

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2024.03.035>

УДК 539.1.074.55

Г.П. Гайдар, <https://orcid.org/0000-0003-2077-3484>

С.В. Бердниченко

В.Г. Воробйов

В.І. Кочкін

В.Ф. Ластовецький

П.Г. Литовченко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

Особливості фізичних процесів формування кремнієвих поверхнево-бар'єрних структур

Представлено академіком НАН України В.І. Слісенком

Напівпровідникові детектори займають чільне місце серед приладів ядерної спектроскопії і використовуються для дослідження спектрального складу, інтенсивності, просторового й кутового розподілів іонізуючих частинок. Найбільш привабливим матеріалом для виготовлення детекторів є кремній завдяки розвиненій кремнієвій технології і можливості створювати не тільки дозиметричні й радіометричні, але й спектроскопічні детектори. Напівпровідникові детектори на основі Si застосовуються для реєстрації заряджених частинок, а також γ -квантів, у тому числі з енергією менше 100 кеВ, та рентгенівського випромінювання.

Узагальнено результати комплексного дослідження властивостей вихідного високоомного n -Si з метою вдосконалення технології виготовлення кремнієвих спектроскопічних напівпровідникових детекторів із наперед заданими параметрами. Для плоско-паралельного травлення кристалів кремнію розроблено методи хімічної обробки поверхні Si шляхом підбору складу травників на основі високочистих кислот. Запропоновано метод прискореного формування поверхнево-бар'єрних структур унаслідок прикладання зовнішнього електричного поля на етапі їх формування. Визначено умови витримки структур для оптимального формування якісних і стабільних поверхнево-бар'єрних p – n -переходів. На основі оптимізованої поверхнево-бар'єрної технології з використанням високоомного n -Si великого діаметра розроблено dE/dx -детектори з робочою площею 8 см² і діапазоном товщин чутливої області від десятків мікрон до міліметра, з тонкими вхідними і вихідними «вікнами» й роздільною здатністю за енергіями не гірше 100 кеВ. Одержані детектори можуть бути використані в складі телескопів в ядерних експериментах за участю важких іонів при низьких виходах продуктів реакцій.

Ключові слова: високоомний кремній, поверхнево-бар'єрні структури, напівпровідникові детектори, спектроскопія ядерних випромінювань.

Цит у в а н н я: Гайдар Г.П., Бердниченко С.В., Воробйов В.Г., Кочкін В.І., Ластовецький В.Ф., Литовченко П.Г. Особливості фізичних процесів формування кремнієвих поверхнево-бар'єрних структур. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2024. № 3. С. 35—43. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2024.03.035>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ. Напівпровідникові детектори займають одне з важливих місць серед приладів ядерної спектроскопії і застосовуються в ядерній фізиці, при вивченні космічного простору, в біофізиці, геофізиці, біології, медицині [1] та в інших областях науки і техніки, де використовують радіоактивні випромінювання [2—5]. Зокрема, такі детектори широко застосовуються в багатьох експериментах: для α -спектроскопії [6], γ - та рентгенівської спектроскопії [7], реєстрації моноенергетичних електронів [8], важких іонів [9], для вивчення поділу атомних ядер [10].

Напівпровідниковим детекторам властиві такі важливі якості, як високе енергетичне розділення, лінійність характеристик у широкому діапазоні енергій для різних частинок, малий час наростання імпульсу, нечутливість до магнітних полів, компактність, механічна міцність, здатність працювати за низьких температур тощо.

Вихідним матеріалом для виготовлення поверхнево-бар'єрних детекторів (Au-Si) здебільшого слугує Si електронного типу провідності. На його поверхні створюється (зазвичай травленням) p -шар унаслідок окиснення протравленої поверхні основного матеріалу киснем повітря. Слід зауважити, що для створення якісного p — n -переходу на n -Si легше отримати відповідні поверхневі стани, ніж на кремнії діркової провідності. Ці стани зумовлюють вигин енергетичних зон поблизу поверхні напівпровідника, і в них локалізуються електрони. Якщо на поверхню напівпровідника нанести ще металевий електрод, який сприятиме подальшому вигину зон, то можна отримати перехід типу метал-напівпровідник. В якості такого металу найчастіше використовують золото. Товщину напиленого шару золота (який є, по-суті, "мертвим" шаром для частинок, які реєструються) намагаються робити мінімальною ($\leq 5 \cdot 10^{-5}$ мм). Коли метал знаходиться в контакті з напівпровідником, то на їх границі виникає електростатичний бар'єр, який перешкоджає проникненню носіїв із напівпровідника в метал і назад. При прикладанні оберненої напруги до границі метал-напівпровідник виникає збіднений носіями шар, товщина якого в Si може бути доведена до декількох міліметрів.

