

PACS numbers: 68.37.Hk, 78.30.Fs, 78.55.Et, 78.55.Mb, 78.67.Pt, 78.67.Rb, 81.15.Cd

Властивості плівок ZnO, одержаних на мезопоруватих підкладках Si методом магнетронного напорощення

В. В. Кідалов¹, А. Ф. Дяденчук¹, Ю. Ю. Бачеріков², А. Г. Жук²,
В. А. Батурін³, І. В. Рогозін¹, О. Ю. Карпенко³, В. В. Кідалов¹

¹*Бердянський державний педагогічний університет,
вул. Шмідта, 4,
71100 Бердянськ, Україна*

²*Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
просп. Науки, 41,
03028 Київ, Україна*

³*Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58,
40000 Суми, Україна*

У роботі методом реактивного магнетронного ВЧ-розпорошення одержано плівки ZnO на підкладках кремнію орієнтації (100) з попередньо нанесеною системою мезопор. Рентгенографічні дослідження ZnO показали, що плівки мають полікристалічну природу з гексагональною ґратницею типу вюрциту. Середні розміри кристалітів склали близько 50–200 нм. Мікроелементна аналіза виявила практично ідеальну стехіометричність ZnO, вирощеного на porous-Si/Si. У плівках ZnO спостерігається ледь помітний пік у зеленій (500–530 нм) і більш виразний у жовто-помаранчевій (590–620 нм) областях спектру.

The processes of formation of zinc oxide by the method of reactive magnetron high-frequency sputtering on mesoporous substrates of silicon with orientation (100) and (111) are investigated. Porous silicon specimens are obtained by electrochemical etching using silicon plates of *n*-type orientation conductivity (100) with a specific resistance of 1.0–1.5 Ω·cm. The anodizing process is carried out using an electrolyte solution consisting of hydrofluoric acid (HF) and ethanol (C₂H₅OH) in a 1:1 ratio. The current density is $J = 31.64$ mA/cm². The diameter of the substrate pores is of 15–20 nm. The ZnO film coating is performed by reactive magnetron high-frequency sputtering of the zinc target. Before the process of applying films, the vacuum system is pumped to a level of 10⁻³ Pa. The substrate temperature is of 300°C. Spray time is 20 minutes. The surface and cross-sectional studies of ZnO/porous-Si/Si samples show a significant change in surface morphology after synthesis. The film has a columnar

structure. The thin film of ZnO is closely tied to the porous silicon substrate, and the gap is not detected in the interface. If the Si(100) substrate is used, the diameter of the crystallites is of ≈ 200 nm, while using the substrate Si(111), it is not exceed 100 nm. As shown by x-ray studies of ZnO, it has a polycrystalline nature with a hexagonal wurtzite-type lattice. The deformation value of a ZnO film grown on porous silicon along the c -axis is calculated. The low value of compression strain (0.36%) shows that the ZnO film grows along the c -axis and indicates the fabrication of a high-quality crystal. The average crystallite size is of about 50–200 nm. The micronutrient analysis reveals practically the ideal stoichiometry of ZnO grown on porous-Si/Si. ZnO films show a slight peak in the green (500–530 nm) and more pronounced in the yellow–orange (590–620 nm) regions of the spectrum.

В роботі методом реактивного магнетронного ВЧ-распылення отримані плівки ZnO на підложках кремнія орієнтації (100) з попередньо нанесеною системою мезопор. Рентгенографічні дослідження ZnO показали, що плівки мають полікристалічну природу з гексагональною решіткою типу вюрцита. Середні розміри кристалітів склали близько 50–200 нм. Мікроелементний аналіз виявив практично ідеальну стехіометричність ZnO, вирощеного на porous-Si/Si. В плівках ZnO спостерігається едва помітний пік в зеленій (500–530 нм) і більш виразний в жовто-оранжевій (590–620 нм) областях спектра.

Ключові слова: плівки ZnO, поруваті підкладки Si, метода реактивного магнетронного ВЧ-розпорошення.

Key words: ZnO film, porous substrate Si, method of reactive magnetron RF sputtering.

Ключевые слова: плівки ZnO, пористі підкладки Si, метод реактивного магнетронного ВЧ-распылення.

(Отримано 3 січня 2019 р.; після доопрацювання — 15 січня 2019 р.)

