

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS73.50.Pz, 73.63.-b; УДК 537.312, 535.215, 621.382

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.278625>

ФОТОЧУТЛИВИЙ ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський

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

ФОТОЧУТЛИВИЙ ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський

Анотація. Створено фоточутливий графеновий польовий транзистор шляхом нанесення плівки відновленого оксиду графену (rGO) на поверхню шару SiO_2 на кремнієвій підкладці, яка слугує одночасно фоточутливим середовищем і затвором польового транзистора. Електричні та фотоелектричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO досліджено в режимах постійного та змінного струму. На основі аналізу комутаційних характеристик одержаного польового транзистора виявлено лінійні ділянки залежності струму стоку від напруги затвору і суттєву залежність електронної складової провідності плівки rGO від опромінення білим світлом. Виявлено фотоіндуковане зменшення внутрішнього опору та збільшення ємності провідного каналу графенового польового транзистора у діапазоні 10^2 – 10^5 Гц. Встановлено, що час фотовідгуку одержаного польового транзистора на світлові імпульси ІЧ, видимого та УФ випромінювання становить близько 1,5 мс. Отримані результати можуть бути використані для спрощення технології виготовлення фотодетекторів на основі графену.

Ключові слова: відновлений оксид графену, польовий транзистор, фоточутливість, комутаційна характеристика, імпеданс

PHOTOSENSITIVE FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM

I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii

Abstract. A photosensitive graphene field-effect transistor was created by depositing a reduced graphene oxide (rGO) film on the surface of the SiO₂ layer on a silicon substrate, which serves as both a photosensitive medium and the field-effect transistor gate. The electrical and photoelectric properties of the field-effect transistor based on the rGO film were studied in DC and AC modes. Linear sections of the drain current on the gate voltage dependence and significant dependence of the electronic component of the rGO film conductivity on the irradiation with white light were revealed based on the analysis of the switching characteristics of the obtained field-effect transistor. A photoinduced decrease in the internal resistance and an increase in the capacitance of the conducting channel of the graphene field-effect transistor in the range of 10²–10⁵ Hz were revealed. It has been established that the photoresponse time of the obtained field-effect transistor to light pulses of IR, visible, and UV radiation is about 1.5 ms. The obtained results can be used to simplify the technology of manufacturing photodetectors based on graphene.

Keywords: reduced graphene oxide, field-effect transistor, photosensitivity, switching characteristic, impedance

Вступ

Графен розглядають як надзвичайно перспективний матеріал для різних сфер практичного застосування. Унікальні властивості графену як безщілинного напівпровідника зумовлені кінчною формою електронного спектру гексагональної структури моношару sp²-зв'язаних атомів вуглецю [1, 2]. Висока електропровідність двовимірною (2D) графену та висока рухливість носіїв заряду є вагомими перевагами для створення високошвидкісних електронних пристроїв [3–5]. Крім того, положенням рівня Фермі й, як наслідок, біполярною провідністю графену можна легко керувати зовнішнім електричним полем [6]. Така властивість графену дає змогу інжектувати у 2D матеріал носії як позитивного, так і негативного заряду та може бути використана для створення нового типу польових транзисторів, які використовують моношар графену як матеріал провідного каналу [7, 8].

Ще однією перевагою графену є здатність витримувати значну густину струму, що разом з омичним контактом з металами та високою теплопровідністю розширює перспективу використання графенових польових транзисторів у потужних електричних схемах [9, 10].

Крім того, графен може бути використаний як прозорий електрод у фотоелектронних пристроях завдяки лише 2,3% поглинанню світла моношаром вуглецю [11–13]. Проте, висока прозорість графену і висока швидкість рекомбінації фотогенерованих носіїв заряду зумовлює слабкий відгук фотодетекторів на основі графену. Однією з основних стратегій покращення їх фоточутливості є гібридизація: поєднання фоточутливого матеріалу для генерації носіїв заряду та графену, як зарядочутливого елемента [14, 15]. Зокрема, як фоточутливий шар може бути використана кремнієва підкладка графенового польового транзистора. У свою чергу, локальне електричне поле фотогенерованих у підкладці носіїв зумовлює зміну електропровідності графенового каналу.