Якщо вигин зон поблизу поверхні напівпровідника настільки великий, що рівень Фермі знаходитиметься нижче середини забороненої зони, то частина напівпровідника, яка межує з металом, матиме діркову провідність.

Зазначимо, що поверхнево-бар'єрні детектори на основі кремнію [11] можуть використовуватися при кімнатній температурі на відміну від аналогічних детекторів, створених на основі германію [12], які працюють тільки за температури рідкого азоту внаслідок наявності значних струмів витоку.

На даний час поверхнево-бар'єрні структури становлять невід'ємну частину багатьох типів напівпровідникових детекторів. У контакті металу та реальної поверхні кремнію (метал-напівпровідник) вони формують робочий перехід, який при зворотній напрузі створює чутливий об'єм детектора.

Оскільки температурний режим виготовлення поверхнево-бар'єрного випрямляючого і тильного неінжектуючого контактів не перевищує 100 °С, то це дозволяє зберігати значення часу життя неосновних носіїв заряду та створювати детектори з високою енергетичною роздільною здатністю.

Слід зауважити, що сучасні детектори з імплантованими p — n -переходами проходять термообробку за температури ~ 800 °С для відпалу радіаційних дефектів, що призводить до зниження часу життя неосновних носіїв заряду і погіршення енергетичної роздільної здатності, в тому числі за рахунок значної товщини вхідного "вікна".

Для спектrometerії ядерних випромінювань використовують поверхнево-бар'єрні детектори повного поглинання заряджених частинок (E -детектори) з широким інтервалом товщин чутливої області і розміру робочих площин та детектори питомих втрат енергії заряджених частинок (dE/dx -детектори) з товщиною чутливої області значно меншою від пробігу частинок, які ідентифікуємо.

У ядерних реакціях зіштовхуються і вступають у взаємодію дві складні ядерні системи. Особливо це стосується реакцій за участю важких іонів, в яких унаслідок високої енергії збудження та інтенсивного обміну нуклонами відкривається множина вихідних каналів і в якості продуктів реакцій створюються різноманітні нукліди. Вивчення таких реакцій потребує вимірювання виходів, розділення продуктів реакцій за зарядом ядра та його масою, визначення їх енергетичних спектрів і кутових розподілів.

При дослідженні конкуруючих ядерних реакцій з легкими іонами (^1H , ^2H , ^3H , ^3He , ^4He) широко застосовується $\left(\frac{dE}{dx} \cdot E\right)$ -метод ідентифікації заряджених частинок на основі вимірювання питомої втрати енергії і повної енергії. Система, що реєструє, у цьому методі — *телескоп детекторів*, може складатися одночасно з двох (і більше) детекторів. У першому детекторі телескопа, який має невелику товщину і є повністю збідненим (так званий прострільний або dE/dx -детектор), частинка втрачає частину повної кінетичної енергії E (тобто dE/dx -детектор реєструє питомі енергетичні втрати), а основна частина енергії $E_1 = E - \Delta E$ реєструється в другому товстому детекторі (E -детектор — детектор повного поглинання енергії частинок).

До dE/dx -детекторів пред'являються деякі специфічні порівняно з E -детекторами вимоги, а саме: високий ступінь плоско-паралельності, особливо при малих товщинах; тонкі вхідні і вихідні "вікна", в яких відбуваються неконтрольовані втрати; низький рівень шумів при повному збідненні об'єму детектора (при збільшенні зворотного зміщення на детекторі), коли область просторового заряду розповсюджується до тильного контакту; неінжектуєчий тильний контакт [13].

Втрати енергії ΔE в dE/dx -детекторі складають

$$\Delta E = \left(\frac{dE}{dx}\right) \cdot w, \quad (1)$$

де dE/dx — питомі втрати енергії в прострільному детекторі; w — його товщина.

