

Я.О. Сичікова, А.С. Лазаренко, С.С. Ковачов, І.О. Бардус, І.Т. Богданов

Формування гетероструктур CdO/CdS/textured-ZnO/ZnO методом хімічного осадження

Бердянський державний педагогічний університет, Бердянськ, Україна, yanasuchikova@gmail.com

Гетероструктуру CdO/CdS/textured-ZnO/ZnO синтезували з використанням комбінації методів електрохімічного травлення та хімічного осадження. Електрохімічне травлення було застосовано для формування текстурованого шару ZnO. Хімічне осадження розчину, що містив CdCl₂ здійснювали для приготування плівки CdS з наночастинками CdO на поверхні. Отриманий нанокompatит був охарактеризований за допомогою SEM, EDX та Raman методів для структурних, морфологічних та компонентних досліджень. Зображення SEM та спектри комбінаційного розсіювання світла показали існування кубічної фази нанокристалітів CdO. Дослідження SEM виявило дисперсію агломерованих наноструктур розміром 50–200 нм на поверхні плівки CdS.

Ключові слова: електрохімічне травлення, хімічне осадження, наноструктури, комбінаційне розсіювання світла, гетеро структура.

Подано до редакції 2.05.2022; прийнято до друку 23.06.2022.

Вступ

Металеві оксиди є об'єктом багатьох досліджень завдяки їхнім чудовим фотокаталітичними властивостям. Широко досліджуються напівпровідники TiO₂ [1, 2], NiO [3, 4], Ga₂O₃ [5, 6], MgO [7, 8], CdO [9, 10] тощо. Такі напівпровідники, як правило, характеризуються великою довжиною дифузії та легкістю синтезу. Дуже багато досліджень присвячено матеріалу ZnO завдяки широкому колу його застосувань – від оптоелектронної техніки до косметології [11, 12]. Як напівпровідник ZnO знаходить застосування у п'єзоелектроніці, сенсорних пристроях та оптоелектроніці [13 - 14]. При цьому необхідно відмітити суттєвий недолік для певних застосувань цього напівпровідника, а саме широка заборонена зона (E_g=3.2 eV) [15]. Ця властивість може обмежувати поглинання видимої області спектру світла. Для генерації електронно-діркових пар у видимій області спектру на поверхню ZnO наносять вузькозонні напівпровідники. Так, повідомлялося про створення гетероструктури c-Si/ZnO для ультратонких сонячних елементів [16].

Структура нанокристалів Ag₃VO₄/ZnO пропонується у якості фотокаталізатора видимого світла [17]. Повідомлялося про синтез ультратонкого шару CdS на масиві нанострижнів ZnO з використанням імпульсного електроосадження для покращення транспортування фотозаряду при освітленні видимого світла [18]. У роботі [19] для підвищення фотокаталітичної активності також на масиви нанотрубок ZnO наносили шар CdS.

Сульфід кадмію (CdS) – напівпровідник, що широко застосовується в оптичній електроніці та продовжує бути об'єктом багатьох досліджень завдяки своїм властивостям. Зокрема, CdS має пряму ширину забороненої зони 2.42 eV. Ще однією цікавою властивістю сульфід кадмію є здатність до наноструктурування. Повідомлялося про синтез наноголок, нанострижнів, нанодротів тощо [20, 21]. Проте вироцування плівок CdS на підкладках ZnO має ряд проблем та обмежень. Так, невідповідність параметрів кристалічних ґраток призводить до розтріскування плівки та надмірних напружень. Крім того, перенесення заряду може бути ефективним лише на активній межі розділу, тоді як рекомбінація

пар «електрон-дірка» збільшується по мірі збільшення товщини плівки. Це принципово впливає на фотоактивність гетероструктури [19]. Щоб подолати ці проблеми, в цьому дослідженні ми повідомляємо про простий метод текстурування підкладки ZnO для створення буферного шару між основною підкладкою та структурами CdS. Такими буферними підкладками часто слугують поруваті шари, сформовані на поверхні основної підкладки [22]. Так, нами повідомлялося про вирощування нітриду індію на поверхні фосфіду індію з буферним шаром рого-InP [23]. Було показано, що поруватий шар є «м'якою» підкладкою, що дозволяє мінімізувати напруження, які виникають внаслідок невідповідності кристалічних ґраток. Крім того, поруваті шари на монокристалічних напівпровідниках збільшують шорсткість і текстурність поверхні, що забезпечує кращу адгезію синтезованих наноструктур з матеріалом підкладки [24]. Крім того, для покращення фотоелектрохімічних властивостей та забезпечення пасивації поверхні сформованої структури ми проводимо модифікацію поверхні CdS шляхом електрохімічного синтезу нанокристалітів CdO.

