

М. С. Кукурудзяк^{1,2}

Вплив структури охоронних кілець на темнові струми кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів

¹Акціонерне товариство «Центральне конструкторське бюро Ритм», Україна, Чернівці, mykola.kukurudzyak@gmail.com

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, Чернівці

У статті досліджено вплив структури системи охоронних кілець (ОК) на темнові струми чутливих елементів (ФЧЕ) та власне охоронних кілець кремнієвих 4-елементних $p-i-n$ фотодіодів (ФД). Зразки виготовлені на основі p -кремнію за планарною технологією. Виготовлено зразки з одним, двома та трьома ОК. Було встановлено, що збільшення кількості n^+ -ОК не зменшує темновий струм ФЧЕ. Але зі збільшенням кількості n^+ -ОК збільшується ймовірність крайового пробою n^+ - p -переходу в областях виходу гетеропереходу ОК на поверхню. Зменшити рівні темнового струму ФЧЕ та ОК можна шляхом поєднання захисних областей n^+ - та p^+ -, де p^+ -ОК є областю обмеження каналів витоку темнового струму, ізотипних з матеріалом підкладки. ФД виконано з p^+ -ОК по периферії кристала у вигляді концентричного кільця, а також з p^+ -областю по всій периферії кристала. Це дозволяє знизити рівень темнового струму n^+ -ОК за рахунок зменшення площі збору носіїв заряду з поверхні. Але істотного зменшення темнового струму ФЧЕ в таких випадках не спостерігалось. Нами запропоновано здійснювати дифузію бору в проміжках між ФЧЕ та між ФЧЕ та n^+ -ОК.

Ключові слова: кремній, фотодіод, темновий струм, охоронне кільце.

Подано до редакції 18.05.2023; прийнято до друку 26.10.2023.

Вступ

В останні десятиліття в світі виросла цікавість до розробки приладів здатних реєструвати світлові потоки малої потужності. Ефективно це завдання виконують кремнієві фотоприймачі, широкоживаними представниками яких є $p-i-n$ фотодіоди (ФД). Параметр, який визначає мінімально можливий рівень детектованого оптичного випромінювання є темновий струм (I_m). Цей параметр може залежати від різних факторів: площі фоточутливого елемента (ФЧЕ), міри легування ФЧЕ [1], наявності дефектів на поверхні та об'ємі підкладки, наявності неконтрольованих домішок, внесених під час виготовлення ФД [2] та ін.

Зворотний (темновий) струм у $p-n$ -переходах, утворюється за рахунок теплової генерації пар вільних носіїв заряду (НЗ) в області просторового заряду ОПЗ [3] та поруч із ОПЗ (на відстані порядку дифузійної

довжини НЗ). Ця генерація відбувається через глибокі енергетичні центри генерації – рекомбінації, які розташовані поблизу середини забороненої зони напівпровідника. Найбільший внесок в утворення зворотного струму $p-n$ -переходів ФЧЕ вносять ті області, у яких час життя НЗ мінімальний. Зазвичай мінімальний час життя НЗ мають на поверхні з високою швидкістю поверхневої рекомбінації. Якщо на таку поверхню виходять краї планарних $p-n$ -переходів ФЧЕ, то саме ці крайові ділянки можуть бути місцем переважної генерації зворотного струму.

Темновий струм ФД складається із трьох складових: дифузійної, генераційно-рекомбінаційної (об'ємної) ($I_m^{gen.}$) та поверхневої (поверхнево-генераційної) ($I_m^{nov.}$). $I_m^{nov.}$ можна визначити з формулою (1) [2]:

$$I_T^{пов.} = \frac{eN_{ss}v_{dp}\sigma_{ss}A_{p-n}}{2} \quad (1)$$

де e – заряд електрона, v_{op} – швидкість дрейфу НЗ, σ_{ss} – переріз захоплення, N_{ss} – густина поверхневих станів, A_{p-n} – площа $p-n$ переходу.

Як видно з (1) I_m^{nov} прямопропорційний густині поверхневих станів та площі збирання неосновних НЗ на поверхні. Але дана площа може сильно змінюватися за рахунок утворення на поверхні високоомного $p-Si$ інверсійного шару n -типу, що утворює поверхневі провідні канали внаслідок наявності заряду в пасивуючому SiO_2 та на межі $Si-SiO_2$. Утворений інверсійний шар контактуючи із n^+ -ФЧЕ збільшує площу чутливого елемента вздовж поверхні. При достатній величині позитивного заряду та розширенні інверсійного каналу на всю площу кристалу, можливе збільшення площі ФЧЕ вздовж поверхні до краю кристалу.