Основою $\left(\frac{dE}{dx} \cdot E\right)$ -методу є формула для питомих іонізаційних втрат Бете—Блоха в нерелятивістському випадку [14], записана в такому вигляді (якщо знехтувати логарифмічним членом, який слабо залежить від енергії):

$$\frac{dE}{dx} \approx K M Z^2 / E, \quad (2)$$

звідси маємо

$$\frac{dE}{dx} \cdot E \approx K M Z^2, \quad (3)$$

де K — коефіцієнт, який не залежить від масового числа M і заряду частинки Z ; $M Z^2$ — параметр ідентифікації.

Беручи до уваги вираз (1), справедливим буде наближене рівняння

$$\Delta E \cdot E \approx K' M Z^2, \quad (4)$$

де K' — коефіцієнт, який не залежить від масового числа M і заряду частинки Z ; а зліва стоять величини, які вимірюються експериментально за допомогою $\left(\frac{dE}{dx} \cdot E\right)$ -телескопа.

Такі основні параметри dE/dx -детекторів, як рівень зворотних струмів, якість поверхневого бар'єра, товщини вхідних "вікон", і, нарешті, енергетична роздільна здатність, знаходяться в безпосередньому зв'язку з електрофізичними характеристиками вихідного напівпровідникового матеріалу й електронним станом його поверхні. Тому для створення якісних і надійних детекторів із необхідними параметрами потрібно комплексно вивчати об'ємні і поверхневі властивості вихідних кристалів кремнію.

Мета даної праці — дослідження особливостей фізичних процесів генерації та рекомбінації носіїв заряду, формування зворотних струмів та електронних станів у кремнієвих структурах з поверхневим потенціальним бар'єром, впливу зовнішнього електричного поля на формування потенціального бар'єру в контактi Au-Si та оптимізація технології виготовлення дослідних зразків високоякісних поверхнево-бар'єрних детекторів ядерного випромінювання.

Удосконалення технології вирощування кремнієвих монокристалів дає змогу виготовляти зливки діаметром до 100 мм, що забезпечує можливість розробки детекторів із великою площею чутливої поверхні [15], потрібних для спектрометрії ядерних випромінювань із низьким виходом продуктів реакції.

Для з'ясування придатності монокристалів кремнію для виготовлення якісних детекторів, у даній праці досліджено такі електрофізичні параметри вихідного матеріалу: градієнт питомого опору за діаметром зливка, час життя неосновних носіїв заряду, розподіл концентрації дислокацій. Вивчався також вплив різних режимів травлення на якість поверхнево-бар'єрних переходів та величини вхідних "вікон" детекторів.

Для попередньої оцінки властивостей детекторів визначали величину і розподіл приповерхневого вигину зон на установці контактної різниці потенціалів з вібруючим мікроелектродом. Методом комбінованого ефекту поля одержували інформацію про початковий поверхневий потенціал, заряд іонізованих поверхневих електронних станів і параметри поверхневих рівнів.

Експериментально встановлено, що в разі розробки dE/dx -детекторів із товщиною чутливої області $W \leq 100$ мкм найбільш прийнятним є монокристалічний зонно-очищений кремній n -типу провідності з питомим опором $\rho \approx 1-2$ кОм-см і часом життя неосновних носіїв заряду > 500 мкс. Пластини кремнію повинні мати однорідні електрофізичні параметри за діаметром (розкид ρ і τ має складати < 30 %) та бути структурно досконалими (без дислокацій і кластерів дефектів). Для уникнення явища каналювання іонів у напрямку основної кристалографічної осі кристала [111], нарізання зразків від зливка кремнію проводили під кутом 8° до цього напрямку.

Основою для виготовлення dE/dx -детекторів з товщиною чутливої області ~ 1 мм було визначено кремній з питомим опором $\rho > 10$ кОм-см.

Для розробки детекторів використовували поверхнево-бар'єрну технологію. При такій технології (на відміну від дифузійної і планарної технологій) пластини кремнію не зазнавали впливу високотемпературної обробки, яка зазвичай зумовлює значне зниження часу життя неосновних носіїв заряду та погіршення енергетичного розділення детекторів.

Проведені дослідження показали, що поверхневий потенціал змінюється з часом після хімічної обробки кремнію і досягає в певній оточуючій атмосфері стаціонарної величини залежно від швидкості травлення і типу речовини, яку використовували для “гасіння” реакції травлення. Встановлено, що при закінченні реакції травлення за допомогою азотної кислоти, замість використання H_2O , значно зменшували швидкість окиснення, і на реальній поверхні Si формували тонший окисел (приблизно 20 Å).

