

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS 73.50.Pz, 73.63.-b

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.2.333193>

ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ ДЛЯ ФОТО- ТА РАДІАЦІЙНИХ ДЕТЕКТОРІВ

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

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

Б. С. Соколовський, <https://orcid.org/0000-0002-2561-3255>

Б. І. Турко, <https://orcid.org/0000-0001-9684-6630>

О. С. Дзендзелюк, <https://orcid.org/0000-0001-7356-9730>

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 діелектричних шарів SiO_2 , Al_2O_3 та HfO_2 у польових транзисторах на основі плівки відновленого оксиду графену (RGO) для реєстрації видимого та іонізуючого випромінювання. На основі аналізу залежності струму стоку та опору плівки RGO від напруги затвора досліджено вплив діелектричного шару на електричні характеристики створених польових транзисторів у режимах постійного та змінного струму. Виявлено збільшення струму стоку, зменшення опору плівки RGO та зміщення точки нейтральності заряду у бік від'ємної напруги затвора під впливом опромінення білим світлом. Встановлено, що опромінення β -частинками та γ -квантами від джерела ^{226}Ra зумовлює трансформацію вольт-фарадних характеристик отриманих польових транзисторів на основі плівки RGO внаслідок утворення електрично активних дефектів у діелектричному шарі. Обговорюється ефективність використання різних діелектричних шарів для створення фото- та радіаційних детекторів на основі графенових польових транзисторів.

Ключові слова: графеновий польовий транзистор, відновлений оксид графену, фоточутливість, детектор іонізуючого випромінювання

Вступ

Обладнання для виявлення, ідентифікації та вимірювання високоенергетичних частинок та електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні спектру є ключовим ком-

понентом безпечного та відповідального розвитку ядерної науки, космічних досліджень, медицини тощо. Незважаючи на широке використання напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів як фотодетекторів чи відновлювальних джерел електроенергії, біль-

шість сенсорів іонізуючого випромінювання характеризуються великим розміром і низькою сумісністю з традиційними мікроелектронними технологіями. Впровадження нових підходів дає змогу вдосконалювати відомі системи радіаційного моніторингу, робити їх більш компактними та дешевшими, зменшити споживану потужність, що відповідає сучасним парадигмам, як от Інтернет речей (IoT) [1, 2]. Зокрема, як портативні детектори іонізуючого випромінювання використовують р-і-n-діоди завдяки генерації носіїв заряду в області збіднення та МДН-транзистори з оптимізованою структурою, функціонування яких базується на деградації підзатворного діелектрика під впливом радіації.

Для створення нового типу сенсорів видимого та іонізуючого випромінювання також можна використати радіаційно-індуковану зміну електричних, механічних або люмінесцентних властивостей наноструктурованих матеріалів [3–5]. Проте, через малий об'єм наноматеріалів виникає необхідність реєстрації одиночних високоенергетичних частинок або квантів світла. Зважаючи на це, значний потенціал для застосування у фото- та радіаційних детекторах мають графенові польові транзистори завдяки високій чутливості біполярної провідності графену поблизу точки нейтральності заряду до зміни локального електричного поля [6, 7]. У цьому випадку кремнієва підкладка слугує одночасно затвором польового транзистора і поглиначем квантів світла та іонізуючого випромінювання.

Висока рухливість носіїв заряду та низький електричний шум моношару графену є вагомими перевагами для створення багатофункціональних сенсорів на основі графенових польових транзисторів [8, 9]. Однак, від якості підзатворного діелектрика суттєво залежить ефективність графенових польових транзисторів [10, 11]. Незважаючи на ідеальну гексагональну структуру вуглецевого 2D матеріалу, у нанесеному на підкладку SiO_2 моношарі графену виявлено неоднорідність густини носіїв заряду, пов'язану із зарядженими домішками у діелектрику [12]. Крім того,

взаємодія з підкладкою спричиняє зменшення рухливості носіїв заряду у графені, зумовлене їх розсіюванням на заряджених дефектах [13, 14], зменшити яке можна шляхом використання діелектриків з високою діелектричною проникністю [15, 16]. З іншого боку, утворення радіаційних дефектів у шарі діелектрика як центрів захоплення вільних носіїв заряду можна використати для підвищення відгуку графенових польових транзисторів на вплив іонізуючого випромінювання.

