури навколишнього середовища.

Після охолодження вміст стакана, в якому відбувся електроліз, виливали у більший стакан з дистильованою водою і залишали до наступного дня для повного осідання порошку. Наступного дня розчин над порошком зливали і доливали у стакан дистильованої води. Отриману суспензію залишали до наступного дня. Порошкоподібний осад продукту електролізу промивали біля 15 разів. Після цього осад переносили в чашку Петрі і залишали її на добу в сушильній шафі за 50 °С. Кадмієві електроди промивали дистильованою водою після їх сушіння на повітрі та зважували. [9].

Синтезовані помаранчеві порошки досліджували за допомогою скануючої електронної мікроскопії та рентгенівської порошкової дифракції (дифрактометр DRON-4-13, Cu-Kα випромінювання).

Рентгенограми усіх зразків представлені на рис. 1 та 2. Дифракційна картина всіх зразків містить відбиття, що відповідають теоретичним діаграмам для просторової групи *P6₃mc* (позначена синьою лінією) і *F43m* кадмій сульфідів (помаранчева лінія). Таким чином, одержаний порошкоподібний продукт є чистим кадмій сульфідом зі змішаною гексагональною та кубічною структурою типу вюрциту та сфалериту відповідно.

За допомогою програми PowderCell2.4 визначено вміст сфалериту та вюрциту в усіх отриманих зразках кадмій сульфідів наведено в табл. 3.

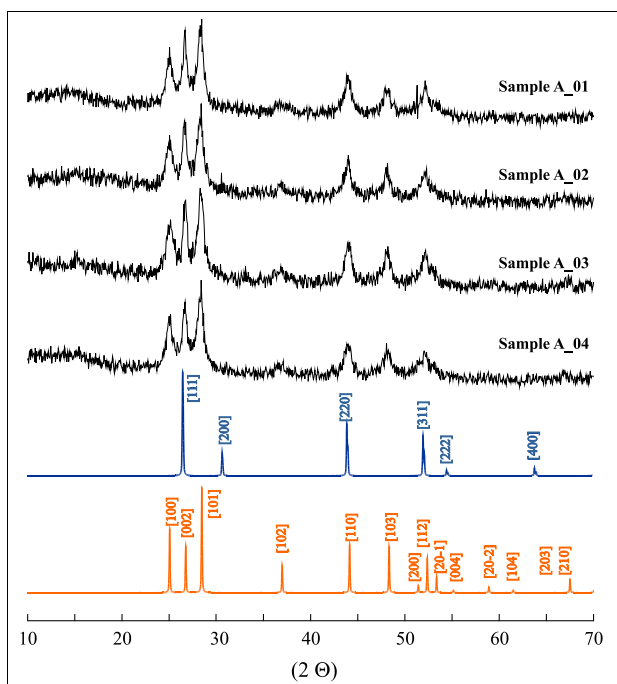


Рис. 1. Експериментальні та теоретичні порошкограми зразків кадмій хлориду, синтезованих за однакової температури (90°C), часу електролізу (20 хв), концентрації NaCl (1,0 моль/л), концентрації тіокарбаміду (0,2 моль/л), вмісту ПВС (10 г/л), але різної густини струму (А/см²): а) А01 – 0,5; А02 – 0,4; зразок А03 – 0,3; А04 – 0,2.