1. ВСТУП

Нині різко зріс інтерес до плівок ZnO, які знаходять застосування в тонкоплівкових транзисторах [1], мемристорах [2], світлодіодах [3, 4], напівпровідникових лазерах, фотодетекторах [5], як прозорі електроди для кремнієвих сонячних батарей [6].

Для одержання плівок ZnO можуть бути використані підкладки сапфіру [7], нітриду галію [8] і карбїду кремнію [9]. Сапфір є діелектриком і має низький коефіцієнт теплопровідності, що обмежує його використання як підкладки. GaN і SiC мають високу вартість. При створенні фотодетекторів і сонячних елементів особливий інтерес представляють гетеропереходи n -ZnO/ p -Si [10]. Тому підкладки на основі кремнію представляють особли-

вий інтерес для одержання плівок оксиду цинку.

Однак параметри ґратниць кремнійової підкладинки і ZnO відрізняються на 20%; крім того, відрізняється ще й симетрія кристалічних ґратниць. Кремній — кубічний кристал, а ZnO має гексагональну ґратницю.

Для одержання ненапружених шарів використовуються різні методи. Це так звані метода «надріст» і метода «Пендео» [11, 12]. Такі способи вирощування дуже дорогі, що не технологічно, а сам процес вирощування займає тривалий час.

Останнім часом для зменшення механічної напруги в гетероструктурах використовуються поруваті підкладинки.

Так, нами в роботах [13, 14] були одержані плівки GaN кубічної модифікації на поруватих підкладинках арсеніду галію (GaAs) методом радикало-променевої епітаксії. Було показано, що частина пружних деформацій, що виникають у гетероструктурі GaN/porous-GaAs/GaAs [15], релаксує саме в поруватій структурі.

Також ми одержали монокристалічні плівки карбіду кремнію на підкладинках мезопоруватого кремнію методом хемічного заміщення атомів [16]. Експериментально і теоретично з використанням програмного пакета Comsol MultiPhysics було показано, що механічні напруження при наявності поруватого буферного шару складають $\cong 65$ МПа, при відсутності буферного шару механічні напруги значно вище і становлять $\cong 125$ МПа [17]. На одержаному темплейті SiC/porous-Si/Si методом хлорид-гідридної епітаксії одержані якісні плівки GaN [18].

Таким чином, порувата структура скорочує площу контакту між плівкою та підкладинкою, що уможливорює ефективно зменшити пружні напруження, що виникають внаслідок різниці в коефіцієнтах теплового розширення та параметрах ґратниць. У зв'язку з цим представляються актуальними подальші дослідження процесу росту плівок ZnO на поруватому Si і вивчення впливу проміжного поруватого шару на пружні напруження в гетеросистемі.

Метою даної роботи є дослідження процесів формування оксиду цинку методом реактивного магнетронного ВЧ-розпорошення на мезопоруватих підкладинках кремнію орієнтації (100) і (111).

Робота містить результати й обговорення досліджень одержаних зразків за допомогою таких метод: сканувальної електронної мікроскопії, фотолюмінесценції та раманівської спектроскопії. Структуру поверхні розділу фаз і структуру поверхні шарів ZnO на porous-Si було досліджено за допомогою сканувального електронного мікроскопа Tescan Mira 3 LMU і енергодисперсійного спектрометра Oxford Instruments X-Max 80 мм². Спектри ФЛ з часовим розділенням вимірювали в діапазоні енергій 1,4–3,2 еВ при порушенні випроміненням азотного лазера ($\lambda = 337$ нм, тривалість імпульсу 8 нс) і стробоскопічної реєстрації сигналу в ре-

ТАБЛИЦЯ 1. Параметри процесу осадження тонких плівок ZnO.¹

Параметер	Значення
Залишковий тиск у камері, Па	10^{-3}
Тиск аргону, Па	1
Тиск кисню P_{O_2} , Па	0,1
Температура підкладинки, °С	300
Потужність на розряді ВЧ-магнетрона, Вт	200
Віддаль мішень-підкладинка, м	0,07
Час осадження, с	1200

жимі підрахунку фотонів. Ширина стробу становила 250 нс. Раманові спектри були одержані за допомогою конфокального раманівського мікроскопа Witec Alpha 300R.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Зразки поруватого кремнію були одержані методом електрохімічного щавлення з використанням кремнієвих пластин *n*-типу провідності орієнтації (100) з питомим опором у 1,0–1,5 Ом·см. Процес анодування проводили з використанням розчину електродолу, що складається з фтористоводневої кислоти (HF) і етанолу (C₂H₅OH) у співвідношенні 1:1. Густина струму становила $J = 31,64$ мА/см².