Одним із перспективних і недорогих методів виготовлення графенових наноаркушів є окиснення та хімічне відшарування графіту для одержання наночастинок оксиду графену з подальшим їх відновленням [16]. Відновлений оксид графену (rGO) зазвичай отримують за допомогою хімічних реакцій з використанням гідразину, тетрагідроборату натрію або інших відновників [17, 18]. Використання плівки, утвореної наноаркушами rGO, замість

моношару графену в польових транзисторах може спростити технологію виготовлення фотоприймачів на основі 2D вуглецевих матеріалів. Тому мета роботи полягала у вивченні особливостей застосування плівки rGO у фоточутливих графенових польових транзисторах. У роботі створено графеновий польовий транзистор шляхом осадження плівки rGO на поверхню шару оксиду кремнію на кремнієвій підкладці та досліджено його електричні та фотоелектричні властивості в режимах постійного та змінного струму.

Експеримент

Як підкладку для графенового польового транзистора було використано поліровану пластину монокристалічного кремнію кристаліграфічної орієнтації [100] і товщиною 400 мкм. Діелектричний шар на поверхні кремнієвої підкладки одержано випаровуванням дрібнодисперсного порошку кремнію за допомогою вакуумної системи ВУП-5М із залишковим тиском повітря $\sim 10^{-3}$ мм. рт. ст. та подальшим осадженням на підготовлену підкладку нестехіометричного SiO_x ($x < 2$), який утворювався в результаті реакції парів кремнію із залишковим киснем. Виміряна за допомогою мікроінтерферометра МП-4 товщина шару SiO_x становила близько 100 нм. Термічна обробка в атмосфері повітря при температурі 1050 °C упродовж 2 годин забезпечила утворення шару діоксиду кремнію, який слугував підзатворним діелектриком у графеновому польовому транзисторі.

Для одержання наночастин rGO використано водну суспензію оксиду графену виробництва Sigma-Aldrich (США) з концентрацією основної речовини 2 мг/мл. Наночастинки оксиду графену відновлювали моногідратом гідразину під дією ультразвукової обробки упродовж 20 хв. Для запобігання агрегації одержаних наночастин rGO до суспензії був доданий 0,2 М розчин додецилбензолсульфонату натрію. Плівка rGO була одержана в результаті нанесення плівкоутворювальної суспензії rGO на поверхню шару SiO_2 і по-

дальшого висушування на повітрі за кімнатної температури. Такий підхід забезпечує високий ступінь відновлення оксиду графену та формування плівки rGO товщиною до декількох десятків нанометрів [19, 20]. Утворена плівка слугувала електропровідним каналом фоточутливого польового транзистора. Електроди виток та сток були сформовані на поверхні плівки rGO термовакuumним осадженням срібних контактів на відстані 1 мм один від одного. Як затвор польового транзистора використовували кремнієву підкладку. Одержаний польовий транзистор на основі плівки rGO зображений на рис. 1.

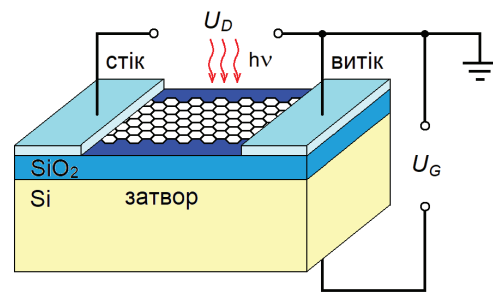


Рис. 1. Схематичне зображення фоточутливого польового транзистора на основі плівки rGO.

Електричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO були досліджені в режимах постійного та змінного струму за допомогою прецизійного мультиметра Siglent SDM 3055 та RLC вимірювача Hantek 1833C. Залежність опору плівки rGO від напруги затвору U_G була досліджена на частоті 1 кГц. Фотоелектричні явища були досліджені за умови опромінення польового транзистора зі сторони плівки rGO випромінюванням світлодіода білого світла FYLP-1W-UWB-A з потужністю 1 Вт і світловим потоком 76 люмен. Дослідження кінетики фотовідгуку на різних довжинах хвиль проводились за допомогою генератора прямокутних імпульсів, світлодіодів FYL-5013UVC ($\lambda=390$ нм), FYL-5013UGC ($\lambda=570$ нм), L-53F3C ($\lambda=940$ нм) та осцилографа Siglent SDS1104X-E. Усі вимірювання проводились за кімнатної температури.

