

**ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУР, ОТРИМАНИХ ПРИ ОСАДЖЕННІ  
МІКРОЧАСТИНОК ZnO В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ**

У даній роботі розглядаються спектри фото-люмінесценції (ФЛ) ультрадисперсних кристалів (УДК) ZnO, осаджених на підкладку в електричному полі. Дрібнодисперсні кристали ZnO отримували шляхом поділу на фракції в колоїдному розчині промислового люмінофора К-56. Колоїдний розчин витримувався в пробірці не менше двох тижнів. Після цього для досліджень використовувалася 1/3 розчину з верхньої частини пробірки. Аналіз мікрофотографії плівки УДК показує, що розміри кристалів знаходяться в межах 10-40 нм. Зразки для дослідження наносилися на підкладку з нержавіючої сталі у вигляді емульсії ZnO водного розчину, потім вода була вилучена шляхом випарювання. Досліджувалися зразки ZnO, нанесені на підкладку як звичайним способом, так і в електричному полі. Напруженість електричного поля становила  $10^5$  В/м. Спектри ФЛ для вихідного зразка мають досить інтенсивну широку смугу в видимій ділянці, яка при осадженні початкового зразка в електричному полі стає менш інтенсивною. Спектри ФЛ для УДК ZnO мають слабку інтенсивність смуги в видимій області, а спектри ФЛ для УДК ZnO, осаджених в електричному полі, практично не мають цієї смуги. При цьому екситонна смуга з  $\lambda_{\max} = 401$  нм для всіх зразків залишається практично незмінною. Для відповіді на питання про походження спектральної лінії в видимій області, що охоплює діапазон від 401 до 650 нм, зразок початкового ZnO (промислового люмінофора К-56) оброблявся іонами кисню з енергією 3 кВ протягом двадцяти хвилин, після чого інтенсивність смуги ФЛ (Еб) у видимій області значно збільшилася. Після прогріву зразка до 700 К в вакуумі (з подальшим охолодженням до кімнатної температури) спектр ФЛ ZnO приймає первинний вигляд, що говорить про те, що дефекти, відповідальні за лінію у видимій області спектра (довжина хвилі в максимумі  $\lambda_{\max} \approx 510-540$  нм), створюються іонами кисню.

**Ключові слова:** спектр, фотолюмінесценція, електричне поле, ультрадисперсні кристали.

**Тютюнников В.И. Оптические свойства структур, полученных при осаждении микрочастиц ZnO в электрическом поле.** В данной работе рассматриваются спектры фото-люминесценции (ФЛ) ультрадисперсных кристаллов (УДК) ZnO, осаждённых на подложку в электрическом поле. Спектры ФЛ для исходного образца имеют довольно интенсивную широкую полосу в видимой области, которая при осаждении исходного образца в электрическом поле становится менее интенсивной. Спектры ФЛ для УДК ZnO имеют слабую интенсивность полосы в видимой области. А спектры ФЛ для УДК ZnO, осаждённых в электрическом поле, практически не имеют этой полосы. При этом экситонная полоса с  $\lambda_{\max} = 401$  нм для всех образцов остаётся практически неизменной.

**Ключевые слова:** спектр, фотолюминесценция, электрическое поле, ультрадисперсные кристаллы.

**V.I. Tyutyunnikov. Optical properties of structures obtained by deposition of ZnO microparticles in an electric field.** This paper considers the photoluminescence (PL) spectra of ultrafine ZnO crystals (UFC) deposited on a substrate in an electric field. Fine ZnO crystals were obtained by separating into fractions in a colloidal solution of K-56 industrial phosphor. The colloidal solution was kept in a test tube for at least two weeks.