Напорошення плівок ZnO виконано реактивним магнетронним ВЧ-розпорошенням цинкової мішені. Підкладинки закріплювалися в пристрої за допомогою спеціальних затискачів, які здійснювали переміщення їх всередині вакуумної камери. Підкладинки та мішені розміщували паралельно одна одній. Параметри процесу осадження тонких плівок ZnO методом магнетронного розпорошення цинкової мішені наведено в табл. 1. Безпосередньо перед процесом нанесення плівок вакуумна система відкачувалася до рівня 10^{-3} Па.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

РЕМ-зображення поверхні і поперечних перерізів зразків ZnO/porous-Si/Si (рис. 1 і 2) демонструють істотну зміну морфології поверхні після синтезу. На поверхні зразків ZnO/porous-Si/Si спостерігається структура з невеликих, близько 50–200 нанометрів, кристалітів. Слід зазначити, що в зразках не спостерігається великий розкид за розміром частинок. У ряді випадків спостерігаються

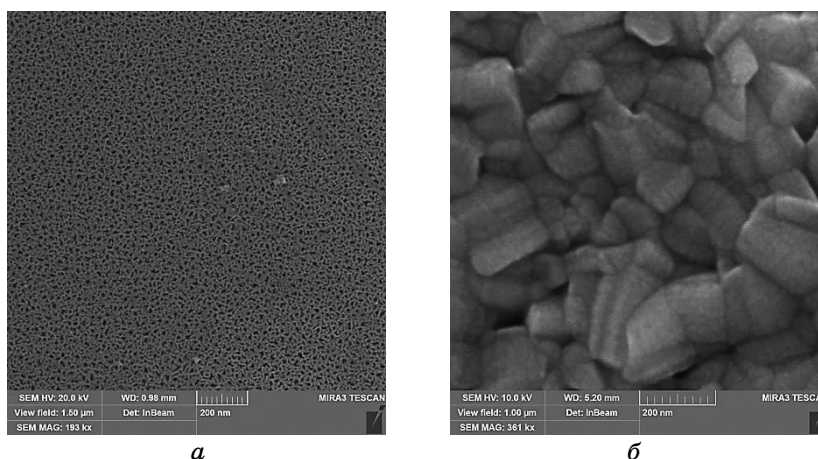


Рис. 1. СЕМ-зображення поверхні: *а*) мезопоруватого Si(100); *б*) плівки ZnO на мезопоруватому Si(100).²

зростки кристалітів.

У разі використання підкладки Si(100) діаметер кристалітів буде ≈ 200 нм (рис. 1, *б*), у той час як при використанні підкладки Si(111) — не перевищуватиме 100 нм (рис. 2, *в*).

Як показали результати досліджень, одержані зразки являють собою суцільні плівки з щільно упакованих стрижнів, що зрослися біля основи, орієнтованих перпендикулярно поверхні росту.

Рентгеноструктурна аналіза плівки ZnO, одержаної на мезопоруватих підкладках Si орієнтації (100) та орієнтації (111), показала, що плівки ZnO мають полікристалічну структуру вюрциту з переважною орієнтацією в напрямку [0002]. Рентгенограми мають основний дифракційний пік (002), який спостерігається на куті $2\theta = 34,64^\circ$.

Деформацію плівки ZnO, вирощеної на поруватому кремнії, уздовж *c*-осі можна обчислити за допомогою наступної формули [19]:

$$\varepsilon = \frac{c - c_0}{c_0} \cdot 100\%,$$

де c — постійна ґратниці напруженої плівки ZnO, розрахована за даними XRD ($c = 5,2260$ Å), c_0 являє собою постійну ґратниці для монокристалу ZnO (константи ґратниці для гексагональної плівки ZnO наведено в стандартних даних JCPDS $c_0 = 5,20661$ Å).

