



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **162787** (13) **U**
(51) МПК (2026.01)
G03F 7/075 (2006.01)
H10F 99/00
H01F 41/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2025 05190	(72) Винахідник(и): Оленич Ігор Богданович (UA), Горбенко Юлія Юріївна (UA)
(22) Дата подання заявки: 24.10.2025	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 23.04.2026	(73) Володілець (володільці): ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА, вул. Кирила і Мефодія, 6, м. Львів, 79005 (UA)
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 22.04.2026, Бюл.№ 16	

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТЕКТОРА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ ГРАФЕНОВОГО ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА

(57) Реферат:

Спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора, за яким наносять плівку відновленого оксиду графену на поверхню шару окисненого поруватого кремнію на кремнієвій підкладці, яку використовують як затвор польового транзистора, формують електричні контакти витоку та стоку на поверхні цієї плівки. У шар поруватого кремнію вводять срібло при проходженні постійного електричного струму 1 мА упродовж 5 с. Шар поруватого кремнію анодно окиснюють у водному розчині пероксиду водню при проходженні постійного електричного струму 20 мА упродовж 1 хв.

UA 162787 U

UA 162787 U

Корисна модель належить до галузі сенсорної електроніки і може бути використана для виготовлення детекторів іонізуючого випромінювання на основі відновленого оксиду графену та поруватого кремнію для радіаційного моніторингу в екології, медицині, наукових програмах.

Відомий спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора [Ruiz I., Vizkelethy G., McDonald A.E., Howell S.W., Thelen P.M., Goldflam M.D., Beechem T.E. "Detection of high energy ionizing radiation using deeply depleted graphene-oxide-semiconductor junctions". J. Appl. Phys. Vol. 132, 184503 (2022)], за яким на кремнієвій підкладці з низьким вмістом легуючої домішки, яка слугує затвором польового транзистора, термічно формують пасивуючий шар SiO_2 товщиною 15 нм, поверх якого атомно-шаровим осадженням за температури 250 °C наносять діелектричний шар HfO_2 товщиною 50 нм та переносять хімічно осаджений з газової фази моношар графену. Ti/Au електричні контакти витоку та стоку формують на плівці графену електронно-променевим випаровуванням, після чого атомно-шаровим осадженням наносять додатковий пасивуючий шар HfO_2 товщиною 50 нм. Детектор реєструє радіацію за зміною струму графенового польового транзистора.

Недоліками способу є його складність і використання вартісного обладнання.

Відомий спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора [Li M.J., Chen Z. "Graphene field effect transistor for radiation detection". Патент США US 9508885 B1, МПК G01N 27/403, H01L 31/119, H01L 31/028 (2016)], за яким відлущену від піролітичного графіту плівку графену наносять на нелеговану кремнієву підкладку з діелектричним шаром SiO_2 товщиною 90 нм і фото- або електронно-променевою літографією формують Pd/Au або Ti/Pd/Au електричні контакти витоку та стоку. Нелеговану кремнієву підкладку використовують як затвор і поглинач радіації. Детектор іонізуючого випромінювання працює за зміною електропровідності плівки графену під дією локального електричного поля радіаційно-індукованих зарядів.

Недоліками способу є його складність і використання вартісного обладнання.

Найближчим аналогом до корисної моделі є "Спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання на основі графену" [Патент України № 153940, МПК H01L 31/00, H01L 31/119, H01L 31/028 (2023)], за яким як затвор польового транзистора та поглинач радіації використовують кремнієву підкладку з додатковим поглинаючим шаром термічно окисненого поруватого кремнію, на поверхню якого поливом наносять плівкоутворювальну суспензію відновленого оксиду графену та висушують її на повітрі за кімнатної температури упродовж 48 годин. На поверхні отриманої плівки відновленого оксиду графену формують електричні контакти витоку та стоку. Іонізуюче випромінювання реєструють за зміною електричних характеристик польового транзистора.

Недоліком способу є низька чутливість провідності плівки відновленого оксиду графену до електричного поля генерованих радіацією зарядів у кремнієвій підкладці, зумовлена наявністю діелектричного шару термічно окисненого поруватого кремнію.

В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалити спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора шляхом уведення срібла у шар поруватого кремнію з наступним анодним окисненням цього шару, що дасть змогу спростити його виготовлення та збільшити чутливість до α - і β -частинок і γ -квантів.

