

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

УДК 520.8.054

PACS: 61.72.U-, 81.05.DZ, 85.60.DW

ОСОБЛИВОСТІ ФОТОЧУТЛИВОСТІ СТРУКТУРИ Ni/n-ZnO:N/p-Si

*А. І. Євтушенко¹, Г. В. Лашкар'єв¹, В. Й. Лазоренко¹, Л. А. Косяченко²,
В. М. Склярчук², О. Ф. Склярчук²*

¹Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України,
вул. Кржижанівського, 3, 03680, Київ, Україна

Тел. +38 044 424 15 24, Факс +38044 424 21 31, e-mail: earsen@ukr.net

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ул. Коцюбинського, 2, 58012, Чернівці, Україна

Тел. +38 03722 44221, e-mail: lakos@chv.ukrpack.net

ОСОБЛИВОСТІ ФОТОЧУТЛИВОСТІ СТРУКТУРИ NI/N-ZNO:N/P-SI

*А. І. Євтушенко, Г. В. Лашкар'єв, В. Й. Лазоренко, Л. А. Косяченко,
В. М. Склярчук, О. Ф. Склярчук*

Анотація. Леговані азотом плівки n-ZnO:N були осаджені на p-Si підкладки методом магнетронного розпилення. Досліджено особливості фоточутливості структури Ni/n-ZnO:N/p-Si залежно від напруги зміщення та температури. Структури демонструють високу струмову чутливість в широкому спектральному діапазоні, яка стрімко зростає при збільшенні прикладеної напруги. При напрузі 5 В чутливість на довжині хвилі $\lambda = 400$ нм становить декілька десятків А/Вт, а при $\lambda = 1000$ нм — декілька одиниць А/Вт. Висока чутливість детектора пояснюється внутрішнім підсиленням в структурі Ni/n-ZnO:N/p-Si, що поводить себе як фототранзистор.

Ключові слова: плівка ZnO, гетероструктура, внутрішнє підсилення фотоструму, фототранзистор

PHOTOSENSITIVITY PECULIARITIES OF Ni/n-ZnO:N/p-Si STRUCTURE

*А. І. Ievtushenko, G. V. Lashkarev, V. I. Lazorenko, L. A. Kosyachenko,
V. M. Sklyarchuk, O. F. Sklyarchuk*

Abstract. Nitrogen doped n-ZnO:N films were deposited on p-Si substrates by magnetron sputtering. The photosensitivity peculiarities of n-ZnO:N/p-Si structure depending on bias voltage and temperature were investigated. The structures demonstrate a high current sensitivity in a wide spectral region, which increases rapidly with increasing applied voltage. Under a bias 5 V, the responsivity is equal to several tens of A/W at $\lambda = 400$ nm, and several units of A/W at 1000 nm. High sensitivity of detector is attributed to internal gain in Ni/n-ZnO:N/p-Si structure that operates as a phototransistor.

Keywords: ZnO film, heterostructure, internal photocurrent gain, phototransistor

ОСОБЕННОСТИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ Ni/n-ZnO:N/p-Si

*А. И. Евтушенко, Г. В. Лашкарев, В. И. Лазоренко, Л. А. Косяченко,
В. М. Склярчук, Е. Ф. Склярчук*

Аннотация. Легированные азотом пленки n-ZnO:N были осаждены на p-Si подложки методом магнетронного распыления. Исследовано особенности фоточувствительности структуры Ni/n-ZnO:N/p-Si в зависимости от напряжения смещения и температуры. Структуры демонстрируют высокую токовую чувствительность в широком спектральном диапазоне, которая стремительно возрастает при увеличении приложенного напряжения. При напряжении смещения 5 В чувствительность на длине волны $\lambda = 400$ нм составляет несколько десятков А/Вт, а при $\lambda = 1000$ нм — несколько единиц А/Вт. Высокая чувствительность детектора объясняется внутренним усилением в структуре Ni/n-ZnO:N/p-Si, которая ведет себя как фототранзистор.