I. Зразки та методика експерименту

Експеримент проводили у два етапи.

Перший етап – формування текстуруваного шару на поверхні монокристалічного ZnO. Мета цього етапу – зняти надмірні напруження на поверхні підкладки та сформувати текстури та пори, які забезпечать адгезію наночастинок з поверхнею кристалу. Текстурувані шари ZnO формували методом електрохімічного травлення в розчині електроліту $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}=2:1:1$. Травлення проводили у стандартній трьохелектродній комірці при постійній напрузі $U = 5\text{V}$ протягом 10 хв. Під час електрохімічної обробки зразки підсвічували ксеноновою лампою Osram XBO потужністю 250 Вт на відстані 10 см від поверхні напівпровідника.

Для приготування наночастинок CdS використовували розчин хлориду кадмію (0.1 M CdCl_2), у який розчинили в 100 мл дистильованої води (DI) і додавали тіокарбамід ($0.1\text{ M CH}_4\text{N}_2\text{S}$) та аміак (5M NH_3). Розчин перемішували магнітною мішалкою протягом 20 хв та підігрівали до температури 80°C . У приготовлений розчин занурювали текстурувані зразки ZnO та витримували їх протягом 5 годин. Після цього зразки доставали з розчину та залишали на відкритому повітрі на 3 місяці.

Морфологію наноструктур було охарактеризовано за допомогою скануючого електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B. SEM був також оснащений спектрометром EDX, який використовується для елементного аналізу (AZtecOne з детектором X-MaxN20). Раманівську спектроскопію проводили при кімнатній температурі з використанням системи RENISHAW inVia Reflex з довжиною хвилі збудження 532 нм при інтенсивності

0.5%, решітка 2400 нм, діапазон $100\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$. Час вимірювання 10 сек, було проведено 5 акумуляцій.

II. Результати

2.1. SEM аналіз

Після електрохімічної обробки зразків ZnO їхня поверхня стала текстуруваною. Рис. 1 демонструє елементи поверхні зразків оксиду цинку. З рисунку можна бачити, що поверхня стала шорсткою, спостерігається вихід ковзних дислокацій (рис 1 a, b). Також можна бачити утворення ямок травлення на поверхні, а саме двох типів пор. Так, на рис. 1 (a) можна спостерігати дрібні пори.

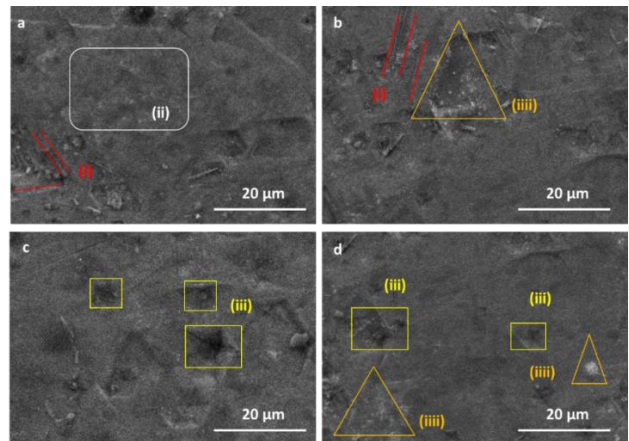


Рис. 1. Текстурувана поверхня ZnO після електрохімічної обробки: (i) вихід ковзної дислокації, (ii) дрібні мікропори, (iii) зірчастоподібні пори, (iiii) оксидні вкраплення.