Поставлена задача вирішується тим, що спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора, за яким наносять плівку відновленого оксиду графену на поверхню шару окисненого поруватого кремнію на кремнієвій підкладці, яку використовують як затвор польового транзистора, формують електричні контакти витоку та стоку на поверхні цієї плівки, згідно з корисною моделлю, у шар поруватого кремнію уводять срібло при проходженні постійного електричного струму 1 мА упродовж 5 с, після чого шар поруватого кремнію анодно окиснюють у водному розчині пероксиду водню при проходженні постійного електричного струму 20 мА упродовж 1 хв.

Суттєвими відмінностями пропонованого способу від аналога є:

1. Уведення срібла у шар поруватого кремнію забезпечує ефективне збирання та накопичення у ньому генерованих іонізуючим випромінюванням носіїв заряду.

2. Застосування анодного окиснення поверхні поруватого кремнію у водному розчині пероксиду водню дає змогу спростити та здешевити спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання і забезпечує формування пасивуючої плівки SiO_2 , яка не перешкоджає впливу електричного поля радіаційно-індукованих у кремнієвій підкладці зарядів на провідність плівки відновленого оксиду графену.

Чутливість детектора іонізуючого випромінювання ґрунтується на залежності електропровідності графену від локальної зміни електричного поля. Взаємодія іонізуючого випромінювання з кремнієвою підкладкою та шаром анодно окисненого поруватого кремнію

зумовлює генерацію вільних носіїв заряду та утворення радіаційних дефектів, які задіяні у процесах перенесення та релаксації заряду. У результаті, електричне поле радіаційно-індукованих зарядів спричинює зміну опору графенового каналу польового транзистора.

Суть корисної моделі пояснюються кресленнями, на яких зображено:

5 Фіг. 1. Детектор іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора: 1 - плівка відновленого оксиду графену, 2 - шар анодно окисненого поруватого кремнію, 3 - кремнієва підкладка - затвор польового транзистора, 4 - уведенне срібло, 5 - електричний контакт стоку, 6 - електричний контакт витоку, 7 - електричний контакт затвора.

10 Фіг. 2. Залежність відносного опору R/R_0 графенового польового транзистора від часу опромінення ізотопом ^{226}Ra .

Фіг. 3. Залежність опору R графенового польового транзистора від напруги на затворі K_g до (1) та після опромінення ізотопом ^{226}Ra упродовж 120 хв (2).

15 Фіг. 4. Нормалізована залежність ємності затвора C/C_{max} графенового польового транзистора від напруги на затворі V_g до (1) та після опромінення ізотопом ^{226}Ra упродовж 120 хв (2).

Приклад. Детектор іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора (фіг. 1) виготовляють на кремнієвій пластині електронного типу провідності з питомим опором 4,5 Ом-см, товщиною 400 мкм і кристалографічною орієнтацією [100], яка одночасно є підкладкою (3) і затвором польового транзистора. На тильну поверхню кремнієвої 20 пластини термовакуумно осаджують і відпалюють упродовж 20 хв при температурі 600 °C плівку золота товщиною 0,5 мкм, яку використовують як електричний контакт затвора (7). Шар поруватого кремнію (2) одержують електрохімічним травленням робочої поверхні кремнієвої пластини у розчині $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{HF}=1:1$ при густині анодного струму 30 мА/см² та освітленні вольфрамовою лампою потужністю 500 Вт упродовж 10 хв, після чого промивають у 25 дистильованій воді. В одержаний шар поруватого кремнію електрохімічно уводять срібло (4) з 0,1 М водного розчину AgNO_3 при проходженні постійного струму 1 мА упродовж 5 с та анодно окиснюють шар поруватого кремнію у 3 % водному розчині пероксиду водню при проходженні струму 20 мА упродовж 1 хв і одержують пасивуючу плівку SiO_2 .

Для формування плівки відновленого оксиду графену (1) на поверхні анодно окисненого 30 поруватого кремнію (2) використовують водну суспензію оксиду графену виробництва фірми Sigma-Aldrich (США) з концентрацією 2 мг/мл. Оксид графену відновлюють доданням у суспензію моногідратом гідразину за впливу ультразвуку упродовж 20 хв. Для запобігання агрегації наночастинок відновленого оксиду графену до суспензії додають 0,2 М водний розчин додецилбензолсульфонату натрію. Одержану суспензію наносять поливом на поверхню анодно 35 окисненого поруватого кремнію і висушують на повітрі за кімнатної температури упродовж 48 годин.