Ключевые слова: пленка ZnO, гетероструктура, внутреннее усиление фототока, фототранзистор

Вступ

Упродовж останніх років значна увага приділяється вивченню широкозонного напівпровідника — оксиду цинку (ZnO), властивості якого важливі для використання в випромінюючих приладах і детекторах випромінювання в ультрафіолетовій області спектру. Серед детекторів зріс інтерес, зокрема, до фотодіодів, в яких світлочутливим елементом є гетероструктура n-ZnO/p-Si. У таких фотодіодах досягнуто фоточутливість 0,28 А/Вт на довжині хвилі 670 нм, що відповідає квантовій ефективності η близькій до 50% [1, 2], а чутливість на довжині хвилі 310 і 650 нм становить відповідно 0,5 і 0,3 А/Вт. Останнє відповідає квантовій ефективності близькій до 2 (200%) [3]. Нижче наводяться результати дослідження структури Ni/n-ZnO:N/p-Si, квантова ефективність якої на довжині хвилі ~ 400 нм становить декілька десятків одиниць.

1. Виготовлення зразків

Важливим для створення ефективних фотодетекторів на основі оксиду цинку є пасивація азотом таких власних його дефектів донорного типу як вакансії кисню [4]. Тож плівки ZnO:N були осажені методом магнетронного розпилення керамічної ZnO мішені в атмосфері азоту на p-Si підкладки. Таким чином, плівки ZnO були леговані азотом в процесі осадження з концентрацією 1,16 ваг.%. Питомий опір осаджених у такий спосіб плівок ZnO:N становив $3 \cdot 10^5$ Ом·см.

Напівпрозорий Ni контакт товщиною 10 нм був напилений методом вакуумного термічного розпилення (ВТР) на плівку ZnO:N (вікно для введення випромінювання в детектор). Al омічні контакти до p-Si були також осажені методом ВТР.

2. Результати та обговорення

Отримані структури мають нелінійну і асиметричну вольт-амперну характеристику. Відношення прямого струму для n-ZnO/p-Si гетеропереходу ("—" на Ni контакті) до зворотного струму ("+" на Ni контакті) становить близько 100 при напрузі $|V| = 2,5$ В. Сусідні контакти до p-Si демонструють омічну поведінку, тоді як сусідні Ni контакти до ZnO — симетричні, але сильно нелінійні. Виходячи з цього, можна припустити, що на контакті Ni/n-ZnO формується бар'єр Шоттки, який "спотворює" вольт-амперну характеристику гетероструктури n-ZnO/p-Si. Можна також припустити, що у разі "+" на Ni контакті спостережуваній малий струм (~ 1 мкА при 8 В) визначається зворотно-зміщеним гетеропереходом n-ZnO/p-Si.

2.1. Фотоелектричні характеристики

Спектри фоточутливості зразків реєструвалися за допомогою монохроматора МДР-23, оснащеного кварцовою галогенною лампою як джерела оптичного випромінювання. Спектральний розподіл випромінювання на вихідній щілині монохроматора визначався в абсо-

лютних одиницях з використанням еталонного Si фотодіода Д286, каліброваного на ділянці спектру 300–1100 нм.

Досліджувані зразки виявляли фоточутливість лише при полярності ввімкнення, що відповідає малим струмам ("+" на Ni, "-" на p-Si).

Як видно з рис. 1, спектри фоточутливості охоплюють широкий діапазон довжин хвиль. Природно допустити, що на ділянках $\lambda < 500$ нм і $\lambda > 500$ нм фоточутливість зумовлена фотогенерацією електронно-діркових пар відповідно в ZnO і в Si.