Загальні причини появи інверсійних шарів давно відомі та вивчені [4, 5]. Ключовим фактором їх утворення є збільшення питомого опору, оскільки при збільшенні ρ матеріалу потрібна менша кількість домішок для зміни поверхневої провідності на протилежну [6]. В більшості випадків на кремнії p -типу з $\rho = 1-10$ Ом·см вже присутній інверсійний шар [7]. У випадку проведення термічних операцій, технологічними причинами появи інверсії є неналежна хімічна обробка підкладок, наявність домішок лужних металів в деіонізованій воді, кварцовій посуді, чи кварцовому реакторі та газаносіях. Мінімізувати імовірність появи інверсійних шарів можна чітким контролем газів-носіїв, деіонізованої води на наявність лужних металів, та періодичним продуванням кварцових реакторів парами соляної кислоти.

Крім описаних заходів запобігання появи та впливу інверсійного шару запропоновано використання т. зв. охоронних кілець (ОК), які «обривають» поверхневий канал та обмежують поверхневу складову темного струму. Спочатку системи ОК використовувались в силових транзисторах для збільшення напруги крайового пробою [8, 9]. Зокрема в [8] представлено моделювання потужного n -канального ДМОН-транзистора з пробивною напругою стік-витік більше 870 В, при чому описаний транзистор володів системою із 7 ОК. Із розвитком твердотільної електроніки та зростанням потреб в виробках, зокрема фотоприймачах, з високою робочою напругою, охоронні кільця були запозичені і в інші сфери. Так в [10] наведено моделювання конструкції лавинних ФД на основі $p-Si$ з чотирма ОК n^+ -типу та одним p^+ -типу для реєстрації малопотужних світлових потоків. В [11] досліджено діод з бар'єром Шоткі з плаваючими захисними кільцями. Утворено систему із 23 ОК, та методом ЕВІС-аналізу показано, що електричне поле зникає на 5-му ОК, що робить 17 наступних кілець неважливими.

Охоронні кільця також запозичені і в технології кремнієвих $p-i-n$ ФД. Зокрема в [12] змодельовано та досліджено кремнієвий $p-i-n$ ФД з двома ОК, а в [13] досліджувався $p-i-n$ ФД на основі $n-Si$ із 3-ма ОК: два p^+ -типу та одним периферійним n^+ -типу. При огляді промислових зразків, побачено, що деякі ФД виготовляються без ОК (ФД QP154-Q, First,

Німеччина [14]) чи з одним ОК (ФД YAG-555-4, Excelitas Technologies Corp, Тайвань [15]). Тож з літератури та технічних джерел побачено, що думки з приводу структури системи охоронних кілець фотоприймачів сильно відрізняються, тому враховуючи потребу промисловості в розробці та виробництві високонадійних кремнієвих $p-i-n$ ФД, вирішено експериментально дослідити вплив системи охоронних кілець на параметри ФД, зокрема темнові струми фоточутливих елементів.

I. Експериментальна частина

Дослідження проводилось при виготовленні кремнієвих квадрантних $p-i-n$ ФД для роботи при зворотньому зміщенні $U_{зм}=120$ В на основі кремнію p -типу провідності з питомим опором $\rho \approx 16-20$ кОм·см. Товщина підкладки сягала 460-480 мкм. Технологічний маршрут виготовлення ФД складався з комбінації термічних операцій та фотолітографій. Спочатку кремнієві підкладки окислялись за принципом сухе-вологе-сухе [16] окиснення для утворення маскуючого покриття товщиною $h_{SiO_2} \approx 0,7-0,8$ мкм. Далі після фотолітографії проводилась двостадійна дифузія фосфору з планарних джерел в атмосфері азоту, для утворення ФЧЕ-ів та охоронного кільця (ОК) n^+ -типу. Поверхнева концентрація домішки після першого етапу дифузії (утворення тонкого поверхневого високолегованого шару) складала

$N_0 = 1,1-1,3 \cdot 10^{21}$ см⁻³. Наступний етап дифузії фосфору в атмосфері сухого кисню при вищій температурі для збільшення глибини n^+ - p -переходу (x_{n+p}), перерозподілу домішки та утворення просвітлювального покриття, поверхнева концентрація домішки після даної операції складала $N_0 = 4-4,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ [1]. Далі після хімікодинамічного полірування (ХДП) зворотньої сторони підкладки дифузія бору для створення омичного контакту p^+ -типу та гетерування генераційно-рекомбінаційних центрів [17]. Наступна операція - напилення $Cr-Au$ з підшаром Cr для утворення контактів, далі приварювання виводів до контактних площадок, збірні роботи, розміщення кристалу в корпусі та герметизація.

Для утворення p^+ -ОК проводилась додатково дифузія бору в лицеву сторону підкладки.