Діаметр таких пор складає (50 – 150) нм. Такі пори формуються на поверхні кристалу в останню чергу, мають спонтанний характер утворення і не пов'язані із поверхневими дефектами та дефектами кристалічної ґратки вихідного напівпровідника [25]. Другий тип пор (рис. 1 c, d) - масивні зіркоподібні ямки травлення, діаметр яких знаходиться у діапазоні (5 – 10) мкм. Поява таких пор пов'язана з виходом дислокацій на поверхню, в результаті чого спостерігаються кратерні утворення. Також поверхня характеризується наявністю цяток діаметром до 1 мкм. (рис. 1 b, d). Скоріше за все, цятки – результат осідання продуктів реакції, що виникають під час електрохімічного розчинення кристалу.

Взагалі кажучи, напівпровідники групи A^2B^6 , на відміну від напівпровідників A^3B^5 , проявляють погану здатність до структуроутворення під час електрохімічної обробки [26]. Так, на поверхні фосфіду індію, арсеніду галію, фосфіду галію спостерігається утворення широкого класу наноструктур у широкому діапазоні режимів травлення [27, 28]. Тоді як поверхня ZnO, ZnSe, ZnTe та інші доволі стабільна по відношенню до багатьох електролітів [29, 30]. З іншого боку, напівпровідники A^2B^6 мають доволі хорошу хімічну інертність по відношенню до повітря та вологи. Їхня поверхня майже не окислюється та не потребує поверхневої

пасивації [31]. Цей факт у багатьох аспектах надає таким напівпровідникам значну перевагу над іншими.

Метою даного етапу експерименту не було формування впорядкованих структур на поверхні ZnO, необхідно було лише текстурувати поверхню та витравити дефекти кристалічної ґратки для зменшення надлишкових напружень. Можемо констатувати, що цю мету досягнуто.

Рис. 2 демонструє морфологію зразка після етапу хімічного осадження. Можна бачити, що поверхнева морфологія істотно змінилася. Так, на поверхні більше не спостерігаються ямки травлення, наявні лише тонкі довгі смуги, у перерізі їх розмір складає від 75 до 500 нм. Крім того, на поверхні з'явилися шароподібні кристаліти. Через дзеркальність зразка якість мікрофотографії доволі низька. Однак можна спостерігати три характерні розміри кульок: (i) 80 нм, (ii) 500 нм, (iii) 1 мкм.

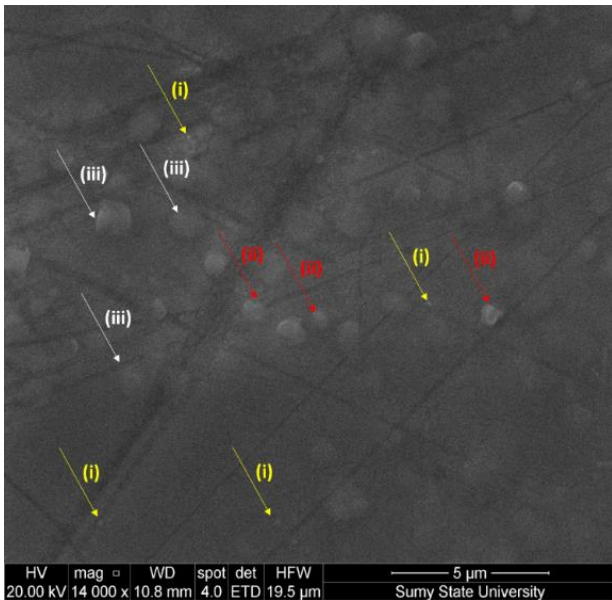


Рис. 2. Морфологія плівки, а також мікро- та наночасток на поверхні ZnO.

Таким чином, можна зробити висновок, що на поверхні текстурованого ZnO утворилася щільна плівка. Вона вистилає пори та ямки травлення та

тісно зв'язана з матеріалом підкладки. Утворені на поверхні кульки є іншою фазою, вони формувалися після завершення процесу формування плівки. Логічно передбачити, що це оксидні з'єднання.

2.2. EDX аналіз

Аналіз елементного складу утвореної структури (рис. 3) показує присутність на поверхні кисню, цинку, кадмію, сірки та вуглецю. Наявність вуглецю може свідчити, що на поверхні структури було утворено складні з'єднання продуктів реакції. Скоріш за все – це пасивуюча плівка, яка не вносить внеску у загальні властивості поверхні матеріалу. Також необхідно відмітити, що рефлексії від інших елементів достатньо сильні, тобто вони «просвічуються» через пасивуючу плівку. Поява та внесок вуглецю потребує подальшого дослідження.