\* канд. фіз.-мат. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь

After that, 1/3 of the solution from the upper part of the tube was used for research. The analysis of the micrograph of the UFC film shows that the size of the crystals ranges from 10 to 40 nm. The samples for the study were deposited on a stainless steel substrate in the form of an aqueous solution of ZnO emulsion, then the water was removed by evaporation. ZnO samples deposited on a substrate, both in the usual way and in an electric field, were investigated. The electric field strength was 105 V/m. The PL spectra for the initial sample have a fairly intensive wide band in the visible region, which, when the original sample is deposited in an electric field, becomes less intensive. The PL spectra for UFC ZnO have a weak intensity of the band in the visible region; while the PL spectra for UDC ZnO deposited in an electric field practically do not have this band. In this case, the exciton band with  $\lambda_{max} = 401$  nm for all the samples remains almost unchanged. To answer the question as to the origin of the spectral line in the visible region and covering the range from 401 to 650 nm the sample of the original ZnO (K-56 industrial phosphor) was treated with 3 kV oxygen ions, for twenty minutes after which the intensity of the PL band (E6) in the visible region increased significantly. After heating the sample to 700 K in vacuum (followed by cooling to room temperature) the ZnO FL spectrum takes on its original appearance, which means that the defects responsible for the line in the visible region of the spectrum (the wavelength at the maximum is  $\lambda_{max} \approx 510-540$  nm), are created by oxygen ions.

**Keywords:** spectrum, photoluminescence, electric field, ultrafine crystals.

**Постановка проблеми.** Підвищений інтерес до оксиду цинку пов'язаний з можливістю створення світловипромінюючих пристроїв, що працюють в ближньому ультрафіолетовому діапазоні. Дослідження властивостей дрібнодисперсних кристалів ZnO, отриманих за допомогою різних методів, відкриває нові перспективи застосування цієї речовини. Тому існує необхідність досліджувати зразки, отримані певним методом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом особливий інтерес представляють нанорозмірні матеріали, в яких можуть спостерігатися розмірні ефекти зміни властивостей матеріалів через великий внесок поверхні. У зв'язку з цим завдяки своїм унікальним властивостям дрібнодисперсні структури на основі ZnO привертають увагу різних дослідницьких груп [1-3]. Оксид цинку є напівпровідником, у якого ширина забороненої зони 3,37 еВ. З джерела [4] випливає, що ширина забороненої зони наночастинок ZnO залежить і від їх розмірів. Енергія зв'язку екситону в ZnO дорівнює 63 меВ, це значно вище, ніж у широко відомого напівпровідника GaN (26 меВ). Рекомбінація екситонів в оксиді цинку при кімнатній температурі створює ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 380-390 нм [5, 6]. Таким чином, отримання та дослідження нових структур на основі наночастинок ZnO надають передумови створення світло-випромінюючих пристроїв, що працюють в ближньому ультрафіолетовому діапазоні [6-9]. Крім вище згаданих властивостей у ZnO є такі переваги перед іншими широкозонними матеріалами, як радіаційна стійкість. Також, технологія отримання ZnO набагато простіша, що є запорукою низької вартості пристроїв на його основі. Актуальною на сьогоднішній день є одна з найважливіших проблем кристалізації – отримання орієнтованих дрібнодисперсних систем на поверхні підкладки, необробленої особливим способом [10-11].

**Мета статті** полягає в дослідженні оптичних властивостей дрібнодисперсних систем ZnO, які були отримані шляхом осадження наночастинок ZnO на неорієнтовану підкладку в електричному полі.

**Виклад основного матеріалу.** Спектральні властивості досліджувалися на установці, що представлена в роботі [3]. Дрібнодисперсні кристали ZnO отримували шляхом поділу на фракції в колоїдному розчині промислового люмінофора К-56. Колоїдний розчин витримувався в пробірці не менше двох тижнів. Після цього для досліджень використовувалася 1/3 розчину з верхньої частини пробірки. Аналіз мікрофотографії промислового люмінофора показує, що розміри кристалів знаходяться в межах 10-500 нм. Зразки для дослідження отримували шляхом нанесення на дзеркальну поверхню підкладки з нержавіючої сталі емульсії ZnO водного розчину, потім вода була вилучена шляхом випаровування. Досліджувалися структури, утворені при нанесенні дрібнодисперсних кристалів ZnO на підкладку як звичайним способом, так і в електричному полі. Напруженість електричного поля складала  $10^5$  В/м. Після чого зразок поміщався

