

Прикладна фізика та наноматеріали

УДК 539.2615

<https://doi.org/10.15407/materials2025.10-11.004>

Властивості конгломератів ZnO—Zn, вирощених на неpolірованих Si підкладках методом карботермічного відновлення з використанням концентрованого сонячного випромінювання

Ю. О. Ковальський^{1*}, В. А. Карпина¹, О. І. Оліфан¹,
С. Ф. Корічев¹, С. П. Старик², В. В. Стрельчук³,
А. І. Євтушенко¹

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН
України

Україна, 03142, Київ, вул. Омеляна Пріцака, 3

*E-mail: y.kovalskyi@ipms.kyiv.ua

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України
Україна, 04074, Київ, вул. Автозаводська, 2

³Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
Україна, 03028, Київ, пр. Науки, 41

Вивчено структуру, морфологію та фотолюмінесценцію конгломератів ZnO—Zn, вирощених на неpolірованих Si підкладках методом карботермічного відновлення з використанням концентрованого сонячного випромінювання зі зміною наступних параметрів вирощування: відстані прекурсор—підкладка, де перекурсором є суміш порошків ZnO та C, та масових співвідношень порошку ZnO до порошку C: 0,33 : 1 та 2 : 1. Запропонований метод синтезу дозволяє вирощувати конгломерати ZnO—Zn з інтенсивною крайовою ультрафіолетовою (УФ) фотолюмінесценцією на фоні слабого випромінювання в видимій області, що робить можливим розробку ефективних УФ-світлодіодів на їх основі.

Ключові слова: конгломерати ZnO—Zn, структура, морфологія, фотолюмінесценція, карботермічне відновлення.

Вступ

Оксид цинку ZnO є перспективним напівпровідниковим матеріалом класу A^{II}—B^{VI}, який характеризується прямою широкою забороненою зоною (~3,37 eV) та високою енергією зв'язку екситонів (~60 meV) за кімнатної температури. Інженерія мікроструктури та морфології поверхні

© Ю. О. Ковальський, В. А. Карпина, О. І. Оліфан, С. Ф. Корічев,
С. П. Старик, В. В. Стрельчук, А. І. Євтушенко, 2025

ZnO викликає великий дослідницький інтерес для створення нових функціональних матеріалів на його основі [1] для розробки п'єзоелектричних перетворювачів [2], газових датчиків, люмінофорів [3], прозорих оптичних покриттів [4], детекторів ультрафіолетового (УФ) випромінювання [5] та прозорих провідників тощо. Інтерес до ZnO зумовлений такими його нетривіальними фізичними властивостями, як висока прозорість у видимій області, висока електропровідність внаслідок легування домішками Al, Ga або In, високі коефіцієнт електромеханічного зв'язку, механічна міцність та радіаційна стійкість [4, 5]. Вирощування впорядкованих наноструктур ZnO у формі дротів, стрижнів, кристалітів, гексагонів, трубок, квітів, конусів, тетраподів, кілець, голок, пірамід, які мають високу площу питомої поверхні, є актуальним для створення світлодіодів, газо- та біосенсорів, гібридних сонячних елементів, фотокаталізаторів тощо [6, 7].

Оксид цинку з різною морфологією наноструктур можна одержати в процесі карботермічного синтезу завдяки реакції відновлення порошку оксиду цинку вуглецем при відносно невисоких температурах $\sim 1000^\circ\text{C}$, коли для випаровування прекурсору ZnO/C застосовують різного роду інерційні електричні нагрівачі або трубчасті печі. Наявний різний градієнт тиску парів цинку та кисню призводить до порушення стехіометричного співвідношення в ZnO. Особливо гостро ця проблема проявляється, коли вирощуються леговані наноструктури ZnO з використанням металоорганічних сполук, які мають різні температури сублімації. Тому для осадження впорядкованих наноструктур стехіометричного ZnO різної морфології актуальною задачею є розробка методів швидкого випаровування прекурсору, наприклад, за допомогою концентратора сонячного випромінювання [8].

У даній роботі реалізовано швидкий процес карботермічного відновлення ZnO за допомогою випаровування прекурсору ZnO/C концентрованим сонячним випромінюванням, що дозволило випаровувати прекурсор швидко завдяки миттєвому росту температури в фокусі сонячного концентратора, яка становила 1000°C .