У відсотковому відношенні можна спостерігати, що кисню на поверхні більше ніж цинку майже вдвічі (табл. 1). З цього можна зробити попередній висновок про те, що на поверхні є ще з'єднання, окрім ZnO, які містять кисень. Найімовірнішим джерелом кисню можуть бути краплі оксиду кадмію. Поява цього з'єднання може бути зумовлена окисненням поверхнево незв'язаних атомів кадмію з іонами кисню в електроліті. Також кисень може приєднуватися до атомів кадмію поверхні, які характеризуються наявністю обірваних зв'язків та внаслідок цього хімічною активністю.

Таблиця 1.

Елементний склад поверхні зразка, отриманий за допомогою методу EDX.

Елемент	Тип лінії	Атом., %
C	K-серія	21,82
O	L-серія	25,12
S	K-серія	20,69
Zn	K-серія	3,23
Cd	L-серія	29,14

2.3. Raman аналіз

Дослідження комбінаційного розсіяння світла показало, що раманівський спектр має 5 піків: 112, 210, 254, 300, 602 cm^{-1} (рис. 4). Інтенсивні піки 300 і 602 cm^{-1} зумовлені основною фононною модою LO та

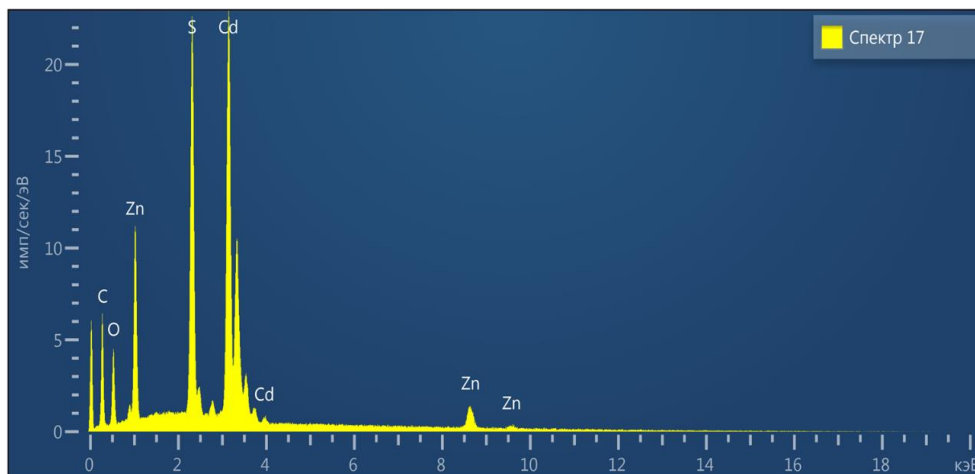


Рис. 3. Спектр EDX поверхні ZnO після хімічного осадження.