Оскільки характеристики поверхнево-бар'єрних детекторів (особливо великої площі) визначаються не лише об'ємними властивостями кремнієвих кристалів, а й електрофізичними процесами на їхній поверхні, досліджували величини й розподіл поверхневого потенціалу ϕ_k хімічно протравлених пластин та кінетики його в часі.

Для створення детекторів із товщиною чутливої області в інтервалі 200—1100 мкм застосовували травники зі швидкістю травлення ~ 20 мкм/хв. Як показали вимірювання поверхневого потенціалу, тільки-но протравлена поверхня кремнію є слабко збідненою зі значною неоднорідністю ϕ_k . Необхідного значення j_k та інверсії на поверхні досягали через дві доби після витримки пластин на повітрі. Виходячи з цих результатів, формування потенціального бар'єру в контакті метал-напівпровідник dE/dx -детекторів виконували з урахуванням кінетики ϕ_k .

При хімічній поліровці кристалів для виготовлення dE/dx -детекторів з $W \leq 100$ мкм використано травники з низькою швидкістю травлення — приблизно 3,5 мкм/хв. Визначено, що за таких умов ϕ_k досягає за 2 год стабільного значення, яке відповідає збідненню за основними носіями на поверхні кристалу.

Окрім цього, при виготовленні детекторів з $W \leq 100$ мкм використано технологію послідовного травлення пластин спочатку з тильної, а потім і з передньої сторони кристала на певну глибину. Для забезпечення неінжектуючого тильного контакту товщину стравленого шару задавали так: досягнута величина швидкості поверхневої рекомбінації (s) повинна була відповідати оптимальному значенню ефективного часу життя неосновних носіїв заряду (τ_{ef}).

Проведені дослідження дали змогу встановити можливість формування тильного неінжектуючого контакту детекторів при термічному напиленні тонких шарів Ge та Al на тильну сторону кристала, який має певну швидкість поверхневої рекомбінації. Після хімічної поліровки кристалів, через певний час, на тильну поверхню послідовно напилювали методом термічного випарювання шари германію та алюмінію. Використовували p -Ge з питомим опором ~ 3 Ом·см. Оптимізація технологічного режиму процесу напилення дала можливість отримати аморфний шар α -Ge і створити нейтральну поверхню Si кристала, що дозволило врахувати вимогу формування плоских енергетичних зон на поверхні.

Після напилення Ge і Al та витримки пластин на повітрі протягом 2 діб на робочу поверхню напилювали шар золота для формування поверхнево-бар'єрної структури.

У результаті проведених експериментів виявлено можливість прискорити стабілізацію поверхневих процесів у разі прикладання до контакту Au-Si зворотної напруги порядку висоти потенціального бар'єру, що прискорювало дрейф іонів кисню крізь плівку золота