Згідно з проведеними розрахунками, деформація плівок ZnO, одержаних на мезопоруватих підкладках кремнію, становить $-0,36\%$. Від'ємне значення пов'язане з деформацією стиснення. Низьке значення деформації стиску показало, що вирощена плівка ZnO росте

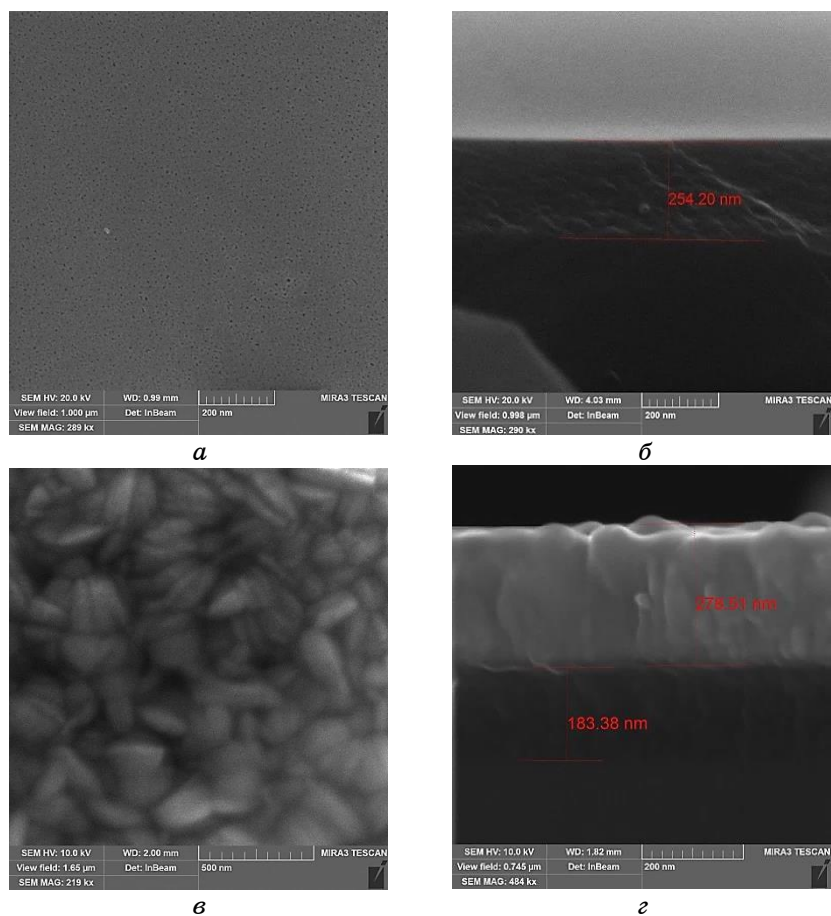


Рис. 2. СЕМ-зображення: *а*) поверхні мезопоруватого Si(111); *б*) поперечного перерізу мезопоруватого Si(111); *в*) поверхні плівки ZnO на мезопоруватому Si(111); *г*) поперечний переріз плівки ZnO на мезопоруватому Si(111).³

ТАБЛИЦЯ 2. Параметри мезопоруватого Si орієнтації (100) та (111).⁴

Параметер	Значення	
	porous Si(100)	porous Si(111)
Глибина поруватого шару h , м	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$254 \cdot 10^{-9}$
Діаметер пор d , м	$15 \cdot 10^{-9}$	$20 \cdot 10^{-9}$
Віддаль між порами, м	$10 \cdot 10^{-9}$	$15 \cdot 10^{-9}$
Розмір пластини, м ²	10^{-4}	10^{-4}

вздовж c -осі, і свідчить про одержання високоякісного кристалу.

