

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІБРИДНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ І ОКСИДУ ЦИНКУ

І. Б. Оленич

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
Львів, Україна*

Надійшла до редакції 17.03.2016

Методом електрохімічного осадження вирощено масиви наноструктур оксиду цинку на поверхні поруватого кремнію. Виявлено вплив температури електроліту на морфологію вирощених шарів ZnO. У роботі вивчено вольт-амперні характеристики отриманих гібридних структур, часові і спектральні залежності їх фотовідгуку в широкому діапазоні електромагнітного випромінювання. Результати досліджень проаналізовано в рамках якісної моделі, за якою різні значення ширини забороненої зони наноструктур оксиду цинку, поруватого кремнію і кремнієвої підкладки забезпечують ефективне поглинання ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного випромінювання. Отримані результати розширюють перспективу застосування структур на основі поруватого кремнію і ZnO у фотоелектроніці.

Ключові слова: поруватий кремній, оксид цинку, фотовідклик, спектральна характеристика.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ОКСИДА ЦИНКА

И. Б. Оленич

Методом электрохимического осаждения выращены массивы наноструктур оксида цинка на поверхности пористого кремния. Выявлено влияние температуры электролита на морфологию выращенных слоев ZnO. В работе изучены вольт-амперные характеристики полученных гибридных структур, временные и спектральные зависимости их фототовета в широком диапазоне электромагнитного излучения. Результаты исследований проанализированы в рамках качественной модели, согласно с которой разные значения ширины запрещенной зоны наноструктур оксида цинка, пористого кремния и кремниевой подложки обеспечивают эффективное поглощение ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения. Полученные результаты расширяют перспективу применения структур на основе пористого кремния и ZnO в фотоэлектронике.

Ключевые слова: пористый кремний, оксид цинка, фототответ, спектральная характеристика.

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF HYBRID STRUCTURES BASED ON POROUS SILICON AND ZINC OXIDE

I. B. Olenych

Zinc oxide nanostructured arrays were grown on porous silicon surface by electrochemical deposition method. The influence of temperature on the morphology of the grown ZnO layers is confirmed. Voltage-current curves of obtained hybrid structures are investigated. Time and spectral dependencies of the photoresponse of these structures are studied for a wide range of electromagnetic radiation. The results are interpreted in the frame of the qualitative model, which suggests that different band gap value for zinc oxide, porous silicon and silicon substrate ensure efficient UV, visible and IR absorption. Obtained data widen the perspective of using porous silicon based structures and ZnO in photoelectronics.

Keywords: porous silicon, zinc oxide, photoresponse, spectral characteristics.

ВСТУП

Розвиток електроніки сьогодні тісно пов'язаний з функціональними напівпровідниковими наноматеріалами. Значний інтерес викликає вивчення кремнієвих нанокристалів з квантовими властивостями, оскільки цей матеріал складає основу сучасної електроніки. Доступним способом отримання кремнієвих наноструктур є технологія формування поруватого кремнію (ПК): електрохімічне витравлювання в монокристалі дрібних порожнин, у результаті чого товщина стінок між порами може мати розміри декількох нанометрів [1, 2]. ПК має низку корисних властивостей. Інтенсивна видима фотолюмінесценція ПК, значна площа поглинаючої поверхні, збільшена внаслідок квантового обмеження ширина забороненої зони кремнієвих нанокристалів розширюють перспективу використання ПК в оптоелектроніці та фотоніці [3–6]. Крім того, можна додатково керувати функціональними властивостями ПК шляхом модифікації його поверхні [7, 8].

Завдяки розгалуженій системі пор ПК є ідеальною основою для осадження та інфільтрації наночастинок різної природи, зокрема і оксиду цинку (ZnO) — прямозонного матеріалу з шириною забороненої зони 3,37 еВ [9, 10]. Для використання в оптоелектронних системах важливими є синьо-зелена фотолюмінесценція і прозорість наноструктурованих шарів ZnO у видимому діапазоні, ефективно фотоелектричне перетворення в ультрафіолетовій (УФ) області, його антивідбивні властивості та сумісність з традиційними електродними матеріалами [10–13]. Модифікація поверхні ПК наноструктурами ZnO може призвести до відмінності властивостей гібридного нанокompозиту ZnO-ПК від тих, які характерні окремим його компонентам: підсилюючи їх, або формуючи нові. Зокрема, наносистеми ZnO-ПК є перспективними для створення джерел випромінювання білого світла, фотоприймачів та інших електронних пристроїв [14–16].

