

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

PACS 73.50.Pz, 73.63.-b

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355911>

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ ДЛЯ ФОТО- ТА ГАЗОЧУТЛИВИХ ЗАСТОСУВАНЬ

І. Б. Оленич, <https://orcid.org/0000-0002-6642-0222>

Л. С. Монастирський, <https://orcid.org/0000-0003-4782-9978>

А. Ю. Козак, <https://orcid.org/0009-0006-3626-9433>

В. Я. Бойко, <https://orcid.org/0009-0003-4112-0201>

О. О. Сінькевич, <https://orcid.org/0000-0001-9834-2700>

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Драгоманова, 50, м. Львів, 79005, Україна
Тел. (032)239-45-64, e-mail: igor.olenych@lnu.edu.ua

Анотація. Досліджено особливості використання польових транзисторів на основі плівки відновленого оксиду графену (RGO), нанесеної на поверхню анодно та термічно окисненого поруватого кремнію, як фотодетекторів і газоадсорбційних сенсорів. Виявлено підвищення ефективності створених польових транзисторів у результаті термічного окиснення поруватого шару або осадження додаткового шару SiO₂ на поверхню анодно окисненого поруватого кремнію. Встановлено, що фото- та адсорбційна чутливість польових транзисторів з RGO-каналом залежить як від якості ізоляційного шару, так і наявності захисного SiO₂ покриття на плівці RGO. Зокрема, найбільшою фоточутливістю характеризуються польові транзистори з ізоляційним шаром анодно окисненого поруватого кремнію. І навпаки, графеновий польовий транзистор з термічно окисненим поруватим кремнієм майже нечутливий до видимого світла, проте демонструє максимальний відгук на адсорбцію молекул води. Захисний шар SiO₂ майже не впливає на фоточутливість польових транзисторів на основі RGO, але суттєво зменшує вплив атмосфери на їхню провідність.

Ключові слова: графеновий польовий транзистор, відновлений оксид графену, поруватий кремній, фоточутливість, газоадсорбційний сенсор

Вступ

Унікальне поєднання надвисокої рухливості носіїв заряду, високої прозорості у широкому спектральному діапазоні, механічної міцності та гнучкості забезпечує виняткові перспективи графену та матеріалів на основі sp^2 -зв'язаних атомів вуглецю у сенсорній електроніці. Здатність графену реагувати на незначні зміни електричного поля, механічного тиску чи хімічного складу середовища зміною електропровідності робить його ідеальним матеріалом для створення високочутливих первинних перетворювачів портативних газових детекторів, біосенсорів, сенсорів деформації, оптоелектронних та дозиметричних пристроїв нового покоління [1-5]. Можливість функціоналізації поверхні вуглецевого моношару різними хімічними групами робить графен надзвичайно ефективною платформою для виявлення різних біомаркерів, ідентифікації екологічно важливих газів або токсичних речовин без використання складного лабораторного обладнання [6,7]. Інтеграція чутливих елементів на основі графену з малопотужними IoT-платформами дає змогу зменшити розміри та споживану потужність портативних діагностичних систем і їх функціонування в режимі реального часу [8,9].

Попри привабливість графену для сенсорних застосувань є низка викликів, які стримують розвиток багатофункціональних графенових сенсорів і їх масове промислове застосування. Однією з перешкод залишається масштабування виробництва високоякісного графену та забезпечення його однорідності на великих площах. Рішенням цієї проблеми може бути використання відновленого оксиду графену (RGO), технологія виготовлення якого є доволі простою та недорогою [10,11]. Польові транзистори на основі плівки RGO демонструють високу чутливість до електромагнітного й іонізуючого випромінювання [12] та адсорбції різних молекул [13]. Використання поруватого кремнію (por-Si) з надзвичайно розвинутою поверхнею як підкладки для осадження плівки RGO забезпечує підвищення чутливості таких сенсорів [14,15].