Результати та їх обговорення

Важливим параметром польових транзисторів є характеристика перемикання, а саме співвідношення струму в увімкненому стані до струму у вимкненому стані ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$). Слід зазначити, що проблемним місцем графенових польових транзисторів на етапі застосування у промислових масштабах є саме характеристика перемикання, яка обмежує їх використання в схемах цифрової обробки інформації. Цей недолік зумовлений нульовою шириною забороненої зони графену і може бути усунутий шляхом застосування нанострічки графену як провідного каналу польового транзистора [8, 21]. Завдяки латеральному квантовому обмеженню відкривається енергетичний розрив у електронній структурі графенової нанострічки як квазіодновимірної системи. Крім того, невелика заборонена зона була виявлена у двошаровому графені, що відкриває перспективу розробки польових транзисторів на такому матеріалі [22, 23]. Залежність струму стоку I_D від напруги між затвором і витоком U_G запропонованого польового транзистора на основі плівки rGO зображена на рис. 2.

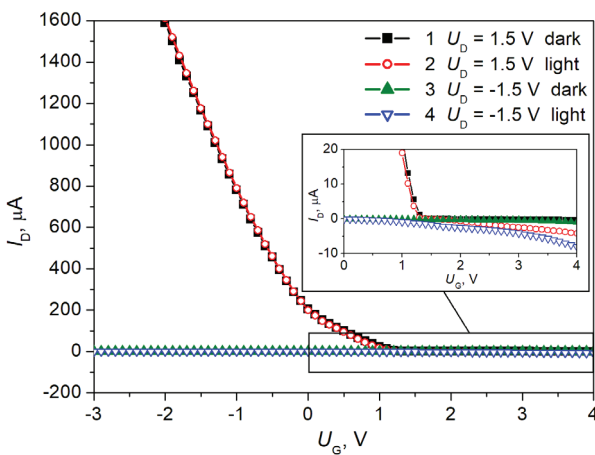


Рис. 2. Залежність струму стоку I_D від напруги затвору U_G польового транзистора на основі плівки rGO у темноті (1, 3) та за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A (2, 4).

Виміряні залежності I_D-U_G характеризуються лінійними ділянками, положення яких залежить від знака напруги зміщення U_D . За допомогою напруги затвору можна керувати

провідністю каналу польового транзистора на основі плівки rGO, змінюючи її більш ніж на два порядки. Крім того, більший діапазон зміни струму стоку I_D від напруги затвору U_G спостерігався у випадку додатної напруги зміщення U_D . Аналіз залежностей I_D-U_G не виявив яскраво вираженої точки нейтральності заряду (точки Дірака), тобто мінімуму провідності графену у разі, коли рівень Фермі проходить через точку контакту зони провідності та валентної зони. Подібний характер залежності опору плівки rGO від напруги затвору U_G спостерігався також у режимі змінного струму на частоті 1 кГц, як це можна побачити на рис. 3. Після досягнення максимуму в околі $U_G = 1,1$ В опір провідного каналу польового транзистора на основі плівки rGO майже не змінювався зі збільшенням напруги затвору.

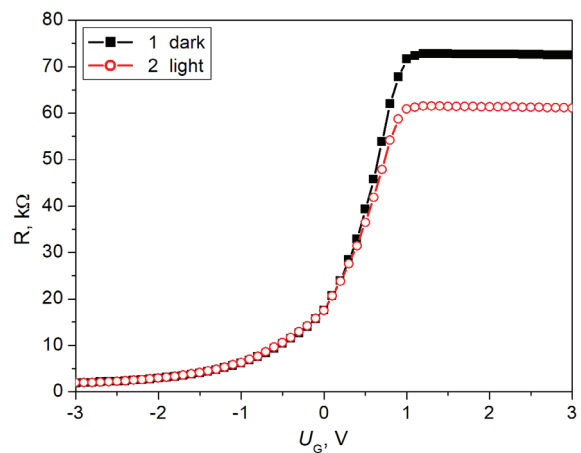


Рис. 3. Залежність опору плівки rGO від напруги затвору U_G на частоті 1 кГц у темноті (1) та за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A (2).