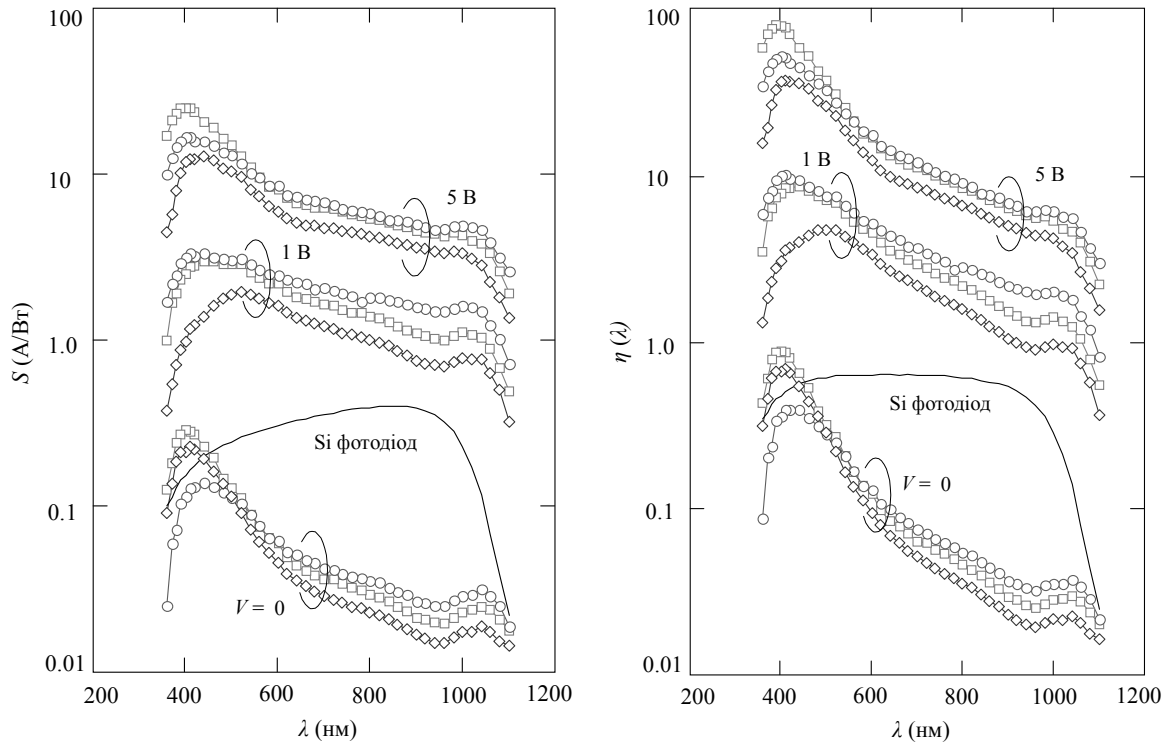


Рис. 1. Ліворуч — спектральна чутливість S , праворуч — квантова ефективність $\eta(\lambda)$ структури Ni/n-ZnO:N/p-Si залежно від довжини хвилі λ при різних напругах зміщення та при різних температурах: 3°C (ромбики), 20°C (квадратики) та 40°C (кружечки). Суцільна лінія — чутливість і квантова ефективність еталонного Si фотодіода

Перші ж експерименти показали, що навіть при низькій напрузі (0,5–1 В) чутливість Ni/n-ZnO:N/p-Si структур значно вища за фоточутливість еталонного Si фотодіоду D286 (максимальна фоточутливість 0,45 А/Вт). На рис. 1 ліворуч наведені спектральні характеристики Ni/n-ZnO:N/p-Si структури залежно від напруги зміщення та температури. Для порівняння наведена також спектральна крива Si фотодіода. Як видно, у короткохвильовій області, зокрема на довжині хвилі $\lambda = 400$ нм, чутливість Ni/n-ZnO:N/p-Si структури при напрузі 5 В перевершує чутливість Si фотодіоду на 2 порядки, а в довгохвильовій області, зокрема при $\lambda = 1000$ нм, — ще більше.

При підвищенні температури від 3 до 40°C чутливість Ni/n-ZnO:N/p-Si структури на довгохвильовій ділянці спектру збільшується в 1,5–2 рази, а чутливість короткохвильової

смуги з максимумом при $\lambda = 400$ нм залежить від температури немонотонно, а саме, знижується як при збільшенні, так і при зменшенні температури відносно кімнатної (приблизно в 2 рази) залежно від величини напруги зміщення.

Високі значення спектральної чутливості S означають, що фотоелектричне перетворення в структурі Ni/n-ZnO:N/p-Si характеризується підвищеною квантовою ефективністю $\eta(\lambda)$ ($\eta(\lambda) = S \cdot hc / \lambda$). На рис. 1 праворуч показані спектральні залежності $\eta(\lambda)$ структури Ni/n-ZnO:N/p-Si від напруги зміщення ($V = 0, 1$ та 5 В), а також, для порівняння, Si фотодіода. Слід звернути увагу на те, що при доволі низькій напрузі 5 В квантова ефективність фотоелектричного перетворення наближається до 100 (для кращих зразків квантова ефективність становить 600–700 [5]).