Досліджувались різні комбінації систем n^+ - та p^+ -ОК.

II. Результати та обговорення досліджень

2.1. Фотодіоди із n^+ -охоронними кільцями.

Рівень I_m ФЧЕ залежить від рівня темного струму ОК (I_{OK}), оскільки при наявності інверсійних шарів, можливе перетікання носіїв заряду з ОК в ФЧЕ. Особливо це спостерігається при підвищених температурах внаслідок зростання провідності інверсійних каналів. Для порівняння рівнів темного струму ФЧЕ та ОК від структури системи охоронних кілець виготовлено ФД із 1-м, 2-ма та 3-ма n^+ -ОК.

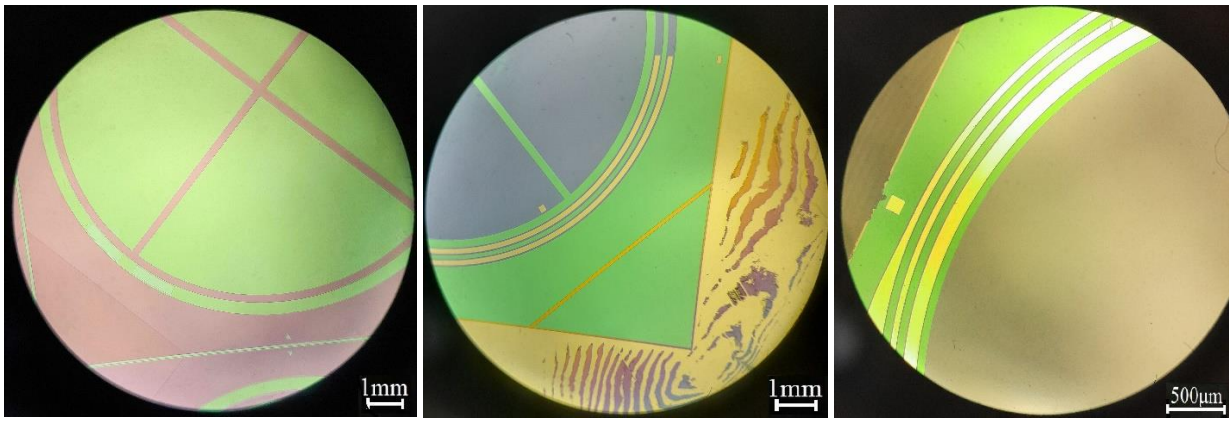


Рис. 1. Зображення кристалу ФД з: а) 1-м n^+ -ОК; б) 2-ма n^+ -ОК; в) 3-ма n^+ -ОК.

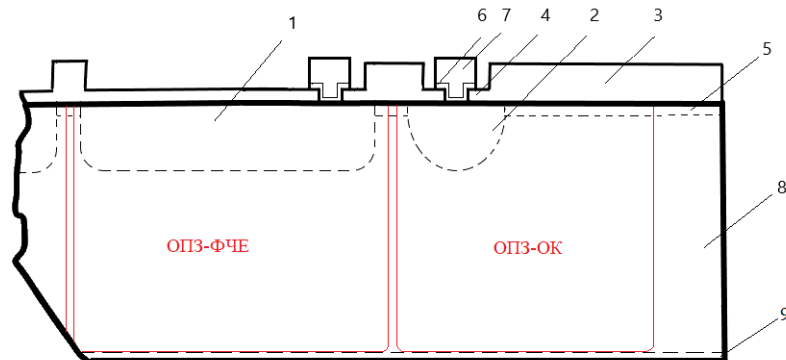


Рис. 2. Схематичний переріз частини кристалу ФД: 1 – n^+ -ФЧЕ; 2 – n^+ -ОК; 3 – маскуючий SiO_2 ; 4 – просвітлюючий SiO_2 ; 5 – n^+ -інверсійний шар; 6 – підшар хрому; 7 – контактна площадка-Au; 8 – підкладка $p\text{-Si}$; 9 – омічний p^+ - Si .

У випадку одного ОК, то даним елементом при зворотному зміщенні «збираються» носії заряду не лише з площі ОК, а і з периферії кристалу (покритої інверсійним шаром), торців та половини зазору між ФЧЕ та ОК. Збір носіїв заряду відбувається за рахунок розширення ОПЗ ОК при збільшенні $U_{зм}$ як в товщу кристалу, так і до периферії (рис. 2).

Відмітимо, що при невисокій $U_{зм}$ та великому розміру периферії кристалу ОПЗ-ОК не досягає до краю кристалу. Ширину ОПЗ W_i можна визначити з рівняння [1]:

$$W_i = \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U_{оп})}{eN_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

де $\varepsilon, \varepsilon_0$ - діелектричні сталі для кремнію і вакууму відповідно, φ_k - контактна різниця потенціалів, N_A - концентрація домішки в підкладці.