Виявлені особливості електричних властивостей польового транзистора на основі rGO можуть бути зумовлені як неоднорідністю плівки, утвореної наноаркушами rGO, так і недосконалістю шару підзатворного діелектрика. Адже важливий вплив на рухливість носіїв у графеновому каналі мають локалізовані стани у діелектричній підкладці та на інтерфейсі графен/діелектрик [24, 25]. Зокрема, електрично-активні дефекти в шарі SiO_2 на кремнієвій підкладці можуть заряджатися та розряджатися через графеновий канал, бути

центрами розсіювання носіїв заряду, а значить можуть по різному впливати на перенесення електронів та дірок. Додатковим підтвердженням цієї гіпотези може бути подібний характер залежності струму стоку від напруги затвору польових транзисторів на основі сандвіч-структури rGO – поруватий кремній – кремнієва підкладка [26]. Як наслідок, положення точки нейтральності заряду, а також та нахил лівої (діркової) та правої (електронної) гілок профілю електропровідності графенового каналу польового транзистора визначається впливом локального електричного поля на мобільність і концентрацію вільних носіїв заряду відповідного знаку [27].

Опромінення польового транзистора на основі плівки rGO білим світлом спричинило збільшення струму стоку I_D більше як у два рази при напрузі затвору U_G понад 1 В незалежно від полярності напруги між витоком і стоком U_D (див. рис. 2). На залежності опору провідного каналу польового транзистора від напруги затвору U_G спостерігалось збільшення електронної складової провідності плівки rGO під впливом випромінювання світлодіода FYLP-1W-UWB-A (див. рис. 3). Виявлені зміни опору плівки rGO ймовірно зумовлені локальним електричним полем носіїв заряду, фотогенерованих у кремнієвій підкладці та накопичених біля діелектричного шару завдяки прикладеній напрузі затвору. Крім того, на

провідність каналу польового транзистора можуть впливати електричні заряди, локалізовані у структурно недосконалому шарі SiO_2 .

Особливості процесів перенесення зарядів у плівці rGO також було досліджено методом імпедансної спектроскопії. Частотні залежності електричного опору та ємності провідного каналу польового транзистора у разі проходження струму між контактами витоку та стоку показано на рис. 4.

Було виявлено зменшення внутрішнього опору та ємності польового транзистора на основі плівки rGO зі збільшенням частоти у діапазоні 10^2 – 10^5 Гц. Під впливом опромінення білим світлом світлодіода FYLP-1W-UWB-A з потоком 76 люмен спостерігалось зменшення опору та збільшення ємності досліджуваної структури. Варто зазначити, що опромінення здійснювало більший вплив на електричні параметри провідного каналу графенового польового транзистора у низькочастотному діапазоні.

Для одержання додаткової інформації про фотоелектричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO було досліджено часові параметри фотовідгуку на імпульсне електромагнітне випромінювання у широкому діапазоні спектру. Зокрема, на рис. 5 зображено результати досліджень кінетики фотовідгуку на П-подібні імпульси зеленого світла з довжиною хвилі $\lambda=570$ нм і тривалістю 5 мс, а також

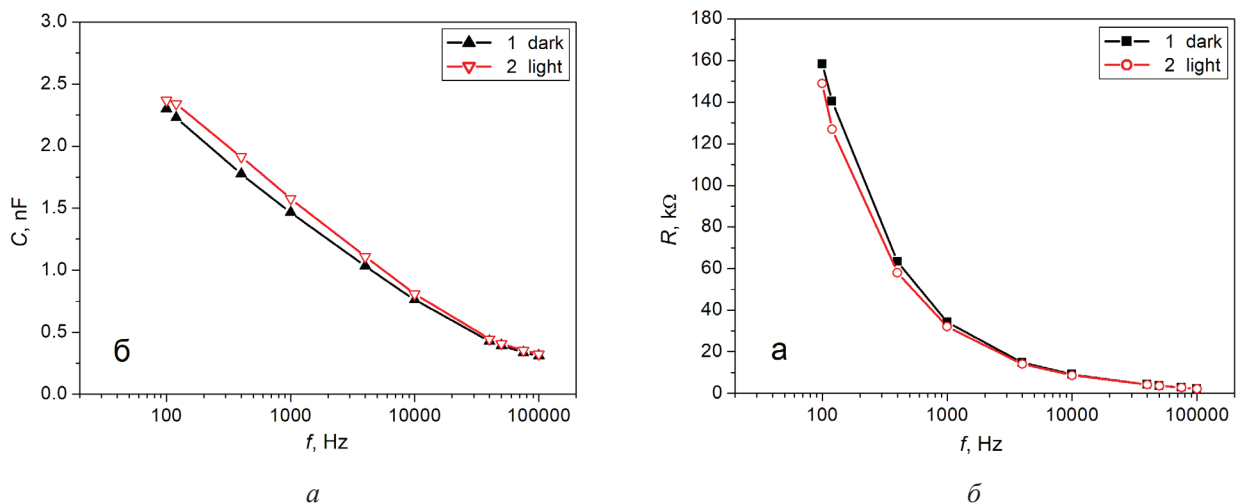


Рис. 4. Частотні залежності внутрішнього опору (а) та ємності (б) провідного каналу польового транзистора на основі плівки rGO у темноті (1) та за умови опромінення світлодіодом FYLP-1W-UWB-A (2).