Високий потенціал для використання у польових транзисторах демонструють сендвіч-подібні структури, отримані осадженням наночастинок відновленого оксиду графену (RGO) на кремнієву підкладку з діелектричним шаром [17]. Використання плівки RGO як провідного каналу польового транзистора дає змогу спростити технологію фото- та радіаційних детекторів [18, 19]. Тому мета роботи полягала у вивченні особливостей використання різних типів діелектричних шарів у польових транзисторах на основі плівки RGO, чутливих до квантів світла та іонізуючого випромінювання.

Експеримент

Для створення графенового польового транзистора як підкладку використано слаболеговані кремнієві пластини товщиною 400 мкм, на тильну поверхню яких було термічно осаджено і відпалено за температури 600°C упродовж 30 хв тонку плівку золота, що слугувала електричним контактом затвору. Щоб сформувати діелектричні шари SiO_2 , Al_2O_3 та HfO_2 на кремнієвій поверхні було використано метод ВЧ-магнетронного розпилення мішеней SiO_2 , Al_2O_3 та Hf з чистотою 99,99; 99,5 та 99,9 %, відповідно, в атмосфері аргону за тиску 0,1 Па без додаткового нагріву підкладок. Іншими важливими параметрами процесу осадження були такі: потужність височастотного генератора 100 Вт, індукція магнітного поля 0,1 Тл, відстань між мішенню і підкладкою 60 мм. Час розпилення становив 90 хв для всіх отриманих зразків. Щоб видалити будь-які забруднення з мішеней, їх попередньо розпилювали упродовж 10 хв. Осаджений шар

Hf був додатково окиснений на повітрі за температури 700°C упродовж 20 хв, щоб отримати діоксид гафнію [20]. Товщина діелектричних шарів SiO_2 , Al_2O_3 та HfO_2 , отриманих у зазначених умовах становила 170, 150 та 200 нм, відповідно.

Для формування провідного каналу графенових польових транзисторів використано водну суспензію оксиду графену (GO) виробництва Sigma-Aldrich (США) з концентрацією 2 мг/мл. Наночастинки GO відновлювали за допомогою моногідрату гідразину під впливом ультразвукової обробки упродовж 20 хв, після чого у суспензію додавали 0,2 М розчин додецилбензолсульфонату натрію для запобігання агрегації отриманих наноаркушів RGO. Застосований метод забезпечує високий ступінь хімічного відновлення GO, про що свідчить порівняльний аналіз спектрів оптичного поглинання плівок GO та RGO [21] і високе значення співвідношення C/O [22, 23]. Плівкоутворювальну суспензію RGO наносили на поверхню діелектричних шарів і висушували на повітрі упродовж двох діб за кімнатної температури. У результаті було отримано плівку з декількох шарів наноаркушів RGO, яка слугувала провідним каналом польового транзистора. Як стік і витік було використано срібні контакти, термічно напilenі на поверхню плівки на відстані 1 мм один від одного, як це схематично зображено на рис. 1.

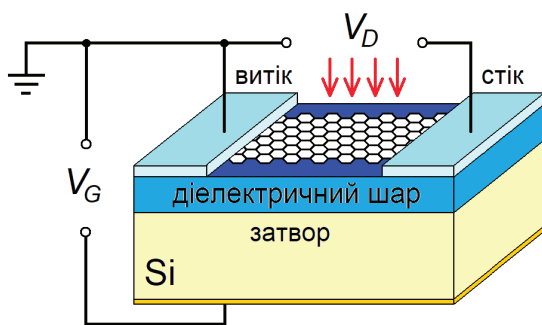


Рис. 1. Схематичне зображення польового транзистора на основі плівки RGO.

Дослідження впливу видимого та іонізуючого випромінювання на електричні характеристики польових транзисторів на основі

отриманих сандвіч-структур $\text{RGO-SiO}_2\text{-Si}$, $\text{RGO-Al}_2\text{O}_3\text{-Si}$ та $\text{RGO-HfO}_2\text{-Si}$ здійснювалося в режимах постійного та змінного струмів. Зокрема, залежність струму стоку I_D від напруги на затворі V_G виміряно за допомогою мультиметра Siglent SDM 3055 при напругах зміщення $V_D = \pm 1,5$ В. Залежність опору плівки RGO від напруги затвора V_G була досліджена на частоті 1 кГц з використанням RLC-вимірювача. Для вивчення фотоелектричних явищ було використано світловипромінювальний діод білого світла FYLP-1W-UWB-A з потужністю 1 Вт і світловим потоком 76 люмен. Якість діелектричних шарів було досліджено шляхом вимірювання вольт-фарадних ($C-V_G$) характеристик у випадку, коли струм проходив через сандвіч-структури між електричними контактами витоку та затвора польових транзисторів на основі плівки RGO.