Традиційно для отримання наноструктур ZnO використовують хімічне осадження з газової фази [17], термічне випаровування [18], магнетронне розпилення [19], імпульсне лазерне осадження [20], гідротермальний та золь-гель методи [15, 16, 21], електрохімічне

осадження [11, 13]. Використовуючи особливості кристалічної структури, можна ефективно керувати морфологією наноструктур ZnO в процесі їх отримання [21]. Крім того, використання поруватого шару як підкладки для осадження зменшує механічні напруження, які зумовлені невідповідністю параметрів кристалічної ґратки і коефіцієнта теплового розширення кремнію та оксиду цинку, що дає змогу вирішувати структурно якісні кристалічні масиви ZnO [22].

Тому мета роботи полягала у створенні гібридних структур ZnO-ПК-Si методом електроосадження на поверхню поруватого шару наноструктурованих масивів оксиду цинку. Особлива увага була зосереджена на вивченні електричних та фотоелектричних властивостей отриманих наносистем на основі ПК і ZnO.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Для експериментальних досліджень були використані зразки ПК, виготовлені методом електрохімічного травлення на підкладках монокристалічного кремнію товщиною 400 мкм, кристалографічної орієнтації (100) *n*- і *p*-типів провідності з питомим опором 4,5 та 1 Ом·см, відповідно. Як електроліт використовувався водноетанольний розчин фтористоводневої кислоти у співвідношенні $C_2H_5OH:HF:H_2O = 1:1:1$. Для одержання однорідного поруватого шару на тильну поверхню кремнієвої підкладки попередньо було нанесено термовакуумним методом і відпалено упродовж 20 хв при температурі 450 °С металічну Au або Al плівку товщиною 0,5 мкм, яка також слугувала контактом для подальших вимірювань. Густина анодного струму була постійною в часі і становила 30–40 мА/см², а тривалість процесу анодування 5–10 хв. Для забезпечення наявності в приповерхневому шарі *n*-Si носіїв заряду позитивного знаку, необхідних для перебігу анодних реакцій і формування ПК [2], робоча поверхня пластини опромінювалась вольфрамовою лампою потужністю 500 Вт упродовж всього процесу електрохімічного травлення. За таких умов анодування на кремнієвих підкладках були одержані шари ПК товщиною 12–20 мкм для різних зразків.

Масиви оксиду цинку на поверхні ПК були отримані методом електрохімічного осадження, який добре себе зарекомендував при вирощуванні наноструктур ZnO на кремнії та інших електропровідних підкладках [11, 13]. Для процесу осадження була використана двохелектродна електрохімічна комірка з водним розчином $0,05 \text{ M Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та $0,1 \text{ M NaNO}_3$. Осадження ZnO проводилось при потенціалі $-1,4 \text{ В}$, прикладеному до кремнієвої підкладки з поруватим шаром, яка слугувала робочим електродом. Допоміжним електродом була платинова сітка. Тривалість вирощування наноструктур ZnO становила 10–20 хв. Електроліт в процесі осадження підігрівався до температури $65\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$, оскільки температура є одним з важливих факторів, які визначають морфологію ZnO. У процесі електрохімічного осадження реагенти проникають в пори кремнію і наноструктури оксиду цинку синтезуються безпосередньо на поверхні електрода та всередині пор. Мікροструктура нанокристалічних масивів ZnO на поверхні ПК була досліджена за допомогою скануючого електронного мікроскопу (SEM) Selmі PEMMA-102.

Для експериментальних досліджень на поверхню шару ZnO було нанесено електричний контакт діаметром близько 3 мм за допомогою струмопровідного лаку. Вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) проводились згідно з стандартними методиками при проходженні струму через структури в напрямку, перпендикулярному до поверхні. Фотоелектричні явища досліджувались за умов опромінення структур зі сторони шару ZnO випромінюванням світлодіода білого світла FYLP-1W-UWB-A з потужністю 1 Вт, світловим потоком 76 люмен.