На поверхню утвореної плівки відновленого оксиду графену, яку використовують як провідний канал польового транзистора, термовакуумно осаджують два срібні контакти 40 товщиною 0,5 мкм на відстані 1 мм один від одного, які служать електричними контактами витоку (6) і стоку (5).

Як джерело γ -квантів з енергією 0,19 МеВ, α - і β -частинок з енергією 4,78 і 0,17 МеВ, відповідно, використовують ізотоп радію ^{226}Ra з активністю 0,1 мКі. Детектор іонізуючого випромінювання, який розміщений безпосередньо біля радіоактивного джерела ^{226}Ra , опромінюють з боку плівки відновленого оксиду графену. Опір графенового польового 45 транзистора збільшується зі збільшенням дози поглинутого випромінювання, яка залежить від тривалості впливу α - та β -частинок і γ -квантів (фіг. 2). Залежність опору графенового польового транзистора від напруги на затворі дає змогу керувати чутливістю радіаційного детектора (фіг. 3). Опромінення ізотопом ^{226}Ra упродовж 120 хв спричиняє зміну залежностей опору провідного каналу та ємності затвора графенового польового транзистора від напруги затвора (фіг. 3 і фіг. 50 4), що пов'язано з утворенням радіаційних дефектів і генерацією вільних носіїв заряду у шарі поруватого кремнію та кремнієвій підкладці.

Уведення срібла у шар поруватого кремнію забезпечує ефективне збирання та накопичення радіаційно-індукованих носіїв заряду, електричне поле яких змінює провідність графенового каналу польового транзистора. Застосування анодного окиснення поверхні поруватого кремнію 55 спрощує спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання та забезпечує більшу радіаційну чутливість завдяки меншій товщині пасивуючої плівки SiO_2 порівняно з товщиною термічно окисненого поруватого кремнію, яка не перешкоджає впливу електричного поля генерованих у кремнієвій підкладці вільних носіїв заряду.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- Спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання на основі графенового польового транзистора, за яким наносять плівку відновленого оксиду графену на поверхню шару окисненого поруватого кремнію на кремнієвій підкладці, яку використовують як затвор польового транзистора, формують електричні контакти витоку та стоку на поверхні цієї плівки, який **відрізняється** тим, що у шар поруватого кремнію уводять срібло при проходженні постійного електричного струму 1 мА упродовж 5 с, після чого шар поруватого кремнію анодно окиснюють у водному розчині пероксиду водню при проходженні постійного електричного струму 20 мА упродовж 1 хв.