З іншого боку, значна реакція електропровідності графену на мінімальні зміни електричного поля зумовлює не тільки його високу чутливість, але й низьку природну вибірковість – різні фактори впливу можуть викликати подібний електричний відгук матеріалу. Це ускладнює точне розпізнавання як фактора впливу, так і конкретної речовини серед схожих за властивостями газів-аналітів у разі використання графенового польового транзистора як газочутливого сенсорного елемента. Для підвищення селективності газових сенсорів було запропоновано підходи, пов'язані з хімічною функціоналізацією графену, яка дає змогу “налаштувати” його поверхню на взаємодію з конкретними аналітами [6], чи використанням алгоритмів машинного навчання для аналізу “сенсорних відбитків” адсорбованих газів [15-17]. Значно менше уваги приділялося проблемі сепарування відгуку багатофункціональних сенсорних елементів на основі графену на вплив різних чинників. Тому мета роботи полягала у вивченні зв'язку між структурними особливостями польових транзисторів на основі плівки RGO, їхніми електричними характеристиками та фото- і газочутливими властивостями.

Експеримент

Як підкладку і затвор графенових польових транзисторів використано слаболеговані кремнієві пластини товщиною 400 мкм. Тонка плівка золота, що слугувала електричним контактом затвора, була термічно осаджена на тильну поверхню пластин і відпалена за температури 600°C упродовж 30 хв. На протилежному боці пластини фотоелектрохімічним методом було сформовано шар por-Si. Як електроліт використано етанольний розчин фтористоводневої кислоти з співвідношенням компонентів $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1$. Густина струму і тривалість анодного травлення становили 30 mA/cm^2 і 5 хв, відповідно. Для генерації носіїв заряду позитивного знаку, необхідних для перебігу хімічних реакцій травлення кремнію, робоча поверхня пластини освітлювалася лампою розжарення потужністю 500 Вт упродовж

всього процесу електрохімічного травлення. Після промивання дистильованою водою одна частина зразків піддавалася термічному окисненню поруватого шару за температури 1050°C упродовж 2 годин, а інша частина – десятихвилинному електрохімічному окисненню por-Si у розчині H_2O_2 при густині струму 15 mA/cm^2 для стабілізації поверхні і формування тонкої діелектричної плівки.

Оскільки por-Si використовувався як ізоляційний шар між затвором і RGO-каналом польового транзистора, для покращення його діелектричних властивостей на поверхню анодно окисненого поруватого шару окремих зразків було додатково осаджено плівку SiO_2 ВЧ-магнетронним розпиленням кварцової мішені в атмосфері аргону. Умови осадження, а саме потужність височастотного генератора 100 Вт, індукція магнітного поля 0,1 Тл, час розпилення 90 хв, відстань між мішенню і підкладкою 60 мм, забезпечили формування плівки SiO_2 товщиною близько 170 нм.

Провідний канал графенових польових транзисторів був утворений у результаті висушування на повітрі нанесеної на поверхню ізоляційного шару плівкоутворювальної суспензії RGO, отриманої відновленням оксиду графену (у вигляді водної суспензії виробництва Sigma-Aldrich) моногідратом гідразину за впливу ультразвукової обробки упродовж 20 хв з додаванням 0,2 М розчину додецилбензолсульфонату натрію для запобігання агрегації наночастинок RGO. На поверхню утвореної плівки RGO було термічно напилено срібні контакти витіку та стоку на відстані 1 мм один від одного, як це показано на рис. 1.

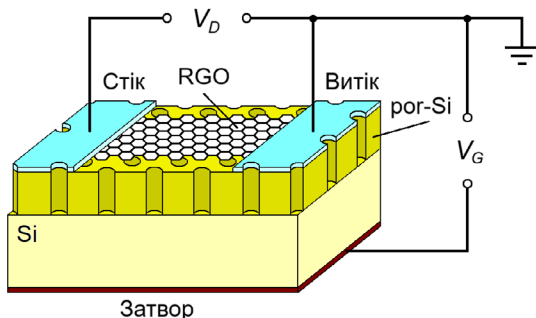


Рис. 1. Схематичне зображення польового транзистора на основі плівки RGO та por-Si .

Додатково були сформовані експериментальні зразки графенових польових транзисторів із захисним шаром SiO_2 товщиною 170 нм, осадженим на поверхню плівки RGO методом ВЧ-магнетронного розпилення.