в робочу камеру. Запис спектрів здійснювався при кімнатній температурі. На рис. 1 представлені спектри ФЛ зразків на основі вихідного люмінофора К-56. Отримані в даній роботі спектри промислового люмінофора ZnO (К-56) представлені поруч ліній з довжинами хвиль в максимумі: E1 ( $\lambda_{\max} = 379,6$  нм), E2 ( $\lambda_{\max} = 388$  нм), E3 ( $\lambda_{\max} = 395,5$  нм), E4 ( $\lambda_{\max} = 401$  нм), і широкою смугою у видимій області E6 ( $\lambda_{\max} = 510-540$  нм), яка охоплює діапазон від 401 до 650 нм. Спостерігається відмінність між спектрами ФЛ для зразків, нанесених на підкладку звичайним способом (рис. 1, а) і нанесених в електростатичному полі (рис. 1, б). З аналізу спектрів видно, що лінії спектра в фіолетовій області мають близькі параметри (для самої інтенсивної лінії з  $\lambda_{\max} = 401$  нм маємо напівширину  $\Delta\lambda \approx 3$  нм). Інтенсивність смуги E6 для зразків, осаджених в електростатичному полі, є меншою, ніж для зразків, осаджених звичайним чином (рис. 1 а, б).

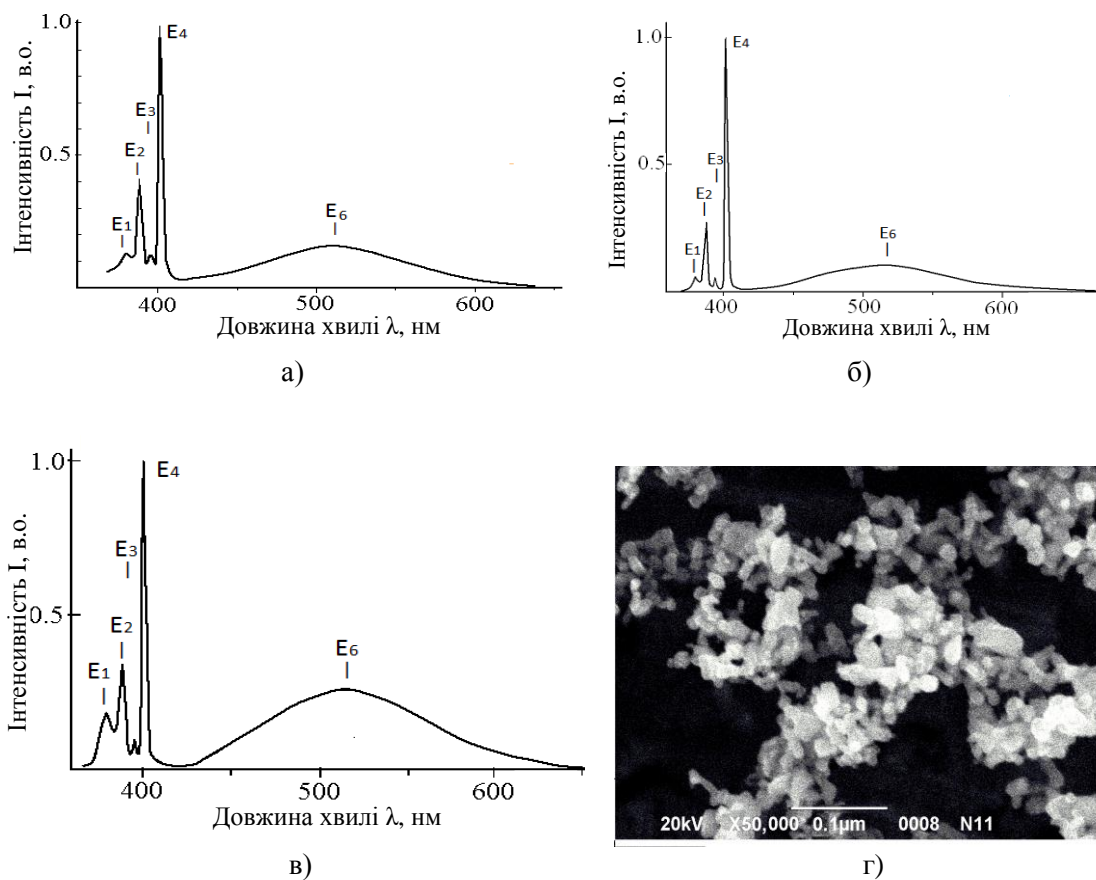


Рис. 1 – Оптичні спектри ФЛ промислового люмінофору К-56 (ZnO): а – нанесення кристалів на підкладку звичайним способом; б – нанесення кристалів на підкладку в електричному полі напруженістю  $10^5$  В/м; в – матеріал, нанесений на підкладку в електричному полі напруженістю  $10^5$  В/м після впливу іонами кисню (енергією 3 кеВ) протягом 20 хвилин; г – мікрофотографія дрібнодисперсних кристалів ZnO