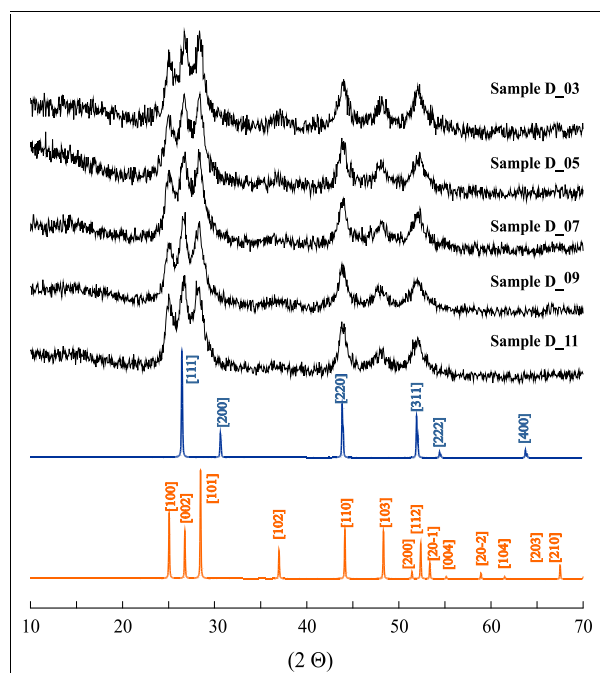


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні порошкограми зразків сульфід кадмію, синтезованих за однакової температури (90°C), часу електролізу (20 хв), концентрації NaCl (1,0 М), концентрації тіокарбаміду (0,2 М), вмісту Atlas G3300 (1,0 г/л), але різної густини струму (А/см²): D03 – 0,112; D05 – 0,186; D07 – 0,280; D09 – 0,360; D11 – 0,440.

Таблиця 3
**Вміст сфалериту (CdS_F4-3m)
та вюрциту (CdS_P6-3m)**

Зразок	A01	A02	A03	A04	D03	D05	D07	D09	D11
Вміст вюрциту, %	82	88	81	85	75	76	74	74	72
Вміст сфалериту, %	18	12	19	15	25	24	26	26	28

Так, у структурі кадмій сульфіді істотно переважає вюрцит. Не виявлено закономірностей впливу густини струму на співвідношення модифікацій вюрциту і сфалериту в отриманому порошку кадмій сульфіді. Присутність поверхнево-активної речовини Atlas G3300 сприяє одержанню кадмій сульфіді з співвідношенням вюрцитної і сфалеритної модифікацій яка змінюється від 3,2:1 до 2,6:1. Це ж співвідношення при синтезі CdS у присутності полівінілового спирту змінюється від 7,3:1 до 2,7:1.

Морфологію та розмір синтетичного CdS визначали за допомогою польового скануючого електронного мікроскопа JSM-6700F ("JEOL")

в інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України (ІГМР НАНУ). Перед дослідженням зразків їх покривали методом розпилення платиновою плівкою товщиною 30 Å. Умови роботи візуалізації були такими: режим SE, прискорювальна напруга 10 кВ та пучковий струм 0,65 нА. Як показано на рис. 3 і 4, частинки мають форму переважно пластівців. Не виявлено суттєвого впливу густини струму електролізу на середні діаметри частинок в обох випадках.

Частинки порошку серії А мають розміри в широкому діапазоні від 5 до 100 нм. Діаметр пластівців – 15÷100 нм, а товщина – 5÷25 нм. Середні діаметри частинок знаходяться в діапазоні 35÷40 нм. ПВС спричиняє значний розкид частинок за розмірами.

Діаметри найдрібніших частинок серії D знаходяться в інтервалі від 11 до 20 нм. Суттєво за числом переважають частинки, що знаходяться в інтервалі від 21 до 30 нм. Розподіл числа частинок за діапазонами розмірів для цих частинок є досить вузьким. Діаметри найкрупніших

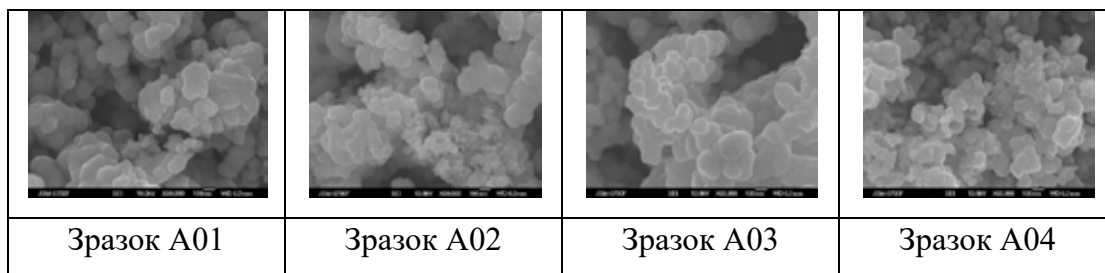


Рис. 3. SEM-зображення зразків сульфїду кадмію, синтезованих за однакової температури (90 °C), часу електролізу (20 хв), концентрації NaCl (1,0 моль/л), концентрації тіокарбамїду (0,2 моль/л), вмісту ПВС (10 г/л), але різної густини струму (А/см²): A01 – 0,5; A02 – 0,4; A03 – 0,3; A04 – 0,2