Вплив іонізуючого випромінювання на електричні характеристики отриманих сандвіч-структур було досліджено з використанням ізотопу радію ^{226}Ra , інтенсивність випромінювання якого становила 0,1 мКи. У результаті розпаду ^{226}Ra утворюються γ -кванти з енергією 0,19 МеВ, а також α - та β -частинки з середньою енергією близько 4,78 і 0,17 МеВ, відповідно. Враховуючи, що експериментальні зразки були розміщені на відстані близько 0,5 м від радіоактивного джерела, то впливом α -частинок можна знехтувати через їхню взаємодію із повітрям. Доза поглинутої β - та γ -радіації визначалася тривалістю опромінення, яка становила 24 год. Усі вимірювання проводились за кімнатної температури.

Результати та їх обговорення

Однією з основних характеристик польових транзисторів є залежність струму стоку I_D від напруги затвора V_G . На відміну від МДН-транзисторів, де характеристика перемикання відображає відношення струму стоку у ввімкненому стані до струму у вимкненому стані, залежність I_D-V_G графенових польових транзисторів має свої особливості, пов'язані з безщільною зонною структурою моношару графену у формі конусів Дірака. Як наслідок,

на залежності провідності графенового каналу польового транзистора від напруги затвора спостерігається мінімум провідності (максимум опору), який асоціюється з точкою нейтральності заряду.

Положення точки нейтральності заряду та форма діркової та електронної частин профілю провідності визначається як структурними характеристиками плівки графену та якістю діелектричного шару, так і впливом зовнішніх факторів, зокрема, локальним електричним полем адсорбованих молекул або фотогенерованих носіїв заряду тощо. Загалом характеристика перемикачності є слабкою стороною графенових польових транзисторів, однак, саме

область поблизу точки нейтральності заряду на біполярному профілі провідності графену є найбільш важливою для сенсорних застосувань [24]. Залежності струму стоку I_D від напруги затвора V_G польових транзисторів на основі плівки RGO з різними діелектричними шарами зображені на рис. 2.

Виміряні залежності I_D-V_G отриманих польових транзисторів на основі плівки RGO характеризуються лінійними ділянками, положення яких залежить від знаку напруги зміщення V_D . Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що найвища ефективність спостерігається для структур RGO– Al_2O_3 –Si, що може бути пов'язано з меншою

