

PACS numbers: 68.37.Hk, 72.40.+w, 73.50.Pz, 73.63.-b, 81.05.Rm, 84.60.Jt, 85.60.-q

Фоточутливі структури на основі модифікованого паладієм поруватого кремнію

І. Б. Оленич, О. Б. Перевізник

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
факультет електроніки та комп'ютерних технологій,
кафедра радіоелектронних і комп'ютерних систем,
вул. Драгоманова, 50,
79005 Львів, Україна*

Створено фоточутливі сандвіч-структури на основі поруватого кремнію. Вивчено вплив легування поруватого шару йонами Паладію на електричні та фотоелектричні властивості одержаних структур. Виявлено збільшення електропровідності та фото-ерс експериментальних структур внаслідок інкорпорації Паладію в матрицю поруватого кремнію. Досліджено температурні, енергетичні та часові залежності фотовідгуку бар'єрних структур та їх спектральні характеристики в діапазоні довжин хвиль 450–1100 нм. Одержані результати розширюють перспективи застосування структур на основі поруватого кремнію у фотоелектроніці.

In this work, we fabricate photosensitive sandwich-like structures based on porous silicon by means of both electrochemical etching of silicon wafer and adding palladium into porous layer. The effect of porous layer doping by palladium ions on electrical and photovoltaic properties of the obtained structures is studied. The increase of electrical conductivity and photoinduced voltage in investigated structures is found because of palladium incorporation into the porous silicon matrix. Temperature, time, and energy dependences of photoinduced voltage of the barrier structures are measured. The existence of trap levels of non-equilibrium carriers, which affect the electronic processes in porous silicon nanostructures, is confirmed. Spectral characteristics of photoresponse within the 450–1100 nm wavelength range are investigated. The obtained results broaden the prospects of application of the structures based on porous silicon in photoelectronics.

Созданы фоточувствительные сандвич-структуры на основе пористого кремния. Изучено влияние легирования пористого слоя ионами палладия на электрические и фотоэлектрические свойства полученных

структур. Обнаружено увеличение электропроводности и фотоэда экспериментальных структур вследствие инкорпорации палладия в матрицу пористого кремния. Исследованы температурные, энергетические и временные зависимости фотоотклика барьерных структур, а также их спектральные характеристики в диапазоне длин волн 450–1100 нм. Полученные результаты расширяют перспективу применения структур на основе пористого кремния в фотоэлектронике.

Ключові слова: поруватий кремній, паладій, електропровідність, фото-відгук, спектральна характеристика.

Key words: porous silicon, palladium, electrical conductivity, photore-
sponse, spectral characteristics.

Ключевые слова: пористый кремний, палладий, электропроводность, фотоотклик, спектральная характеристика.

(Отримано 14 червня 2016 р.)

1. ВСТУП

Один з пріоритетних напрямів розвитку електроніки тісно пов'язаний з можливістю розширення функціональності кремнієвої технології завдяки створенню та дослідженню нових наноматеріалів з унікальними фізико-хімічними властивостями. Доступним способом одержання кремнієвих наноструктур є електрохімічна метода формування поруватого кремнію (ПК) [1, 2]. Інтенсивна видима фотолюмінесценція та антивідбивні властивості ПК, збільшена внаслідок квантового обмеження ширина забороненої зони кремнієвих нанокристалів, велика площа їх поверхні розширюють перспективу використання ПК для створення нового покоління оптоелектронних пристроїв, сенсорних систем і фотоелектричних перетворювачів [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 нанооб'єктів різної природи, що дає змогу створювати композити з прогнозованими властивостями. Зокрема, було встановлено, що впровадження у пори наночастинок металів (золота, кобальту, нікелю, міді та ін.) сприяє підвищенню ефективності прояву оптичних, люмінесцентних, каталітичних властивостей матеріалу [9–12]. Науковий і практичний інтерес викликають наносистеми на основі ПК з інкорпорованими частинками паладію, які широко використовують як газові сенсори. Наявність на поверхні поруватого шару каталітичного матеріалу сприяє підвищенню чутливості сенсорів до молекул

