

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-07>

УДК 621.382.2

Г. С. КАТРИЧ¹, к.ф.-м. наук, н.с.

e-mail: g.s.katrich@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9600-7092>

С.І. ПЕТРУШЕНКО¹, к.ф.-м. наук, с.н.с.

e-mail: petrushenko@univer.kharkov.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7727-9527>

О.В. БОЦУЛА¹, к.ф.-м. наук, доц.

e-mail: oleg.botsula@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2809-9482>

¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛІВОК ZnO ВИРОЩЕНИХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

Актуальність. Оксид цинку (ZnO) є перспективним матеріалом для створення напівпровідникових джерел випромінювання та детекторів в області коротких хвиль оптичного діапазону. Плівки на основі ZnO розглядаються як можливі елементи приладів оптоелектроніки, за допомогою яких можна впливати на їх оптичні властивості. Методи створення таких плівок є досить різноманітними, проте отримання якісних та маловартісних плівок ZnO залишається важливою науково-технічною задачею, що потребує розв'язку. Отже, проведення досліджень в цьому напрямку та на їх основі вироблення рекомендацій по синтезу плівок ZnO є актуальним.

Метою роботи є отримання плівок ZnO з використанням золь-гель методу та оцінка їх фізичної структури та оптичних властивостей. Проведення оцінки впливу ультрафіолетового випромінювання на структуру та оптичні характеристики отриманих плівок.

Методи і методологія. Розглянуто процес отримання плівок ZnO. Описано процес отримання таких плівок з використанням золь-гель методу. Проведено візуальний аналіз експериментально отриманих плівок. Проведено експериментальне дослідження оптичних властивостей плівок ZnO. Зокрема аналізується вплив ультрафіолетового випромінювання, що використовується на етапі отримання плівок на особливості їх здатності до поглинання випромінювання в оптичному діапазоні.

Результати. З використанням золь-гель методу експериментально отримано плівки ZnO. Плівки ZnO формувалися на кварцевих підкладках. Показано, що в отриманих плівках, які було сформовано без впливу випромінювання, спостерігається утворення наночастинок ZnO. Використання ультрафіолетового випромінювання на етапі кінцевої термічної обробки за температури 480° С призводить до формування більш якісної плівки ZnO та зменшення розміру гранул. Аналіз хімічного складу плівок з використанням рентгено-флуоресцентного аналізу показує наявність цинку та кисню в утворених плівках, а також незначний вміст вуглецю, що пов'язано з використанням у якості підкладок кварцу. Отримано залежності пропускну здатності плівок ZnO від довжини хвилі випромінювання, що падає на плівку в діапазоні 200- 450 нм. Показано, що у плівках, які на етапі термічної обробки знаходилися під дією ультрафіолетового випромінювання, спостерігається зменшення величини граничної довжини хвилі, яка відповідає краю поглинання, та, відповідно, зменшення ширини забороненої зони, яка обчислюється за результатами експерименту.

Висновки. Отже, дія ультрафіолетового випромінювання на етапі фінальної термічної обробки в плівках ZnO, які формуються за допомогою золь – гель методу, призводить до покращення якості плівок та до зміни їх оптичних властивостей, зокрема зменшення енергії, що відповідає порогу поглинання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: золь-гель метод, оксид цинку, термічна обробка, ультрафіолетове випромінювання, поглинаюча здатність, поріг поглинання, довжина хвилі

Як цитувати: Катрич Г. С., Петрушенко С. І., Боцула О.В. Оптичні характеристики плівок ZnO вирощених золь-гель методом. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021;35:84-90. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-07>

In cites: Katrich GS, Petrushenko SI, Botsula OV. Optic properties of ZnO films grown by sol-gel technique. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2021;35:84-90. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-07>