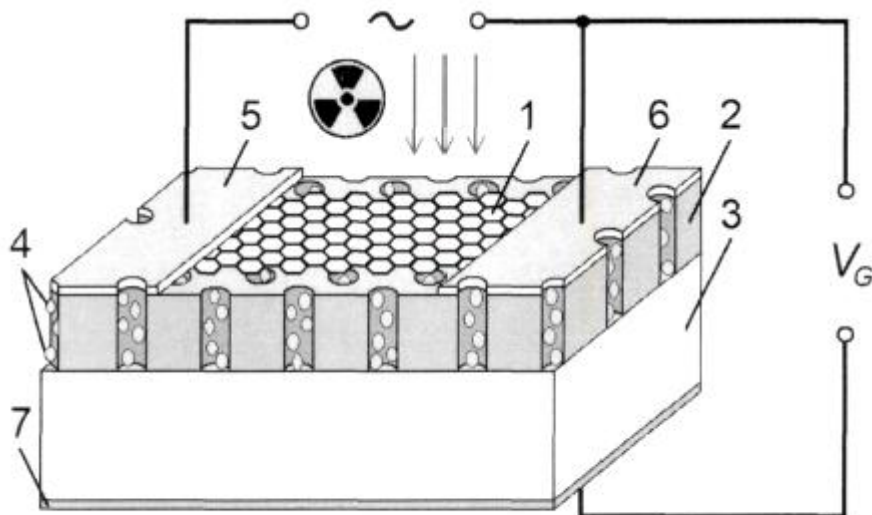


Fig. 1

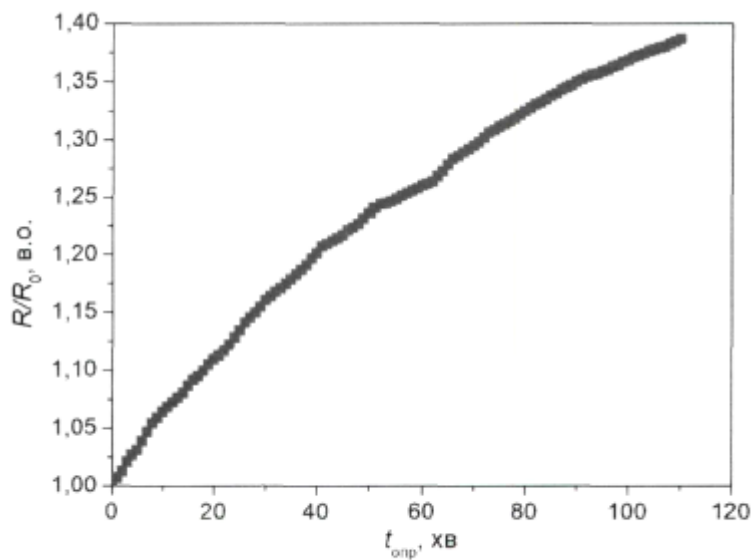


Fig. 2

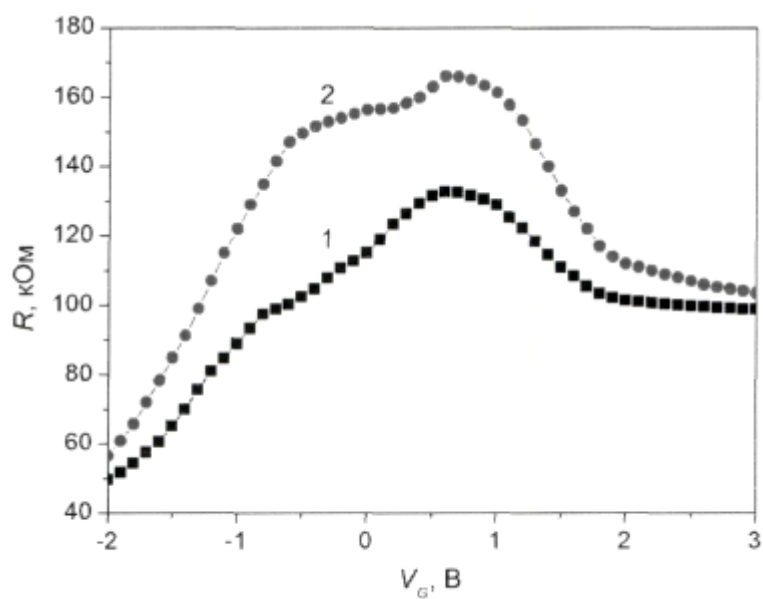


Fig. 3

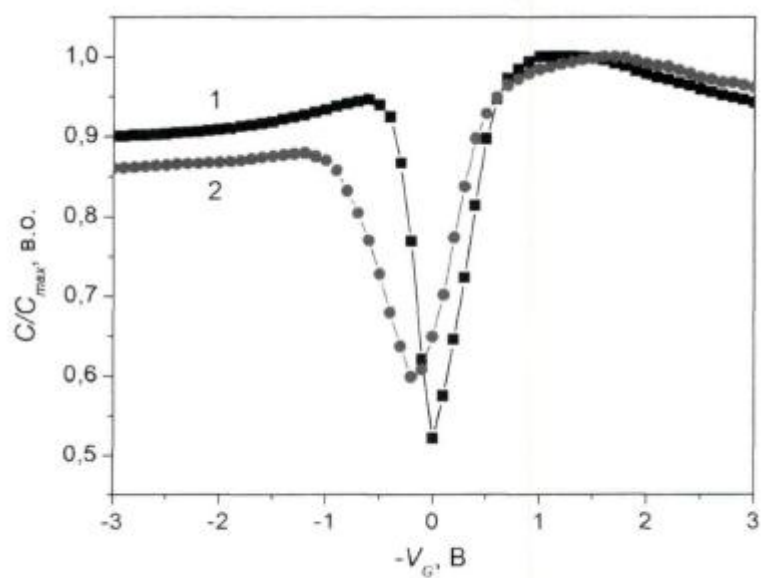


Fig. 4