ТАБЛИЦЯ 3. Кількісна аналіза методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії зразка ZnO на поруватому Si(100).⁵

Спектер	In stats.	O	Si	Zn
Спектер 1	Так	46,05	1,15	52,81
Середній		46,05	1,15	52,81
Стандартний відхил		0,00	0,00	0,00
Максимальний		46,05	1,15	52,81
Мінімальний		46,05	1,15	52,81

ТАБЛИЦЯ 4. Кількісна аналіза методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії зразка ZnO на поруватому Si(111).⁶

Спектер	In stats.	O	Si	Zn
Спектер 1	Так	41,46	20,82	37,72
Середній		41,46	20,82	37,72
Стандартний відхил		0,00	0,00	0,00
Максимальний		41,46	20,82	37,72
Мінімальний		41,46	20,82	37,72

Із СЕМ-мікрофотографій можна побачити, що плівка має стовпчасту структуру. Можна помітити (рис. 2, з), що тонка плівка ZnO тісно пов'язана з підкладкою поруватого кремнію, і в інтерфейсі не виявлено зазору. Це пов'язано з частковим заповненням тонкою плівкою ZnO пор на поверхні підкладки, що підтверджується зменшенням поруватого шару Si під плівкою ZnO. Параметри зразків мезопоруватого кремнію наведено в табл. 2.

Кількісні результати мікроаналізи досліджених плівок вказують на утворення близьких до стехіометричності плівок ZnO із співвідношенням Zn:O:Si = 0,53:0,46:0,01 для структури ZnO/porous-Si/Si (рис. 1, б, табл. 3).

Для зразків другого типу пік Si має велику інтенсивність — Zn:O:Si = 0,41:0,21:0,38 (рис. 2, в, табл. 4). Присутність піків Si (рис. 3) може свідчити або про недостатність товщини плівки, або про дифузію Si в приповерхневі шари.

На рисунку 4 наведено спектер КРС зразка ZnO/porous-Si/Si при порушенні Ar⁺-лазером ($\lambda = 514,5$ нм). У спектрі присутні моди $E_2(\text{low})$ при частоті 100 cm^{-1} і $E_2(\text{high})$ при частоті 438 cm^{-1} , $A_1(\text{LO})$ і 2LO — моди при частотах 575 cm^{-1} і 1150 cm^{-1} характерні для ZnO. Моди $E_2(\text{high})$ і $A_1(\text{LO})$ пов'язані з коливаннями атомів Оксигену в ідеальному кристалі ZnO і локальними коливаннями власних дефектів ґратниці, таких як вакансії Оксигену, катіони в міжвузлях [20]. При частоті 521 cm^{-1} спостерігається оптичний фон, пов'язаний з підкладкою Si, і його другий порядок у ви-

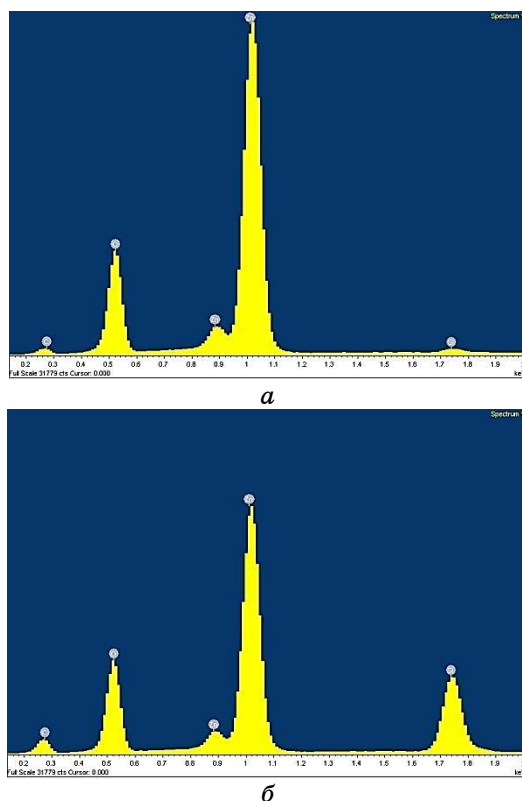


Рис. 3. Результати рентгенофлуоресцентної аналізи плівки ZnO на мезопоруватій підкладинці: а) Si(100); б) Si(111).⁷

гляді широкої смуги при 940 см^{-1} . Інтенсивна смуга при 303 см^{-1} також пов'язана з кремнієм. Як видно з рис. 4, в спектрі КРС ZnO домінують неполярні моди E_2 .

На рисунку 5 представлено спектри фотолюмінесценції плівок ZnO на поруватих підкладинках Si(100) і Si(111).