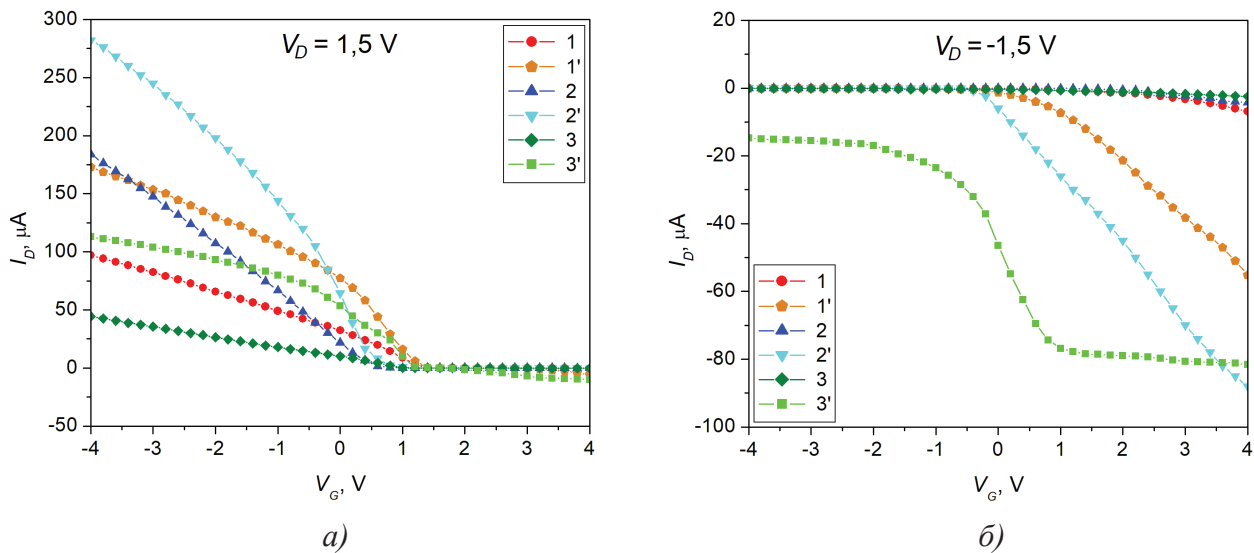


Рис. 2. Залежність струму стоку I_D від напруги затвора V_G польових транзисторів на основі структур RGO– SiO_2 –Si (1, 1'), RGO– Al_2O_3 –Si (2, 2') та RGO– HfO_2 –Si RGO (3, 3') при напрузі зміщення $V_D = 1,5$ V (а) та $V_D = -1,5$ V (б). Криві (1, 2, 3) виміряні у темноті, а (1', 2', 3') – за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A.

товщиною діелектричного шару, кращого його якістю та більшим значенням діелектричної проникності Al_2O_3 , порівняно з SiO_2 . Незважаючи на високе значення діелектричної проникності, яким зазвичай характеризується діоксид гафнію, запропонований спосіб формування шару HfO_2 , ймовірно, не забезпечує його високу якість як діелектрика.

Під впливом опромінення білим світлом спостерігається збільшення струму стоку польових транзисторів на основі плівки RGO для

обох знаків напруги зміщення V_D . Структура RGO– Al_2O_3 –Si демонструє максимальну фотоіндуковану зміну струму I_D для $V_D = 1,5$ V. Дещо інший характер залежності I_D-V_G польового транзистора на основі структури RGO– HfO_2 –Si для $V_D = -1,5$ V під впливом освітлення також може бути пов'язаний з гіршою якістю шару HfO_2 .

Залежності опору плівки RGO від напруги затвора V_G досліджуваних польових транзисторів у режимі змінного струму на частоті 1 кГц

відповідають кривим I_D-V_G (рис. 3). Зі збільшенням напруги затвора спостерігається збільшення опору польових транзисторів на основі плівки RGO. Після досягнення максимального значення, яке пов'язане з точкою нейтральності заряду, опір провідного каналу зменшується, причому опір електронної складової профілю провідності плівки RGO є дещо більшим порівняно з дірковою. Максимальні значення опору плівки RGO знаходяться у діапазоні $V_G = 0,4-2,8$ В для різних сандвіч-структур. Різні значення опору плівки RGO, які спостерігаються для структур RGO-SiO₂-Si, RGO-Al₂O₃-Si та RGO-HfO₂-Si, можуть бути зумовлені як різним впливом діелектричного шару, так і неоднорідністю плівки RGO, сформованої із 2D вуглецевих нанокрушків.

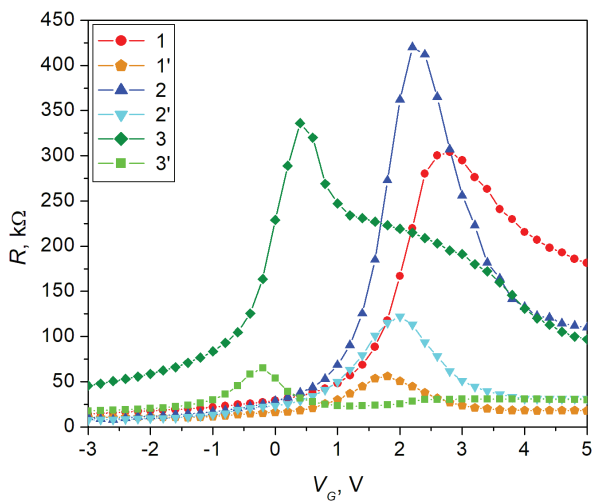


Рис. 3. Залежність опору плівки RGO від напруги затвора V_G польових транзисторів на основі структур RGO-SiO₂-Si (1, 1'), RGO-Al₂O₃-Si (2, 2') та RGO-HfO₂-Si RGO (3, 3') на частоті 1 кГц, виміряні у темноті (1, 2, 3) та за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A (1', 2', 3').