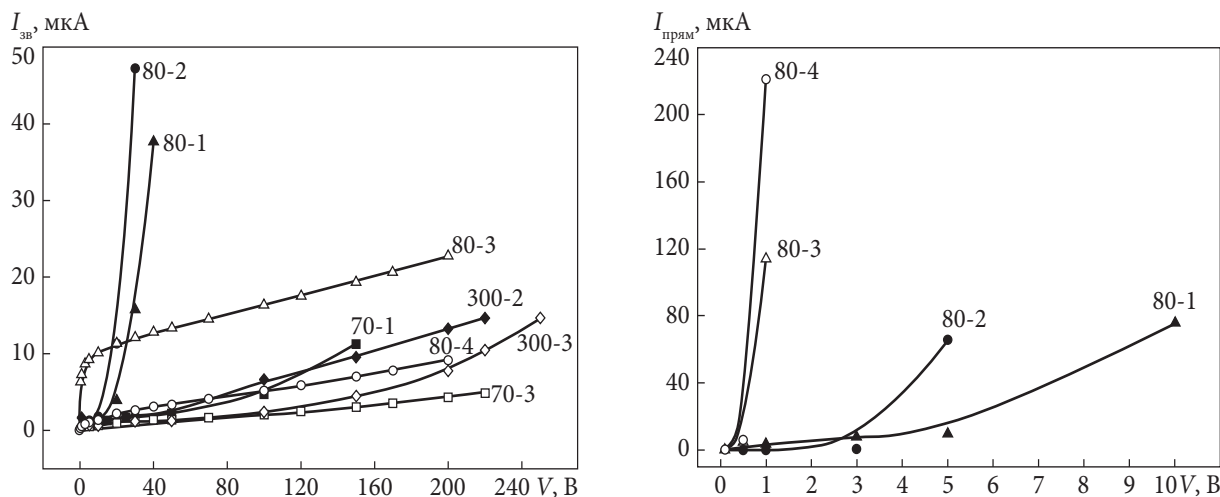


Рис. 1. Зворотні вольт-амперні характеристики dE/dx -детекторів з різними товщинами чутливої області ($W = 70, 80$ і 300 мкм); детектори № 80-1, 80-2 мають інжектуючий тильний контакт; (n -Si, $\rho = 2$ кОм·см, $S = 8$ см²)

Рис. 2. Прямі вольт-амперні характеристики dE/dx -детекторів з $W = 80$ мкм: № 80-1, 80-2 — бар'єр на тильному контакті; № 80-3, 80-4 — тильний контакт омичний

до поверхні напівпровідника. Для формування якісних і стабільних поверхнево-бар'єрних p — n -переходів проведено витримку зразків в атмосфері вологого кисню. Комплекс зазначених технологічних удосконалень дав можливість розробити прискорену технологію виготовлення поверхнево-бар'єрних структур зі стабільними параметрами.

На рис. 1 наведено типові зворотні вольт-амперні характеристики розроблених dE/dx -детекторів із товщинами чутливої області $W = 70, 80$ і 300 мкм і робочою площею $S = 8$ см². Детектори мають низький рівень зворотного струму ($< 0,2$ мкА·см⁻²) із основною компонентою зворотного струму генераційного характеру при напругах, які відповідають поширенню чутливої області до тильного контакту.

Вплив параметрів тильного контакту продемонстровано на рис. 2, де представлено прямі вольт-амперні характеристики dE/dx -детекторів із омичним тильним контактом (детектори № 80-3, 80-4) і за наявності потенціального бар'єру з тильної сторони детектора (детектори № 80-1, 80-2). Високий рівень інжекції з тильного контакту проявляється в різкому збільшенні зворотного струму (див. рис. 1, детектори № 80-1, 80-2), що призводить до високого рівня шумів детекторів.

За насиченням вольт-ємнісних (C-V) характеристик детекторів було визначено напругу повного збіднення об'єму кристала, коли i -область поширилася від переднього до тильного контакту.

Спектрометричні характеристики dE/dx -детекторів визначали при опроміненні атестованим трикомпонентним α -джерелом ($E_{\alpha 1} = 4,821$ МеВ, $E_{\alpha 2} = 5,156$ МеВ, $E_{\alpha 3} = 5,467$ МеВ) з боку вхідного і вихідного "вікон". На рис. 3, а і б наведено спектри, зняті за допомогою dE/dx -детектора з товщиною чутливої області 1100 мкм, площею 8 см² при зворотній напрузі 300 В. Накладання вимірних спектрів (рис. 3, в) показує практичну відсутність різниці величин для вхідного і вихідного "вікон". Напруженість електричного поля в розро-