водню та водневмісних сполук [13–15]. Наноккомпозит на основі ПК і паладію також є перспективним матеріалом водневої енергетики для електродів мікропаливних елементів [16, 17]. Менше уваги було приділено вивченню фотоелектричних властивостей такого наноккомпозиту. Враховуючи велику площу поглинаючої поверхні поруватого шару і високі значення роботи виходу електронів з паладію (5,22–5,6 еВ) можна очікувати підвищення ефективності фотовольтаїчних структур на основі модифікованого паладієм ПК. Тому мета роботи полягала у вивченні електричних та фотоелектричних властивостей наносистем на основі ПК і паладію.

2. ЕКСПЕРИМЕНТ

Шари ПК були одержані методом фотоелектрохімічного щавлення пластин монокристалічного кремнію кристалографічної орієнтації (100) товщиною 400 мкм, електронного типу провідності (*n*-Si) з питомим опором 4,5 Ом·см. Як електроліт використовувався етанольний розчин фтористоводневої кислоти з об'ємним співвідношенням компонентів HF:C₂H₅OH = 1:1. Густина анодного струму і час щавлення складали 25 мА/см² та 5 хвилин, відповідно. З метою одержання однорідного поруватого шару на тильній поверхні кремнієвого підложжя попередньо була термічно осаджена і відпалена за температури 450°C упродовж 20 хв плівка золота, яка також слугувала контактом для подальших вимірювань. Для забезпечення наявності в приповерхневому шарі *n*-Si носіїв заряду позитивного знаку, необхідних для перебігу анодних реакцій і формування ПК [2], робоча поверхня пластини опромінювалася вольфрамовою лампою розжарення потужністю 500 Вт упродовж всього процесу електрохімічного щавлення. Одержані структури розділялися на зразки площею близько 0,7 см².

Втілення Паладію в матрицю ПК здійснювалось електрохімічною методою з 0,005М розчину ацетату паладію (Pd(CH₃COO)₂) в ацетонітрилі (C₂H₃N) при проходженні постійного струму 2 мА упродовж 10 хв. Йони Паладію, які володіють більш позитивним у порівнянні з кремнієм електрохімічним потенціалом, осідаючи на поверхню поруватого шару, нейтралізуються шляхом відбору електронів від поверхневих атомів Силіцію і стають зародками зростання нанокристалів металу [18,19]. Крім того, окиснювально-відновні процеси можуть сприяти утворенню оксидної плівки на поверхні ПК. Вивчення морфології ПК і контроль за втіленням Паладію в поруватий шар здійснювалися методами сканувальної електронної мікроскопії (SEM) у режимах вторинних і пружньо відбитих електронів та рентгенівської мікροаналізи за

допомогою растрового мікроскопу Selmi PEMMA-102.

Електричний контакт до поруватого шару діаметром 3 мм формувався методом термічного осадження напівпрозорої плівки срібла. Кут між напрямом потоку випаруваних атомів Ag і нормаллю до поверхні ПК становив 60° , що забезпечувало утворення електричного контакту на поверхні поруватого шару, уникаючи проникнення Ag в глибину пор. Таким чином були одержані сандвіч-структури Au/n-Si/ПК/Ag.

Вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) проводили за кімнатної температури згідно з стандартними методиками з кроком 50 мВ при проходженні струму через структури в напрямку, перпендикулярному до поверхні. Фотоелектричні явища досліджували за умов опромінення структур зі сторони поруватого шару світловипромінювальною діодою (СВД) FYLP-1W-UWB-A з потужністю у 1 Вт і світловим потоком у 76 люмен. Вимірювання спектральних залежностей фото-ерс проводили на стандартному оптичному обладнанні з використанням дифракційного монохроматора і лампи розжарення (2800 К). Спектри фотовідгуку нормувалися на криву випромінення чорного тіла з температурою у 2800 К (Планкову криву) і корегувалися з врахуванням спектральної чутливості установки.