Мета роботи — встановити вплив співвідношення в прекурсорі масової долі порошку ZnO до масової долі порошку C (ZnO/C), яке змінювали як $0,33 : 1$ та $2 : 1$, та вплив відстані розміщення підкладки від прекурсору на структуру, морфологію та фотолюмінесценцію конгломератів ZnO—Zn, вирощених на неполірованих Si підкладках методом карботермічного відновлення з використанням концентрованого сонячного випромінювання.

Матеріали та методи дослідження

Конгломерати ZnO—Zn вирощували на неполірованих підкладках кремнію методом карботермічного відновлення, використовуючи концентроване сонячне випромінювання. Розмір підкладок становив $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Процес випаровування здійснювали за допомогою сонячного концентратора Інституту проблем матеріалознавства (Київ, Україна) (рис. 1), який був створений на базі переобладнаного військового прожектора.

Для проведення випаровування прекурсор (суміш порошків ZnO та C загальною масою 1 г) розміщували з одного краю кварцової трубки, який залишався закритим, а підкладки неполірованого Si розміщували на

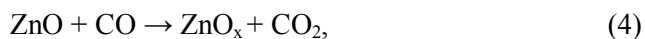


Рис. 1. Сонячний концентратор (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України (Київ, Україна).

відстанях 4—10 см від зони випаровування (параметр L). Інший край кварцової трубки залишався відкритим, забезпечуючи доступ повітря та відвід продуктів реакції.

У експерименті використовували суміші ZnO/C у співвідношеннях 0,33 : 1 та 2 : 1. Представлений на рис. 1 концентратор має дзеркало діаметром 100 см, яке забезпечує температуру ~ 1000 °C на об'єкті фокусування сонячного випромінювання з повністю відкритими жалюзіями (кут 90°).

За карботермічною реакцією розкладання ZnO під дією температури та каталізатора вуглецю відбуваються декілька реакцій. Ці процеси можна описати наступними рівняннями [9]:



У результаті швидкого термічного нагріву відбувається генерація парів цинку, які транспортуються в зону з меншою температурою, де відбувається їх конденсація та ріст наноутворень оксиду цинку. Мікроструктура цих наноутворень визначається температурою, тиском парів над підкладкою, природою підкладки, складом прекурсору.

Оксид цинку відновлюється вуглецем при температурі вище 900 °C. У цьому випадку цинк, що вивільняється, може утворювати рідку фазу у вигляді крапель рідини, оскільки температура плавлення цинку складає 419 °C, які можуть слугувати центрами зародкоутворення та росту нанокристалітів оксиду цинку. Пари цинку в процесі карботермічного відновлення також можуть окиснюватися до стабільної фази ZnO, температура плавлення якої складає 1975 °C. Таким чином, на ділянках кварцової трубки поза межами сонячного фокусу, тобто за температур нижчих 900 °C, повинні конденсуватися нанокристаліти ZnO.

Враховуючи, що певна частина вуглецю безпосередньо реагує з киснем з утворенням CO або CO₂, в експериментах використали суміш

порошків ZnO та C (ZnO/C) у двох різних масових пропорціях — 0,33 : 1 та 2 : 1. Процес випаровування суміші ZnO/C проводили при температурах 900—1000 °С. Це сприяло формуванню нанокристалів, які осаджувалися на неpolіровані підкладки Si (100), розташовані на відстані 40—100 мм від зони випаровування. Тривалість осадження за даних умов становила близько 2 хв.

Для дослідження кристалічної структури ZnO використовували метод рентгенівської дифракції за допомогою дифрактометра ДРОН-4 з CuK_α -випромінюванням ($\lambda = 0,1541$ нм). На сканувальному електронному мікроскопі Tescan Mira 3 LMUSEM (Чехія) досліджено морфологію поверхні зразків, що дозволило отримати зображення поверхні з високою деталізацією одержаних конгломератів. Елементний склад зразків визначили на електронному мікроскопі ZEISS EVO 50 XVP (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Німеччина) з використанням енергодисперсійного аналізатора рентгенівських спектрів Ultim Max 100 (Oxford Instruments plc, Велика Британія). Спектри фотолюмінесценції (ФЛ) вимірювали за кімнатної температури за допомогою збудження He-Cd лазера (325 нм) на спектрофотометрі Horiba Jobin-Yvon T64000 (Франція).