Опромінення отриманих польових транзисторів білим світлом з боку плівки RGO спричинило зменшення її опору та зміщення точки нейтральності заряду в сторону від'ємної напруги V_G . Максимальне зміщення максимуму опору на залежності $R-V_G$ спостерігалось для польового транзистора на основі сандвіч структури RGO-SiO₂-Si. Крім того, для всіх досліджуваних зразків фотоіндуко-

ване зменшення опору було більшим для правої (електронної) частини залежності опору плівки RGO від напруги затвора, ніж для лівої (діркової) складової (див. рис. 3). Виявлені зміни опору провідного каналу польових транзисторів на основі RGO ймовірно зумовлені локальним електричним полем носіїв заряду, фотогенерованих у кремнієвій підкладці та накопичених біля діелектричного шару завдяки прикладеній напрузі затвора.

Крім того, суттєвий вплив на провідність графенового каналу польового транзистора мають локалізовані стани у діелектричному шарі та на інтерфейсі графен/діелектрик, що можна використати для реєстрації іонізуючого випромінювання. Для дослідження якості діелектричних шарів у польових транзисторах на основі плівки RGO було виміряно вольт-фарадні характеристики експериментальних зразків у конфігурації МДН-структур (рис. 4).

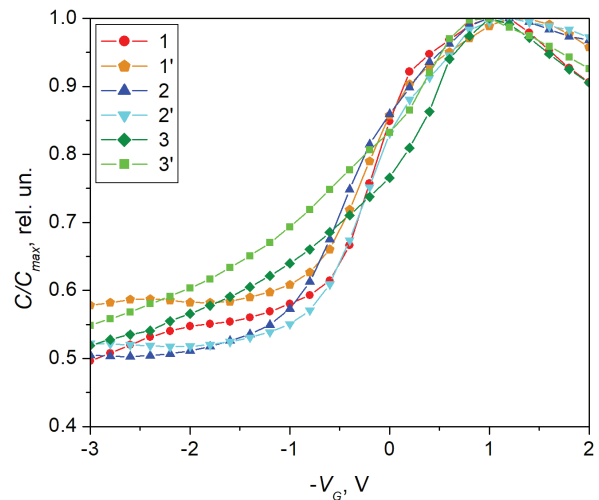


Рис. 4. Нормалізовані вольт-фарадні характеристики сандвіч-структур RGO-SiO₂-Si (1, 1'), RGO-Al₂O₃-Si (2, 2') та RGO-HfO₂-Si RGO (3, 3') до (1, 2, 3) і після (1', 2', 3') опромінення ізотопом ²²⁶Ra упродовж 24 год.

На основі аналізу нормалізованих вольт-фарадних характеристик виявлено, що структури RGO-SiO₂-Si та RGO-Al₂O₃-Si демонструють найменше значення співвідношення C/C_{max} . Оскільки кремнієва підкладка була однаковою для всіх сандвіч-структур, то відношення мінімальної ємності до макси-

мальної визначається поверхневим зарядом, пов'язаним з електрично активними дефектами у діелектричному шарі, тобто якістю підзатворного діелектрика досліджуваних польових транзисторів на основі плівки RGO. Після опромінення експериментальних структур γ -квантами та β -частинками від джерела ^{226}Ra упродовж 24 годин відбулася трансформація вольт-фарадних характеристик. Зокрема, спостерігалася незначна зміна нахилу C - V -залежностей і збільшення співвідношення C/C_{max} , що може бути зумовлено утворенням радіаційних дефектів у діелектричному шарі. Отримані результати дають змогу стверджувати, що оптимальною для створення графенових радіаційних детекторів є структура $\text{RGO-SiO}_2\text{-Si}$, оскільки для неї спостерігається найбільша радіаційно-індукована зміна відношення мінімальної ємності до максимальної.

Висновки

У роботі вивчено особливості використання різних діелектричних шарів у польових транзисторах на основі плівки RGO для реєстрації видимого та іонізуючого випромінювання. Шари SiO_2 та Al_2O_3 товщиною 170 та 150 нм, відповідно, отримано на кремнієвій підкладці ВЧ-магнетронним напыленням з відповідних мішеней. Щоб отримати шар HfO_2 осаджену магнетронним методом плівку Hf товщиною 200 нм додатково піддавали термічній обробці в атмосфері повітря. Провідний канал польових транзисторів сформовано шляхом нанесення на діелектричні шари і подальшого висушування плівкоутворювальної суспензії наночастинок RGO.