Для вивчення енергетичних характеристик структур Au/n-Si/ПК/Ag використовували СВД білого світла, інтенсивність випромінення якого прямо пропорційна струму. У випадку дослідження температурних залежностей фото-ерс експериментальні зразки були розміщені у криостаті, в якому підтримувався вакуум на рівні залишкового тиску близько 10^{-3} мм рт. ст. Вимірювання проводили за умов лінійного нагріву зразків від температури у 80 К до 325 К з швидкістю 0,1 К/с. Кінетику фотовідгуку сандвіч-структур Au/n-Si/ПК/Ag на прямокутні імпульси інфрачервоного світла досліджували за допомогою генератора ГЗ-36А, СВД L-53F3C ($\lambda = 940$ нм) і осцилографа Hantek 1008В.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження мікроструктури шарів ПК здійснювалося на основі аналізу СЕМ-зображень поперечного перерізу експериментальних структур у режимах вторинних і пружньо відбитих електронів (рис. 1). Встановлено, що на кремнієвих монокристалах з кристаліграфічною орієнтацією (100) утворюються вузькі колоноподібні пори діаметром від декількох десятків до декількох сотень нанометрів, які напрямлені в глибину кристалу перпендикулярно до поверхні. Товщина поруватого шару складала близько 20 мкм.

Визначення фазового складу шару ПК експериментальних структур здійснювалось за енергетичними спектрами в режимі

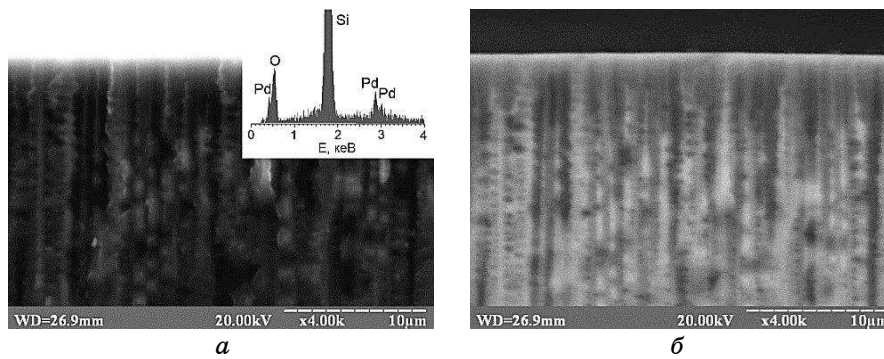


Рис. 1. СЕМ-зображення поперечного перерізу ПК у режимі вторинних (а) і пружньо відбитих електронів (б). На вставці: діаграма рентгенівської мікроаналізи модифікованого паладієм ПК.¹

рентгеноспектральної мікроаналізи. Поряд з інтенсивним максимумом з енергією 1,74 кеВ, який характерний для кремнію, спостерігалися піки при 0,45 кеВ, 2,83 кеВ та 3,04 кеВ, які відповідають атомам Паладію. Крім того, було ідентифіковано смугу з енергією 0,52 кеВ, яка пов'язана з атомами кисню і може бути зумовлена окисненням поверхні поруватого шару. Слід зазначити, що інтенсивність смуг, пов'язаних з інкорпорованими атомами Паладію, зменшувалась із збільшенням віддалі від поверхні ПК до аналізованої ділянки. Це може свідчити про те, що електроосадження металу відбувалося переважно на поверхні та у приповерхневому шарі ПК. Оскільки на СЕМ-зображеннях поперечного перерізу структур ПК не спостерігалося утворення субмікронних частинок паладію, то можна припустити, що осадження паладію в порах ПК відбувалось в атомарному вигляді або у формі дрібних нанокластерів.