Так, в випадку, зображеному на Рис. 1а відстань від ОК до краю кристалу складає 800 мкм. А для підкладки з питомим опором $\rho=18$ кОм·см ($N_A=7,7 \cdot 10^{11}$ см⁻³) та $U_{зм}=120$ В згідно рівняння (2) $W_i \approx 490$ мкм. Зауважимо, що після термічних операцій можливе деяке зменшення питомого опору базового матеріалу [18], що дещо знизить W_i . Тож в описаному випадку носії заряду з торців кристалу не беруть участі в утворенні темного струму ОК.

Отримано вольт-амперні характеристики темного струму ФЧЕ (I_m кожного ФЧЕ однакові) та ОК фотодіода (Рис. 3, Рис. 4), кристал якого

зображено на Рис. 1а:

З Рис. 3 можна побачити, що крива ВАХ для n^+ -ОК не виходить в насичення. Це свідчить про те, що при збільшенні напруги зворотного зміщення зростатиме W_i , що сприятиме зростанню $I_{ОК}$ поки ОПЗ не досягне краю кристалу. В момент розширення ОПЗ-ОК на всю периферію кристалу крива ВАХ вийде в насичення.

У випадку ВАХ для ФЧЕ (Рис. 4) крива виходить в насичення в момент досягнення ОПЗ зворотної сторони кристалу, відповідно подальше зростання об'ємної генераційної складової темного струму не відбувається, оскільки генераційний струм прямопропорційний W_i [1]:

$$I_T^{ген} = e \frac{n_i}{2\tau} W_i A_{ФЧЕ} \quad (3)$$

де n_i - власна концентрація носіїв заряду в підкладці, τ - час життя неосновних носіїв заряду, $A_{ФЧЕ}$ - активна площа ФЧЕ.

У випадку виготовлення ФД із 2-ма та 3-ма n^+ -ОК зниження I_m ФЧЕ не спостерігалось. Але дещо інша картина спостерігалась при вимірюванні ВАХ ОК (Рис. 5):

Зовнішнє ОК володіло рівнем темного струму приблизно таким же, як і в випадку одного n^+ -ОК. А крива ВАХ внутрішнього ОК була схожа на вольт-амперну характеристику ФЧЕ із дещо нижчим рівнем темного струму ($I_{ОК}=15$ нА) внаслідок зниження

активної площі. Насичення кривої ВАХ внутрішнього кільця також спричинене розширенням ОПЗ до протилежної сторони кристалу та обмеженням ОПЗ зі сторони зовнішнього ОК та ФЧЕ. У випадку 3-ох n^+ -ОК спостерігалась подібна картина.

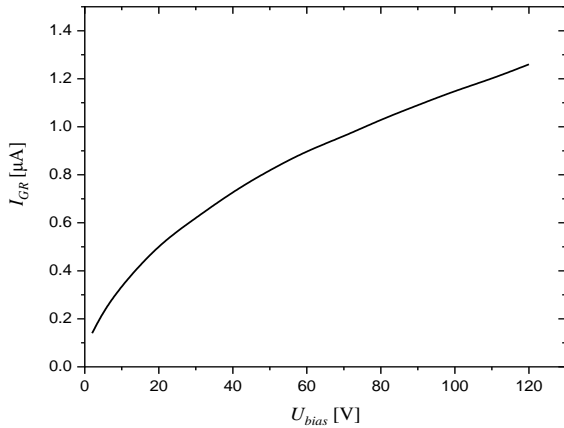


Рис. 3. ВАХ n^+ -ОК.

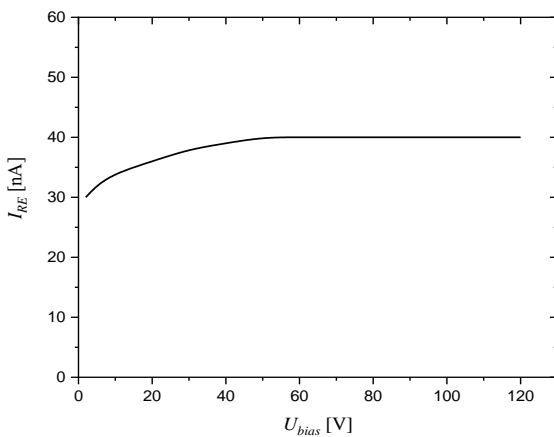


Рис. 4. б) ВАХ ФЧЕ фотодіода з одним n^+ -ОК.