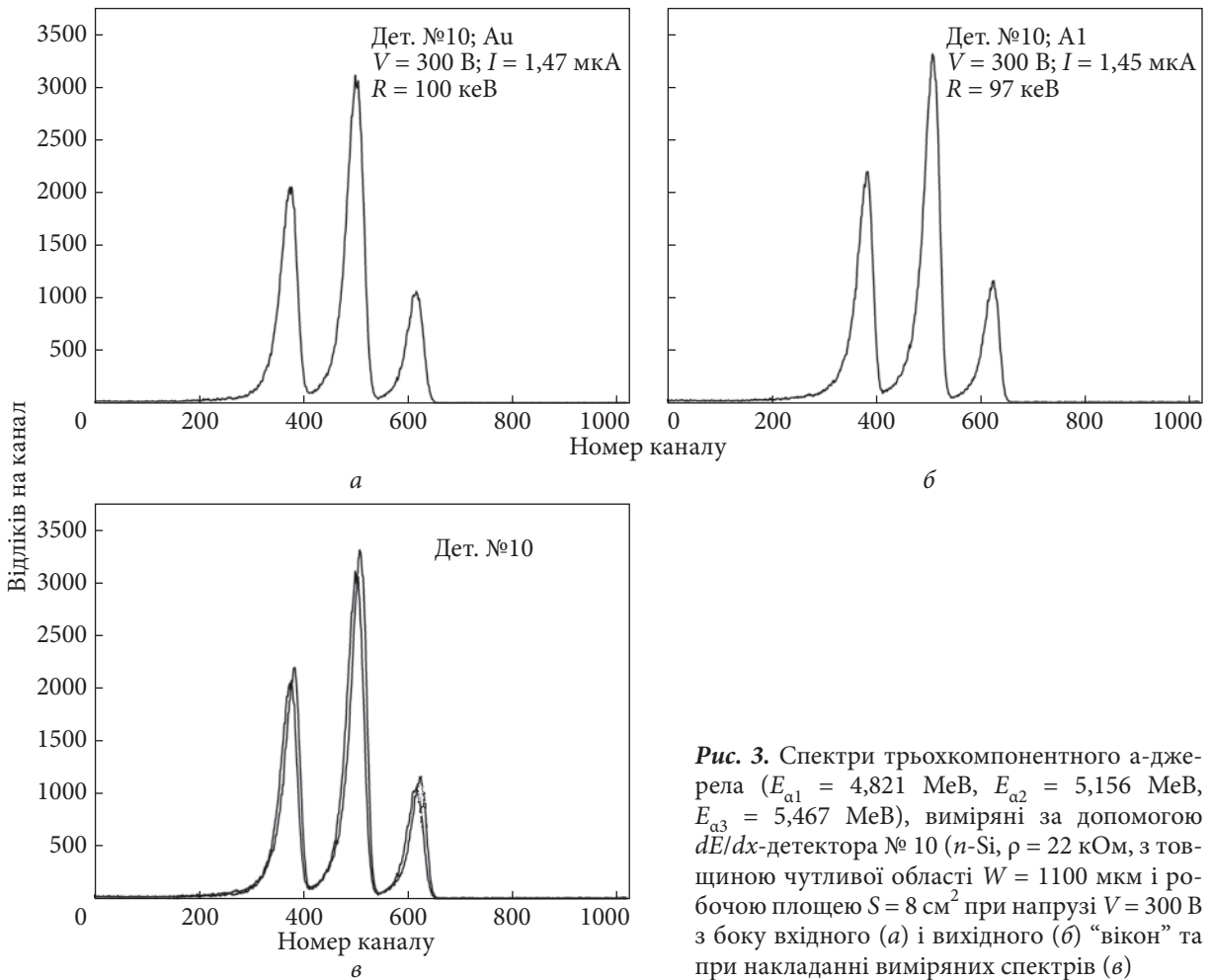


Рис. 3. Спектри трьохкомпонентного α -джерела ($E_{\alpha 1} = 4,821$ MeВ, $E_{\alpha 2} = 5,156$ MeВ, $E_{\alpha 3} = 5,467$ MeВ), виміряні за допомогою dE/dx -детектора № 10 (n -Si, $\rho = 22$ кОм, з товщиною чутливої області $W = 1100$ мкм і робочою площею $S = 8$ см² при напрузі $V = 300$ В з боку вхідного (а) і вихідного (б) “вікон” та при накладанні вимірних спектрів (в))

блених детекторах складала близько 10^4 В/см, що було цілком достатнім для використання їх в експериментах із важкими зарядженими частинками, які утворюють високу густину іонізації вздовж треку.