Вимірювання спектральних залежностей фотовідклику, а саме відношення фотоструму I до темного струму I_0 при зворотному зміщенні — 3 В, проводились на стандартному оптичному обладнанні з використанням дифракційного монохроматора і лампи розжарення при 2800 К. Спектри фотовідклику нормувались на криву випромінювання чорного тіла з температурою 2800 К (криву Планка) і корегувались з врахуванням спектральної чутливості установки.

Дослідження кінетики фотовідклику структур ZnO-ПК-Si на різних довжинах хвиль проводились за допомогою генератора прямокутних імпульсів Г3-36А, світловипромінюючих діодів FYL-5013UVC ($\lambda = 390 \text{ нм}$), FYL-5013UGC ($\lambda = 570 \text{ нм}$), L-53F3C ($\lambda = 940 \text{ нм}$) і осцилографа Hantek 1008В.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз поверхні експериментальних структур ZnO-ПК-Si проводився за допомогою скануючого електронного мікроскопу в режимі скануючого електронного мікроскопу, в режимі вторинних електронів і рентгенівського мікроаналізу. На SEM-зображеннях спостерігалось утворення щільних масивів наноструктур ZnO на поверхні ПК (рис. 1).

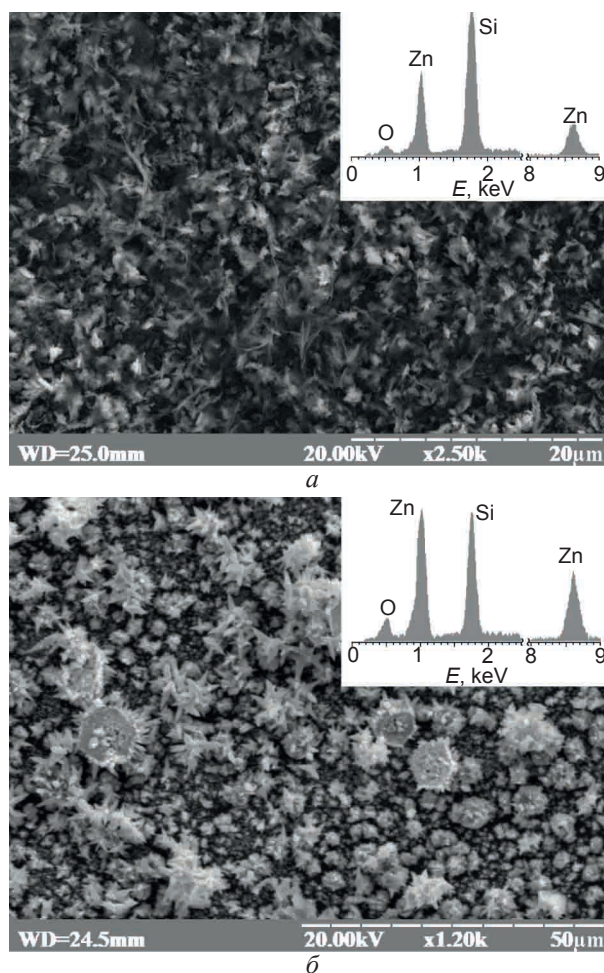


Рис. 1. SEM-зображення масивів ZnO, електроосаджених на поверхню ПК при $\tau = 10 \text{ хв}$, $t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ (а) і $\tau = 20 \text{ хв}$, $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ (б)

Морфологія шарів ZnO залежала від температури електроліту і тривалості електрохімічного осадження. При температурі $65 \text{ }^\circ\text{C}$ спостерігалось утворення невпорядкованої

мережі нанодотин і нанолістів ZnO (див. рис. 1а). Збільшення температури електроліту до 80°C і тривалості електроосадження зумовлювало формування масивів неорієнтованих наностержнів ZnO, причому дрібніші з них виростили на більших утвореннях гексагональної форми, розмір яких досягав декількох мікрометрів (див. рис. 1б). Широкий спектр морфологічних особливостей структури ZnO зумовлений різними кінетичними параметрами росту різних кристалічних площин [9]. Важливим фактором, який дозволяє ефективно керувати формою і розміром вирощуваних масивів ZnO є температура електроліту, оскільки вона визначає інтенсивність електрохімічних процесів, швидкість дифузії реагентів і швидкість десорбції газоподібних продуктів реакції з поверхні вирощеного ZnO [23]. Товщина шару оксиду цинку збільшувалась із збільшенням часу електроосадження.