Плівки ZnO мають явно виражену смугу ФЛ з максимумом 380 нм. Спектральне положення піку при 380 нм (3,27 eV) пов'язане з навколосонними крайовими екситонними рекомбінаціями в плівках ZnO, тоді як синьо-зелена смуга випромінювання, що досягає максимуму у 520 нм (2,38 eV) була представлена як така смуга, що найчастіше зустрічається для ZnO, зазвичай приписувана нестехіометричному складу ZnO (дефекти в основному за рахунок Оксигенових вакансій). Наявність зеленого світіння в оксиді цинку свідчить про наявність точкових дефектів кристалічної структури типу вакансій Цинку і Оксигену.

Відношення ультрафіолетового до видимого випромінювання роз-

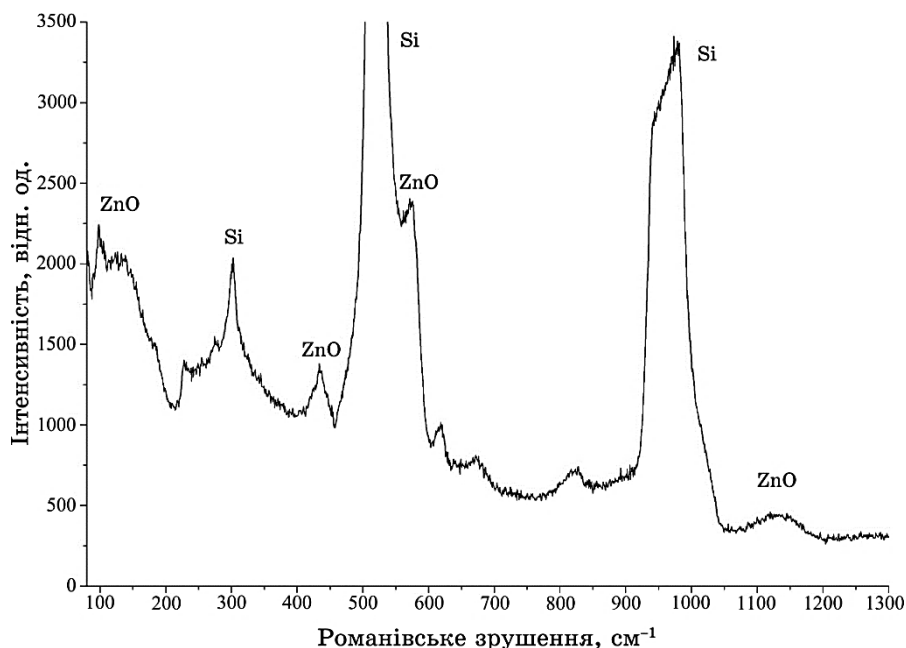


Рис. 4. Спектер КРС зразка ZnO/porous-Si/Si (100).⁸

глядається як ключовий критерій для оцінки якості кристалу. Отже, сильне УФ-випромінювання і слабка зелена емісія від ZnO свідчать про хорошу оптичну якість плівки ZnO. Глибока емісія зазвичай пов'язана зі структурними дефектами і домішками, однак структурні дефекти залежать від невідповідності ґратниць.

У плівках ZnO спостерігається ледь помітний пік в зеленій (500–530 нм) і більш виразний в жовто-помаранчевій (590–620 нм) областях спектру. На спектрі присутній також пік від підкладинки, що представляє собою широку смугу з максимумом в області довжин хвиль 650–660 нм.

Інтенсивність ФЛ пов'язана безпосередньо з товщиною шару — чим товще шар, тим більше інтенсивність фотолюмінесценції [21]. Відповідно, з порівняння результатів ФЛ для зразків двох типів можна зробити висновок, що шар ZnO, вирощених на мезопоруватій підкладинці Si(100), має товщину більшу, ніж шар ZnO, вирощених на мезопоруватій підкладинці Si(111). Цей висновок узгоджується з результатами сканувальної електронної мікроскопії.