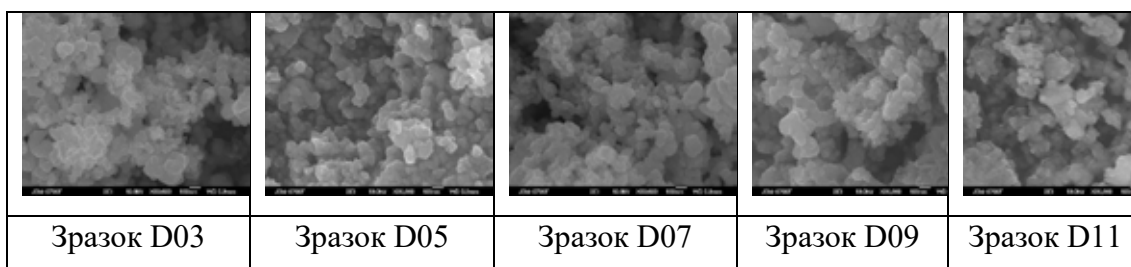


Рис. 4. SEM-зображення зразків сульфїду кадмію, синтезованих за однакової температури (90 °C), часу електролізу (20 хв), концентрації NaCl (1,0 М), концентрації тіокарбамїду (0,2 М), вмісту Atlas G3300 (1,0 г/л), але різної густини струму (А/см²): D03 – 0,112; D05 – 0,186; D07 – 0,280; D09 – 0,360; D11 – 0,440

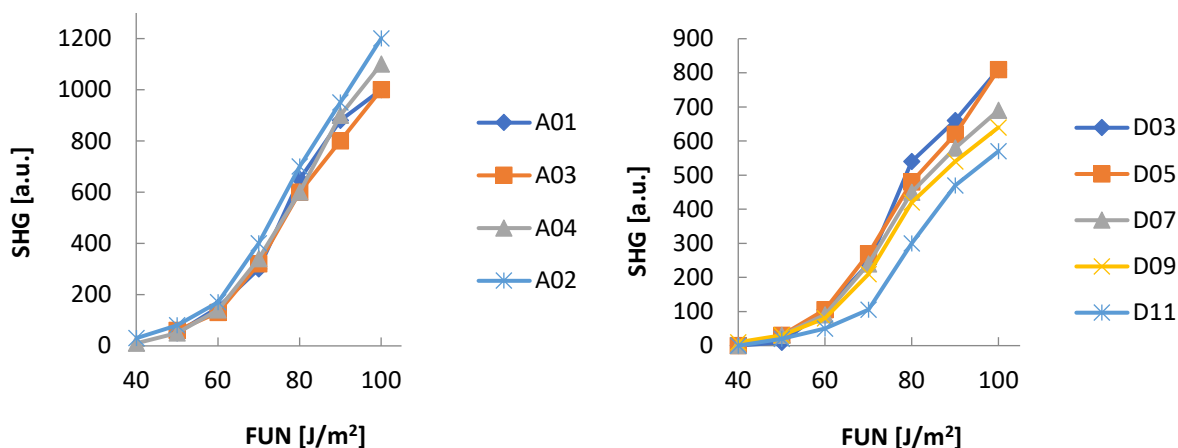


Рис. 5. Залежність ефективності генерації другої гармонїки від основної густини лазерної енергїї

частинок є в інтервалі від 51 до 60 нм. Середній розмір частинок є в інтервалі від 23 до 29 нм. Таким чином додавання до електроліту стабілізатора Atlas G3300 сприяє зменшенню розмірів частинок та зменшенню ступеня їх полідисперсності.

Серед оптоелектронних функцій, керованих лазером, ми зосереджені на дослідженнях індукованої лазером генерації другої гармонїки

(SHG), що представляє нелїнійний оптичний ефект другого порядку, який описується полярним тензором третього рангу.

Можна побачити, що інтенсивність сигналу ГДГ залежить від розмір зерна та симетрії кристалїчної ґратки, що добре узгоджується з даними робіт [10-11]. Фракції дрібніших частинок порошку дають нижчі сигнали SHG. Максимальні

коефіцієнти досягаються при 88% вюрцитного компонента CdS. При іншому вмісті вюрциту ці значення менші. Це є відображенням значної ролі розмірів, морфології зерен та ацентричних