Режим рентгеноспектрального мікроаналізу дає змогу визначити фазовий склад композитної структури. Крім піку з енергією 1,7 кеВ, який характерний для кремнію, спостерігались енергетичні піки поблизу 0,5 кеВ, що відповідає атомам кисню, 1,0 кеВ та 8,6 кеВ, які відповідають атомам цинку.

Сендвіч-структури ZnO-ПК-Si, отримані на кремнієвих підкладках як електронного, так і діркового типів провідності, володіли нелінійними ВАХ, яким були властиві більші значення струму у випадку негативного потенціалу на шарі оксиду цинку (рис. 2). Слід зазначити, що коефіцієнт випрямлення був більшим у випадку структури ZnO-ПК-*p*-Si. Нелінійні ВАХ можуть бути зумовлені контактними явищами, електричними бар'єрами в поруватому шарі та на границях ZnO-ПК і ПК-кремнієва підкладка. Враховуючи, що структури з товстими (понад 10 мкм) шарами ПК зазвичай характеризуються варисторними вольт-амперними залежностями [24, 25], можна припустити, що випрямляюча ВАХ зумовлена домінуванням електричного бар'єру на інтерфейсі ZnO-ПК.

Під впливом освітлення поверхні гібридних структур ZnO-ПК-Si випромінюванням світлодіода FYLP-1W-UWB-A з світловим потоком 76 люмен спостерігалось збільшення

струму зворотної вітки ВАХ, що свідчить про фотогенерацію вільних носіїв заряду в експериментальних структурах.

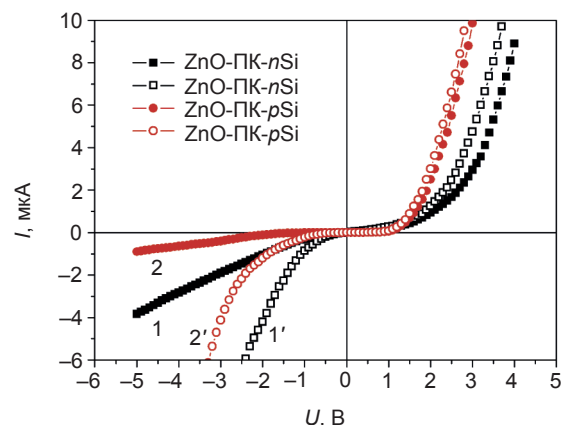


Рис. 2. ВАХ гібридних структур ZnO-ПК-*n*-Si (1,1') і ZnO-ПК-*p*-Si (2,2'): 1, 2 — у темноті; 1', 2' — за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A

Для одержання додаткової інформації про фотоелектричні властивості гібридних структур ZnO-ПК-Si були досліджені спектральні залежності фотовідклику в діапазоні 400–1100 нм. Спектри фотовідклику, а саме відношення фотоструму I до темного струму I_0 при зворотному зміщенні -3 В, показані на рис. 3.

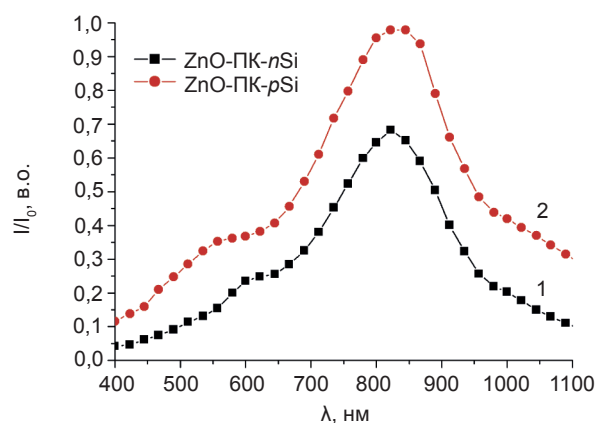


Рис. 3. Спектральні залежності фотовідклику за прикладеної напруги — 3 В гібридних структур ZnO-ПК-*n*-Si (1) і ZnO-ПК-*p*-Si (2)