Результати та їх обговорення

Рентгенограми одержаних зразків, осаджених з різними співвідношеннями вихідного прекурсору ZnO/C як 0,33 : 1 та 2 : 1, представлено на рис. 2. Бачимо, що в обох випадках представлені рентгенограми свідчать про утворення ZnO та Zn: положення піків співпадає з фазою ZnO гексагональної сингонії (згідно з дифракційною картою JCPDS № 87-0713) та з фазою гексагонального Zn (згідно з JCPDS № 36-1451). Для всіх вирощених зразків характерним є наявність піків ZnO (002) та (101), а також рефлексів Zn (100), (101) та (102) (рис. 2, а, б). Варто зазначити, що найбільш інтенсивним піком ZnO є пік (101) при $2\theta = 36,25^\circ$ та пік Zn (101) при $43,22^\circ$.

Нами проведено апроксимацію цих піків функцією Гаусса (математичний пакет Origin) для визначення положення найінтенсивніших піків ZnO (101) та Zn (101) та їх повної ширини на половині максимуму (англ. FWHM) та внесено отримані дані в табл. 1 та 2.

Для визначення розміру кристалітів D було використано рівняння Шеррера [10]

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (5)$$

де k — коефіцієнт форми (приблизно 0,93); λ — довжина хвилі рентгенівського випромінювання (0,1541 нм); β і θ — повна ширина на половині максимуму (FWHM) та кут дифракції для площини (101) відповідно. Результати розрахунків розмірів кристалітів наведені в табл. 1 та 2.

На рис. 3 представлено залежність розмірів кристалітів D ZnO та Zn від відстані прекурсор—підкладка для конгломератів ZnO—Zn за різних співвідношень прекурсору ZnO/C. На рис. 3, а можна бачити, а з табл. 1 слідує, що величина розміру кристалітів для ZnO знаходиться в межах 37,7—48,4 нм, а для Zn — в межах 48,5—73,0 нм. Видно, що при співвідношенні ZnO/C як 0,33 : 1 має місце тенденція до зменшення розмірів кристалітів ZnO та Zn залежно від відстані L . Мінімальні значення

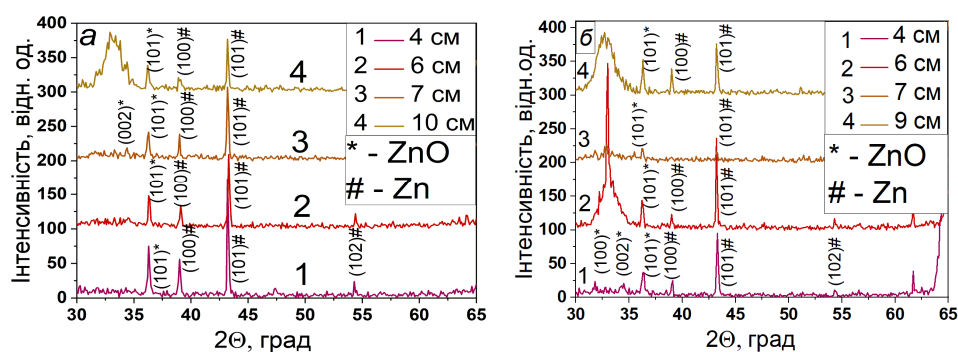


Рис. 2. Рентгенограми конгломератів ZnO—Zn, вирощених на підкладках Si з співвідношеннями ZnO/C як 0,33 : 1 (а) та 2 : 1 (б) за різних значень параметра L .

Т а б л и ц я 1. Результати рентгеноструктурного аналізу конгломератів ZnO—Zn, вирощених на підкладці Si з співвідношенням ZnO/C як 0,33 : 1 залежно від параметра L

L , см	Кристаліти ZnO			Кристаліти Zn		
	Пік (101), град	FWHM, град	D , нм	Пік (101), град	FWHM, град	D , нм
4	36,31	0,17	48,4	43,23	0,11	73,0
6	36,34	0,17	48,2	43,31	0,14	57,2
7	36,26	0,22	37,7	43,22	0,17	48,5
10	36,23	0,19	43,0	43,22	0,13	61,2

Т а б л и ц я 2. Результати рентгеноструктурного аналізу конгломератів ZnO—Zn, вирощених на підкладці Si з співвідношенням ZnO/C як 2 : 1 залежно від параметра L