Незначна зміна інтенсивності смуги E6 (рис. 1, б) мабуть пов'язана з частковою поляризацією частинок ZnO. На поляризацію наночастинок в електричному полі вказується і в роботах [11-13]. До теперішнього часу залишається відкритим питання про природу центрів, відповідальних за смугу, що охоплює зелену і червону області; в нашому випадку смуга E6 (довжина хвилі в максимумі  $\lambda_{\max} \approx 510-540$  нм). Одні джерела пов'язують цю смугу з однократно зарядженими вакансіями кисню [1, 5], інші – з неконтрольованою домішкою міді [14]. В роботі [14] проведено легування міддю монокристалічних плівок ZnO високої якості шляхом термічної дифузії і дослідження їх люмінесцентних властивостей методом катодолюмінесценції. Відзначається, що легування міддю призводить до збільшення інтенсивності зеленої смуги спектра катодолюмінесценції. У роботах [1, 5] говориться, що за люмінесценцію в зеленій і червоній

областях відповідальні дефекти, утворені вакансіями кисню. У даній роботі зразок вихідного ZnO (промислового люмінофора К-56) оброблявся іонами кисню з енергією 3 кВ протягом двадцяти хвилин, після чого інтенсивність смуги ФЛ (E<sub>6</sub>) у видимій області значно збільшилась (рис. 1, в). Після прогріву зразка до 700 К в вакуумі (з подальшим охолодженням до кімнатної температури) спектр ФЛ ZnO приймає первинний вигляд (рис. 1, а), що говорить про те, що дефекти, відповідальні за лінію у видимій області спектра, створюються іонами кисню. Цікаві результати були отримані при дослідженні УДС ZnO. Як видно з спектрів ФЛ, отримані УДС володіють високою інтенсивністю лінії E<sub>4</sub> в ультрафіолетовій області спектра с довжиною хвилі  $\lambda_{\text{max}} = 401$  нм і низькою інтенсивністю у видимій області (рис. 2, а). При цьому, для зразків, отриманих осадженням в електричному полі, інтенсивність смуги в видимій ділянці спектра практично відсутня (рис. 2, б). Такі спектри відповідають високим структурним та оптичним якостям кристалів [5, 7].