На рис. 2 показані залежності квантової ефективності, виміряні при різних температурах на довжинах хвиль 400 і 1000 нм, від прикладеної напруги. Найбільш загальна закономірність щодо

впливу прикладеної напруги до Ni/n-ZnO:N/p-Si структури полягає в тому, що чутливість стрімко зростає при збільшенні напруги від 0 до ~ 1 В, а далі її зростання значно сповільнюється.

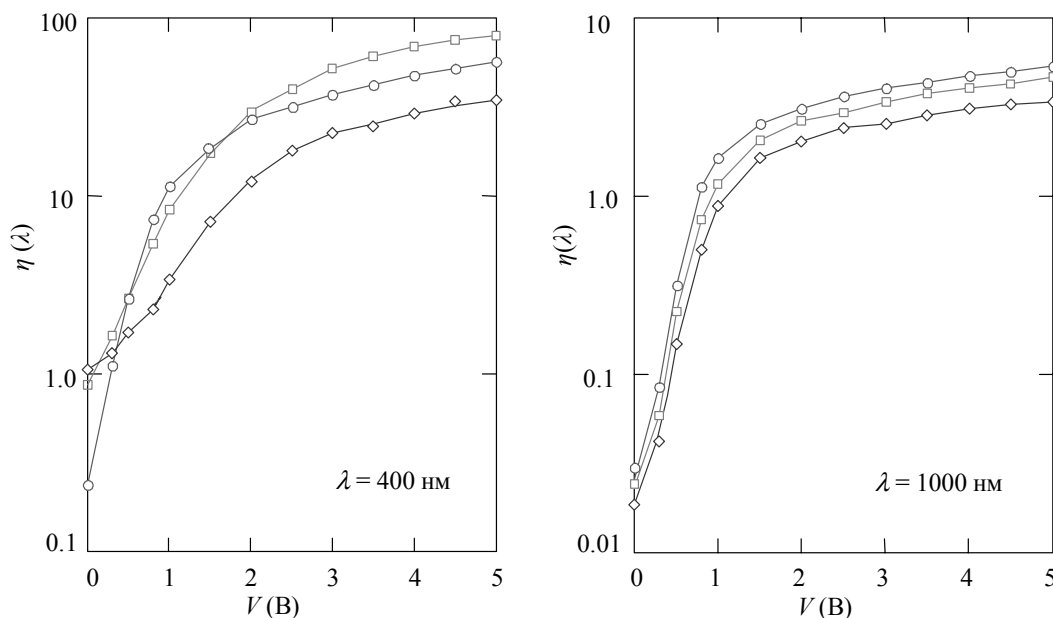


Рис. 2. Залежності квантової ефективності Ni/n-ZnO:N/p-Si структури на довжинах хвиль 400 і 1000 нм від прикладеної напруги при різних температурах: 3 °C (ромбики), 20 °C (квадратики) та 40 °C (кружечки)

2.2. Фізична інтерпретація отриманих результатів

Наведені вище результати дозволяють зробити припущення, що структура Ni/n-ZnO:N/p-Si є своєрідним біполярним транзистором — детектором з внутрішнім підсиленням фотоструму, тобто фототранзистором [6]. Зазвичай р-n-p фототранзистор містить два р-n переходи, один з котрих може бути р-n гетеропереходом. Розроблено також фототранзистор, в якому колекторний р-n перехід замінений контактом Шоттки (Schottky phototransistor). У досліджуваній структурі Ni/n-ZnO/p-Si контакт Шоттки Ni/n-ZnO виконує функцію емітерного переходу, а n-ZnO/p-Si гетероперехід — колекторного (рис. 3).