Висновки. У даній праці проведено комплексне дослідження електрофізичних властивостей високоомного кремнію n -типу провідності, виявлено низку особливостей фізичних процесів формування поверхнево-бар'єрних структур та оптимізовано технологію виготовлення високоякісних кремнієвих спектрометричних детекторів зі стабільними параметрами. На основі оптимізованої поверхнево-бар'єрної технології з використанням високоомного кремнію n -типу великого діаметра розроблено dE/dx -детектори з робочою площею 8 см² і діапазоном товщин чутливої області від десятків мікрон до міліметра, з тонкими вхідними і вихідними “вікнами” й енергетичною роздільною здатністю R не гірше 100 кеВ. Одержані детектори можуть бути використані в складі телескопів в ядерних експериментах за участю важких іонів при низьких виходах продуктів реакцій.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Parker R.P. Semiconductor nuclear radiation detectors. *Phys. Med. Biol.* 1970. **15**, № 4. P. 605—620. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/15/4/201>
2. Sahoo D. Al/Au/n-Si/Al Surface Barrier Detector. Proceedings of the DAE Symposium on Nuclear Physics. 2014. **59**. P. 868—869. <https://www.symnpnp.org/proceedings/>
3. Sannakki B., Devendrappa M. Measurement of energy loss of light ions using silicon surface barrier detector. *Int. J. Res. Eng. Technol.* 2014. **03**, № 03. P. 286—289. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0315055>
4. Kim S., Park S.H., Ha J.H., Cho S.Y., Kim Y.K. Characteristics of Silicon Surface Barrier Radiation Detectors for Alpha Particle Detection. *J. Korean Phys. Soc.* 2008. **52**, № 6. P. 1754—1758. <https://doi.org/10.3938/jkps.52.1754>
5. Lutz G. Semiconductor Radiation Detectors. Device Physics. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 353 p.
6. Cywiak M., Iturbe J.L., Gallardo R., Bulbulian S. Surface barrier detector device and its application to alpha spectroscopy. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1988. **126**, № 2. P. 145—151. <https://doi.org/10.1007/BF02162433>
7. Muggleton A.H.F. Semiconductor devices for gamma ray, X ray and nuclear radiation detection. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 1972. **5**, № 5. P. 390—404. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/5/5/001>
8. Von Dincklage R.-D., Gerl J. The response function of a Si(Li) detector for monoenergetic electrons. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 1985. **235**, № 1. P. 198—199. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90262-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90262-1)
9. Zhang Y., Whitlow H.J. Response of Si p-i-n diode and Au/n-Si surface barrier detector to heavy ions. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 2002. **190**, № 1—4. P. 383—386. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)01240-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01240-X)
10. Акимов Ю.К., Игнат'єв О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.
11. Sharma R.P. Development of high resolution silicon surface barrier detectors. *Pramana-J. Phys.* 1988. **31**, № 3. P. 185—195. <https://doi.org/10.1007/BF02848805>
12. Khandaker M.U. High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry. *Int. J. Fundam. Phys. Sci.* 2011. **1**, № 2. P. 42—46. <https://doi.org/10.14331/ijfps.2011.330011>
13. England J.B.A., Hammer V.W. A new type of non-injecting back contact for totally depleted silicon surface barrier detectors. *Nucl. Instr. Meth.* 1971. **96**, № 1. P. 81—83. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(71\)90440-X](https://doi.org/10.1016/0029-554X(71)90440-X)
14. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytráček R., Cooperman G., Cosmo G., Degtyarenko P., Dell'Acqua A., Depaola G., Dietrich D., Enami R., Feliciello A., Ferguson C., Fesefeldt H., Folger G., Foppiano F., Forti A., Garelli S., Giani S., Giannitrapani R., Gibin D., Gómez Cadenas J.J. Geant4 — a simulation toolkit. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2003. **506**, № 3. P. 250—303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
15. Stojanovic M., Osmokrovic P., Boreli F., Novković D., Webb R. Characteristics of large area silicon surface barrier detectors. *Thin Solid Films.* 1997. **296**, № 1—2. P. 181—183. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)09334-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)09334-0)

Надійшло до редакції 15.01.2024

REFERENCES

1. Parker, R. P. (1970). Semiconductor nuclear radiation detectors. *Phys. Med. Biol.*, 15, No. 4, pp. 605-620. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/15/4/201>
2. Sahoo, D. (2014). Al/Au/n-Si/Al Surface Barrier Detector. Proceedings of the DAE Symposium on Nuclear Physics., 59, pp. 868-869. <http://www.symnpnp.org/proceedings/>
3. Sannakki, B. & Devendrappa, M. (2014). Measurement of energy loss of light ions using silicon surface barrier detector. *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 03, No. 03, pp. 286-289. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0315055>
4. Kim, S., Park, S. H., Ha, J. H., Cho, S. Y. & Kim, Y. K. (2008). Characteristics of Silicon Surface Barrier Radiation Detectors for Alpha Particle Detection. *J. Korean Phys. Soc.*, 52, No. 6, pp. 1754-1758. <https://doi.org/10.3938/jkps.52.1754>
5. Lutz, G. (2007). Semiconductor Radiation Detectors. Device Physics. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
6. Cywiak, M., Iturbe, J. L., Gallardo, R. & Bulbulian, S. (1988). Surface barrier detector device and its application to alpha spectroscopy. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 126, No. 2, pp. 145-151. <https://doi.org/10.1007/BF02162433>
7. Muggleton, A. H. F. (1972). Semiconductor devices for gamma ray, X ray and nuclear radiation detection. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 5, No 5, pp. 390-404. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/5/5/001>