ВСТУП

Оксид цинку (ZnO) переважно розглядається як перспективний матеріал для створення напівпровідникових джерел випромінювання та детекторів в області коротких хвиль оптичного діапазону. Для цих застосувань ZnO може використовуватися як самостійно, наприклад, в якості матеріалу для польового транзистора [1,2], так і виступати допоміжним елементом конструкції, наприклад, для створення прозорого контакту до

© Катрич Г. С., Петрушенко С. І., Боцула О.В., 2021

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

оптоелектронного приладу[3]. Він має всі властивості, що характерні для інших широкозонних матеріалів, зокрема для нітридних сполук, карбиду кремнію та інших: радіаційну стійкість, значну величину поля пробою, здатність працювати за високих температур оточуючого середовища[4,5]. Особливістю цього матеріалу, яка суттєво відрізняє його від вище згаданих матеріалів, є його висока прозорість, яка і визначила пріоритетну область його застосування.

Останнім часом інтерес до цього матеріалу також пов'язаний з можливістю використання його у вигляді тонких плівок та формуванню в них наночастинок[6]. Використання таких плівок дає змогу змінювати оптичні властивості приладів оптоелектроніки та в деяких випадках отримати нові оптичні характеристики[7]. Відомо, що низькоомні плівки оксиду цинку р-типу можна достатньо легко отримати шляхом легування алюмінієм, в той час як плівки n-типу формуються введенням Ga. Це дозволяє розглядати ці об'єкти в майбутньому як основу для створення елементів для сонячної енергетики.

Наразі отримання плівок оксиду цинку є важливою технологічною задачею, яка, не беручи до уваги велику кількість наявних технологічних методів, потребує свого розв'язку. На сьогодні відомо декілька основних методів отримання плівок ZnO: магнетронне та радіочастотне розпилення, електронно-променево та імпульсне лазерне осадження, метод осадження з водних розчинів, термічне окислення сполук, що містять цинк та ряд інших [8-13]. Основним критерієм вибору того або іншого технологічного процесу залишається якість отриманих плівок та їх собівартість.

Метою цієї роботи є створення бази для експериментального отримання плівок ZnO золь-гель методом та визначення впливу на процес формування плівок зовнішніх факторів, зокрема ультрафіолетового випромінювання.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для формування плівок ZnO в роботі використовується золь-гель метод. Ця технологія передбачає формування плівок в результаті утворення гелю із золю(колоїдної дисперсії твердих частинок в рідині). Слід відзначити, що всі матеріали, що отримуються за допомогою цього методу є наноматеріалами, тому їх властивості можуть суттєво відрізнятися від матеріалів, що отримано в інший спосіб.

Для приготування розчину для золю необхідну кількість ацетату цинку заливали 100% ізопропіловим спиртом і перемішували за температури 60 °С. Для стабілізації гелю в розчин додавали триетаноламін ($C_6H_{15}NO_3$). Потім розчин розміщували в ультразвуковому диспергаторі протягом 20 хв. Отриману суміш повільно охолоджували до кімнатної температури і витримували 2 дні до готовності золю за температури навколишнього середовища (22 ± 2) °С. Ступінь готовності рідкого гелю до нанесення оцінювалася за ступенем його в'язкості. Для формування шарів плівок ZnO золь-гель методом використовувалося центрифугування. Щоб отримати однорідні плівки із заданою товщиною, частота обертання центрифуги вибиралася 2000 об/хв, що знаходиться у відповідності до методики, яка була описана в [14]. У якості підкладки для формування плівки використовувалося кварцеве скло. Пластини з нанесеним на них золем проходили попередню сушку. Для цього вони поступово нагрівалися до температури 250 °С, після чого пластинка витримувалася за незмінної температури протягом 20 хвилин. Для отримання шарів із більшою товщиною процес нанесення і сушіння повторювався. Сформована в такий спосіб плівка поступово нагрівалася до температури 480°С та витримувалася за цієї температури протягом 30 хвилин. Частина отриманих зразків на етапі фінішної термообробки поверхні піддавалася впливу ультрафіолетового випромінювання. Як джерело ультрафіолетового випромінювання використовувалася лампа ДРШ-500. На останньому етапі зразки із сформованими на склі плівками повільно охолоджувалися до температури навколишнього середовища і промивалися дистильованою водою в ультразвуковій ванні та остаточно висушувалися за звичайних умов. Мікроструктуру та елементний склад зразків досліджували з використанням растрового електронного мікроскопа Tescan Vega 3LMH, оснащеного детектором характеристичного рентгенівського випромінювання XFlash 5010, Bruker.