Спектральні залежності фотовідклику гібридних структур на основі ПК і ZnO характеризувались двома широкими смугами fotocутливості в діапазонах 750–950 нм і 500–650 нм. Смуга з максимумом поблизу 830 нм подібна до спектрів фотовідклику кремнієвого фотодіода і фотодетекторів на основі ПК [7]. Така схожість дозволяє припустити, що чутливість експериментальних

структур до електромагнітного випромінювання у довгохвильовій видимій області та ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні пов'язана з поглинанням світла в кремнієвій підкладці та у неквантоворозмірних нанокристалах ПК. При цьому шар ZnO є достатньо прозорий для довгохвильового випромінювання [16]. Розширення спектрального діапазону fotocутливості гібридних структур ZnO-ПК-Si у короткохвильову область можна пов'язати з поглинанням світла у наноструктурах оксиду цинку і нанокристалах ПК, електронна структура яких модифікована внаслідок квантового обмеження.

Результати досліджень кінетики фотовідгуку гібридних структур ZnO-ПК-Si показані на рис. 4. Аналіз фотовідгуку на П-подібні світлові імпульси тривалістю 2,5 мс виявив деяку відмінність у генераційно-рекомбінаційних та релаксаційних процесах, які відбуваються в експериментальних структурах під впливом збуджуючого світла з різною довжиною хвилі. Спостерігалися менші часи наростання і загасання фотосигналу (близько 1 мс) у випадку фотогенерації вільних носіїв заряду імпульсами ІЧ випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 940$ нм. Час відклику структур ZnO-ПК-Si на імпульси УФ випромінювання ($\lambda = 390$ нм) і зеленого світла ($\lambda = 570$ нм) становив близько 2–2,5 мс.

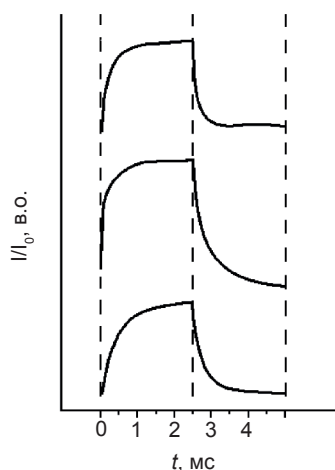


Рис. 4. Кінетика фотовідклику гібридних структур ZnO-ПК-Si на П-подібний імпульс світла з довжиною хвилі $\lambda = 940$ нм (1), $\lambda = 570$ нм (2), $\lambda = 390$ нм (3)

Спостережувана кінетика фотовідклику структури ZnO-ПК-Si на світлові імпульси з різною довжиною хвилі може бути додатковим аргументом на користь того, що різні

шари гібридної структури відповідальні за поглинання світлових квантів різної енергії. Зокрема, масиви ZnO ефективно поглинають УФ випромінювання у спектральному діапазоні 300–400 нм [16].

ВИСНОВКИ

Таким чином у роботі показано, що електрохімічне осадження є ефективним методом контрольованого вирощування масивів наноструктур ZnO на поверхні ПК. Морфологічні особливості таких масивів можна змінювати в широких межах, варіюючи температурні і часові параметри електроосадження. У свою чергу, від морфології шарів оксиду цинку залежать електричні та фотоелектричні властивості гібридних структур ZnO-ПК-Si.

На основі комплексних досліджень ВАХ, спектральних і часових залежностей фотовідгуку вивчено фотоелектричні процеси в структурах на основі ПК і ZnO. Встановлено, що час наростання і загасання фотосигналу експериментальних структур залежить від довжини хвилі світлових імпульсів і складає 1–2,5 мс. Високу fotocутливість гібридних структур ZnO-ПК-Si у широкому спектральному діапазоні — від УФ до ближнього ІЧ випромінювання можна пов'язати з великою площею поглинаючої поверхні та різною шириною забороненої зони нанокристалів ZnO і ПК, що забезпечує ефективне поглинання світлових квантів різної енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bisi O., Ossicini S., Pavese L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // *Surface Science Reports*. — 2000. — Vol. 38, No. 1. — P. 1–126.
2. Cullis A. G., Canham L. T., Calcott P. D. J. The structural and luminescence properties of porous silicon // *Journal of Applied Physics*. — 1997. — Vol. 82. — P. 909–965.
3. Föll H., Christophersen M., Carstensen J., Hasse G. Formation and application of porous silicon // *Materials Science and Engineering*. — R: Reports. — 2002. — Vol. 39, No. 4. — P. 93–141.
4. Ünal B., Parbukov A. N., Bayliss S. C. Photovoltaic properties of a novel stain etched porous silicon and its application in photosensitive devices // *Optical Materials*. — 2001. — Vol. 17. — P. 79–82.