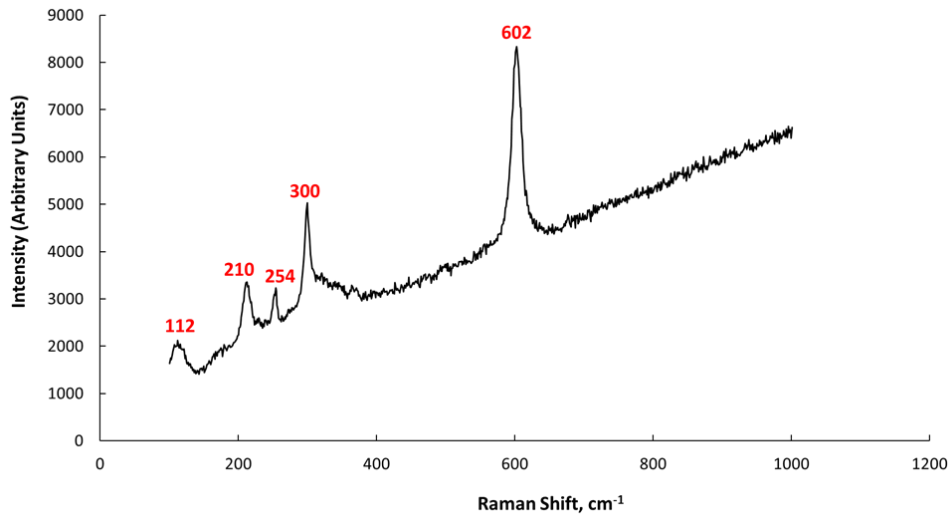


Рис. 4. Раманівські спектри наноструктур, синтезованих на поверхні ZnO

першою надтоною модою 2LO CdS відповідно. Це добре узгоджується з попередніми дослідженнями [32]. Також у дослідженні [33] повідомляється, що пік 300 cm^{-1} зумовлений наявністю частинок нанометрового розміру. Це добре узгоджується з результатами скануючої електронної мікроскопії, представленими на рис. 2.

У наноструктурованих напівпровідниках міцність екситон-фононного зв'язку оцінюється як відношення інтенсивності обертона до основного. Для нашої структури цей коефіцієнт дорівнює: $I_{2LO}/I_{LO} = 1,65$. У порівнянні з іншими аналогічними дослідженнями [34], значення цього показника є доволі великим, що свідчить про сильний зв'язок екситон-LO фононів у синтезованій структурі.

Також можна спостерігати, що лінія комбінаційного розсіювання світла (КРС) першого порядку LO не тільки розширена, а й асиметрична у бік більшої частоти у порівнянні з типовим спектром об'ємного CdS (305 cm^{-1}). Це також свідчить про наявність частинок на поверхні, які мають значний розкид по розмірам. Різкий підйом спектру у діапазоні від 605 cm^{-1} і більше без видимих піків може свідчити про багатофотонне розсіювання. Пік 254 cm^{-1} є типовим для кубічної фази CdO [35]. Таким чином, можна стверджувати, що сферичні нанокристаліти на поверхні утвореної структури є оксидом кадмію. Це узгоджується з раніше зробленим припущенням за результатами хімічного аналізу, отриманими методом EDX. Про кристалічність цього утворення також свідчить той факт, що пік 254 cm^{-1} є доволі вузьким. Крім того, пік 210 cm^{-1} також з'являється через наявність наночастинок CdO. Зсув у низькочастотну частину спектру порівнянні з типовим піком (216 cm^{-1}) також свідчить про наявність кристалітів нанометрового розміру [36]. Мода 112 cm^{-1} скоріш за все пов'язана з нанопоруватою текстурованою поверхнею ZnO, що є підкладкою для синтезованої структури CdO/CdS. Тобто маємо складну структуру CdO/CdS/textured-ZnO/ZnO (рис. 5). Такі гетероструктури можуть

знайти застосування в оптоелектронних пристроях. Подальші дослідження повинні бути сфокусовані на удосконаленні технології синтезу гетероструктури та безпосередньому оцінюванні їхніх фотокаталітичних властивостей.

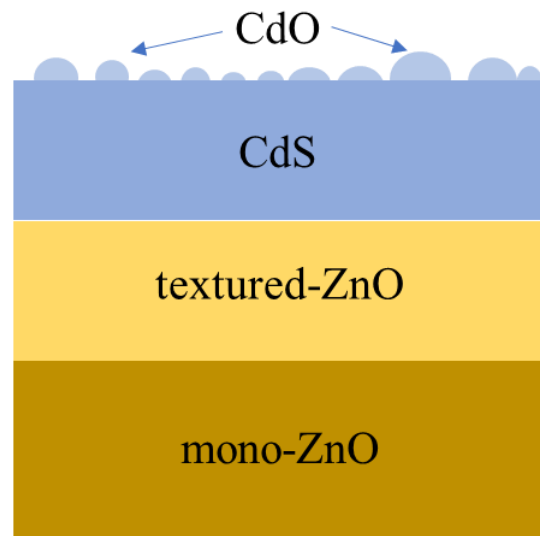


Рис. 5. Схематичне зображення гетероструктури CdO/CdS/ textured-ZnO /ZnO.

Висновки

Підкладки з текстурованого ZnO готували методом електрохімічного травлення. Плівку CdS з нанокристалітами CdO готували за допомогою хімічного осадження. Нанокристаліти мають сферичну форму та мають кубічну кристалічну ґратку. Зсув спектрів комбінаційного розсіювання спектру у низькочастотну область свідчить про наявність частинок нанометрового розміру. Аналіз мікроморфології поверхні, зроблений за допомогою SEM також свідчить про нанометровий розмір частинок діаметром 80 нм. Текстуровання ZnO перед хімічним нанесенням субстрату дозволило

сформувати якісну кристалічну гетероструктуру CdO/CdS/textured-ZnO/ZnO.