Нелінійні ВАХ сандвіч-структур Au/n-Si/ПК/Ag, виміряні в темноті за кімнатної температури, ймовірно зумовлені електричними бар'єрами на контактах металів з напівпровідником. Причому, домінування одного з бар'єрів Шоттки визначає випрямляючий характер ВАХ, що можна простежити на рис. 2. Під впливом освітлення поверхні ПК випроміненням СВД з світловим потоком у 76 люмен ВАХ експериментальних зразків змінювалися подібно до фотодіодних структур. Слід зазначити, що коефіцієнт випрямлення та значення фото-ерс і фотоструму були більшими у випадку структур Au/n-Si/ПК/Ag з інкорпорованим в поруватий шар паладієм. Це може бути зумовлено як зміною пасивації поверхні нанокристалів ПК, так і модифікацією їх електронних параметрів внаслідок адсорбційно-електричних ефектів [7, 20]. Крім того, спостерігалося збільшення електропровідності струк-

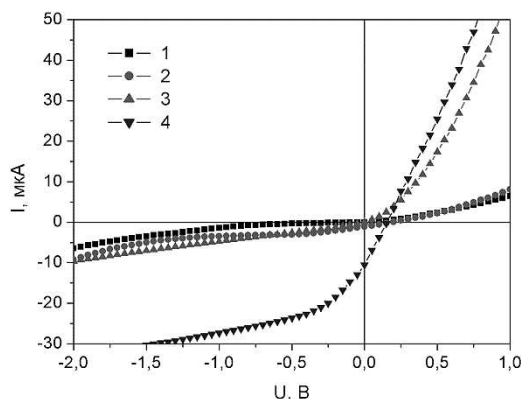


Рис. 2. ВАХ вихідної (1, 2) і модифікованої паладієм (3, 4) структури Au/n-Si/PK/Ag: 1, 3 — в темноті; 2, 4 — під впливом освітлення поверхні ПК випроміненням СВД (FYLP-1W-UWB-A).²

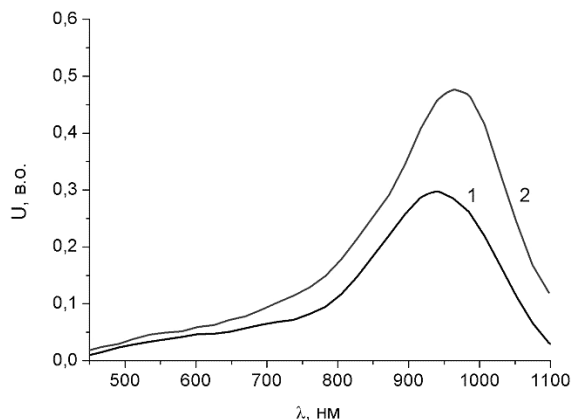


Рис. 3. Спектральні залежності фото-ерс вихідної (1) і модифікованої паладієм (2) структури Au/n-Si/PK/Ag.³

тур на основі леґованого Паладієм ПК, що може бути пов'язано з більшою площею контакту метал-напівпровідник і утворенням додаткових каналів проходження струму через поруватий шар.

Спектральні залежності фотовідгуку бар'єрних структур Au/n-Si/PK/Ag наведено на рис. 3. Спектри фото-ерс в режимі холостого ходу були подібними до спектру фотовідгуку кремнійової діоди та гетеропереходів ПК-кремній [7,11] і характеризувалися широким максимумом в діапазоні 930–970 нм. Незначне зміщення максимуму спектральної фоточутливості структур на основі модифікованого паладієм ПК у низькоенергетичну область може бути пов'язано з шунтуванням квантово-розмірних кремні-

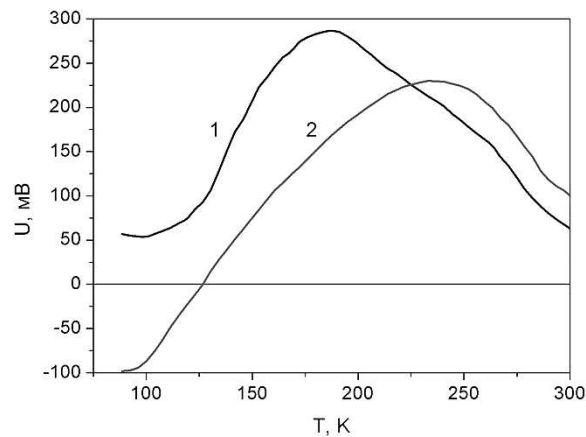


Рис. 4. Температурні залежності фото-ерс вихідної (1) і модифікованої паладієм (2) структури $Au/n-Si/PK/Ag$ під впливом освітлення поверхні ПК випроміненням СВД FYLP-1W-UWB-A.⁴

йових нанокристалів осадженим металом.