5. Венгер Е. Ф., Кириллова С. И., Кизяк И. М., Манойлов Э. Г., Примаченко В. Е. Влияние примеси золота на фотолуминесценцию и фотоэде пористого кремния // ФТП. — 2004. — Т. 38, вып. 1. — С. 117–123.
6. Brodovoi A. V., Brodovoi V. A., Skryshevskiy V. A., Bunchuk S. G., Khnorozok L. M. Photoelectric properties of metal-porous silicon-silicon planar heterostructures // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. — 2002. — Vol. 5, No. 4. — P. 395–397.
7. Olenych I. B., Monastyrskii L. S., Aksimentyeva O. I., Sokolovskii B. S. Effect of bromine adsorption on the charge transport in porous silicon — silicon structures // Electronic Materials Letters. — 2013. — Vol. 9, No. 3. — P. 257–260.
8. Оленич І. Б. Електричні і фотоелектричні властивості поруватого кремнію, модифікованого наночастинками кобальту // Журнал нано- та електронної фізики. — 2014. — Т. 6, № 4. — С. 04022-1–04022-4.
9. Wang Z. L. Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2004. — Vol. 16, No. 25. — P. 829–858.
10. Heo Y. W., Norton D. P., Tien L. C., Kwon Y., Kang B. S., Ren F., Pearton S. J., LaRoche J. R. ZnO nanowire growth and devices // Materials Science and Engineering. — R: Reports. — 2004. — Vol. 47, No. 1. — P. 1–47.
11. Kapustianyk V., Turko B., Luzinov I., Rudyk V., Tsybul'skiy V., Malynych S., Rudyk Yu., Savchak M. LEDs based on *p*-type ZnO nanowires synthesized by electrochemical deposition method // Physica Status Solidi (C). — 2014. — Vol. 11, No. 9–10. — P. 1501–1504.
12. Kind H., Yan H., Messer B., Law M., Yang P. Nanowire ultraviolet photodetectors and optical switches // Advanced Materials. — 2002. — Vol. 14, No. 2. — P. 158–160.
13. Ключко Н. П., Клепикова Е. С., Хрипунов Г. С., Волкова Н. Д., Копач В. Р., Любов В. Н., Кириченко М. В., Копач А. В. Антиотражающие наноструктурированные массивы оксида цинка, изготовленные методом импульсного электроосаждения // ФТП. — 2015. — Т. 49, вып. 2. — С. 219–229.
14. Singh R. G., Singh F., Agarwal V., Mehra R. M. Photoluminescence studies of ZnO / porous silicon nanocomposites // Journal of Physics. — D.: Applied Physics. — 2007. — Vol. 40. — P. 3090–3093.
15. Keramatnejad K., Khorramshahi F., Khataami S., Asl-Soleimani E. Optimizing UV detection properties of *n*-ZnO nanowire / *p*-Si heterojunction photodetectors by using a porous substrate // Optical and Quantum Electronics. — 2015. — Vol. 47. — P. 1739–1749.
16. Martinez L., Ocampo O., Kumar Y., Agarwal V. ZnO-porous silicon nanocomposite for possible memristive device fabrication // Nanoscale Research Letters. — 2014. — Vol. 9. — P. 437-1–437-6.
17. Wu J. J., Liu S. C. Low-temperature growth of well-aligned ZnO nanorods by chemical vapor deposition // Advanced Materials. — 2002. — Vol. 14. — P. 215–218.
18. Srivatsa K. M. K., Chhikara D., Kumar M. S. Synthesis of aligned ZnO nanorod array on silicon and sapphire substrates by thermal evaporation technique // Journal of Materials Science & Technology. — 2011. — Vol. 27, No. 8. — P. 701–706.
19. Sundaram K. B., Khan A. Characterization and optimization of zinc oxide films by r.f. magnetron sputtering // Thin Solid Films. — 1997. — Vol. 295, No. 1. — P. 87–91.
20. Gafiyuchuk V. V., Ostafiyuchuk B. K., Popovych D. I., Popovych I. D., Serednytski A. S. ZnO nanoparticles produced by reactive laser ablation // Applied Surface Science. — 2011. — Vol. 257, No. 20. — P. 8396–8401.
21. Zhu M. W., Huang N., Gong J., Zhang B., Wang Z. J., Sun C., Jiang X. Growth of ZnO nanorod arrays by sol-gel method: transition from two-dimensional film to one-dimensional nanostructure // Applied Physics A. — 2011. — Vol. 103. — P. 159–166.
22. Hsu H. C., Cheng C. S., Chang C. C., Yang S., Chang C. S., Hsieh W. F. Orientation-enhanced growth and optical properties of ZnO nanowires grown on porous silicon substrates // Nanotechnology. — 2005. — Vol. 16, No. 2. — P. 297–301.
23. Ключко Н. П., Мягченко Ю. А., Мельничук Е. Е., Копач В. Р., Клепикова Е. С., Любов В. Н., Хрипунов Г. С., Копач А. В. Перспективы импульсного электроосаждения иерархических наноструктур оксида цинка // ФТП. — 2013. — Т. 47, вып. 8. — С. 1129–1136.