Дослідження електричних і фотоелектричних характеристик створених польових транзисторів здійснювалося у режимах постійного та змінного струмів. Зокрема, залежності струму стоку I_D від напруги зміщення V_D і напруги затвора V_G виміряно з використанням мультиметра Siglent SDM 3045. Ємнісно-резистивні характеристики RGO-каналу досліджувалися за допомогою RLC-вимірювача Hantek 1833C у частотному діапазоні 10^2 – 10^5 Гц. Для вивчення фотоелектричних явищ було використано світловипромінювальний діод білого світла FYLP-1W-UWB-A з потужністю 1 Вт і світловим потоком 76 люмен. Газоадсорбційні властивості польових транзисторів на основі плівки RGO досліджувалися в герметичній камері з контрольованою зміною вологості повітря. Контроль відносної вологості повітря здійснювався за допомогою сенсора Honeywell НН-4000-004. Всі вимірювання проводилися за кімнатної температури.

Результати та їх обговорення

Залежності струму стоку I_D від різниці потенціалів між контактами витік і стік V_D створених польових транзисторів за відсутньої напруги затвора ($V_G = 0$) мають нелінійний характер (рис. 2), що вказує на складні процеси перенесення заряду у плівці RGO. Найменшою провідністю характеризується плівка RGO, осаджена на поверхню анодно окисненого поруватого шару (структура $\text{Si-por-Si}_{\text{aox}}\text{-RGO}$). Дещо більша провідність плівок RGO спостерігається у структурах з додатковим шаром SiO_2 ($\text{Si-por-Si}_{\text{aox}}\text{-RGO-SiO}_2$ та $\text{Si-por-Si}_{\text{aox}}\text{-SiO}_2\text{-RGO}$). Найвищу провідність демонструє плівка RGO, сформована на поверхні термічно окисненого поруватого шару (структура $\text{Si-por-Si}_{\text{tox}}\text{-RGO}$). Хоча різні значення провідності найімовірніше спричинені різною кількістю шарів вуглецевих наноаркушів у плівці RGO,

нелінійний характер залежностей I_D-V_D може мати декілька причин.

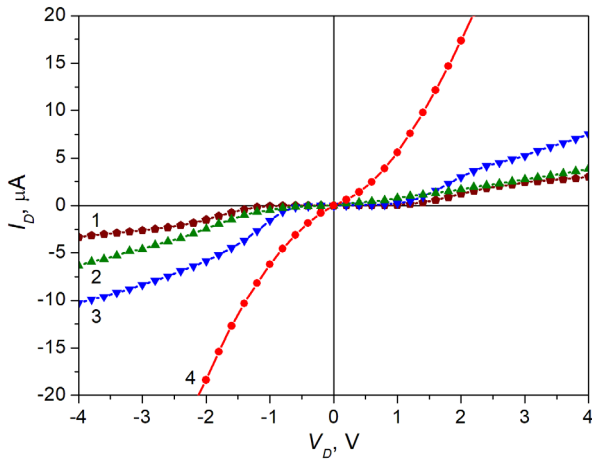


Рис. 2. Залежність струму стоку I_D від напруги зміщення V_D польових транзисторів на основі структур Si-por-Si_{aox}-RGO (1), Si-por-Si_{aox}-RGO-SiO₂ (2), Si-por-Si_{aox}-SiO₂-RGO (3) та Si-por-Si_{tox}-RGO (4) за напруги затвора $V_G = 0$.

Враховуючи, що графен характеризується омичним контактним опором з металами [18], можна припустити, що виявлена нелінійність зумовлена як неоднорідністю утворених плівок, так і впливом шару por-Si на провідність RGO. Перш за все, електричні властивості плівки RGO визначаються не тільки провідністю 2D вуглецевих наночастинок, але й елек-

тричними бар'єрами між ними, які ймовірно утворюються через наявність поверхнево-активної речовини у плівкоутворювальній суспензії. Крім того, через структурну недосконалість шару SiO₂ і пов'язані з нею електрично активні дефекти на електропровідність плівки RGO можуть впливати носії заряду, локалізовані у цьому шарі чи на межі SiO₂/RGO. З огляду на малу товщину оксидної плівки, також не слід повністю виключати можливість інжекції носіїв з анодно окисненого шару por-Si_{aox}.