L , см	Кристаліти ZnO			Кристаліти Zn		
	Пік (101), град	FWHM, град	D , нм	Пік (101), град	FWHM, град	D , нм
4	36,32	0,26	31,6	43,29	0,19	43,5
6	36,24	0,25	32,9	43,22	0,11	73,0
7	36,25	0,21	39,6	43,23	0,19	43,6
9	36,29	0,19	42,7	43,23	0,15	53,7

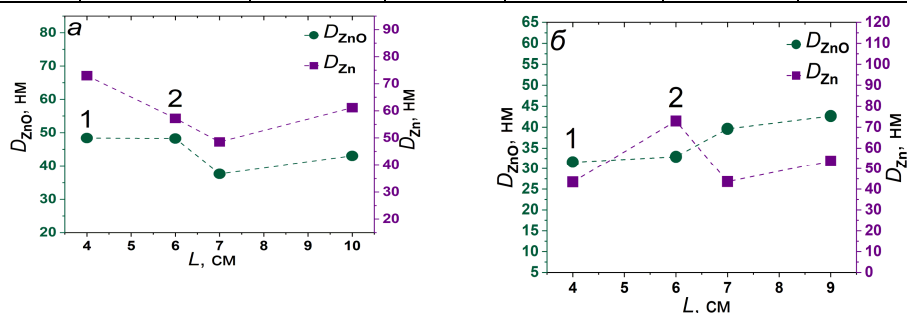


Рис. 3. Розміри кристалітів ZnO (1) та Zn (2) конгломератів ZnO—Zn, вирощених на підкладках Si зі співвідношеннями ZnO/C як 0,33 : 1 (а) та 2 : 1 (б) залежно від параметра L .

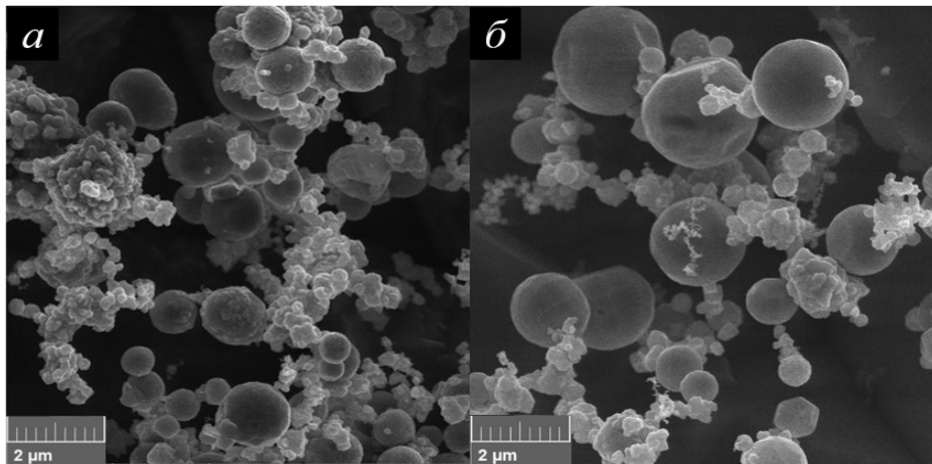


Рис. 4. СЕМ зображення конгломератів зерен ZnO та сфер Zn, вирощених на неpolірованих підкладках Si зі співвідношеннями ZnO/C як 0,33 : 1 (а) та 2 : 1 (б).

розмірів кристалітів фіксуються при $L = 7$ см. Для співвідношення ZnO/C як 2 : 1 (рис. 3, б, табл. 2) спостерігаються значно менші розміри кристалітів у порівнянні зі зразками, вирощеними при співвідношенні ZnO/C як 0,33 : 1: значення D для кристалітів ZnO змінюються від 31,6 до 42,7 нм, а для кристалітів Zn — від 43,5 до 53,7 нм. У цьому випадку спостерігається зворотна тенденція, а саме: розмір кристалітів ZnO зростає зі збільшенням відстані L .

СЕМ зображення конгломератів ZnO—Zn, осаджених на неpolірованих підкладках Si з використанням концентрованого сонячного випромінювання для розкладання прекурсорів, наведені на рис. 4. Методом енергодисперсійного аналізу встановлено, що зразки складаються з наноутворень ZnO з розмірами в діапазоні 40—60 нм та мікрокристалів Zn у формі сфер з діаметрами в діапазоні 500—3500 нм (рис. 4, а, б).