24. Оленич І. Б., Монастирський Л. С., Аксіментьєва О. І., Соколовський Б. С. Вологочутливі структури на основі поруватого кремнію // УФЖ. — 2011. — Т. 56, № 11. — С. 1199–1203.
25. Vakulenko O. V., Kondratenko S. V., Shutov B. M. // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. — 1999. — Vol. 2, No. 2. — P. 88–89.
9. Wang Z. L. Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 2004. — Vol. 16, No. 25. — P. 829–858.
10. Heo Y. W., Norton D. P., Tien L. C., Kwon Y., Kang B. S., Ren F., Pearton S. J., LaRoche J. R. ZnO nanowire growth and devices // *Materials Science and Engineering*. — R: Reports. — 2004. — Vol. 47, No. 1. — P. 1–47.

LITERATURA

1. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // *Surface Science Reports*. — 2000. — Vol. 38, No. 1. — P. 1–126.
2. Cullis A. G., Canham L. T., Calcott P. D. J. The structural and luminescence properties of porous silicon // *Journal of Applied Physics*. — 1997. — Vol. 82. — P. 909–965.
3. Föll H., Christophersen M., Carstensen J., Hasse G. Formation and application of porous silicon // *Materials Science and Engineering*. — R: Reports. — 2002. — Vol. 39, No. 4. — P. 93–141.
4. Ünal B., Parbukov A. N., Bayliss S. C. Photovoltaic properties of a novel stain etched porous silicon and its application in photosensitive devices // *Optical Materials*. — 2001. — Vol. 17. — P. 79–82.
5. Venger E. F., Kirillova S. I., Kizyak I. M., Manojlov E. G., Primachenko V. E. Vliyanie primesi zolota na fotolyuminescenciyu i fotoeds poristogo kremniya // *FTP*. — 2004. — Vol. 38, vyp. 1. — P. 117–123.
6. Brodovoi A. V., Brodovoi V. A., Skryshevskiy V. A., Bunchuk S. G., Khnorozok L. M. Photoelectric properties of metal-porous silicon-silicon planar heterostructures // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. — 2002. — Vol. 5, No. 4. — P. 395–397.
7. Olenych I. B., Monastyrskii L. S., Aksimentyeva O. I., Sokolovskii B. S. Effect of bromine adsorption on the charge transport in porous silicon — silicon structures // *Electronic Materials Letters*. — 2013. — Vol. 9, No. 3. — P. 257–260.
8. Olenich I. B. Elektrichni i fotoelektrichni vlastivosti poruvatogo kremniyu, modifikovanogo nanochastinkami kobal'tu // *Zhurnal nano- ta elektronnoi fiziki*. — 2014. — Vol. 6, No. 4. — P. 04022-1-04022-4.
9. Wang Z. L. Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 2004. — Vol. 16, No. 25. — P. 829–858.
10. Heo Y. W., Norton D. P., Tien L. C., Kwon Y., Kang B. S., Ren F., Pearton S. J., LaRoche J. R. ZnO nanowire growth and devices // *Materials Science and Engineering*. — R: Reports. — 2004. — Vol. 47, No. 1. — P. 1–47.
11. Kapustianyk V., Turko B., Luzinov I., Rudyk V., Tsybul'skyi V., Malynych S., Rudyk Yu., Savchak M. LEDs based on *p*-type ZnO nanowires synthesized by electrochemical deposition method // *Physica Status Solidi (C)*. — 2014. — Vol. 11, No. 9–10. — P. 1501–1504.
12. Kind H., Yan H., Messer B., Law M., Yang P. Nanowire ultraviolet photodetectors and optical switches // *Advanced Materials*. — 2002. — Vol. 14, No. 2. — P. 158–160.
13. Klochko N. P., Klepikova E. S., Hripunov G. S., Volkova N. D., Kopach V. R., Lyubov V. N., Kirichenko M. V., Kopach A. V. Antiotrazhayuschie nanostrukturirovannyye massivyy oksida cinka, izgotovlennyye metodom impul'snogo elektroosazhdeniya // *FTP*. — 2015. — Vol. 49, vyp. 2. — P. 219–229.
14. Singh R. G., Singh F., Agarwal V., Mehra R. M. Photoluminescence studies of ZnO / porous silicon nanocomposites // *Journal of Physics*. — D.: Applied Physics. — 2007. — Vol. 40. — P. 3090–3093.
15. Keramatnejad K., Khorramshahi F., Khataami S., Asl-Soleimani E. Optimizing UV detection properties of *n*-ZnO nanowire / *p*-Si heterojunction photodetectors by using a porous substrate // *Optical and Quantum Electronics*. — 2015. — Vol. 47. — P. 1739–1749.
16. Martinez L., Ocampo O., Kumar Y., Agarwal V. ZnO-porous silicon nanocomposite for possible memristive device fabrication // *Nanoscale Research Letters*. — 2014. — Vol. 9. — P. 437-1–437-6.
17. Wu J. J., Liu S. C. Low-temperature growth of well-aligned ZnO nanorods by chemical vapor deposition // *Advanced Materials*. — 2002. — Vol. 14. — P. 215–218.
18. Srivatsa K. M. K., Chhikara D., Kumar M. S. Synthesis of aligned ZnO nanorod array on