СТРУКТУРА ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД ПЛІВОК ZNO

У результаті процесу виготовлення плівок було отримано дві групи, в одній з яких знаходилися плівки, які були отримано без впливу ультрафіолетового випромінювання, Рис.1, а інші були плівки, поверхня яких піддавалася впливу ультрафіолетового випромінювання на етапі фінішної термічної обробки, Рис.2. Наведені на Рис. 1-2 зображення було отримано з використання електронного мікроскопу, де зображення а) та б) отримані за використання різної величини масштабу зображень. На наведених знімках області, що відповідають сформованим шарам ZnO, мають білий колір, на відміну від областей, в яких плівка не сформувалася, вони на знімках більш темні.

На рисунках можна побачити відмінності, що виникають у пластинках за різних умов їх формування. Зокрема, в обох випадках спостерігається виникнення гранул ZnO розміром в десятки нанометрів. Проте у зразках, які на етапі фінальної термічної обробки знаходилися під дією ультрафіолетового випромінювання, спостерігається більш щільна упаковка та ділянки, де однорідність отриманих плівок є досить високою. Оцінки розмірів нанокристалітів показали, що в отриманих плівках, які було сформовано без впливу випромінювання,

спостерігається утворення наночастинок ZnO з розмірами гранул близько 70 нм. Використання ультрафіолетового випромінювання на етапі кінцевої термічної обробки за температури 480° С призводить до формування більш якісної плівки ZnO та зменшення розміру гранул до 50 нм. Можна відмітити формування більш якісних границь розділу, що також вказує якість зразків, що формуються під впливом ультрафіолетового випромінювання.