Для отримання додаткової інформації про процеси перенесення заряду у RGO-каналі створених польових транзисторів було досліджено їхні ємнісно-резистивні властивості у режимі змінного струму. На рис. 3 зображені частотні залежності дійсної та уявної частин імпедансу плівки RGO, виміряні між контактами витoku і стоку. Виявлено зменшення дійсної та уявної частин імпедансу зі збільшенням частоти від 100 Гц до 100 кГц. Найбільші зміни резистивних і ємнісних характеристик плівки RGO спостерігалось у разі її нанесення на поверхню анодно окисненого шару por-Si_{aox}. Покращення ізоляційних властивостей шару por-Si шляхом його термічного окиснення чи осадження додаткового шару SiO₂ забезпечує зменшення діапазону зміни імпедансу плівки RGO у досліджуваному частотному діапазоні.

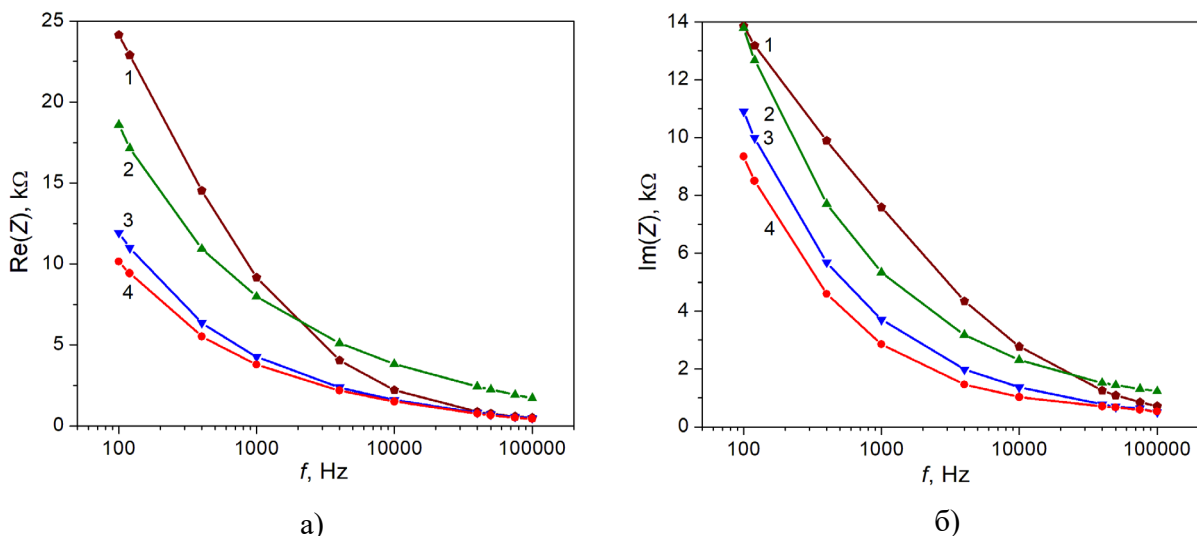


Рис. 3. Частотні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин імпедансу RGO-каналу польових транзисторів на основі структур Si-por-Si_{aox}-RGO (1), Si-por-Si_{aox}-RGO-SiO₂ (2), Si-por-Si_{aox}-SiO₂-RGO (3) та Si-por-Si_{tox}-RGO (4) за напруги затвора $V_G = 0$.

Дисперсія електричних характеристик RGO-каналу створених польових транзисторів може бути додатковим підтвердженням неоднорідності плівки RGO, утвореної з вуглецевих наоаркушів.

Вимірювання залежності струму стоку I_D від напруги затвора V_G дає змогу оцінити ефективність створених польових транзисторів на основі плівки RGO. Виміряні криві I_D-V_G за напруги зміщення $V_D = \pm 1,5$ В зображені на рис. 4. Виявлено майже лінійне збільшення струму I_D при зміні напруги затвора від приблизно 1 до -4 В для напруги зміщення $V_D = 1,5$ В. Аналогічно, провідність RGO-каналу польових транзисторів лінійно збільшується зі збільшенням V_G від 1 до 4 В для $V_D = -1,5$ В. Мінімум провідності польових транзисторів на основі плівки RGO за напруги затвора близько 1 В зумовлений особливостями зонної структури графену у формі конусів Дірака й асоціюється з точкою нейтральності заряду, яка розділяє профіль провідності на діркову та електронну складові [19]. Загалом, положення точки нейтральності заряду та форма профілю провідності визначається як якістю діелектричного шару, на який нанесена плівка RGO [12], так і впливом зовнішніх факторів, зокрема, електричним полем адсорбованих молекул чи фотогенерованих носіїв заряду [14,15].