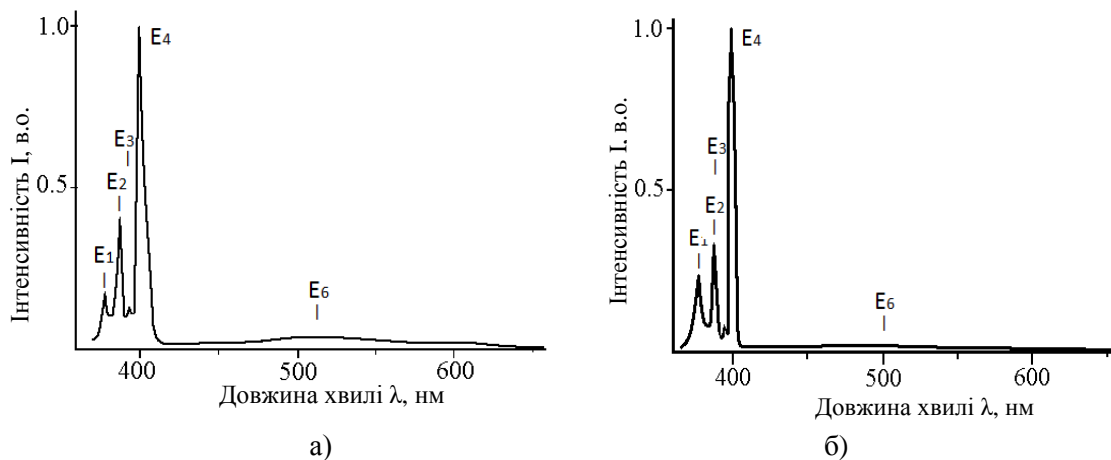


Рис. 2 – Оптичні спектри ФЛ ультрадисперсних частинок ZnO: а – нанесення на підкладку звичайним способом; б – нанесення на підкладку в електричному полі напруженістю 105 В/м

Спектри ФЛ для ультрадисперсних частинок ZnO, нанесених на підкладку звичайним способом і в електричному полі напруженістю  $10^5$  В/м, представлені на рис. 2.

Цьому, мабуть, сприяє спрямована орієнтація кристалів в електричному полі. Рівень поляризації кристалів в даному випадку вище, так як згідно мікрофотографії розміри кристалів знаходяться в межах 10-40 нм (рис. 1, г). У даній роботі було встановлено, що осадженні в електричному полі кристали ZnO ультрадисперсних розмірів значно покращують свої спектральні властивості. Ці спектри аналогічні спектрам, які отримують при використанні надчистих кристалів з ідеальною кристалічною решіткою [1, 7, 15, 16]. В роботі [15] відзначається, що ультрафіолетове (UV) випромінювання проявляється в досить досконалих структурах з мінімальною кількістю дефектів, які можуть створювати конкуруючі канали випромінювальної або безізлучательної рекомбінації. Тому співвідношення інтенсивностей UV і видимого випромінювання PL може служити мірою якості кристалів ZnO. Причому в цій роботі для цього використовувалася не навмисно підготовлена підкладка. Аналіз спектрів фотолюмінесценції показав, що за спектр у видимій області спектра відповідальні дефекти, утворені іонами кисню. В роботі [16] також підкреслюється, що видиму люмінесценцію ZnO (пік 550 нм) пов'язують з наявністю глибоких дефектів, зазвичай кисневих вакансій і міжвузлових атомів цинку.

### Висновки

Отримано спектри ФЛ для ультрадисперсних систем ZnO (К-56), які вказують на те, що при зменшенні розмірності кристалів до нанорозмірних величин їх оптичні властивості поліпшуються. Осадження ультрадисперсних кристалів на підкладку в електричному полі також веде

до значного поліпшення оптичних властивостей. Це можна пояснити строго визначеною орієнтацією оптичної осі дрібнодисперсних кристалів ZnO при осадженні їх в електричному полі. Зміна спектральних характеристик при впливі іонами кисню на кристали ZnO показала, що за інтенсивність широкої смуги у видимій області відповідальні дефекти, утворені іонами кисню. Показано, що при осадженні ультрадисперсних кристалів в електричному полі можна отримати УДС з оптичними параметрами не гірше, ніж для надчастих кристалів з ідеальною кристалічною решіткою.