Конгломерати ZnO та Zn неоднорідно покривають поверхню підкладки кремнію. Чіткої залежності розподілу наноутворень ZnO та мікросфер Zn від відстані прекурсор—підкладка не спостерігається.

На рис. 5 представлено нормовані на максимальне значення спектри фотолюмінесценції (ФЛ) конгломератів ZnO—Zn (виміряні за кімнатної температури), вирощених на підкладці Si зі співвідношеннями ZnO/C як 0,33 : 1 та 2 : 1. Спектри фотолюмінесценції зразків складаються з двох смуг: в ультрафіолетовому діапазоні спектра — крайова фотолюмінесценція (КФЛ) з максимумом при 3,23—3,24 еВ та напівшириною піку близько 140—170 меВ та смугою ФЛ у видимому діапазоні спектра випромінювання з максимумом при 2,4 еВ (рис. 5), зумовленою оптичними переходами за участю дефектних рівнів (ДФЛ). На рис. 5 також спостерігається другий порядок КФЛ при 1,62 еВ.

Видно, що використання прекурсору зі співвідношенням ZnO/C як 2 : 1 є доцільним для осадження конгломератів ZnO—Zn з інтенсивною УФ ФЛ на фоні слабкої ФЛ з дефектних рівнів. На останнє також вказує вище положення піку КФЛ при 3,24 еВ та його менше значення напівширини піку 140 меВ в порівнянні з меншим значенням положення піку КФЛ при 3,23 еВ з напівшириною піку 170 меВ зразка, вирощеного при

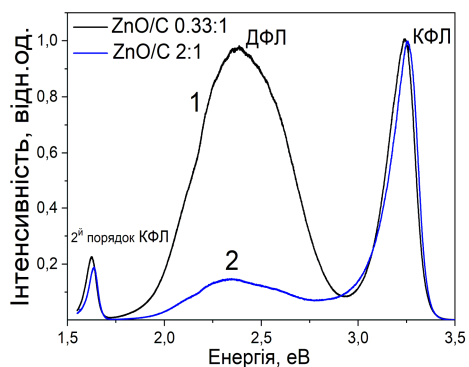


Рис. 5. Нормовані спектри фотолюмінесценції конгломератів ZnO—Zn, вирощених на неполірованих підкладках Si зі співвідношеннями ZnO/C як 0,33 : 1 (1) та 2 : 1 (2).

співвідношенні ZnO/C як 0,33 : 1. Детальний аналіз смуги ДФЛ шляхом її апроксимації функцією Лоренца виявив два піки ФЛ з положеннями при 2,3 та 2,59 еВ. Пік ДФЛ при 2,3 еВ відноситься до переходу електрона з зони провідності на рівень подвійно зарядженої вакансії кисню V_o^{++} , а пік при 2,59 еВ викликаний рекомбінаційним переходом з мілкового донорного рівня на рівень вакансії кисню V_o або рівень міжвузлового цинку Zn_i [8].

Висновки

Проведений аналіз структури, морфології та фотолюмінесценції зразків дозволяє зробити наступні висновки.

Розміри кристалітів ZnO знаходяться в межах 37—48 нм, а кристалітів Zn — в межах 48—73 нм.

Морфологія конгломератів ZnO—Zn визначається співвідношенням ZnO/C в прекурсорі. Мікрокристали Zn формуються у вигляді сфер з діаметрами в діапазоні 500—3500 нм, а наноутворення ZnO — у вигляді кристалітів розмірами 40—60 нм.

Для досягнення інтенсивної ультрафіолетової фотолюмінесценції конгломерати ZnO—Zn доцільно вирощувати з використанням співвідношення ZnO/C як 2 : 1.

Ця робота була підтримана Національною академією наук України за темою № 0125U000604.