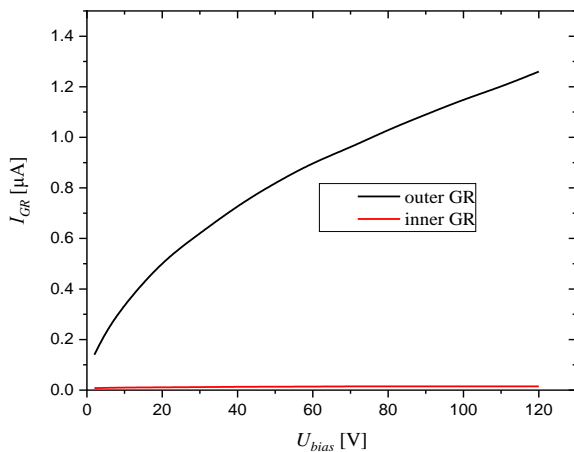


Рис. 5. ВАХ фотодіода із двома n^+ -ОК.

Тож збільшення кількості n^+ -ОК не впливає на темновий струм ФЧЕ. Але зауважимо, що при збільшенні кількості n^+ -ОК зростає імовірність крайового пробою n^+ - p -переходу в областях виходу гетеро-переходу ОК на поверхню. Оскільки p - n -перехід, внаслідок наявності клину травлення оксиду,

виходить на поверхню під гострим кутом. Дані області є місцями локалізації підвищеного рівня напруженості електричного поля, відповідно, областями із зниженою напругою пробою [19]. При утворенні кількох n^+ -ОК периметр області виходу n^+ - p -переходу на поверхню зростає тому варто використовувати структуру кристалу ФД із одним n^+ -ОК.

2.2. Фотодіоди із комбінацією n^+ - та p^+ -охоронних кілець.

Знизити рівні темного струму ФЧЕ та ОК вдається комбінуючи n^+ - та p^+ -охоронні області. Розглянемо структуру кристалу ФД із двома n^+ -ОК та одним p^+ -ОК (ФД₁). При чому p^+ -ОК розміщене на периферії кристалу (Рис. 6а). Дане p^+ -ОК являє собою область обмеження каналів витoku темного струму, ізотипну із матеріалом підкладки.

Така топологія кристалу ФД дозволяє дещо знизити рівень темного струму зовнішнього n^+ -ОК за рахунок зниження поверхневої генераційної складової, оскільки p^+ -ОК обмежує площу поверхні, покриту інверсійним шаром, з якої n^+ -ОК збирає носії заряду. Внаслідок зниження I_{OK} , можливе деяке зниження I_m ФЧЕ (а також I_{OK} -внутрішнього), але це зниження не суттєве. Зауважимо, що p^+ -ОК повинно бути розміщене на відстані від n^+ -ОК меншій W_i .

Для ефективного зниження темного струму ОК варто утворювати p^+ -область на всій периферії кристалу (Рис. 6б) (ФД₂). Мінімальна відстань від n^+ -області, на якій можна утворювати p^+ -шар являється сумою бокової дифузії фосфору та бору під оксидну маску [20]. По мірі наближення p^+ -області до n^+ -ОК зменшується площа захоплення носіїв заряду охоронним кільцем. Також дифузія бору в лицеву сторону підкладки із подальшими термічними операціями являє собою процес гетерування, де гетером виступає p^+ -область [17]. Це дозволяє знизити кількість генераційно-рекомбінаційних центрів в об'ємі периферії кристалу, а відповідно, і $I_m^{ген. ОК}$.

При виготовленні ФД із p^+ -шарами на лицевій стороні кристалу, нами запропоновано проводити дифузію бору і в зазори між ФЧЕ та між ФЧЕ і n^+ -ОК (Рис. 7). Виготовлення зразків з такою топологією не вводить додаткових технологічних операцій, потрібно лише змінити фотошаблон. Вказане дозволяє збільшити опір ізоляції ФЧЕ між собою, відповідно зростає коефіцієнт фотозв'язку. Також зростає опір ізоляції між ОК та ФЧЕ. Так, без p^+ -області опір ізоляції всіх ФЧЕ і ОК із зазором між ними 200 мкм сягає 2-15 МОм. А в випадку утворення посередині такого ж зазору p^+ -області шириною 100 мкм - 18-50 МОм. Таку структуру кристалу варто використовувати при підвищених рівнях заряду на оксиді, що унеможливило вплив інверсійних каналів на темнові струми ФЧЕ та ОК.

Для дослідження рівнів темнових струмів ФД із комбінацією n^+ - та p^+ -охоронних кілець отримано ВАХ для ФЧЕ (Рис. 8) та ОК (Рис. 9.)