кристалітів у спостережуваних залежностях, що може бути використано для подальшого пошуку лазерно-керованих матеріалів у майбутньому розвитку лазерних модуляторів і тригерів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Jaiswal J.K., Mattoussi H., Mauro J.M. and 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. and Whaley K.B. Quantum computing with quantum dots on quantum linear supports. *Phys. Rev.* 2002. Vol. A65. 012307.
3. Chan W.C.W., Maxwell D.J., Gao X.H., Bailey R.E., Han M.Y and 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. and Iverso B.L. Bacterial biosynthesis of cadmium sulfide nanocrystals. *Chem. Biol.* 2004. Vol. 11. P.1553-1559.
5. Ozga K., Yanchuk O.M., Tsurkova L.V., Marchuk O.V., Urubkov I.V., Romanyuk Y.E., Fedorchuk O., Lakshminarayana G. and 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.
6. Parasyuk O.V., Babizhetskyy V.S., Khyzhun O.Y., Levytsky V.O., Kityk I.V., Myronchuk G.L., Tsisar O.V., Piskach L.V., Jedryka J., Maciag A. and Piasecki M. Novel quaternary TlGaSn₂Se₆ single crystal as promising material for laser operated infrared nonlinear optical modulators. *Crystals.* 2017. Vol.7. P. 341-357.
7. Krymus A.S., Myronchuk G.L., Parasyuk O.V., Lakshminarayana G., Fedorchuk A.O., El-Naggar A., Albassam A. and Kityk I.V. Photoconductivity and nonlinear optical features of novel Ag_xGaxGe_{1-x}Se₂ crystals. *Mater. Res. Bull.* 2017. Vol. 85. P. 74-79.
8. 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. *Applied Surface Science.* 2018. Vol. 446. P. 209-214.
9. Патент 93471U Україна, МПК (2014.01) C 01G 11/00, Спосіб отримання нанопорошків кадмій сульфід електролізом водного розчину індиферентного електроліту, заявник та патентний власник Східноєвропейський нац. ун-т імені Лесі Українки. - № u201313037; Заявл. 11.11.2013; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 9. - 3 с.
10. Banerjee R., Jayakrishnan R. and 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.
11. Michal Jacobsohn and Uri Banin. Size Dependence of Second Harmonic Generation in CdSe Nanocrystal Quantum Dots. *Phys. Chem. B.* 2000. Vol.104(1) 1-5.

REFERENCES:

1. Jaiswal J.K., Mattoussi H., Mauro J.M. and 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. and Whaley K.B. Quantum computing with quantum dots on quantum linear supports. *Phys. Rev.* 2002. Vol. A65. 012307.
3. Chan W.C.W., Maxwell D.J., Gao X.H., Bailey R.E., Han M.Y and 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. and Iverso B.L. Bacterial biosynthesis of cadmium sulfide nanocrystals. *Chem. Biol.* 2004. Vol. 11. P.1553-1559.
5. Ozga K., Yanchuk O.M., Tsurkova L.V., Marchuk O.V., Urubkov I.V., Romanyuk Y.E., Fedorchuk O., Lakshminarayana G. and 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.
6. Parasyuk O.V., Babizhetskyy V.S., Khyzhun O.Y., Levytsky V.O., Kityk I.V., Myronchuk G.L., Tsisar O.V., Piskach L.V., Jedryka J., Maciag A. and Piasecki M. Novel quaternary TlGaSn₂Se₆ single crystal as promising material for laser operated infrared nonlinear optical modulators. *Crystals.* 2017. Vol.7. P. 341-357.
7. Krymus A.S., Myronchuk G.L., Parasyuk O.V., Lakshminarayana G., Fedorchuk A.O., El-Naggar A., Albassam A. and Kityk I.V. Photoconductivity and nonlinear optical features of novel Ag_xGaxGe_{1-x}Se₂ crystals. *Mater. Res. Bull.* 2017. Vol. 85. P. 74-79.
8. 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. *Applied Surface Science.* 2018. Vol. 446. P. 209-214.

9. Патент 93471U Україна, МПК (2014.01) С 01G 11/00, Спосіб отримання нанопорошків кадмій сульфід електролізом водного розчину індиферентного електроліту, заявник та патентний власник Східноєвропейський нац. ун-т імені Лесі Українки. - № u201313037; Заявл. 11.11.2013; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 9. 3 с.

10. Banerjee R., Jayakrishnan R. and 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.

11. Michal Jacobsohn and Uri Banin. Size Dependence of Second Harmonic Generation in CdSe Nanocrystal Quantum Dots. *Phys. Chem. B.* 2000. Vol.104(1) 1–5.