Температурні залежності фото-ерс дослідних структур в діапазоні 80–300 К володіли немонотонним характером з максимумом при температурі близько 180 К у випадку вихідної структури $Au/n-Si/PK/Ag$ і 240 К для структури з інкорпорованим Паладієм (рис. 4). Крім того, фоточутливі сандвіч-структури з модифікованим паладієм поруватим шаром характеризувалися інверсією знаку фото-ерс в температурній області 80–125 К. Інверсія знаку фото-ерс у структурах на основі ПК також спостерігалась у випадку легування поруватого шару золотом, йони якого подібно до йонів Паладію володіють більш позитивним у порівнянні з кремнієм електрохімічним потенціалом [10, 19].

Спостережуваний характер температурних залежностей фото-сигналу може визначатися рядом причин, зокрема, зміною з температурою положення рівня Фермі, наявністю рівнів захоплення нерівноважних носіїв заряду як на поверхні кремнієвих нанокристалів, так і на межі поруватого шару з підложжям, та ін. [10, 21]. Зокрема, різні за природою та енергією активації рівні захоплення були виявлені в ході досліджень термостимульованої провідності та деполаризації ПК [22, 23]. Величина фотосигналу залежить від часу утримання носіїв на рівнях захоплення, який зростає із зниженням температури. Інверсія знаку фото-ерс модифікованих паладієм структур $Au/n-Si/PK/Ag$ у різних температурних діапазонах може бути зумовлена різною глибиною поток нерівноважних електронів і дірок.

Для одержання додаткової інформації про фотоелектричні процеси в структурах $Au/n-Si/PK/Ag$ були дослідженні їх енер-

гетичні характеристики. Характер залежностей фото-ерс від інтенсивності опромінення був схожим з сигналом фотодіоди, однак спостерігався відхил від лінійності енергетичних залежностей фотоструму (рис. 5). Сублінійна залежність фотоструму від інтенсивності освітлення також може бути пов'язана із захопленням носіїв пастками.

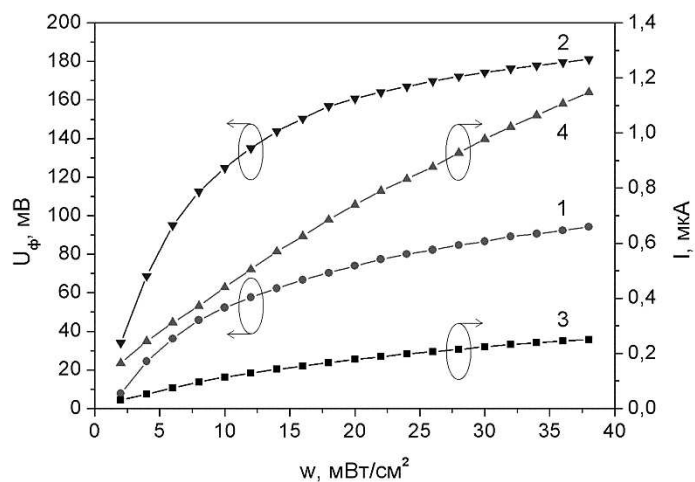


Рис. 5. Залежності фото-ерс (1, 2) та фотоструму (3, 4) вихідної (1, 3) і модифікованої паладієм (2, 4) структури Au/n-Si/ПК/Ag від інтенсивності освітлення.⁵