#### Перелік використаних джерел:

1. Морфология и оптические свойства наноструктур оксида цинка, синтезированных методами термического и электроразрядного распыления / В.С. Бураков [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 2. – С. 89-97.
2. Дослідження процесів формування нанопорошкового ZnO та його властивості / Б.К. Остафійчук [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Том 9, № 4. – С. 728-731.
3. Surface Luminescence of Polycrystalline Zinc oxide Excited by Hydrogen Atoms / M. Sushchikh [et al.] // Materials Research Society Symposium Proceedings. – 2007. – Vol. 957. – Pp. 1-6. – Mode of access: DOI: 10.1557/PROC-0957-K07-02.
4. Вакалов Д.С. Исследование центров рекомбинации в наночастицах ZnO методами оптической, фотоэлектрической и люминесцентной спектроскопии / Д.С. Вакалов, С.О. Краидиевский, Л.В. Михнев // Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XVIII всероссийской конференции. – Краснодар, 2012. – С. 157-161.
5. Кузьмина И.П. Окись цинка. Получение и оптические свойства / И.П. Кузьмина, В.А. Никитенко; отв. ред. И. К. Верещагин; АН СССР, Ин-т кристаллографии им. А.В. Шубникова. – Москва: Наука, 1984. – 166 с.
6. Nikitenko V.A. Optics and Spectroscopy of Point Defects in ZnO / V.A. Nikitenko // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Zinc Oxide as a Material for Microand Optoelectronic Applications (23-25 June 2004; St. Petersburg). – Springer, 2005. – Pp. 69-81.
7. Оптические и структурные свойства наностержней ZnO, полученных методом импульсного лазерного напыления без катализатора / Кайдашев В.Е. [и др.] // Журнал технической физики. – 2009. – Том 79, вып. 11. – С. 45-49.
8. Li L.E. Room-temperature excitonic lasing in ZnO tetrapod-like crystallites / L.E. Li, L.N. Demianets // Optical Materials. – 2008. – Vol. 30, no. 7. – Pp. 1074-1078. – Mode of access: DOI: 10.1016/j.optmat.2007.05.013.
9. Использование различных катализаторов роста для лазерного напыления микро- и наностержней ZnO / Н.В. Лянгузов [и др.] // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 4. – Pp.108-116.
10. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2009. – 416 с.
11. Поляризация тонких пленок титаната бария-стронция при действии внешнего электрического поля / В.Б. Широков [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 8. – С. 115-121.
12. MElectric-Field-Drivtn Accumulation and Alignment of CdSe and CdTe Nanorods in Nanoscale Devices / Zonghai Hu [et al.] // Nano letters. – 2006. – Vol. 6, № 11. – Pp. 2585-2591. – Mode of access: DOI: 10.1021/nl0620379.
13. Electric-Field-Assisted Assembly of Perpendiculary oriented Nanorod Superlattices / Kevin M. Ryan [et al.] // Nano letters. – 2006. – Vol. 6, № 7. – Pp. 1479-1482. – Mode of access: DOI: 10.1021/nl060866o.
14. Ализов Я.И. Зеленая полоса люминесценции пленок оксида цинка, легированных медью в процессе термической диффузии / Я.И. Ализов, М.В. Чукичев, В.А. Никитенко // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 1. – С. 34-38.
15. Сенсбилизация наностержней ZnO квантовыми точками CdSe / А.В. Трошин [и др.] // Неорганические материалы. – 2012. – Т. 48, № 7. – С. 811-818.
16. Исследование структуры, эмиссионных и пьезоэлектрических свойств пленок ZnS, ZnS-ZnO и ZnO, полученных химическим методом / В.С. Хомченко [и др.] // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, вып.1. – С. 94-103.