ІЧ та УФ випромінювання з довжинами хвиль $\lambda=940$ нм і $\lambda=390$ нм, відповідно.

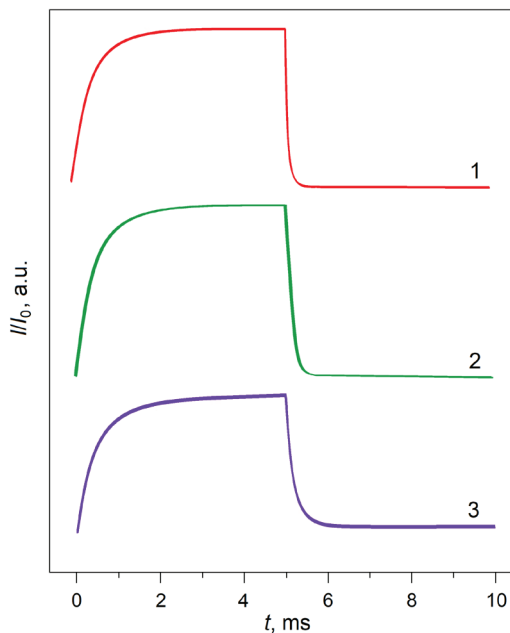


Рис. 5. Кінетика фотовідгуку польового транзистора на основі плівки rGO на П-подібні імпульси світла з довжиною хвилі $\lambda=940$ нм (1), $\lambda=570$ нм (2), $\lambda=390$ нм (3).

Спостерігалися приблизно однакові часи наростання (близько 1,5 мс) і загасання фотосигналу, що свідчить про подібність генераційно-рекомбінаційних та релаксаційних процесів, які відбуваються в експериментальній структурі під впливом збуджуючого світла з різною довжиною хвилі. Різна величина фотовідгуку (відношення фотоструму до струму польового транзистора на основі плівки rGO у темноті) може бути пов'язана з спектральною залежністю фоточутливості кремнієвої підкладки та різною інтенсивністю випромінювання світлодіодів різної довжини хвилі, які використовувались для фотогенерації носіїв заряду.

Висновки

У роботі запропоновано нові технічні рішення, пов'язані із створенням фоточутливих графенових польових транзисторів. Як провідний канал використано плівку rGO, осаджену на поверхню шару SiO₂ на кремнієвій підкладці, яка одночасно слугує фоточутливим середовищем і затвором польового транзистора. Плів-

ку rGO одержано висушуванням плівкоутворювальної суспензії відновлених моногідратом гідразину наночастинок оксиду графену.

Встановлено, що залежності струму стоку I_D від напруги затвору U_G характеризуються лінійними ділянками, положення яких залежить від знака напруги зміщення U_D . Комутаційні характеристики одержаного польового транзистора на основі плівки rGO демонструють відношення I_{on}/I_{off} понад два порядки і суттєву залежність від опромінення білим світлом. Крім того, в режимі змінного струму під впливом локального поля фотоіндукованих зарядів виявлено зменшення опору польового транзистора для електронної гілки профілю біполярної провідності плівки rGO. Опромінення поверхні польового транзистора на основі плівки rGO білим світлом зумовлює зменшення його опору і збільшення ємності в діапазоні 10^2 – 10^5 Гц. Час фотовідгуку одержаного польового транзистора на світлові імпульси ІЧ, видимого та УФ випромінювання становить близько 1,5 мс.