Якщо Ni контакт заряджений позитивно відносно р-Si, емітерний перехід Ni/n-ZnO і колекторний перехід n-ZnO/p-Si виявляються включеними відповідно в прямому і зворотному напрямках, як і при звичайній роботі біполярного транзистора із загальним емітером [6]. Електронно-дірковий пари, породжені при поглинанні фотонів в області просторового заряду гетеропереходу n-ZnO/p-Si, розділяються електричним полем у протилежних напрямках, що й

приводить до виникнення "первинного" фотоструму. Електронно-діркові пари, що виникли в областях просторового заряду, що припадають на ZnO і Si, беруть участь у формуванні смуг з різними спектрами. В обох випадках електрони вводяться в нейтральну частину плівки ZnO, тобто в базу транзистора. Для забезпечення стаціонарного процесу, така ж кількість дірок вводиться в ZnO з емітера (тобто, з Ni контакту), які й нейтралізують надлишок електронів (рис. 3). Звісно, вигин зон на контакті Шоттки Ni/n-ZnO має бути значним, щоб забезпечити утворення інверсійного р-n переходу з високим бар'єром для електронів і, отже, — ефективну інжекцію дірок у базу. Струм неосновних носіїв заряду (дірок) введений в базу з емітера підсилюється в $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ разів, де β — коефіцієнт підсилення транзистора зі спільним емітером, α — коефіцієнт передачі емітерного струму транзистора зі спільною базою.

Коефіцієнт передачі емітерного струму α залежить від співвідношення товщини бази d і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду $L_p = (\tau_p D_p)^{1/2}$, де τ_p і D_p — відповідно час життя і коефіцієнт дифузії дірок в ZnO. Приймавши для оцінки для рухливості дірок в ZnO $\mu_p = 1-10$

$\text{cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [7], із співвідношення Ейнштейна маємо $D_p = \mu_p kT/q = 0,025-0,25 \text{ cm}^2/\text{с}$ при 300 К. Приймаючи в подальшому для дірок в ZnO $\tau_p = 10^{-8}-10^{-7} \text{ с}$ [8], для дифузійної довжини дірок маємо $L_p = 0,5-1,5 \text{ мкм}$, яка більша, ніж товщина плівки $d = 0,1 \text{ мкм}$. У шарі ZnO, нанесеному методом магнетронного розпилення у плазмі азоту, постійна часу фотовідгуку близька до 10 мкс [8], тобто коефіцієнт дифузії неосновних носіїв заряду становить 5–15 мкм. Якщо $L_p > d$, коефіцієнт передачі струму в схемі зі спільною базою α близький до 1. Це означає, що $\beta \gg 1$, тобто фотострум в Ni/n-ZnO:N/p-Si структурі значно підсилюється.

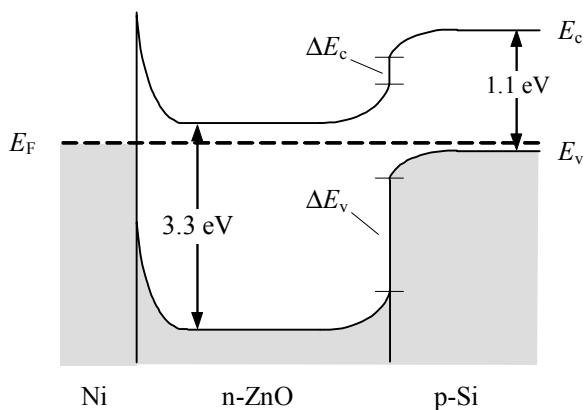


Рис. 3. Обговорювана енергетична діаграма Ni/n-ZnO/p-Si структури

Як альтернативу, слід розглянути механізм підсилення фотоструму, зумовлений наявністю прошарку SiO_2 (SiO_x) на межі поділу між ZnO і кремнієвою підкладкою подібно до того, як це відбувається в тунельних Al/SiO₂/Si MIS діодах [9]. Однак порівняльний аналіз показує, що електричні й фотоелектричні характеристики таких діодів істотно відрізняються від наших структур Ni/n-ZnO:N/p-Si.

По-перше, температурна залежність струму в Al/SiO₂/Si MIS діоді доволі слабка, що є характерним для тунельного механізму переносу заряду, в той час як в структурі Ni/n-ZnO:N/p-Si струм стрімко зменшується при пониженні температури, що свідчить про його термогенеративну природу. По-друге, в Al/SiO₂/Si MIS тунельному діоді фотострум при низьких напругах практично відсутній, а при $V = 0,5-1 \text{ В}$ стрімко зростає й при подальшому збільшенні напруги має тенденцію до насичення [10]. На відміну від цього, фотострум в структурі Ni/n-ZnO:N/p-Si монотонно зростає, починаючи з

найнижчих напруг, а насичення не спостерігається аж до напруг, близьких до електричного пробою.