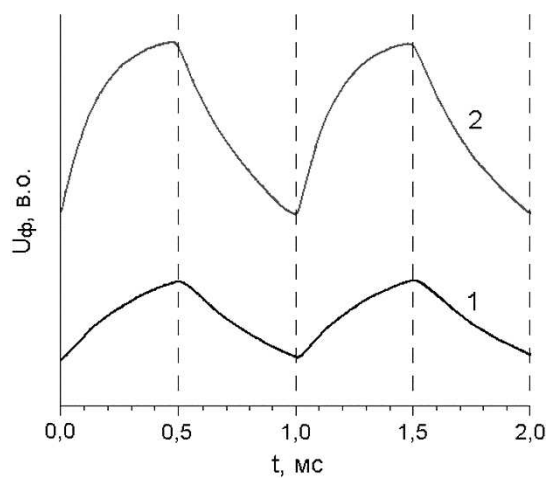


Рис. 6. Кінетика фотовідгуку вихідної (1) і модифікованої паладієм (2) структури Au/n-Si/ПК/Ag на П-подібний імпульс світла з довжиною хвилі $\lambda = 940$ нм.⁶

Для вивчення часових параметрів фотовідгуку використовувалося імпульсне ІЧ-випромінення з довжиною хвилі $\lambda = 940$ нм, що відповідає максимуму фоточутливості структур Au/n-Si/ПК/Ag. Результати досліджень кінетики фотовідгуку на П-подібні світлові імпульси тривалістю у 0,5 мс і частотою у 1 кГц показано на рис. 6.

На основі аналізу одержаних залежностей встановлено, що структури з модифікованим паладієм ПК характеризуються дещо меншим часом наростання фотовольтаїчного сигналу у порівнянні з вихідним зразком. Зменшення часу фотовідгуку легованих металом структур Au/n-Si/ПК/Ag ймовірно зумовлене зміною пасивації нанокристалів ПК. Поряд з тим, поліпшення пасивації поверхні поруватого шару сприяє зменшенню коефіцієнта поверхневої рекомбінації носіїв заряду і підвищенню ефективності фотодетекторів на основі ПК.

4. ВИСНОВКИ

Таким чином, на основі комплексних досліджень ВАХ, спектральних і часових залежностей фотовідгуку вивчено вплив легування поруватого шару йонами Паладію на електричні та фотоелектричні властивості структур Au/n-Si/ПК/Ag. Встановлено, що інкорпорація Паладію в матрицю ПК зумовлює зростання електропровідності сандвіч-структур і збільшення величини фотосигналу, що може бути пов'язано з кращою пасивацією поверхні ПК, більшою площею контакту метал-напівпровідник і утворенням додаткових каналів проходження струму через поруватий шар.

На основі температурних залежностей фото-ерс та енергетичних характеристик фоточутливих структур Au/n-Si/ПК/Ag виявлено існування рівнів захоплення нерівноважних носіїв заряду, які значним чином впливають на електронні процеси в наноструктурах ПК. Висока внаслідок великої площі поглинальної поверхні фоточутливість одержаних структур Au/n-Si/ПК/Ag розширює перспективу використання ПК у фотоприймачах. Крім того, одержані результати можуть бути використаними у сенсоричі та водневій енергетиці для ефективного формування нанокаталізаторів у поруватих матеріалах.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. O. Bisi, S. Ossicini, and L. Pavesi, *Surf. Sci. Rep.*, **38**: 1 (2000).
2. A. G. Cullis, L. T. Canham, and P. D. J. Calcott, *J. Appl. Phys.*, **82**: 909 (1997).