Аналіз вимірних залежностей I_D-V_G свідчить, що найвищу ефективність демонструє польовий транзистор на основі структури Si-por-Si_{tox}-RGO, який характеризується найбільшим діапазоном зміни струму стоку при зміні напруги затвора. І навпаки, найнижча ефективність була властива польовим транзисторам, у яких як ізоляційний шар використовувався анодно окиснений por-Si_{aox}. Виявлені особливості електричних характеристик польових транзисторів на основі RGO та por-Si можуть бути зумовлені електрично активними дефектами у поруватому шарі та/або на інтерфейсі з плівкою RGO, адже продуктивність графенових пристроїв на основі ефекту поля суттєво залежить від дефектів у опорному діелектричному шарі [20]. Слід зазначити, що наноструктури por-Si мають рівні захоплення різної природи з квазінеперервним енергетичним розподілом [21]. Електричне поле захоплених у поруватому шарі носіїв заряду може суттєво впливати на провідність плівки RGO.

Висока чутливість провідності RGO-каналу до локальних змін електричного поля забезпечує можливість застосування запропонованих польових транзисторів у сенсорній електроніці. Зокрема, внаслідок опромінення робочої поверхні транзисторів білим світлом спостерігалось збільшення струму стоку I_D за

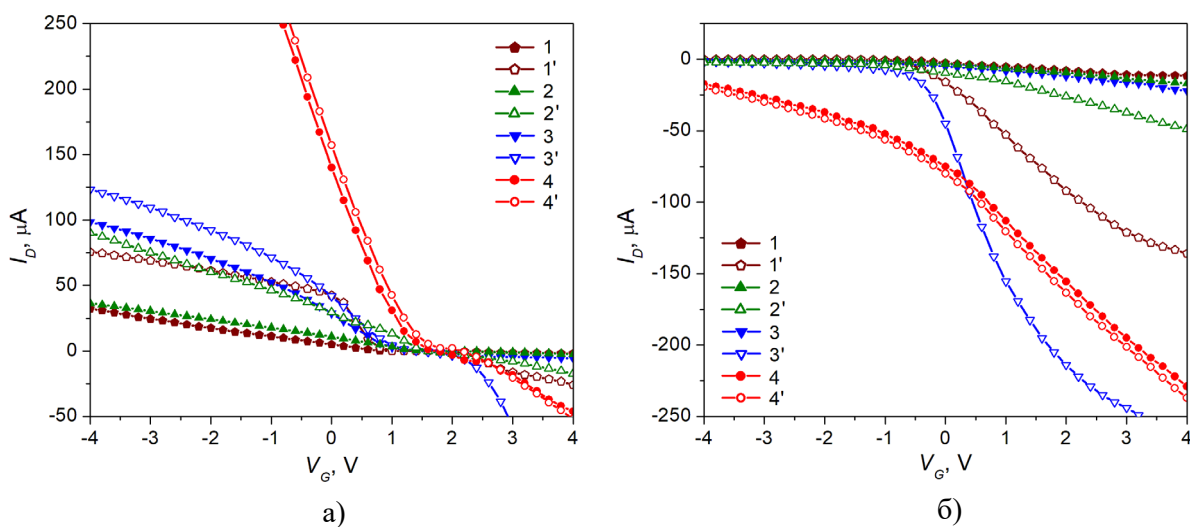


Рис. 4. Залежність струму стоку I_D від напруги затвора V_G польових транзисторів на основі структур Si-por-Si_{tox}-RGO (1, 1'), Si-por-Si_{tox}-RGO-SiO₂ (2, 2'), Si-por-Si_{aox}-SiO₂-RGO (3, 3') та Si-por-Si_{aox}-RGO (4, 4') за напруги зміщення $V_D = 1,5$ В (а) та $V_D = -1,5$ В (б). Криві (1, 2, 3, 4) виміряні у темноті, а (1', 2', 3', 4') – за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A.