8. Von Dincklage, R.-D. & Gerl, J. (1985). The response function of a Si(Li) detector for monoenergetic electrons. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 235, No. 1, pp. 198-199. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90262-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90262-1)
9. Zhang, Y. & Whitlow, H. J. (2002). Response of Si p-i-n diode and Au/n-Si surface barrier detector to heavy ions. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 190, No. 1-4, pp. 383-386. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)01240-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01240-X)
10. Akimov, Yu. K., Ignat'yev, O. V., Kalinin, A. I. & Kushniruk, V. F. (1989). Semiconductor detectors in experimental physics. Moscow: Energoatomizdat (in Russian).
11. Sharma, R. P. (1988). Development of high resolution silicon surface barrier detectors. Pramana-J. Phys., 31, No. 3, pp. 185-195. <https://doi.org/10.1007/BF02848805>
12. Khandaker, M. U. (2011). High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry. Int. J. Fundam. Phys. Sci., 1, No. 2, pp. 42-46. <https://doi.org/10.14331/ijfps.2011.330011>
13. England, J. B. A. & Hammer, V. W. (1971). A new type of non-injecting back contact for totally depleted silicon surface barrier detectors. Nucl. Instr. Meth., 96, No. 1, pp. 81-83. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(71\)90440-X](https://doi.org/10.1016/0029-554X(71)90440-X)
14. Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Chytracsek, R., Cooperman, G., Cosmo, G., Degtyarenko, P., Dell'Acqua, A., Depaola, G., Dietrich, D., Enami, R., Feliciello, A., Ferguson, C., Fesefeldt, H., Folger, G., Foppiano, F., Forti, A., Garelli, S., Giani, S., Giannitrapani, R., Gibin, D. & Gómez Cadenas, J. J. (2003). Geant4 — a simulation toolkit. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A., 506, No. 3, pp. 250-303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
15. Stojanovic, M., Osmokrovic, P., Boreli, F., Novković, D. & Webb, R. (1997). Characteristics of large area silicon surface barrier detectors. Thin Solid Films, 296, No. 1-2, pp. 181-183. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)09334-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)09334-0)

Received 15.01.2024

G.P. Gaidar, <https://orcid.org/0000-0003-2077-3484>

S.V. Berdnichenko

V.G. Vorobyov

V.I. Kochkin

V.F. Lastovetskiy

P.G. Litovchenko

Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

PECULIARITIES OF PHYSICAL PROCESSES OF FORMATION OF SILICON SURFACE-BARRIER STRUCTURES

Semiconductor detectors occupy a prominent place among nuclear spectrometry instruments and are used to study the spectral composition, intensity, spatial and angular distributions of ionizing particles. Silicon is the most attractive material for detector production due to the advanced silicon technology and the possibility of creating not only dosimetric and radiometric, but also spectrometric detectors. Silicon-based semiconductor detectors are used to detect charged particles, as well as gamma quanta, including those with an energy of less than 100 keV and X-ray radiation.

The results of a comprehensive study of the properties of the initial high-resistive *n*-Si with the aim of improving the technology of manufacturing silicon spectrometric semiconductor detectors with predetermined parameters were generalized. For plane-parallel etching of silicon crystals, methods of chemical treatment of the Si surface have been developed by selecting the composition of etchants based on high-purity acids. A method of accelerated formation of surface-barrier structures by applying an external electric field at the stage of their formation was proposed. Conditions for holding the structures for optimal formation of high-quality and stable surface-barrier *p-n* junctions were determined. On the basis of an optimized surface-barrier technology using large-diameter high-resistance *n*-Si, *dE/dx*-detectors have been developed with a working area of 8 cm² and a range of thicknesses of the sensitive area from tens of microns to a millimetre, with thin input and output “windows” and an energy resolution no worse than 100 keV. The obtained detectors can be used in consisting of telescopes in nuclear experiments involving heavy ions at low yields of reaction products.

Keywords: *high-resistance silicon, surface-barrier structures, semiconductor detectors, spectrometry of nuclear radiations.*