## References:

1. Burakov V.S., Tarasenko N.V., Nevar E.A., Nedel'ko M.I. Morfologiya i opticheskie svoystva nanostruktur oksida tsinka, sintezirovannykh metodami termicheskogo i elektrorazriadnogo raspyleniya [Morphology and optical properties of zinc oxide nanostructures synthesized by thermal and electrical discharge spraying]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 2011, vol. 81, no. 2, pp. 89-97. (Rus.)
2. Ostafiichuk B.K., Zhirovets'kii V.M., Kotliarchuk B.K., Moisa M.I., Popovich D.I., Serednits'kii A.S. Doslidzhennia protsesiv formuvannia nanoporoshkovogo ZnO ta iogo vlastivosti [Investigation of processes of formation of nanopowder ZnO and its properties]. *Fizika i khimiia tverdogo tila – Physics and Chemistry of Solid State*, 2008, vol. 9, no. 4, pp. 728-731. (Ukr.)
3. Sushchikh M., Styrov V., Tyutyunnikov V., Cordella N. Surface Luminescence of Polycrystalline Zinc oxide Excited by Hydrogen Atoms. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2007, vol. 957, pp. 1-6. doi: 10.1557/PROC-0957-K07-02.
4. Vakalov D.S., Kraidievskii S.O., Mikhnev L.V. Issledovanie tsentrov rekombinatsii v nanochastitsakh ZnO metodami opticheskoi, fotoelektricheskoi i liuminestsentnoi spektroskopii. *Materialy XVIII vseros. konf. «Optika i spektroskopiia kondensirovannykh sred»* [Investigation of recombination centers in ZnO nanoparticles by optical, photoelectric and luminescent spectroscopy. Proceedings of XVIII All-Russian Conf. «Optics and condensed matter spectroscopy»]. Krasnodar, 2012, pp. 157-161. (Rus.)
5. Kuz'mina I.P., Nikitenko V.A. Okis' tsinka. *Poluchenie i opticheskie svoystva* [Zinc oxide. Receiving and optical properties]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 166 p. (Rus.)
6. Nikitenko V.A. Optics and Spectroscopy of Point Defects in ZnO. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Zinc Oxide as a Material for Micro and Optoelectronic Applications. St. Petersburg, 2005. pp. 69-81.
7. Kaidashev V.E., Kaidashev E.M., Peres M., Monteiro T., Correia M.R., Sobolev N.A. Opticheskie i strukturnye svoystva nanosterzhnei ZnO, poluchennykh metodom impul'snogo lazernogo napyleniia bez katalizatora [Optical and structural properties of ZnO nanorods obtained by pulsed laser deposition without a catalyst]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 2009, vol. 79, no. 11, pp.45-49. (Rus.)
8. Li L.E., Demianets L.N. Room-temperature excitonic lasing in ZnO tetrapod-like crystallites. *Optical Materials*, 2008, Vol. 30, no. 7, Pp. 1074-1078. doi: 10.1016/j.optmat.2007.05.013.
9. Lianguzov N.V., Kaidashev V.E., Zakharchenko I.N., Kuprina Iu.A., Bunina O.A., Iuziuk Iu.I., Kiselev A.P., Kaidashev E.M. Ispol'zovanie razlichnykh katalizatorov rosta dlia lazernogo napyleniia mikro- i nanosterzhnei ZnO [Using various growth catalysts for laser deposition of ZnO micro and nanorods]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 2012, vol. 82, no. 4, pp. 108-116. (Rus.)
10. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 416 p. (Rus.)
11. Shirokov V.B., Biriukov S.V., Mukhortov V.M., Iuziuk Iu.I. Poliarizatsiia tonkikh plenok titanata bariia-strontsiia pri deistvii vneshnego elektricheskogo polia [Polarization of thin films of barium-strontium titanate under the action of an external electric field]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 2011, vol. 81, iss. 8, pp. 115-121. (Rus.)
12. Zonghai Hu, Michael D. Fischbein, Claudia Querner, and Marija Drndic. Electric-Field-Driven Accumulation and Alignment of CdSe and CdTe Nanorods in Nanoscale Devices. *Nano letters*, 2006, vol. 6, № 11, pp. 2585-2591. doi: 10.1021/nl0620379.
13. Ryan K.M., Mastroianni A., Stancil K.A., Liu H., Alivisatos A.P. Electric-Field-Assisted Assembly of Perpendicularly oriented Nanorod Superlattices. *Nano letters*, 2006, vol. 6, № 7, pp. 1479-1482. doi: 10.1021/nl060866o.
14. Alivov Ia.I., Chukichev M.V., Nikitenko V.A. Zelenaia polosa liuminestsentsii plenok oksida tsinka, legirovannykh med'iu v protsesse termicheskoi diffuzii [Green luminescence band of zinc oxide films doped with copper in the process of thermal diffusion]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 2004, vol. 38, iss. 1, pp. 34-38. (Rus.)
15. Troshin A.V., Kovalenko A.A., Dorofeev S.G., Baranov A.N. Sensibilizatsiia nanosterzhnei ZnO kvantovymi tochkami CdSe [Sensitization of ZnO Nanorods by CdSe Quantum Dots]. *Neorganicheskie materialy – Inorganic Materials*, 2012, vol. 48, № 7, pp. 811-818. (Rus.)