Подяка

Дослідження проведено завдяки підтримці Міністерства освіти на науки України, а саме реалізації держбюджетних наукових проєктів № 0122U000129 «Пошук оптимальних умов синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників A3B5, A2B6 і кремнію для фотоніки і сонячної енергетики», № 0121U109426 «Теоретико-методичні засади системної фундаменталізації підготовки майбутніх фахівців у галузі наноматеріалознавства до продуктивної професійної діяльності».

Також Я. Сичікова висловлює подяку Goethe-Institut за підтримку за програмою екстрених стипендій для випускників програм «House of Europe».

Ми також дякуємо Збройним Силам України за забезпечення безпеки для виконання цієї роботи. Ця робота стала можливою лише завдяки стійкості та мужності Української Армії.

Сичікова Я.О. - доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та методики навчання фізики БДПУ;

Лазаренко А.С. - кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики та методики навчання фізики БДПУ;

Ковачов С.С. - науковий співробітник БДПУ;

Бардус І.О. - доктор педагогічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних технологій в управлінні та навчанні й інформатики БДПУ;

Богданов І.Т. – доктор педагогічних наук, професор, ректор БДПУ.

- [1] V. Serga, R. Burve, A. Krumina, M. Romanova, E. A. Kotomin, A. I. Popov, Extraction–pyrolytic method for TiO₂ polymorphs production, Crystals 11(4), 431 (2021); <https://doi.org/10.3390/cryst11040431>.
- [2] V.Serga, R. Burve, A. Krumina, V. Pankratova, A. I. Popov, V. Pankratov. Study of phase composition, photocatalytic activity, and photoluminescence of TiO₂ with Eu additive produced by the extraction-pyrolytic method, Journal of materials research and technology 13, 2350 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.029>.
- [3] T.N.J.I. Edison, R. Atchudan, Y.R. Lee, Binder-free electro-synthesis of highly ordered nickel oxide nanoparticles and its electrochemical performance, Electrochimica Acta 283, 1609 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.101>.
- [4] Z. Alhashem, C. Awada, F. Ahmed, A.H. Farha. Structural and magnetic properties study of Fe₂O₃/NiO/Ni₂FeO₄ nanocomposites, Crystals 11(6), 613 (2021); <https://doi.org/10.3390/cryst11060613>.
- [5] A. Usseinov, Z. Koishybayeva, A. Platonenko, J. Purans, A.I. Popov, Vacancy defects in Ga₂O₃: First-principles calculations of electronic structure, Materials 14(23), 7384 (2021); <https://doi.org/10.3390/ma14237384>.
- [6] A. Usseinov, Z. Koishybayeva, A. Platonenko, A.I. Popov, Ab-Initio Calculations of Oxygen Vacancy in Ga₂O₃ Crystals, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 58(2), 3 (2021); <https://doi.org/10.2478/lpts-2021-0007>.
- [7] A.I. Popov, E.A. Kotomin, M.M. Kuklja, Quantum chemical calculations of the electron center diffusion in MgO crystals, Physica Status Solidi (B) Basic Research 195(1), 61 (1996); <https://doi.org/10.1002/pssb.2221950107>.
- [8] E. Shablonin, A.I. Popov, A. Lushchik, A. Kotlov, S. Dolgov, Excitation of different chromium centres by synchrotron radiation in MgO:Cr single crystals, Physica B: Condensed Matter 477, 133 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.physb.2015.08.032>.
- [9] Z. Zhang, M. Wang, F. Wang, Plasma-assisted construction of CdO quantum dots/CdS semi-coherent interface for the photocatalytic bio-CO evolution, Chem Catalysis 2, 1 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.checat.2022.04.001>.
- [10] L. Jin, Y. Wang, J. Wu, C. Su, H. Zhou, H. Xu, Properties of oxidation quantum dots-CdO/TiO₂ heterostructures constructed as DSSC photoanodes, Materials Science in Semiconductor Processing 147, 106720 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.106720>.
- [11] M.A. Borysiewicz, ZnO as a functional material, a review, Crystals 9(10), 505 (2019); <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>.
- [12] J. Theerthagiri, S. Salla, R. A. Senthil, P. Nithyadharseni, A. Madankumar, P. Arunachalam, H. S. Kim, A review on ZnO nanostructured materials: energy, environmental and biological applications, Nanotechnology 30(39), 392001 (2019); <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab268a>.
- [13] S. Goktas, A. Goktas, A comparative study on recent progress in efficient ZnO based nanocomposite and heterojunction photocatalysts: A review, Journal of Alloys and Compounds 863, 158734 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158734>.
- [14] I.V. Rogozin, Nitrogen-doped p-type ZnO thin films and ZnO/ZnSe p-n heterojunctions grown on ZnSe substrate by radical beam gettering epitaxy, Thin Solid Films, 517(15), 4318 (2009); <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.12.002>.
- [15] Z. Meng, B. Zhu, Y. Zhang, L. Luo, Y. Zhang, Mechanical properties and biocompatibility of porous ZnO/hydroxyapatite composites with different porosities, Chinese Journal of Tissue Engineering Research 26(22), 2095 (2022); <https://doi.org/10.12307/2022.277>.