3. H. Föll, M. Christophersen, J. Carstensen, and G. Hasse, *Mater. Sci. Eng. R*, **39**: 93 (2002).
4. B. Ünal, A. N. Parbukov, and S. C. Bayliss, *Opt. Mater.*, **17**: 79 (2001).
5. S. Ozdemir and J. Gole, *Curr. Opin. Solid St. Mater. Sci.*, **11**: 92 (2007).
6. A. V. Brodovoi, V. A. Brodovoi, V. A. Skryshevskiy, S. G. Bunchuk, and L. M. Khnorozok, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, **5**: 395 (2002).
7. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, and B. S. Sokolovskii, *Electron. Mater. Lett.*, **9**: 257 (2013).
8. L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, I. B. Olenych, and B. S. Sokolovskii, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **589**: 124 (2014).
9. T. S. Amran, M. R. Hashim, N. K. Al-Obaidi, H. Yazid, and R. Adnan, *Nanoscale Res. Lett.*, **8**: 35 (2013).
10. Е. Ф. Венгер, С. И. Кириллова, И. М. Кизяк, Э. Г. Манойлов, В. Е. Примаченко, *Физика и техника полупроводников*, **38**: 117 (2004).
11. І. Б. Оленич, *Ж. нано-електрон. фіз.*, **6**: 04022 (2014).
12. Н. В. Соцкая, О. В. Долгих, В. М. Кашкаров, А. С. Леньшин, Е. А. Котлярова, С. В. Макаров, *Сорбционные и хроматографические процессы*, **9**: 643 (2009).
13. V. Polishchuk, E. Souteyrand, J. R. Martin, V. I. Strikha, and V. A. Skryshevsky, *Anal. Chim. Acta.*, **375**: 205 (1998).
14. F. Rahimi and A. Irajizad, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**: 7201 (2007).
15. І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський, О. І. Аксіментьєва, Б. С. Соколовський, *Укр. фіз. журн.*, **56**: 1199 (2011).
16. Н. А. Яштулов, С. С. Гаврин, А. А. Ревина, В. Р. Флид, *Изв. РАН. Сер. хим.*, № 8: 1450 (2010).
17. H. Presting, J. Konle, V. Starkov, A. Vyatkin, and U. König, *Mater. Sci. Eng. B*, **108**: 162 (2004).
18. I. Coulthard, R. Sammyniaken, S. J. Naftel, P. Zhang, and T. K. Sham, *phys. status solidi A*, **182**: 157 (2000).
19. В. Е. Примаченко, Я. Ф. Кононец, Б. М. Булах, Е. Ф. Венгер, Э. Б. Каганович, И. М. Кизяк, С. И. Кириллова, Э. Г. Манойлов, Ю. А. Цыркунов, *Физика и техника полупроводников*, **39**: 595 (2005).
20. M. Chiesa, G. Amato, L. Voarino, E. Garrone, F. Geobaldo, and E. Giamello, *Angew. Chemie Int. Ed.*, **42**: 5032 (2003).
21. Е. Ф. Венгер, Т. Я. Горбач, С. И. Кириллова, В. Е. Примаченко, В. А. Чернобай, *Физика и техника полупроводников*, **36**: 349 (2002).
22. Л. В. Григорьев, И. М. Григорьев, М. В. Загорянская, В. И. Соколов, Л. М. Сорокин, *Письма в ЖТФ*, **32**, вып. 17: 33 (2006).
23. I. Olenych, V. Tsizh, L. Monastyrskii, O. Aksimentyeva, and B. Sokolovskii, *Solid State Phenom.*, **230**: 127 (2015).

REFERENCES

1. O. Bisi, S. Ossicini, and L. Pavesi, *Surf. Sci. Rep.*, **38**: 1 (2000).
2. A. G. Cullis, L. T. Canham, and P. D. J. Calcott, *J. Appl. Phys.*, **82**: 909 (1997).
3. H. Föll, M. Christophersen, J. Carstensen, and G. Hasse, *Mater. Sci. Eng. R*,