напруги зміщення $V_D = \pm 1,5$ V. Найбільшу фоточутливість демонструють структури з анодно окисненим поруватим шаром, у той час як фотовідгук польових транзисторів на основі структури Si-por-Si_{tox}-RGO є надто слабким (див. рис. 4). Виявлені особливості фотоелектричних властивостей польових транзисторів на основі RGO та por-Si зумовлені різним ступенем окиснення поруватого шару електрохімічним та термічним методами. Товстий шар por-Si_{tox} просторово розділяє фотогенеровані носії заряду і плівку RGO, зменшуючи тим самим їхній вплив на провідність RGO-каналу польового транзистора. Осадження додаткового шару SiO₂ на поверхню por-Si_{aox} з одного боку підвищує ефективність польових транзисторів на основі RGO, а з іншого не перешкоджає впливу фотогенерованих у поруватому шарі носіїв заряду. Захисний шар SiO₂ на поверхні плівки RGO також є достатньо прозорим для видимого світла.

Дослідження газочутливих властивостей створених польових транзисторів здійснювалося шляхом вимірювання відношення опору RGO-каналу за різної вологості повітря до його початкового значення R/R_0 на частоті 1 кГц. Як можна побачити на рис. 5, збільшення відносної вологості повітря спричиняє зменшення опору досліджуваних польових транзисторів.

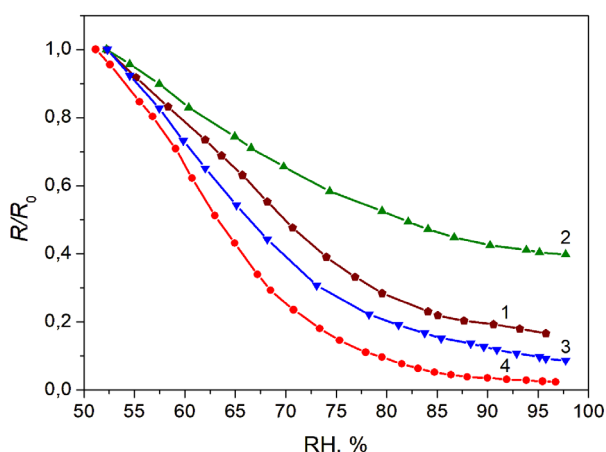


Рис. 5. Залежність зміни опору RGO-каналу польових транзисторів на основі структур Si-por-Si_{aox}-RGO (1), Si-por-Si_{aox}-RGO-SiO₂ (2), Si-por-Si_{aox}-SiO₂-RGO (3) та Si-por-Si_{tox}-RGO (4) на частоті 1 кГц від відносної вологості повітря.

Незважаючи на однаковий характер залежностей R/R_0 від відносної вологості повітря, величина спричиненої адсорбцією молекул води зміни опору RGO-каналу польових транзисторів на основі різних структур була різною. Найменша чутливість до адсорбованих молекул спостерігалася для структури Si-por-Si_{aox}-RGO-SiO₂. Зокрема, за однакових умов зміни вологості повітря опір польового транзистора із захисним шаром SiO₂ на поверхні плівки RGO зменшувався приблизно у 2,5 рази, тоді як структури Si-por-Si_{aox}-RGO, Si-por-Si_{aox}-SiO₂-RGO і Si-por-Si_{tox}-RGO демонстрували зменшення опору RGO-каналу у 6, 10 і понад 30 разів, відповідно. Найбільшою газоадсорбційною чутливістю характеризувався польовий транзистор з термічно окисненим поруватим шаром, попри його найменшу чутливість до світла.