Список літератури

1. Shteplyuk I., Khranovsky V., Ievtushenko A., Yakimova, R. Temperature-dependent photoluminescence of ZnO thin films grown on off-axis SiC substrates by APMOCVD. *Materials*. 2021. Vol. 14 (4). P. 1035 (15 pp). <https://doi.org/10.3390/ma14041035>
2. Taleb S., M. van Lingen W., Acuautila M. Toward high quality tactile sensors using ZnO/P (VDF-TrFE) flexible piezoelectric composite films. *Mater. Adv.* 2024. Vol. 5. P. 7671—7678. <https://doi.org/10.1039/d4ma00283k>
3. Karpyna V., Ievtushenko A., Kolomys O., Lytvyn O., Strelchuk V., Tkach V., Starik S., Baturin V., Karpenko O. Raman and photoluminescence study of Al, N-codoped ZnO films deposited at oxygen-rich conditions by magnetron sputtering. *Phys. Stat. Solidi*. 2020. Vol. 257. P. 1900788. <https://doi.org/10.1002/pssb.201900788>
4. Zhang W., Zhao X., Sun Q., Gao W., Yang X., Wang X. Optical, electrical and thermal stability properties of Al and F co-doped ZnO thin films prepared by sol-gel spin-coating. *Thin Solid Films*. 2023. Vol. 776. P. 139889. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139889>
5. Ievtushenko A., Khyzhun O., Karpyna V., Bykov O., Tkach V., Strelchuk V., Kolomys O., Rarata S., Baturin V., Karpenko O. Lashkarev G. The effect of

- Zn_3N_2 phase decomposition on the properties of highly-doped ZnO:Al, N films. *Thin Solid Films*. 2019. Vol. 669. P. 605—612. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.052>
6. Khranovskyy V., Yakimova R., Karlsson F.S., Syed A., Holtz P.-O., Urgessa Z.N., Oluwafemi O.S., Both J.R. Comparative PL study of individual ZnO nanorods, grown by APMOCVD and CBD techniques. *Phys. B: Condensed Matter*. 2012. Vol. 407. P. 1538—1542. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.09.080>
 7. Baibara O., Radchenko V., Karpyna V., Ievtushenko A. A review of the some aspects of the development of ZnO-based photocatalysts for a variety of applications. *Phys. Chem. Solid State*. 2021. Vol. 22 (3). P. 585—594. <https://doi.org/10.15330/pcss.22.3.585—594>
 8. Ievtushenko A., Tkach V., Strelchuk V., Petrosian L., Kolomys O., Kutsay O., Garashchenko V., Olifan O., Korichev S., Lashkarev G. and Khranovskyy V. Solar explosive evaporation growth of ZnO nanostructures. *Appl. Sci*. 2017. Vol. 7. P. 383. <https://doi.org/10.3390/app7040383>
 9. Mortezaali A., Moradi R. The correlation between the substrate temperature and morphological ZnO nanostructures for H₂S gas sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. Vol. 206. P. 30—34. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.11.027>
 10. Labhane P.K., Sonawane S.H., Sonawane G.H., Patsl S.P., Huse V.R. Snfluence of Mg dopsng on ZnO nanoparticles decorated on grapheme oxide (GO) crumpled paper-like sheet and its high photocatalytic performance under sunlight. *J. Phys. Chem. Solids*. 2018. Vol. 114. P. 71—82. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.11.017>

References

1. Shtepliuk, I., Khranovskyy, V., Ievtushenko, A., Yakimova, R. (2021). Temperature-dependent photoluminescence of ZnO thin films grown on off-axis SiC substrates by APMOCVD. *Materials*, Vol. 14 (4), pp. 1035. <https://doi.org/10.3390/ma14041035>
2. Taleb, S., M. van Lingen, W., Acuautila, M. (2024). Toward high quality tactile sensors using ZnO/P (VDF-TrFE) flexible piezoelectric composite films. *Mater. Adv.*, Vol. 5, pp. 7671—7678. <https://doi.org/10.1039/d4ma00283k>
3. Karpyna, V., Ievtushenko, A., Kolomys, O., Lytvyn, O., Strelchuk, V., Tkach, V., Starik, S., Baturin, V., Karpenko, O. (2020). Raman and photoluminescence study of Al, N-codoped ZnO films deposited at oxygen-rich conditions by magnetron sputtering. *Phys. Stat. Solid.*, Vol. 257, pp. 1900788. <https://doi.org/10.1002/pssb.201900788>
4. Zhang, W., Zhao, X., Sun, Q., Gao, W., Yang, X., Wang, X. (2023). Optical, electrical and thermal stability properties of Al and F co-doped ZnO thin films prepared by sol-gel spin-coating. *Thin Solid Films*, Vol. 776, pp. 139889. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139889>
5. Ievtushenko, A., Khyzhun, O., Karpyna, V., Bykov, O., Tkach, V., Strelchuk, V., Kolomys, O., Rarata, S., Baturin, V., Karpenko, O. and Lashkarev, G. (2019). The effect of Zn_3N_2 phase decomposition on the properties of highly-doped ZnO : Al, N films. *Thin Solid Films*, Vol. 669, pp. 605—612. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.052>
6. Khranovskyy, V., Yakimova, R., Karlsson, F. S., Syed, A., Holtz, P.-O., Urgessa, Z. N., Oluwafemi, O. S., Both, J. R. (2012). Comparative PL study of individual ZnO nanorods, grown by APMOCVD and CBD techniques. *Phys. B: Condensed Matter.*, Vol. 407, pp. 1538—1542. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.09.080>
7. Baibara, O., Radchenko, V., Karpyna, V., Ievtushenko, A. (2021). A review of the some aspects of the development of ZnO-based photocatalysts for a variety of applications. *Phys. Chem. Solid State*, Vol. 22 (3), pp. 585—594. <https://doi.org/10.15330/pcss.22.3.585—594>
8. Ievtushenko, A., Tkach, V., Strelchuk, V., Petrosian, L., Kolomys, O., Kutsay, O., Garashchenko, V., Olifan, O., Korichev, S., Lashkarev, G. and Khranovskyy, V. (2017). Solar explosive evaporation growth of ZnO nanostructures. *Appl. Sci.*, Vol. 7, pp. 383. <https://doi.org/10.3390/app7040383>