16. Khomchenko V.S., Roshchina N.N., Zav'ialova L.V., Strel'chuk V.V., Svechnikov G.S., Tat'ianenko N.P., Gromashevskii V.L., Litvin O.S., Avramenko E.A., Snopok B.A. Issledovanie struktury, emissionnykh i p'ezoelektricheskikh svoistv plenok ZnS, ZnS-ZnO i ZnO, poluchennykh khimicheskim metodom [Study of the structure, emission and piezoelectric properties of ZnS, ZnS-ZnO and ZnO films obtained by the chemical method]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 2014, vol. 84, iss. 1, pp. 94-103. (Rus.)

Рецензент: В.П. Гранкін  
д-р фіз.-мат. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 25.03.2019

УДК 621.81:004.94

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181282

© Рябікіна М.А.\*

### 3D ПРИНТУВАННЯ МЕТАЛАМИ: СТИСЛИЙ SWOT АНАЛІЗ

*В статті розглядаються технології, що застосовуються для 3D друку, їх переваги і недоліки. Результати літературних досліджень засновані на динамічному розвитку адитивних технологій і включають наукові публікації не старші п'яти років. Огляд представлений у вигляді короткого SWOT аналізу: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (сильні, слабкі сторони, можливості, загрози). Формулювання проблеми включає в себе введення в тему і містить розвиток і актуальність технологій 3D друку металами. Надані теоретичні засади і визначені терміни «Адитивне виробництво», «3D друк». В роботі представлені основні принципи, сутність та сфери застосування селективного лазерного спікання (SLS), прямого металевого лазерного спікання (DMLS), селективного лазерного плавлення (SLM). Розглянуто основні види металевих матеріалів. В статті також окреслені сучасні проблеми і ризики 3D друку, можливості і прогнози. Однією з основних проблем є пористість деталей. Вона може бути викликана самим технологічним процесом або металевим порошком, використаним в процесі 3D друку. Пори зменшують загальну щільність деталі і можуть призвести до появи тріщин і втоми. У висновку підкреслюється, що конкретні характеристики деталей і широкий спектр застосувань технологій 3D друку безумовно змінять цілі галузі промисловості в доступному для огляду майбутньому. Для компаній та країн особливо важливо передбачити і адаптуватися до поточного розвитку 3D друку, щоб не втратити свої позиції на ринку.*

**Ключові слова:** адитивні технології, 3D друк, лазер, спікання, плавлення.

**Рябікіна М.А. 3D принтирование металлами: краткий SWOT анализ.** Обзор технологий 3D печати металлами выполнен в виде краткого SWOT анализа: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (сильные, слабые стороны, возможности, риски). Результаты литературных исследований основаны на динамичном развитии аддитивных технологий и научных публикациях не старше пяти лет. В статье определены термины «Аддитивное производство», «3D печать», обсуждены основные принципы и сферы применения селективного лазерного спекания (SLS), прямого металлического лазерного спекания (DMLS), селективного лазерного плавления (SLM). Рассмотрены основные виды металлических материалов, очерчены проблемы 3D печати, тенденции и прогнозы. Одной из основных проблем является пористость деталей. Она может быть

\* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [maryna.ryabikina@gmail.com](mailto:maryna.ryabikina@gmail.com)