- [16] F. Zhao, J. Lin, Z. Lei, Z. Yi, F. Qin, J. Zhang, P. Wu, Realization of 18.97% theoretical efficiency of 0.9 μm thick c-Si/ZnO heterojunction ultrathin-film solar cells via surface plasmon resonance enhancement, *Physical Chemistry Chemical Physics* 24(8), 4871 (2022); <https://doi.org/10.1039/D1CP05119A>.
- [17] A. Shawky, S.M. Albukhari, Design of $\text{Ag}_3\text{VO}_4/\text{ZnO}$ nanocrystals as visible-light-active photocatalyst for efficient and rapid oxidation of ciprofloxacin antibiotic waste, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 133, 104268 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104268>.
- [18] Y. Tang, P. Traveerungroj, H.L. Tan, P. Wang, R. Amal, Y. H. Ng, Scaffolding an ultrathin CdS layer on a ZnO nanorod array using pulsed electrodeposition for improved photocharge transport under visible light illumination, *Journal of Materials Chemistry A* 3(38), 19582 (2015); <https://doi.org/10.1039/C5TA05195A>.
- [19] T.K. Van, L.Q. Pham, D.Y. Kim, J.Y. Zheng, D. Kim, A.U. Pawar, Y.S. Kang, Formation of a CdO layer on CdS/ZnO nanorod arrays to enhance their photoelectrochemical performance, *ChemSusChem* 7(12), 3505 (2014); <https://doi.org/10.1002/cssc.201402365>.
- [20] M. Khan, M.H. Irfan, M. Israr, N. Rehman, T.J. Park, M.A. Basit, Comparative investigation of ZnO morphologies for optimal CdS quantum-dot deposition via pseudo-SILAR method, *Chemical Physics Letters* 744, 137223, (2020); <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137223>.
- [21] Y. Zhu, J. Chen, L. Shao, X. Xia, Y. Liu, L. Wang, Oriented facet heterojunctions on CdS nanowires with high photoactivity and photostability for water splitting, *Applied Catalysis B: Environmental* 268, 118744 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118744>.
- [22] J.A. Suchikova, V.V. Kidalov, G.A. Sukach, Preparation of nanoporous n-InP(100) layers by electrochemical etching in HCl solution, *Functional Materials* 17(1),131 (2010).
- [23] J.A. Suchikova, Synthesis of indium nitride epitaxial layers on a substrate of porous indium phosphide, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 7(3), 03017 (2015).
- [24] Y. Suchikova, I. Bohdanov, S. Kovachov, A.M. Moskina, A.I. Popov, Texturing of indium phosphide for improving the characteristics of space solar cells. 2021 IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies, ELIT 2021 - Proceedings, 194 (2021); <https://doi.org/10.1109/ELIT53502.2021.9501098>.
- [25] Y.A. Suchikova, V.V. Kidalov, G.A. Sukach, Influence of dislocations on the process of pore formation in n-InP (111) single crystals, *Semiconductors* 45(1), 121 (2011), <https://doi.org/10.1134/S1063782611010192>.
- [26] E. Monaico, I. Tiginyanu, V. Ursaki, Porous semiconductor compounds, *Semiconductor Science and Technology* 35(10), 103001 (2020); <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab9477>.
- [27] J. Sabataityt, I. Šimkien, A. N. Baranov, R. A. Bendorius, V. Pačebutas, Porous A^3B^5 compounds, *Materials Science and Engineering: C* 23(1-2), 43 (2003), [https://doi.org/10.1016/S0928-4931\(02\)00223-0](https://doi.org/10.1016/S0928-4931(02)00223-0).