Висновки

У роботі вивчено особливості використання польових транзисторів на основі плівки RGO з різними ізоляційними шарами для реєстрації видимого випромінювання та адсорбованих молекул води. Виявлено нелінійні залежності струму стоку від напруги зміщення створених польових транзисторів, які зумовлені неоднорідністю плівки RGO, сформованої з 2D вуглецевих наночастинок. Як ізоляційний шар використано термічно та анодно окиснений por-Si, а також анодно окиснений por-Si з додатковим шаром SiO₂, отриманим ВЧ-магнетронним напыленням. На основі аналізу залежностей струму стоку від напруги затвора встановлено, що осадження додаткового шару SiO₂ як і термічне окиснення поруватого шару підвищує ефективність польових транзисторів з RGO-каналом. Зареєстровано суттєво нижчу фоточутливість польового транзистора з термічно окисненим шаром por-Si, зумовлену зменшенням впливу фотогенерованих носіїв заряду на провідність плівки RGO. Продемонстровано, що ВЧ-магнетронне напылення захисного шару SiO₂ майже не впливає на фоточутливість польових транзисторів на основі RGO, але суттєво зменшує вплив атмосфери на їхню провідність.

Список використаної літератури

- [1]. M. R. Farani, H. Kim, M. Alhammadi, Y. S. Huh. The detection of toxic gases (CO, FN₃, HI, N₂, CH₄, N₂O, and O₃) using a wearable Kapton–graphene biosensor for environmental and biomedical applications // *Carbon Lett.*, 35, pp. 839–848 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42823-024-00834-x>
- [2]. J. P. Ramoso, M. Rasekh, W. Balachandran. Graphene-Based Biosensors: Enabling the Next Generation of Diagnostic Technologies – A Review // *Biosensors*, 15(9), 586 (2025). <https://doi.org/10.3390/bios15090586>
- [3]. Z. Zhang, Q. Liu, H. Ma, N. Ke, J. Ding, W. Zhang, X. Fan. Recent Advances in Graphene-Based Pressure Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*, 24(16), pp. 25227–25248 (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.02256>
- [4]. S. Ishida, Y. Anno, M. Takeuchi, M. Matsuoka, K. Takei, T. Arie, S. Akita. Highly photosensitive graphene field-effect transistor with optical memory function // *Sci. Rep.* 5, 15491 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep15491>
- [5]. I. B. Olenych, Y. V. Boyko, O. S. Dzendzelyuk. Ionizing radiation detectors based on graphene field effect transistors // *Journal of Physical Studies*, 28(4), 4702 (2024), <https://doi.org/10.30970/jps.28.4702> [in Ukrainian].
- [6]. A. M. Teli, S. M. Mane, S. A. Bknalkar, R. K. Mishra, W. Jeon, J. C. Shin. Graphene-Based Gas Sensors: State-of-the-Art Developments for Gas Sensing Applications // *Micromachines*, 16(8), 916 (2025). <https://doi.org/10.3390/mi16080916>
- [7]. N. Alzate-Carvajal, A. Luican-Mayer. Functionalized Graphene Surfaces for Selective Gas Sensing // *ACS Omega*, 5, pp. 21320–21329 (2020). <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02861>
- [8]. I. Olenych, R. Yaremyk, P. Parandiy. Microprocessor system for measuring sensor characteristics of gas-sensitive field-effect transistors based on porous silicon and reduced graphene oxide film // *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, No. 61, pp. 171–177 (2025), <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-24> [in Ukrainian].
- [9]. P. G. Steeneken, M. Soikkeli, S. Arpiainen, et al.. Towards wafer-scale 2D material sensors // *2D Mater.*, 12, 023002 (2025). <https://doi.org/10.1088/2053-1583/adac73>
- [10]. S. Pei, H. M. Cheng. The reduction of graphene oxide // *Carbon*, 50, pp. 3210–3228 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010>
- [11]. A. A. Abakumov, I. B. Bychko, O. O. Voitsihovska, R. M. Rudenko, P. E. Strizhak. Tuning the surface area of reduced graphene oxide by modulating graphene oxide concentration during hydrazine reduction // *Materials Letters*, 354, 135417 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135417>
- [12]. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, B. S. Sokolovskii, B. I. Turko, O. S. Dzendzelyuk. Field-effect transistors based on reduced graphene oxide film for photo and radiation detectors // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 22(2), pp. 19–26 (2025), <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.2.333193> [in Ukrainian].
- [13]. L. Sarkar, A. Sett, S. Majumdar, T. K. Bhattacharyya. Reduced Graphene-Oxide-Based Silk-FET: A Facile Platform for Low Power and Room Temperature Detection of Formaldehyde // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 70(6), pp. 3275–3281 (2023). <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3269727>
- [14]. I. B. Olenych, Yu. Yu. Horbenko. Electrical and photoelectric properties of hybrid structures based on reduced graphene oxide and Pd-doped porous silicon // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 768, pp. 135–144 (2024). <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2235191>
- [15]. I. B. Olenych. Field-effect transistor based on reduced graphene oxide – porous silicon hybrid structure for application in e-nose technology // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 769, pp. 1527–1537 (2025). <https://doi.org/10.1080/15421406.2025.2540098>