Як видно з рисунку 8 найнижчим рівнем темного струму ОК володіють ФД₃ із p^+ -областями на периферії кристалу та в зазорах між активними елементами. Це спричинено зменшенням площі

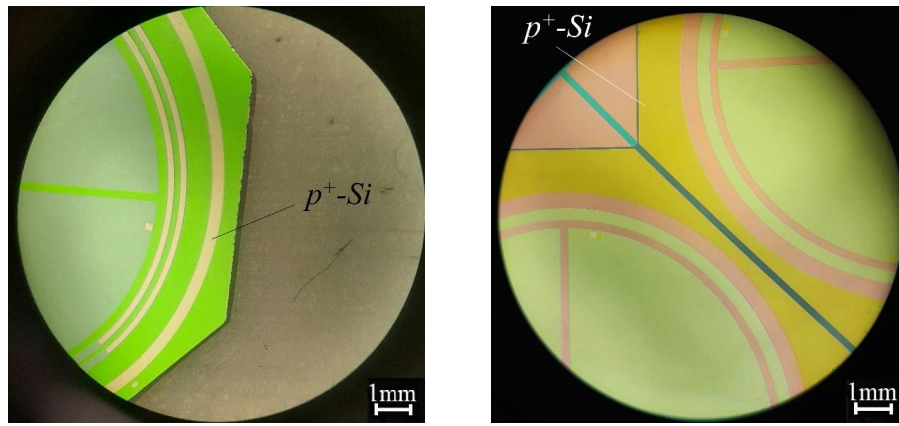


Рис. 6. Зображення кристалів фотодіодів: а) ФД₁; б) ФД₂.

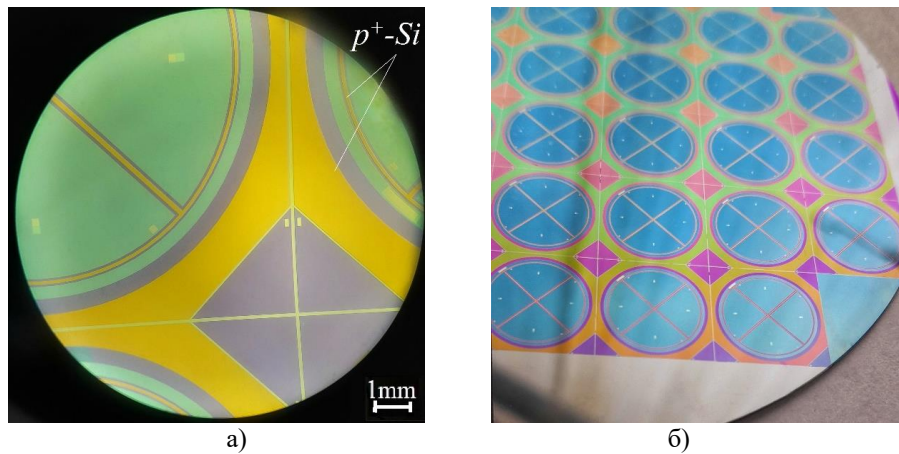


Рис. 7. Зображення кристала ФД з p^+ -областю між активними елементами та на периферії: а) фрагмент кристала; б) пластинка із завершеними кристалами; в) схематичний переріз.

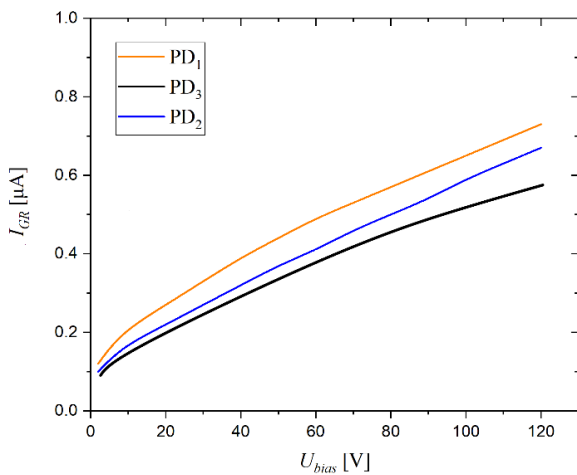
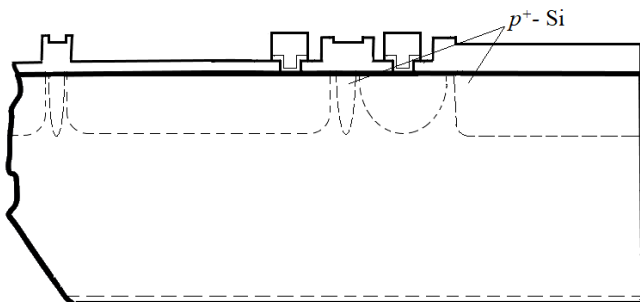


Рис. 8. ВАХ ОК ФД з комбінацією n^+ - та p^+ -охоронних областей (ФД₃).