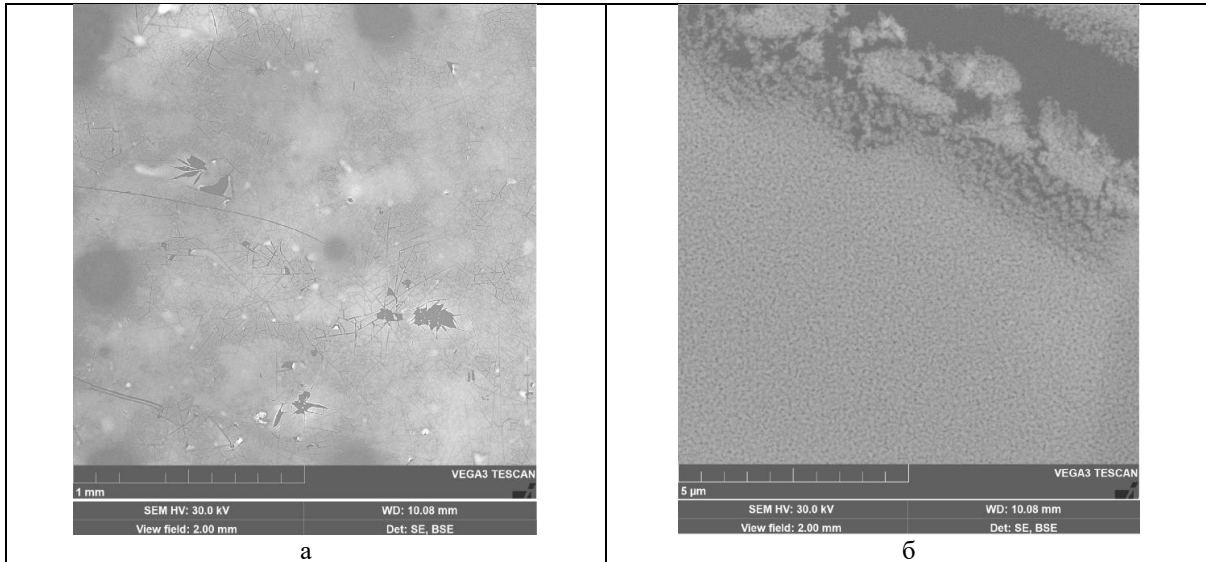


Рис. 1 SEM зображення поверхні плівок, що отримано без впливу ультрафіолетового випромінювання: а)
Fig. 1. SEM image of the surface of the films obtained without exposure to ultraviolet radiation: а)

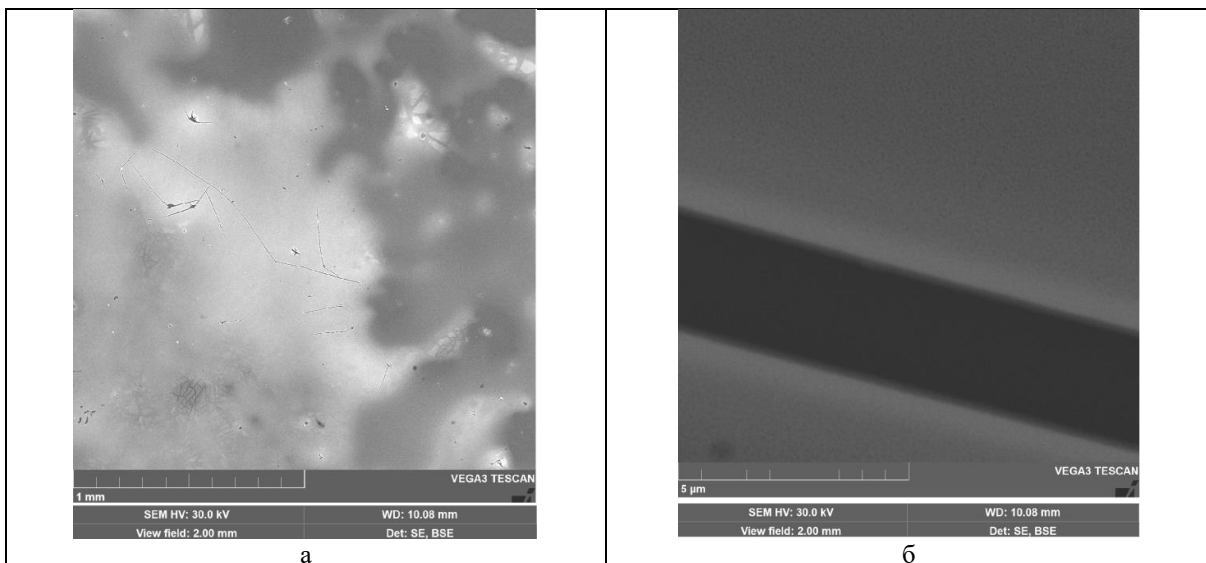


Рис. 2 SEM зображення поверхні плівок, що отримано з використанням ультрафіолетового випромінювання на етапі фінішної термічної обробки.
Fig. 2. SEM image of the surface of the films obtained using ultraviolet radiation at the stage of finishing heat treatment.

Результати хімічного аналізу плівок, які були отримані методом рентгено-флуоресцентного аналізу, показані Рис. 3

Хімічний склад плівок практично однаковий. Аналіз показує наявність цинку та кисню в усіх утворених плівках, а також незначний вміст вуглецю, має домішковий характер і практично завжди спостерігається в EDS спектрах. Також у деяких отриманих зразках плівок проявляється присутність кремнію, наприклад на Рис. 3а, що пов'язано з використанням кварцової підкладки, яка приймає участь в генерації характеристичного випромінювання. Малий вміст кремнію вказує на те, що досліджувані плівки ZnO є суцільними, а їх товщина складає кілька мікрон.