4. ВИСНОВКИ

У даній роботі методом реактивного магнетронного ВЧ-розпорощення одержано плівки ZnO на підкладинках кремнію

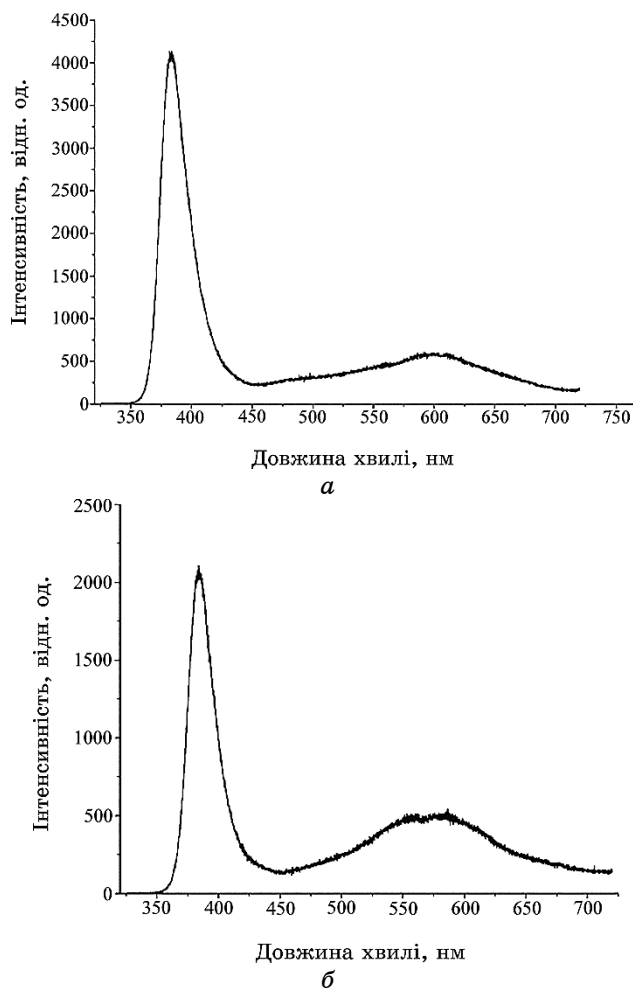


Рис. 5. Спектри ФЛ плівок ZnO одержаних на: а) мезопоруватому Si(100); б) мезопоруватому Si(111).⁹

орієнтації (100) з попередньо нанесеною системою мезопор. Рентгенографічні дослідження ZnO показали, що вона має полікристалічну природу з гексагональною ґратницею типу вюрциту. Середні розміри кристалітів склали близько 50–200 нанометрів. Мікроелементна аналіза виявила практично ідеальну стехіометричність ZnO, вирощеного на porous-Si/Si.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. N. R. Aghamalyan, R. K. Hovsepyan, and S. I. Petrosyan, *Journal*