- silicon and sapphire substrates by thermal evaporation technique // *Journal of Materials Science & Technology*. — 2011. — Vol. 27, No. 8. — P. 701–706.
19. Sundaram K. B., Khan A. Characterization and optimization of zinc oxide films by r. f. magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. — 1997. — Vol. 295, No. 1. — P. 87–91.
 20. Gafiychuk V. V., Ostafiychuk B. K., Popovych D. I., Popovych I. D., Serednytski A. S. ZnO nanoparticles produced by reactive laser ablation // *Applied Surface Science*. — 2011. — Vol. 257, No. 20. — P. 8396–8401.
 21. Zhu M. W., Huang N., Gong J., Zhang B., Wang Z. J., Sun C., Jiang X. Growth of ZnO nanorod arrays by sol-gel method: transition from two-dimensional film to one-dimensional nanostructure // *Applied Physics A*. — 2011. — Vol. 103. — P. 159–166.
 22. Hsu H. C., Cheng C. S., Chang C. C., Yang S., Chang C. S., Hsieh W. F. Orientation-enhanced growth and optical properties of ZnO nanowires grown on porous silicon substrates // *Nanotechnology*. — 2005. — Vol. 16, No. 2. — P. 297–301.
 23. Klochko N. P., Myagchenko Yu. A., Mel'nichuk E. E., Kopach V. R., Klepikova E. S., Lyubov V. N., Hripunov G. S., Kopach A. V. Perspektivy impul'snogo elektroosazhdeniya ierarhicheskikh nanostruktur oksida cinka // *FTP*. — 2013. — Vol. 47, vyp. 8. — P. 1129–1136.
 24. Olenich I. B., Monastirs'kij L. S., Aksiiment'eva O. I., Sokolovs'kij B. S. Vologochutlivi strukturi na osnovi poruvatogo kremniyu // *UFZh*. — 2011. — Vol. 56, No. 11. — P. 1199–1203.
 25. Vakulenko O. V., Kondratenko S. V., Shu-tov B. M. // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. — 1999. — Vol. 2, No. 2. — P. 88–89.