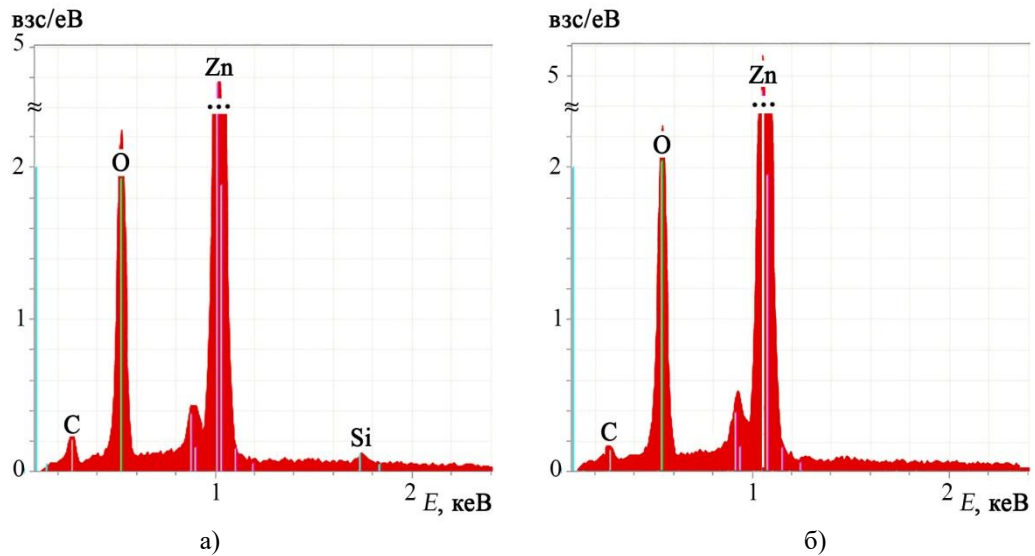


Рис 3 Хімічний склад плівок ZnO а) плівка, що отримана без впливу ультрафіолетового випромінювання; б) плівка, що отримана під впливом ультрафіолетового випромінювання
 Fig. 3. Chemical composition of ZnO films a) film obtained without exposure to ultraviolet radiation; b) a film obtained under the influence of ultraviolet radiation

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК ZNO

Оптичні властивості отриманих плівок оцінювали шляхом вимірювання коефіцієнту пропускання матеріалу T , Рис.4, криві 1 та 2. Для визначення впливу підкладки на результати вимірювань пропускання спроможність кварцевих підкладок була отримана окремо (Рис.4, крива 3)

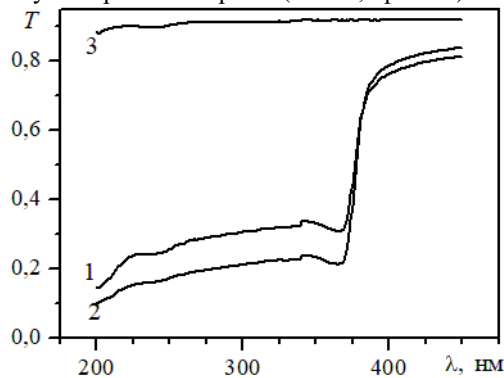


Рис 4 Залежність коефіцієнту пропускання від довжини падаючого електромагнітного випромінювання: 1 - плівка, яку отримано без впливу ультрафіолетового випромінювання; 2 - плівка, яку отримано під впливом ультрафіолетового випромінювання; 3 - кварцева підкладка.

Fig. 4. Dependence of the transmittance on the length of incident electromagnetic radiation: 1 - film obtained without exposure to ultraviolet radiation; 2 - film obtained under the influence of ultraviolet radiation; 3 - quartz substrate.