Список використаної літератури

- [1]. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, A. A. Firsov. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // *Nature*, 438, pp. 197–200 (2005).
- [2]. T. Chakraborty. Graphene: a nanoscale quantum playing field // *Physics in Canada*, 63, pp. 351–354 (2006).
- [3]. 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).
- [4]. Y. Zhang, Y. -W. Tan, H. L. Stormer, P. Kim. Experimental observation of quantum Hall effect and berry's phase in graphene // *Nature*, 438, pp. 201–204 (2005).
- [5]. J. -S. Moon. Graphene Field-effect transistor for radio-frequency applications: review // *Carbon Letters*, 13, pp. 17–22 (2012).
- [6]. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos,

- I. V. Grigorieva, A. A. Firsov. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*, 306, pp. 666–669 (2004).
- [7]. B. Hähnlein, B. Händel, J. Pezoldt, H. Töpfer, R. Granzner, F. Schwier. Side-gate graphene field-effect transistors with high transconductance // *Appl. Phys. Lett.*, 101, 093504 (2012).
- [8]. S. Lone, A. Bhardwaj, A. K. Pandit, S. Gupta, S. Mahajan. A Review of Graphene Nanoribbon Field-Effect Transistor Structures // *J. Electron. Mater.*, 50, pp. 3169–3186 (2021).
- [9]. F. Xia, V. Perebeinos, Y. -M. Lin, Y. Wu, P. Avouris. The origins and limits of metal-graphene junction resistance // *Nature Nanotech.*, 6, pp. 179–184 (2011).
- [10]. K. M. F. Shahil, A. A. Balandin. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials // *Solid State Commun.*, 152, 1331–1340 (2012).
- [11]. K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, K. S. Kim, J. -H. Ahn, P. Kim, J. -Y. Choi, B. H. Hong. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes // *Nature*, 457, pp. 706–710 (2009).
- [12]. D. H. Shin, C. W. Lee, J. S. Lee, J. H. Kim, S. Kim, S. -H. Choi. Enhancement of the effectiveness of graphene as a transparent conductive electrode by AgNO₃ doping // *Nanotech.*, 25, 125701 (2014).
- [13]. P. Avouris. Graphene: Electronic and Photonic Properties and Devices // *Nano Letters*, 10, pp. 4285–4294 (2010).
- [14]. K. Roy, M. Padmanabhan, S. Goswami, T. P. Sai, G. Ramalingam, S. Raghavan, A. Ghosh. Graphene–MoS₂ hybrid structures for multifunctional photoresponsive memory devices // *Nature Nanotech.*, 8, pp. 826–830 (2013).
- [15]. T. Palanisamy, S. Mitra, N. Batra, J. Smajic, A. -H. Emwas, I. Roqan, P. M. F. J. Costa. Carbon Nitride Thin Film-Sensitized Graphene Field-Effect Transistor: A Visible-Blind Ultraviolet Photodetector // *Advanced Materials Interfaces*, 9, 2200313 (2022).
- [16]. S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide // *Carbon*, 45, pp. 1558–1565 (2007).
- [17]. C. K. Chua, M. Pumera. The reduction of graphene oxide with hydrazine: elucidating its reductive capability based on a reaction-model approach // *Chem. Commun.*, 52, pp. 72–75 (2016).
- [18]. D. Li, M. B. Müller, S. Gilje, R. B. Kaner, G. G. Wallace. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets // *Nat. Nanotechnol.*, 3, pp. 101–105 (2008).
- [19]. I. B. Olenych, O. I. Aksimentyeva, L. S. Monastyrskii, Yu. Yu. Horbenko, M. V. Partyka. Electrical and Photoelectrical Properties of Reduced Graphene Oxide – Porous Silicon Nanostructures // *Nanoscale Res. Lett.*, 12, 272 (2017).
- [20]. I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii, O. I. Aksimentyeva, L. Orovcík, M. Y. Salamakha. Charge Transport in Porous Silicon/Graphene-Based Nanostructures // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 673, pp. 32–38 (2018).
- [21]. M. Y. Han, B. Ozyilmaz, Y. Zhang, P. Kim. Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons // *Phys. Rev. Lett.*, 98, 206805 (2007).
- [22]. T. Ohta, A. Bostwick, T. Seyller, K. Horn, E. Rotenberg. Controlling the Electronic Structure of Bilayer Graphene // *Science*, 313, pp. 951–954 (2006).
- [23]. E. McCann, D. S. L. Abergel, V. I. Fal’ko. The low energy electronic band structure of bilayer graphene // *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 148, pp. 91–103 (2007).
- [24]. 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).
- [25]. 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).
- [26]. I. B. Olenych, Ya. V. Boyko. Field-effect transistor based on graphene–porous silicon hybrid structure // *Journal of Physical Studies*, 27, 1701 (2023).
- [27]. 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 08.05.2023 р.