На основі аналізу залежності струму стоку від напруги затвора виявлено, що найвищу ефективність демонструють польові транзистори на основі структури $\text{RGO-Al}_2\text{O}_3\text{-Si}$ завдяки меншій товщині та, ймовірно, кращій якості діелектричного шару. Максимум опору плівки RGO, який асоціюється з точкою нейтральності заряду, на вимірних залежностях опору провідного каналу від напруги затвора знаходився за напруги 0,4, 2,2 та 2,8 В для структур $\text{RGO-HfO}_2\text{-Si}$, $\text{RGO-Al}_2\text{O}_3\text{-Si}$ та $\text{RGO-SiO}_2\text{-Si}$,

відповідно. Під впливом опромінення білим світлом спостерігалася збільшення струму стоку у режимі постійного струму та зменшення внутрішнього опору в режимі змінного струму. Крім того, виявлено зміщення точки нейтральності заряду у бік від'ємної напруги затвора на 0,2–1,0 В за рахунок більшого впливу опромінення на електронну складову профілю провідності польових транзисторів на основі плівки RGO.

У результаті аналізу нормалізованих вольт-фарадних характеристик встановлено, що структура $\text{RGO-Al}_2\text{O}_3\text{-Si}$ демонструє найкращу якість діелектричного шару. Опромінення отриманих сандвіч-структур β -частинками та γ -квантами від джерела ^{226}Ra зумовлює трансформацію C - V -залежностей і збільшення співвідношення C/C_{max} , що можна пов'язати з утворенням радіаційних дефектів. Найбільша радіаційно-індукована зміна відношення мінімальної ємності до максимальної спостерігається у структури $\text{RGO-SiO}_2\text{-Si}$, що можна використати для створення радіаційних детекторів на основі графенових польових транзисторів.

Список використаної літератури

- [1]. T. Buerkle, B.J. LaMeres, T. Kaiser, E. Gowens, L. Smoot, T. Heetderks, K. Schipf, L. Clem, S. Schielke, R. Luhr. Ionizing Radiation Detector for Environmental Awareness in FPGA-Based Flight Computers // IEEE Sensors Journal, 12, pp. 2229–2236 (2012).
- [2]. J. Roman-Raya, I. Ruiz-Garcia, P. Escobedo, A.J. Palma, D. Guirado, M.A. Carvajal. Light-Dependent Resistors as Dosimetric Sensors in Radiotherapy // Sensors, 20, 1568 (2020).
- [3]. D.C. Kim, H. Park. Ultraviolet Photodetector Using Nanostructured Hexagonal Boron Nitride with Gold Nanoparticles // Sensors, 25(3), 759 (2025).
- [4]. I. Ruiz, G. Vizkelethy, A.E. McDonald, S.W. Howell, P.M. Thelen, M.D. Goldflam, T.E. Beechem. Detection of high energy ionizing radiation using deeply depleted graphene-oxide-semiconductor junctions // J. Appl. Phys., 132, 184503 (2022).
- [5]. G. Kim, J. Huang, M.D. Hammig. An Investigation of Nanocrystalline Semiconductor

Assemblies as a Material Basis for Ionizing-Radiation Detectors // *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 56, 841 (2009).

[6]. H. An, D. Li, S. Yang, X. Wen, C. Zhang, Z. Cao, J. Wang. Design and Performance Verification of a Space Radiation Detection Sensor Based on Graphene // *Sensors*, 21, 7753 (2021).

[7]. S. Nisar, S. Ajmal, G. Dastgeer, M.S. Zafar, I. Rabani, M.W. Zulfiqar, A. Al Souwaileh. Chemically doped-graphene FET photodetector enhancement via controlled carrier modulation with an iron(III)-chloride // *Diamond and Related Materials*, 145, 111089 (2024).

[8]. J.-S. Moon. Graphene Field-effect transistor for radio-frequency applications: review // *Carbon Letters*, 13, pp. 17–22 (2012).

[9]. K.I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H.L. Stormer. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene // *Solid State Commun.*, 146, 351 (2008).