Величина інтенсивності світла за умови, що воно проходить тільки через кварцеву підкладку, приймалася за величину інтенсивності світла, що падає на плівку. Одночасно приймалося, що коефіцієнт відбиття світла від плівки є досить малим $R \ll 1$, що є виправдано, враховуючи матову структуру її поверхні. З отриманих 370 нм, що одночасно означає збільшення коефіцієнту поглинання світла на більш коротких довжинах хвиль. Оцінка ширини забороненої зони була зроблена відповідно до підходу, який було запропоновано в роботі [15,16]. Відповідно до нього для аморфних напівпровідників та тонких плівок коефіцієнт поглинання α , пов'язаний з шириною забороненої зони E_g та енергією випромінювання $h\nu$, що поглинається, співвідношенням:

$$\alpha d h\nu = A(h\nu - E_g)^n = F(h\nu), \quad (1)$$

де d - товщина плівки, A - деяка константа. Тоді очевидно, що

$$\frac{F}{F'} = \frac{1}{n} (h\nu - E_g). \quad (2)$$

З отриманих експериментальних даних знаходимо F / F' та визначаємо ширину забороненої зони, використовуючи ділянку, де ця залежність є лінійною (Рис.5). Відповідно приймаємо до уваги, що повинна розглядатися область енергій, які відповідають переходам між станами, що знаходяться поблизу країв зони провідності та валентної зони, де справедливий параболічний закон дисперсії. Рівняння прямої лінії, що якнайкраще відповідає експериментальним даним, знаходимо, використовуючи лінійну регресію та відповідно метод найменших квадратів. З аналізу даних отримуємо, що ширина забороненої зони у випадку плівок, які не піддавалися впливу ультрафіолетового випромінювання, складає $E_g = 3,232$ еВ, в той час як оцінка для плівок, що сформовані під впливом ультрафіолетового випромінювання, дає $E_g = 3,224$ еВ. Тобто спостерігається незначне зменшення оціночного значення ширини забороненої зони для випадку плівок, що підлягали впливу випромінювання. В цілому, отримані величини знаходяться у відповідності до результатів, що отримано іншими авторами та для плівок, які зокрема були сформовані в інший спосіб [1,17]. Слід зазначити, що показник степені у рівнянні (1), який отримано за експериментальними даними, близький до 3; це характерно для багатьох аморфних плівок, зокрема для аморфних германію та кремнію [18], що свідчить про складну залежність густини станів у валентній зоні та зони провідності від енергії в отриманих плівках, яка потребує подальшого дослідження.

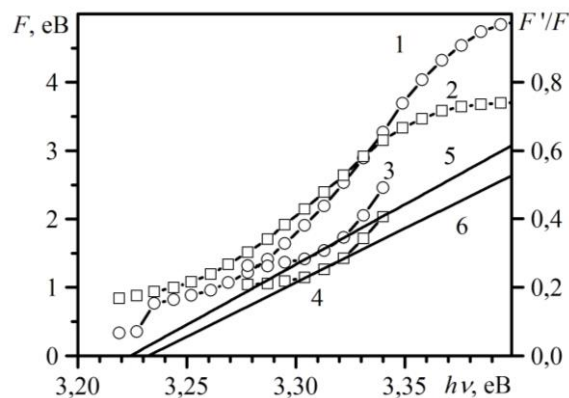


Рис. 5 Залежність функцій F (1,2) та F / F' (3,4) від енергії падаючого випромінювання, 5,6 - лінійна апроксимація: 1,3,5 – плівка, що сформована під впливом ультрафіолетового випромінювання; 2,4,6 - плівка, що сформована без впливу ультрафіолетового випромінювання.