- 39: 93 (2002).
4. B. Ünal, A. N. Parbukov, and S. C. Bayliss, *Opt. Mater.*, **17**: 79 (2001).
 5. S. Ozdemir and J. Gole, *Curr. Opin. Solid St. Mater. Sci.*, **11**: 92 (2007).
 6. A. V. Brodovoi, V. A. Brodovoi, V. A. Skryshevskiy, S. G. Bunchuk, and L. M. Khnorozok, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, **5**: 395 (2002).
 7. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, and B. S. Sokolovskii, *Electron. Mater. Lett.*, **9**: 257 (2013).
 8. L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, I. B. Olenych, and B. S. Sokolovskii, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **589**: 124 (2014).
 9. T. S. Amran, M. R. Hashim, N. K. Al-Obaidi, H. Yazid, and R. Adnan, *Nanoscale Res. Lett.*, **8**: 35 (2013).
 10. E. F. Venger, S. I. Kirillova, I. M. Kizyak, J. G. Manoilov, and V. E. Primachenko, *Semiconductors*, **38**: 113 (2004).
 11. I. B. Olenych, *J. Nano- Electron. Phys.*, **6**: 04022 (2014).
 12. N. V. Sotskaya, O. V. Dolgikh, V. M. Kashkarov, A. S. Len'shin, E. A. Kotlyarova, and S. V. Makarov, *Sorbtsionnyye i Khromatograficheskie Protssesy*, **9**: 643 (2009) (in Russian).
 13. V. Polishchuk, E. Souteyrand, J. R. Martin, V. I. Strikha, and V. A. Skryshevsky, *Anal. Chim. Acta.*, **375**: 205 (1998).
 14. F. Rahimi and A. Irajizad, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**: 7201 (2007).
 15. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, and B. S. Sokolovskii, *Ukr. J. Phys.*, **56**: 1198 (2011).
 16. N. A. Yashtulov, S. S. Gavrin, A. A. Revina, and V. R. Flid, *Izv. RAN. Ser. Khim.*, No. 8: 1450 (2010) (in Russian).
 17. H. Presting, J. Konle, V. Starkov, A. Vyatkin, and U. König, *Mater. Sci. Eng. B*, **108**: 162 (2004).
 18. I. Coulthard, R. Sammyniaken, S. J. Naftel, P. Zhang, and T. K. Sham, *phys. status solidi A*, **182**: 157 (2000).
 19. V. E. Primachenko, Ja. F. Kononets, B. M. Bulakh, E. F. Venger, E. B. Kaganovich, I. M. Kizyak, S. I. Kirillova, E. G. Manoilov, and Yu. A. Tsyrukunov, *Semiconductors*, **39**: 565 (2005).
 20. M. Chiesa, G. Amato, L. Boarino, E. Garrone, F. Geobaldo, and E. Giamello, *Angew. Chemie Int. Ed.*, **42**: 5032 (2003).
 21. E. F. Venger, T. Ya. Gorbach, S. I. Kirillova, V. E. Primachenko, and V. A. Chernobai, *Semiconductors*, **36**: 330 (2002).
 22. L. V. Grigor'ev, I. M. Grigor'ev, M. V. Zamoryanskaya, V. I. Sokolov, and L. M. Sorokin, *Tech. Phys. Lett.*, **32**: 750 (2006).
 23. I. Olenych, B. Tszh, L. Monastyrskii, O. Aksimentyeva, and B. Sokolovskii, *Solid State Phenom.*, **230**: 127 (2015).

*Ivan Franko National University of Lviv,
Faculty of Electronics,
50, Drahomanov Str.,
79005 Lviv, Ukraine*

¹ Fig. 1. SEM images of the porous silicon (PS) cross section: (a) secondary electrons mode, (b) elastically reflected electrons mode. Insets: X-ray microanalysis (EDS) of the palladium modified porous silicon.

² Fig. 2. The VA curve of both the initial Au/n-Si/PS/Ag structure (1, 2) and the structure modified with palladium (3, 4): (1, 3)—in the dark; (2, 4)—with LED illumination (FYLP-

1W-UWB-A) of the PS surface.

³ **Fig. 3.** Spectral dependence of the photoinduced voltage of both the initial Au/*n*-Si/PS/Ag structure (1) and the structure modified with palladium (2).

⁴ **Fig. 4.** Temperature dependences of the photoinduced voltage of both the initial Au/*n*-Si/PS/Ag structure (1) and the structure modified with palladium (2) with LED (FYLP-1W-UWB-A) illumination of the PS surface.

⁵ **Fig. 5.** Dependences of photoinduced voltage (1, 2) and photocurrent (3, 4) of both the initial Au/*n*-Si/PS/Ag structure (1, 3) and the structure modified with palladium (2, 4) on the illumination intensity.

⁶ **Fig. 6.** Kinetics of the photoresponse to the rectangular pulse of light ($\lambda = 940$ nm) of both the initial Au/*n*-Si/PS/Ag structure (1) and the structure modified with palladium (2).