Характеристики Ni/n-ZnO:N/p-Si структури не узгоджуються також з механізмом внутрішнього підсилення фотоструму, який спостерігається в ITO/SiO_x/n-Si SIS структурах з товстим шаром оксиду (80–120 Å), коли можна знехтувати тунелюванням носіїв заряду [11]. Адже при низьких зворотних зміщеннях ($< 2 \text{ В}$), темновий струм у таких структурах збільшуються лінійно з прикладеною напругою, а при $V > 2 \text{ В}$ насичується. Поведінка темнового струму в Ni/n-ZnO:N/p-Si структурах зовсім інша. Якісно інша й поведінка фотоструму в структурі ITO/SiO_x/Si, помноження якого спостерігається при напругах, вищих $\sim 1 \text{ В}$.

Висновки

Наведені експериментальні результати засвідчують значне внутрішнє підсилення фотоструму в структурі Ni/n-ZnO:N/p-Si як на ділянці спектру, що відповідає фотогенерації носіїв заряду в ZnO, так і в кремнієвій підкладці. Спостережувані факти узгоджуються з припущенням, що структура Ni/n-ZnO:N/p-Si функціонує як фототранзистор, в якому емітерним переходом служить контакт Шотткі Ni/n-ZnO, а колекторним — гетероперехід n-ZnO:N/p-Si.

Література

1. С. Н. Park, J. Y. Lee, S. Im and T. G. Kim n-ZnO/p-Si photodiodes fabricated using ion-beam induced isolation technique // Nuclear Instr. and Meth. A. — 2003. — 206. — P.432.
2. Н. Х. Qi, Q. S. Li, B. Zhao, M. M. Zheng, X. S. Li, N. Zhang Materials Influence of ZnO homobuffer layer on n-ZnO/p-Si photodiode // Sc. and Techn., - 2008. — 24. — P.1002.
3. I. — S. Jeong, Jae Hoon Kim and S. Im Ultraviolet-enhanced photodiode employing n-ZnO/p-Si structure // Appl. Phys. Lett. — 2003. — 83. — P. 2946.
4. А. І. Євтушенко, Г. В. Лашкар'єв, В. Й. Лазоренко, В. А. Карпина, В. Д. Храновський, Л. А. Косяченко, В. М. Склярчук, О. Ф. Склярчук Детектор ультрафіолетового випромінювання на основі ZnO, легованого азотом // СЕМСТ. — 2008. — №3. — С.40–44.
5. L. A. Kosyachenko, G. V. Lashkarev, V. M. Sklyarchuk, A. I. Ievtushenko, O. F. Sklyarchuk,

- V. I. Lazorenko and A. Ulyashin Photodetector based on ZnO with internal photocurrent gain. *Phys // J. Phys. Stat. Sol. (a)*. — 2010. — 207. — P. 1972.
6. S. O. Kasap. *Optoelectronics and Photonics* Prentice-Hall, New Jersey, 2001, pp. 237–239.
7. Ü. Özgür, Ya.I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S. — J. Cho, and H. Morkoç □ A comprehensive review of ZnO materials and devices // *J. Appl. Phys.* — 2005. — 98. P. 041301.
8. A. Ievtushenko, G. Lashkarev, V. Lazorenko, V. Karpyna, V. Sichkovskyi, L. Kosyachenko, V. Sklyarchuk, O. Sklyarchuk, V. Bosy, F. Korzhinski, A. Ulyashin, V. Khranovskyy, R. Yakimova Ultraviolet detectors based on ZnO:N thin films with different contact structures//*J. Acta Physica Polonica A*. — 2008. — 114, 5. — P. 1123.
9. R. A. Clarke, J. Shewchun Non-Equilibrium. Effects on Metal-Oxide-Semiconductor Tunnel Currents // *Solid-State Electron.* — 1971. — 14. — P. 957.
10. M. Green, J. Shewchun Current multiplication in metal-insulator-semiconductor (MIS) tunnel diodes // *Solid-State Electronics.* — 1974. — 17. P. 349.
11. M. Fernandes, Yu. Vygranenko, R. Schwarz, M. Vieira, C. Nunes Carvalho Photocurrent multiplication in ITO/SiO_x/Si optical sensors // *Vacuum.* — 2002. — 65. P. 67.