Fig. 5. Dependence of functions F (1,2) and F / F' (3,4) on the energy of incident radiation, 5,6 - linear approximation: 1,3,5 - film formed under the influence of ultraviolet radiation; 2,4,6 - film formed without exposure to ultraviolet radiation.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Розроблено та апробовано методику отримання плівок ZnO з використанням золь-гель методу.
2. Отримані плівки ZnO мають аморфну структуру з розмірами доменів від 50 до 70 нм в залежності від способу їх обробки на кінцевому етапі, зокрема з використанням та без використання ультрафіолетового випромінювання.
3. Обробка плівок на кінцевому етапі ультрафіолетовим випромінювання призводить до незначного зменшення ширини забороненої зони, що характеризує отримані плівки.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Катрича Г. С., Петрушенко С. І. виконано в рамках держбюджетної НДР, за грантом МОН України (номери держреєстрації 0120U102290).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Cho J, Hwang S, Ko D-H, Chung S. Transparent ZnO Thin-Film Deposition by Spray Pyrolysis for High-Performance Metal-Oxide Field-Effect Transistors. *Materials*. 2019 Oct 19;12(20):3423. <https://doi.org/10.3390/ma12203423>
2. Park JW, Kang BH, Kim HJ. A Review of Low-Temperature Solution-Processed Metal Oxide Thin-Film Transistors for Flexible Electronics. *Advanced Functional Materials*. 2019 Sep 6;30(20):1904632.

- <https://doi.org/10.1002/adfm.201904632>
3. T-Thienprasert J, Rujirawat S, Klysubun W, Duenow JN, Coutts TJ, Zhang SB, et al. Compensation in Al-Doped ZnO by Al-Related Acceptor Complexes: Synchrotron X-Ray Absorption Spectroscopy and Theory. *Physical Review Letters*. 2013 Jan 28;110(5):055 502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.055502>
 4. Siddiqua P, Hadi WA, Shur MS, O'Leary SK. A 2015 perspective on the nature of the steady-state and transient electron transport within the wurtzite phases of gallium nitride, aluminum nitride, indium nitride, and zinc oxide: a critical and retrospective review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2015 May 23;26(7):4475–512. <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-015-3055-7>
 5. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III–V and II–VI Semiconductors*. Chichester: Wiley; 2009. 424 p.
 6. Siddiqi KS, ur Rahman A, Tajuddin, Husen A. Properties of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Activity Against Microbes. *Nanoscale Research Letters* [Internet]. 2018 May 8;13(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2532-3>
 7. Crossay A, Buecheler S, Kranz L, Perrenoud J, Fella CM, Romanyuk YE, et al. Spray-deposited Al-doped ZnO transparent contacts for CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012 Jun;101:283–8. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.008>
 8. Sharma S, Vyas S, Periasamy C, Chakrabarti P. Structural and optical characterization of ZnO thin films for optoelectronic device applications by RF sputtering technique. *Superlattices and Microstructures*. 2014 Nov;75:378–89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spmi.2014.07.032>
 9. Franklin JB, Zou B, Petrov P, McComb DW, Ryan MP, McLachlan MA. Optimised pulsed laser deposition of ZnO thin films on transparent conducting substrates. *Journal of Materials Chemistry*. 2011;21(22):8178-8182. <https://doi.org/10.1039/C1JM10658A>
 10. Szyszka B, Sittinger V, Jiang X, Hong RJ, Werner W, Pflug A, et al. Transparent and conductive ZnO:Al films deposited by large area reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 2003 Oct;442(1-2):179–183. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(03\)00968-4](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(03)00968-4)
 11. Liu H, Liu Y-F, Xiong P-P, Chen P, Li H-Y, Hou J-W, et al. Aluminum-Doped Zinc Oxide Transparent Electrode Prepared by Atomic Layer Deposition for Organic Light Emitting Devices. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2017 Jul;16(4):634-638. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2017.2700408>
 12. Opel M, Geprägs S, Althammer M, Brenninger T, Gross R. Laser molecular beam epitaxy of ZnO thin films and heterostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013 Dec 23;47(3):034002. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/47/3/034002>
 13. Barankin MD, Gonzalez II E, Ladwig AM, Hicks RF. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of zinc oxide at atmospheric pressure and low temperature. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007 Jun;91(10):924–930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2007.02.009>
 14. Rashid ARA, Hazwani TN, Mukhtar WM, Taib NAM. Influence of annealing temperature on optical properties of Al doped ZnO nanoparticles via sol-gel methods. *AIP Conference Proceedings*. 2018;1972:030006. <https://doi.org/10.1063/1.5041227>
 15. AL-ANI SKJ. Determination of the optical gap of amorphous materials. *International Journal of Electronics*. 1993 Dec;75(6):1153-1163. <https://doi.org/10.1080/00207219308907191>
 16. Ray AK, Hogarth CA. On the analysis of experimental data for optical absorption in non-crystalline materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1990 Apr 14;23(4):458-459. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/23/4/012>
 17. Marouf S, Beniaiche A, Guessas H, Azizi A. Morphological, Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Dip Coating Method. *Materials Research*. 2016 Nov 28;20(1):88–95. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0751>
 18. Mott NF, Davis EA. *Electronic processes in non-crystalline materials*. Clarendon Press; New York: Oxford University Press; 1979. 608 p.