PACS73.50.Pz, 73.63.-b; UDC537.312, 535.215, 621.382

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.278625>

PHOTOSENSITIVE FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE FILM

I. B. Olenych, L. S. Monastyrskii

Ivan Franko National University of Lviv
50, Dragomanov Str., 79005 Lviv, Ukraine

E-mail: igor.olenych@lnu.edu.ua, lyubomyr.monastyrskyy@lnu.edu.ua

Summary

Graphene-based field-effect transistors are considered a potential alternative to metal-oxide-semiconductor transistors and may become a new elemental base of electronics in the post-silicon epoch. Increasing the functionality of graphene field-effect transistors and simplifying their production techniques are important areas of scientific research. The paper proposes new technical solutions related to the creation of photosensitive graphene-based field-effect transistors. A film of reduced graphene oxide (rGO) was used as the conducting channel of the field-effect transistor. The film-forming suspension of rGO nanosheets was deposited to the surface of the SiO₂ layer on a silicon substrate and dried in air at room temperature. The silicon substrate was used as a photosensitive medium and gate of the field-effect transistor.

The electrical and photoelectric properties of the field-effect transistor based on the rGO film were studied in both DC and AC modes. Linear sections of the drain current on the gate voltage dependence, the position of which depends on the bias voltage sign, were found based on the analysis of the switching characteristics of the proposed field-effect transistor. The switching characteristics demonstrate the $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ratio of more than two orders of magnitude and significant dependence of the rGO film conductivity on white light irradiation. A decrease in the resistance of the field-effect transistor under the influence of the local field of photogenerated charge carriers was found for the electronic branch of the ambipolar conductivity profile of the rGO film. Besides, irradiation of the surface of the field-effect transistor based on the rGO film causes a decrease in its resistance and an increase in capacitance in the 10²–10⁵ Hz frequency range. It has been established that the photoresponse time of the obtained field-effect transistor to light pulses of IR, visible, and UV radiation is about 1.5 ms. The obtained results can be used to simplify the technology of manufacturing photodetectors based on graphene.

Keywords: reduced graphene oxide, field-effect transistor, photosensitivity, switching characteristic, impedance

PACS73.50.Pz, 73.63.-b; УДК 537.312, 535.215, 621.382
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.2.278625>

ФОТОЧУТЛИВИЙ ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВІ ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

І. Б. Оленич, Л. С. Монастирський

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Драгоманова, 50, 79005 м. Львів, Україна
E-mail: igor olenych@lnu.edu.ua, lyubomyr.monastyrskyu@lnu.edu.ua

Реферат

Польові транзистори на основі графену розглядаються як потенційна альтернатива транзисторам метал-оксид-напівпровідник і можуть стати новою елементною базою електроніки у посткремнієву епоху. Підвищення функціональності графенових польових транзисторів і спрощення технології їх виробництва є важливими напрямками наукових досліджень. У роботі запропоновано нові технічні рішення, пов'язані з розробкою фоточутливих польових транзисторів на основі графену. Як провідний канал польового транзистора використовували плівку відновленого оксиду графену (rGO). Плівкоутворювальну суспензію наноаркушів rGO наносили на поверхню шару SiO₂ на кремнієвій підкладці та сушили на повітрі при кімнатній температурі. Як фоточутливе середовище і затвор польового транзистора використовувалася кремнієва підкладка.

Електричні та фотоелектричні властивості польового транзистора на основі плівки rGO досліджено в режимах постійного та змінного струму. На основі аналізу комутаційних характеристик запропонованого польового транзистора виявлено лінійні ділянки залежності струму стоку від напруги затвору, положення яких залежить від знака напруги зміщення. Комутаційні характеристики демонструють співвідношення $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ понад два порядки і суттєву залежність провідності плівки rGO від опромінення білим світлом. Під впливом локального поля фотогенерації носіїв заряду виявлено зменшення опору польового транзистора для електронної гілки профілю біполярної провідності плівки rGO. Крім того, опромінення поверхні польового транзистора на основі плівки rGO призводить до зменшення його опору та збільшення ємності в діапазоні частот 10²–10⁵ Гц. Встановлено, що час фотовідгуку одержаного польового транзистора на світлові імпульси ІЧ, видимого та УФ випромінювання становить близько 1,5 мс. Отримані результати можуть бути використані для спрощення технології виготовлення фотодетекторів на основі графену.

Ключові слова: відновлений оксид графену, польовий транзистор, фоточутливість, комутаційна характеристика, імпеданс