- of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, **43**: No. 4: 177 (2008); <https://doi.org/10.3103/S1068337208040051>.
2. D. Strykov, G. Snider, D. Stewart, and S. Williams, *Nature*, **453**: 80 (2008); <https://doi.org/10.1038/nature06932>.
 3. Dae-Kue Hwang, Min-Suk Oh, Jae-Hong Lim, and Seong-Ju Park, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40**: 387 (2007); <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/22/R01>.
 4. K. M. Sandeep, Shreesha Bhat, and S. M. Dharmaprakash, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **104**: 36 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.01.003>.
 5. S. Mridha and D. Basak, *J. Applied Physics*, **101**: 083102 (2007); <https://doi.org/10.1063/1.2724808>.
 6. A. D. Pogrebnyak, A. A-K. M. Muhammed, and Yu. S. Bukalceva, *PSE*, **8**, No. 4: 348 (2010) (in Russian).
 7. R. P. Doherty, Yuekui Sun, Ye Sun, J. L. Warren, N. A. Fox, D. Cherns, and M. N. R. Ashfold, *Applied Physics A*, **89**, No. 1: 49 (2007); <https://doi.org/10.1007/s00339-007-4075-9>.
 8. Xianqi Wei, Ranran Zhao, Minghui Shao, Xijin Xu, and Jinzhao Huang, *Nanoscale Res. Lett*, **8**, No. 1: 112 (2013); <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-112>.
 9. A. Kh. Abduev, A. K. Akhmedov, A. Sh. Asvarov, and S. Sh. Makhmudov, *J. Nano- Electron. Phys.*, **10**, No. 2: 02041 (2018) (in Russian); [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(2\).02041](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02041).
 10. C. F. Klingshirn, B. K. Meyer, A. Waag, A. Hoffmann, and J. Geurts, (Berlin: Springer) 359 (2010).
 11. S. Nishino, C. Jacob, Y. Okui, S. Ohshima, and Y. Masuda, *J. Cryst. Growth*, **237–239**: 1250 (2002); [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)02229-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)02229-1).
 12. S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, and N. A. Feoktistov, *phys. status solidi*, **56**, No. 8: 1457 (2014) (in Russian).
 13. V. V. Kidalov, G. A. Sukach, A. S. Revenko, and A. D. Bayda, *phys. stat. sol. (a)*, **202**: 1668 (2005).
 14. V. V. Kidalov, G. A. Sukach, A. S. Revenko, and E. P. Potapenko, *Semiconductors*, **37**, No. 11: 1303 (2003) (in Russian).
 15. V. V. Kidalov, G. A. Sukach, and A. S. Revenko, *Russian Journal of Physical Chemistry*, **77**: 1677 (2003).
 16. V. V. Kidalov, S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, A. V. Redkov, A. S. Grashchenko, I. P. Soshnikov, M. E. Boiko, M. D. Sharkov, and A. F. Dyadenchuk, *ECS J. of Solid State Science and Technology*, **7**, No. 4: P1 (2018); <https://doi.org/10.1149/2.0061804jss>.
 17. V. V. Kidalov, S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, A. V. Redkov, A. S. Grashchenko, I. P. Soshnikov, M. E. Boiko, M. D. Sharkov, and A. F. Dyadenchuk, *Materials Physics and Mechanics*, **36**: 39 (2018); https://doi.org/10.18720/MPM.3612018_4.
 18. S. A. Kukushkin, Sh. Sh. Sharofidinov, A. V. Osipov, A. V. Redkov, V. V. Kidalov, A. S. Grashchenko, I. P. Soshnikov, and A. F. Dyadenchuk, *ECS J. of Solid State Sci. Technol.*, **7**, No. 9: P480 (2018); <https://doi.org/10.1149/2.0191809jss>.
 19. Uday Muhsin Nayef, Mohammed Waleed Muayad, and Haider Amer Khalaf, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **9**: 2278 (2014).
 20. J. Serrano, F. J. Manjon, A. H. Romero, F. Widulle, R. Lauck, and

M. Cardona, *Phys. Rev. Lett.*, **90**: 055510 (2003);
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.055510>.

21. D. Kovalev, H. Heckler, G. Polisski, and F. Koch, *phys. status solidi*, **215**, No. 2: 871 (1999); [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3951\(199910\)215:2<871::AID-PSSB871>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3951(199910)215:2<871::AID-PSSB871>3.0.CO;2-9).

¹*Berdiansk State Pedagogical University,
4, Schmidt Str.,
71100 Berdiansk, Ukraine*

²*V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, N.A.S. of Ukraine,
41, Nauky Ave.,
03028 Kyiv, Ukraine*

³*Institute of Applied Physics, N.A.S. of Ukraine,
58, Petropavlivska Str.,
40000 Sumy, Ukraine*

¹ **TABLE 1.** Parameters of ZnO thin films deposition process.

² **Fig. 1.** SEM images of the surface: *a*) mesoporous Si(100); *б*) ZnO films on the mesoporous Si(100).

³ **Fig. 2.** SEM images: *a*) the surface of mesoporous Si(111); *б*) the cross-section of mesoporous Si (111); *в*) the surface of the ZnO film on mesoporous Si(111), *г*) the cross-section of the film ZnO on the mesoporous Si(111).

⁴ **TABLE 2.** Parameters of mesoporous Si orientation (100) and (111).

⁵ **TABLE 3.** Quantitative analysis of energy-dispersive x-ray spectroscopy sample ZnO on porous Si (100).

⁶ **Fig. 4.** Raman spectra of ZnO/porous-Si/Si sample (100).

⁷ **Fig. 3.** Results of x-ray fluorescence analysis of ZnO film on the mesoporous substrate: *a*) Si(100); *б*) Si(111).

⁸ **TABLE 4.** Quantitative analysis of energy-dispersive x-ray spectroscopy sample ZnO on porous Si(111).

⁹ **Fig. 5.** The spectra of PL films of ZnO obtained on: *a*) mesoporous Si(100); *б*) mesoporous Si(111).