9. Mortezaali, A., Moradi, R. (2014). The correlation between the substrate temperature and morphological ZnO nanostructures for H₂S gas sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 206, pp. 30—34. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.11.027>
10. Labhane, P. K., Sonawane, S. H., Sonawane, G. H., Patsl, S. P., Huse, V. R. (2018). Influence of Mg doping on ZnO nanoparticles decorated on graphene oxide (GO) crumpled paper-like sheet and its high photocatalytic performance under sunlight. *J. Phys. Chem. Solids*, Vol. 114, pp. 71—82. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.11.017>

Properties of ZnO—Zn conglomerates grown on unpolished Si substrates by carbothermal reduction using concentrated solar radiation

Y. O. Kovalskyi^{1*}, V. A. Karpyna¹, O. I. Olifan¹, S. F. Korichev¹,
S. P. Starik², V. V. Strelchuk³, A. I. Ievtushenko¹

¹I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv

*E-mail: y.kovalskyi@ipms.kyiv.ua

²V. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine, Kyiv

³V. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine, Kyiv

ZnO is a promising direct wide bandgap functional semiconductor material for optoelectronics and photovoltaics. The growth of ordered ZnO nanostructures (NS) with a diverse morphology and a high specific surface area is relevant for creating LEDs, gas and biosensors, hybrid solar cells, photocatalysts, etc. ZnO NS with different morphology of nanostructures can be produced in the process of carbothermal synthesis due to the reduction of zinc oxide powder with carbon at relatively low temperatures of ~1000 °C when various types of inertial electric heaters or tube furnaces are used to evaporate the ZnO/C precursor. The different pressure gradients of zinc and oxygen vapor violate the stoichiometric ratio in ZnO. Therefore, to deposit ordered stoichiometric ZnO NS of various morphologies, it is an urgent task to develop methods for rapid evaporation of the precursor, for example, using a solar radiation concentrator. Previously, we have used concentrated solar irradiation to evaporate various precursors and grow ZnO NS with different morphologies: hexagons, spheres, and needles. In this work, we investigated the carbothermal reduction process with using concentrated solar radiation for the growth of ZnO—Zn NS. This approach ensures a high heating rate of the precursor since the temperature in the concentrator focus instantly reaches 1000 °C, which allows for the achievement of saturated zinc vapor in a few minutes for the further formation of ZnO—Zn conglomerates of NS. The influence of the ratio of the mass fraction of ZnO powder to the mass fraction of C powder (ZnO/C) in the precursor, which was changed as 0,33 : 1 and 2 : 1, and the effect of the distance of the substrate from the precursor (parameter L) on the structure and morphology of ZnO—Zn conglomerates grown on unpolished Si substrates by the method of carbothermal reduction using concentrated solar radiation were investigated.

Keywords: ZnO—Zn conglomerates, structure, morphology; photoluminescence, carbothermal reduction.