- [28] Y.A. Suchikova, V.V. Kidalov, G.A. Sukach, Influence of type anion of electrolyte on morphology porous InP obtained by electrochemical etching. *Journal of Nano- and Electronic Physics* 1(4), 78 (2009).
- [29] I. Bohdanov, Y. Suchikova, S. Kovachov, A. Usseinov, A.I. Popov, Nanostructure Formation on ZnSe Crystal Surface by Electrochemical Etching. Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties", NAP 2021, (2021); <https://doi.org/10.1109/NAP51885.2021.9568629>
- [30] F. Zenia, C. Levy-Clement, R. Triboulet, R. Könenkamp, K. Ernst, M. Saad, M. Lux-Steiner, Electrochemical texturization of ZnTe surfaces, *Applied physics letters* 75(4), 531 (1999); <https://doi.org/10.1063/1.124438>
- [31] C. Florica, I. Arghir, L. Ion, I. Enculescu, V. A. Antohe, A. Radu, S. Antohe, Production and characterization of CdTe wire arrays for hybrid inorganic/organic photovoltaic cells, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 6(1), 21 (2011).
- [32] M.F. Saleem, H. Zhang, Y. Deng, D. Wang, Resonant Raman scattering in nanocrystalline thin CdS film, *Journal of Raman Spectroscopy* 48(2), 224 (2017); <https://doi.org/10.1002/jrs.5002>.
- [33] R.R. Prabhu, M. Abdul Khadar, Study of optical phonon modes of CdS nanoparticles using Raman spectroscopy, *Bulletin of Materials Science* 31(3), 511 (2008); <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0080-7>.
- [34] S.V. Kahane, R. Sasikala, B. Vishwanadh, V. Sudarsan, S. Mahamuni, CdO–CdS nanocomposites with enhanced photocatalytic activity for hydrogen generation from water. *International Journal of Hydrogen Energy* 38(35), 15012 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.077>.
- [35] V. Srihari, V. Sridharan, T. R. Ravindran, S. Chandra, A. K. Arora, V. S. Sastry, C. S. Sundar, Raman scattering of cadmium oxide: in B1 phase. In AIP Conference Proceedings 1349 (1), 845 (2011); <https://doi.org/10.1063/1.3606122>.
- [36] V. Ganesh, L. Haritha, H. E. Ali, A. M. Aboaraia, Y. Khairy, H. H. Hegazy, I. S. Yahia, Detailed investigation of optical linearity and nonlinearity of nanostructured Ce-doped CdO thin films using Kramers–Kronig relations, *Applied Physics A* 126 (7), 1 (2020); <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03727-8>.

Y. Suchikova, A. Lazarenko, S. Kovachov, I. Bardus, I. Bohdanov

Formation of CdO/CdS/textured-ZnO/ZnO heterostructures by chemical deposition

Berdyansk State Pedagogical University Berdyansk, Ukraine, yanasuchikova@gmail.com

CdO/CdS/textured-ZnO/ZnO heterostructure was synthesized using a combination of electrochemical etching and chemical deposition methods. Electrochemical etching was used to form a textured ZnO layer. Chemical deposition of a solution containing CdCl₂ was performed to prepare a CdS film with CdO nanoparticles on the surface. The obtained nanocomposite was characterized using SEM, EDX and Raman methods for structural, morphological and component studies. SEM images and Raman scattering showed the existence of cubic phase of CdO nanocrystals. The SEM study revealed the dispersion of 50-200 nm agglomerated nanostructures on the surface of CdS film.

Keywords: electrochemical etching, chemical deposition, nanostructures, Raman scattering, heterostructure.