- [16]. T. Hayasaka, A. Lin, V. C. Copa, Jr. L. P. Lopez, R. A. Loberternos, L. I. M. Ballasteros, Y. Kubota, Y. Liu, A. A. Salvador, L. Lin. An electronic nose using a single graphene FET and machine learning for water, methanol, and ethanol // *Microsystems & Nanoengineering*, 6, 50 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41378-020-0161-3>
- [17]. O. G. Agbonlahor, M. Muruganathan, A. Banerjee, H. Mizuta. Machine Learning Identification of Atmospheric Gases by Mapping the Graphene-Molecule van Der Waals Complex Bonding Evolution // *Sens. Actuators B Chem.*, 380, 133383 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133383>
- [18]. F. Xia, V. Perebeinos, Y. -M. Lin, Y. Wu, P. Avouris. The origins and limits of metal graphene junction resistance // *Nature Nanotechnology*, 6(3), pp. 179–184 (2011). <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.6>
- [19]. D. Zhan, J. Yan, L. Lai, Z. Ni, L. Liu, Z. Shen. Engineering the Electronic Structure of Graphene // *Adv. Mater.*, 24, pp. 4055–4069 (2012). <https://doi.org/10.1002/adma.201200011>
- [20]. G. Imamura, K. Saiki. Modification of Graphene/SiO₂ Interface by UV-Irradiation: Effect on Electrical Characteristics // *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7, pp. 2439–2443 (2015). <https://doi.org/10.1021/am5071464>
- [21]. I. Olenych, B. Tsizh, L. Monastyrskii, O. Aksimentyeva, B. Sokolovskii. Preparation and Properties of Nanocomposites of Silicon Oxide in Porous Silicon // *Solid State Phenom.*, 230, pp. 127–132 (2015). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.230.127>

Стаття надійшла до редакції: 12.03.2026

прийнята до друку: 19.03.2026

опублікована: 20.04.2026

PACS 73.50.Pz, 73.63.-b

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.1.355911>

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF FIELD EFFECT TRANSISTORS BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM FOR PHOTO- AND GAS-SENSING APPLICATIONS

I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, A. Yu. Kozak, V. Ya. Boyko, O. O. Sinkevych

Ivan Franko National University of Lviv
50 Drahomanova St, Lviv, 79005, Ukraine
e-mail: igor.olenych@lnu.edu.ua

Abstract. The features of using field-effect transistors (FETs) based on a reduced graphene oxide (RGO) film deposited on the surface of anodically and thermally oxidized porous silicon as photodetectors and gas adsorption sensors have been investigated. An increase in the efficiency of the created FETs was found as a result of thermal oxidation of the porous layer or deposition of an additional SiO₂ layer on the surface of anodically oxidized porous silicon. It has been established that the photo- and adsorption sensitivity of the RGO-based FETs depends on both the quality of the insulating layer and the presence of a protective SiO₂ coating on the RGO film. In particular, the FETs with an anodic oxidized porous silicon insulating layer are characterized by the highest photosensitivity. Conversely, the graphene FET with thermally oxidized porous silicon is almost insensitive to visible light but demonstrates maximum response to the adsorption of water molecules. The SiO₂ protective layer has almost no effect on the photosensitivity of RGO-based FETs but significantly reduces the influence of the atmosphere on their conductivity.

Keywords: graphene field-effect transistor, reduced graphene oxide, porous silicon, photosensitivity, gas adsorption sensor