Стаття надійшла до редакції 30 вересня 2021 р.

Рекомендовано до друку 15 листопада 2021 р.

OPTIC PROPERTIES OF ZNO FILMS GROWN BY SOL-GEL TECHNIQUE

G. S. Katrich, S. I. Petrushenko, O.V. Botsula,

¹V. N. Karazin Kharkiv National University, 61022, Kharkiv, Svobody square, 4

Background. Zinc oxide (ZnO) is a promising material for designing the semiconductor radiation sources and detectors in the region of short wavelengths of the optical range. Films based on ZnO are considered as possible elements of optoelectronic devices that can be used to influence their optical properties. Nowadays, the methods of making such films are quite diverse, however, obtaining high-quality and inexpensive ZnO films remains an actual scientific and engineering task that needs to be solved. Thus, the research in this direction and the development of recommendations on the synthesis of ZnO films is urgent.

Purpose of Work. The aim of the work is to obtain ZnO films by the sol-gel technique, to evaluate their structure and optical properties and to estimate the affect of ultraviolet radiation on the structure and optical characteristics of the obtained films.

Techniques and Methodology. The process of obtaining ZnO films is considered. The process of obtaining such films by sol-gel technique is described. A visual analysis of the experimentally obtained films has been carried out. The optical properties of ZnO films were experimentally examined. In particular, the influence of ultraviolet radiation used at the stage of obtaining films on the features of their ability to absorb radiation in the optical range is analyzed.

Results. ZnO films were grown experimentally by sol-gel technique. ZnO films were formed on quartz substrates. The formation of ZnO nanoparticles is observed in the films obtained without the influence of radiation. The usage of ultraviolet radiation at the stage of the final heat treatment at a temperature of 480 °C leads to the formation of a higher quality ZnO film and a decrease in the size of the granules. Analysis of the chemical composition of the films using X-ray fluorescence analysis shows the presence of zinc and oxygen in the formed films, as well as insignificant carbon content, which is associated with the use of quartz as substrates. The dependencies of the transmission capacity of ZnO films on the wavelength of radiation incident on the film in the range of 200–450 nm are obtained. It is shown that in films exposed to ultraviolet radiation at the stage of heat treatment, there is a shift in the value of the cut-off wavelength corresponding to the absorption edge and, accordingly, a decrease in the band gap calculated from the results of the experiment.

Conclusions: To summarize the results of the research we can highlight that the influence of ultraviolet radiation at the stage of the final heat treatment on ZnO films formed by sol-gel method leads to an improvement in the quality of the films and to a change in their optical properties, in particular, a decrease in the energy corresponding to the absorption threshold.

KEY WORDS: sol-gel technique, zinc oxide, heat treatment, ultraviolet radiation, absorption capacity, absorption threshold, wavelength.

The article was received by the editors: September 30 2021.

The article is recommended for printing November 15 2021.