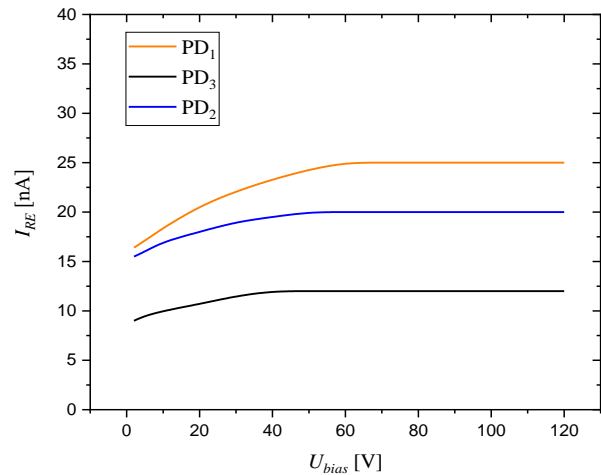


Рис. 9. ВАХ ФЧЕ ФД з комбінацією n^+ - та p^+ -охоронних областей (ФД₃).

захоплення носіїв заряду на поверхні охоронним кільцем та гетеруванням ГРЦ в об'ємі периферії кристалу. Але значення I_{OK} ФД₂ та ФД₃ відрізняються мінімально.

Інша картина спостерігалась при дослідженні ВАХ ФЧЕ (Рис. 9). I_m ФЧЕ ФД₃ були в два рази єнижчі, ніж в ФД₁, та дещо нижчі, ніж в ФД₂, внаслідок мінімізації впливу інверсійних каналів на темнові струми. Відповідно, структура системи охоронних кілець з комбінацією n^+ - і p^+ -областей, як у ФД₃, дозволяє отримати найменші темнові струми ОК і ФЧЕ з розглянутих випадків.

Висновки

Досліджено вплив структури системи охоронних кілець на темнові струми фоточувливих елементів та власне охоронних кілець кремнієвих 4-елементних р-і-п Фотодіодів. При дослідженні зроблено такі висновки:

Збільшення кількості n^+ -охоронних кілець не впливає на темновий струм фоточувливих елементів.

Оптимальною є структура із одним n^+ -ОК.

При збільшенні кількості n^+ -ОК зростає імовірність крайового пробою n^+ - p -переходу в областях виходу гетеро-переходу ОК на поверхню.

Знизити рівні темнового струму ФЧЕ та ОК вдається комбінуючи n^+ - та p^+ - охоронні області. Для ефективного зниження темнового струму ОК варто утворювати p^+ -область на периферії кристалу.

При проведенні дифузії бору і в зазори між ФЧЕ та між ФЧЕ і n^+ -ОК вдається збільшити опір ізоляції ФЧЕ між собою, а також опір ізоляції між ОК та ФЧЕ. Таку структуру кристалу варто використовувати при підвищених рівнях заряду в оксиді, що унеможливило вплив інверсійних каналів на темнові струми ФЧЕ та ОК. ФД з такою топологією володіють найнижчими рівнями темнових струмів ФЧЕ та ОК із розглянутих випадків.

Кукурудзяк Микола – інженер-технолог. Акціонерне товариство «Центральне конструкторське бюро Ритм», м. Чернівці, Україна. Чернівецький національний університет імені Ю. Федьковича, Чернівці, Україна.