[10]. K. Nagashio, T. Yamashita, T. Nishimura, K. Kita, A. Toriumi. Electrical transport properties of graphene on SiO₂ with specific surface structures // *J. Appl. Phys.*, 110, 024513 (2011).

[11]. S.B. Touski, M. Hosseini. A comparative study of substrates disorder on mobility in the Graphene nanoribbon: Charged impurity, surface optical phonon, surface roughness // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 116, 113763 (2020).

[12]. E.H. Hwang, S. Adam, S. Das Sarma. Carrier Transport in Two-Dimensional Graphene Layers // *Phys. Rev. Lett.*, 98, 186806 (2007).

[13]. T. Ando. Screening Effect and Impurity Scattering in Monolayer Graphene // *J. Phys. Soc. Jpn.*, 75, 074716 (2006)

[14]. J.H. Chen, C. Jang, S. Adam, M. Fuhrer, E. Williams, M. Ishigami. Charged-impurity scattering in graphene // *Nat. Phys.*, 4, 377 (2008).

[15]. A. Konar, T. Fang, D. Jena. Effect of high- κ gate dielectrics on charge transport in graphene-based field effect transistors // *Phys. Rev. B*, 82, 115452 (2010).

[16]. A. Newaz, Y.S. Puzyrev, B. Wang, S.T. Pantelides, K.I. Bolotin. Probing charge scattering

mechanisms in suspended graphene by varying its dielectric environment // *Nat. Commun.*, 3, 734 (2012).

[17]. I.B. Olenych, Y.Y. Horbenko, B.S. Sokolovskii. Effect of supporting layer on electrical characteristics of field-effect transistor based on reduced graphene oxide film // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 768(11), pp. 426–435 (2024).

[18]. I.B. Olenych, L.S. Monastyrskii. Photosensitive field-effect transistor based on reduced graphene oxide film // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 20(2), pp. 10–18 (2023), (in Ukrainian).

[19]. 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), (in Ukrainian).

[20]. S. Xing, N. Zhang, Z. Song, Q. Shen, C. Lin. Preparation of hafnium oxide thin film by electron beam evaporation of hafnium incorporating a post thermal process // *Microelectronic Engineering*, 66, pp. 451–456 (2003).

[21]. I.B. Olenych, O.I. Aksimentyeva, L.S. Monastyrskii, Y.Y. Horbenko, M.V. Partyka. Electrical and photoelectrical properties of reduced graphene oxide – porous silicon nanostructures // *Nanoscale Res. Lett.*, 12, 272 (2017).

[22]. 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).

[23]. S. Pei, H.M. Cheng. The reduction of graphene oxide // *Carbon*, 50, pp. 3210–3228 (2012).

[24]. T. Hayasaka, A. Lin, V.C. Copa, Jr.L.P. Lopez, R.A. Loberternos, L.I.M. Ballesteros, 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).

Стаття надійшла до редакції 15.04.2025 р.

PACS 73.50.Pz, 73.63.-b

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.2.333193>

FIELD-EFFECT TRANSISTORS BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM FOR PHOTO AND RADIATION DETECTORS

I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, B. S. Sokolovskii, B. I. Turko, O. S. Dzendzelyuk

Ivan Franko National University of Lviv
50 Dragomanov St, Lviv, 79005, Ukraine

Abstract. The features of using dielectric layers of SiO_2 , Al_2O_3 , and HfO_2 in field-effect transistors based on reduced graphene oxide (RGO) films for detecting visible and ionizing radiation have been investigated. The influence of the dielectric layer on the electrical characteristics of the created field-effect transistors in DC and AC modes was studied based on an analysis of the dependencies of drain current and RGO film resistance on gate voltage. An increase in drain current, a decrease in RGO film resistance, and a shift of the charge neutrality point toward negative gate voltages were found under the influence of white light irradiation. It was established that irradiation with β -particles and γ -quanta from a ^{226}Ra source causes a transformation of the capacitance-voltage characteristics of the obtained field-effect transistors based on the RGO film due to the formation of electrically active defects in the dielectric layer. The effectiveness of using various dielectric layers to create photo- and ionizing radiation detectors based on graphene field-effect transistors is discussed.

Keywords: graphene field-effect transistor, reduced graphene oxide, photosensitivity, ionizing radiation detector