- [1] M.S. Kukurudziak, *Influence of Surface Resistance of Silicon p-i-n Photodiodes n+-Layer on their Electrical Parameters*, Physics and chemistry of solid state, 23(4), 756 (2022); <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.756-763>.
- [2] M.S. Kukurudziak, *Formation of Dislocations During Phosphorus Doping in the Technology of Silicon p-i-n Photodiodes and their Influence on Dark Currents*, Journal of nano- and electronic physics, 14(4), 04015(6cc) (2022); [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.14(4).04015).
- [3] Zi S.: *Semiconductor physics*. Moscow, Mir (1984) [in Russian].
- [4] V.M. Lytvynenko, I.M. Vikulin, *Influence of surface properties on reverse characteristics of semiconductor devices*, Bulletin of the Kherson National Technical University, (1), 46 (2018) [in Ukrainian].
- [5] Yu.O. Kruglyak, M.V. Strikha, *Physics of nanotransistors: gate voltage, surface potential, and mobile electronic charge in bulk MOS and thin SOI*, Sensor electronics and microsystem technologies, 16(2), 5 (2019); https://doi.org/10.18524/1815-7459.2019.2.171224_5.
- [6] M.S. Kukurudziak, *1064 nm wavelength p-i-n photodiode with low influence of periphery on dark currents*. Journal of nano- and electronic physics, 14(1), 01023(4pp), (2022); [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01023](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01023).
- [7] M.M. Atalla, E. Tannenbaum, E.J. Scheibner, *Stabilization of Silicon Surfaces by Thermally Grown Oxides*, Bell System Tech. J., 38, 749 (1959).
- [8] N. L. Lagunovych, *Optimization of the design of guard rings and the specific resistance of the epitaxial film of a powerful n-channel DMOP transistor*, Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical and technical sciences. 65(1), 97 (2020); <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-97-103> [in Russian].
- [9] B.S. Avset, *The effect of metal field plates on multiguard structures with floating p+ guard rings*, Nucl., Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 377(2–3), 397 (1996); [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00194-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00194-5).
- [10] N.N. Korytko, V.B. Zalessky, V.S. Malyshev, V.V. Khatko, *Simulation of the design of avalanche photodiodes with guard regions for recording low-power light fluxes*, Instruments and measurement methods, 1(2), 32 (2011) [in Russian].
- [11] Driche, Khaled, et al. *Electric field distribution using floating metal guard rings edge-termination for Schottky diodes*, Diamond and Related Materials, 82, 160 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.01.016>.
- [12] F. Rezaei, Dehghan Nayeri, F., Rezaeian, *A novel design of a silicon PIN diode for increasing the breakdown voltage*, IET Circuits, Devices & Systems, 16(6), 491 (2022); <https://doi.org/10.1049/cds2.12120>.
- [13] I.B. Chistokhin, K.B. Fritsler, *Influence of getter formation conditions in high-resistance silicon on the characteristics of PIN photodiodes*, JTP Letters, 46(21), 11 (2020); <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.21.50188.18455> [in Russian].
- [14] Data Sheet YAG-555-4. Electronic resource. Access mode: <https://www.excelitas.com/product/yag-555-4-series-quadrant-photodiodes-si-pin-141-mm>.
- [15] Data Sheet QP154-Q. Electronic resource. Access mode: <https://www.first-sensor.com/en/products/optical-sensors/detectors/quadrant-pin-photodiodes-qp/>.
- [16] S.W. Glunz, F. Feldmann, *SiO₂ surface passivation layers—a key technology for silicon solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 185, 260 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.04.029>.

- [17] M.S. Kukurudziak, E.V. Mastruk. *Features of Diffusion Doping and Boron Gettering of Silicon p-i-n Photodiodes*. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 1 (2022); <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916420>.
- [18] G.P. Gaidar, *Effect of different modes of heat treatment on the Hall parameters and lifetime of charge carriers of transmationally doped silicon crystals*. Journal of physical research, 22(4), 4601 (2018); <https://doi.org/10.30970/jps.22.4601> [in Ukrainian].
- [19] T. M. Bagaev, A. A. Abdreymov, *Modeling microplasmas pn junction*. EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR), 8(6), 139 (2022); <http://dx.doi.org/10.36713/epra2013>.
- [20] V. Jeyaselvan, S.K. Selvaraja, *Lateral Dopant Diffusion Length Measurements Using Silicon Microring Resonators*, IEEE Photonics Technology Letters, 30(24), 2163 (2018); <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2879574>.

M.S. Kukurudziak^{1,2}

The influence of the structure of guard rings on the dark currents of silicon p-i-n photodiodes

¹*Rhythm Optoelectronics Shareholding Company, Chernivtsi, Ukraine, mykola.kukurudzyak@gmail.com*

²*Yu. Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine*

The article examines the influence of the guard rings (GR) system structure on the dark currents of responsive elements (RE) and the actual guard rings of silicon 4-element p-i-n photodiodes (PD). The samples were made on the basis of p-silicon by planar technology. Samples with one, two, and three GR were produced. It was found that increasing the amount of n⁺-GRs does not reduce the dark current of the REs. But with an increase in the number of n⁺-GRs, the probability of an edge breakdown of the n⁺-p-junction in the regions of the exit of the hetero-junction of the GR to the surface increases. It is possible to reduce the levels of dark current of REs and GR by combining n⁺- and p⁺- guard regions, where p⁺-GR is a region of restriction of dark current leakage channels, isotopic with the substrate material. PD was made with p⁺-GR on the periphery of the crystal in the form of a concentric ring, as well as with a p⁺- region on the entire periphery of the crystal. This makes it possible to reduce the level of dark current of n⁺- GR due to the reduction of the area of collection of charge carriers from the surface. But a significant decrease in the dark current of REs was not observed in such cases. We proposed to carry out boron diffusion in the gaps between REs and between REs and n⁺-GR.

Keywords: silicon, photodiode, dark current, guard ring.