

М.С. Кукурудзяк<sup>1,2</sup>

## Вплив поверхневого опору $n^+$ -шару кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів на їх електричні параметри

<sup>1</sup>Акціонерне товариство «Центральне конструкторське бюро Ритм», Чернівці, Україна, [mykola.kukurudzyak@gmail.com](mailto:mykola.kukurudzyak@gmail.com)

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

Виготовлено кремнієві квадрантні  $p-i-n$  фотодіоди з різною концентрацією дифундованого фосфору в  $n^+$ -шарі. Отримано експериментальну криву розподілу домішки фосфору по глибині дифузійного шару. Вивчено вплив концентрації носіїв заряду в даному шарі на темнові струми фоточутливих елементів та охоронного кільця. Виміряно вольт-амперні характеристики фотодіодів. Побачено, що при зменшенні поверхневого опору  $n^+$ -шару, темнові струми зменшуються, зразки з поверхневим опором 1,9 – 2,4 Ohm/□ мають приблизно однаковий рівень темнових струмів фоточутливих площадок, тобто подальше збільшення концентрації носіїв заряду не вносить ніяких змін. Для темнових струмів охоронних кілець фотодіодів побачено, що вони більшою мірою залежать від стану периферії кристалу, а не від ступені легування. Виявлено вплив поверхневого опору  $n^+$ -шару на опір взаємозв'язку між фоточутливими площадками та охоронним кільцем та відсутність впливу на ємність ФД.

**Ключові слова:** фотодіод, поверхневий опір, темновий струм, охоронне кільце, опір взаємозв'язку.

Подано до редакції 09.08.2022 ; прийнято до друку 08.11.2022 р.

### Вступ

Разом із технічним прогресом оптоелектронних пристроїв та систем підвищуються вимоги до параметрів їх конструктивних елементів, зокрема фотоприймачів (ФП). Широковикористовуваними ФП є кремнієві  $p-i-n$ -фотодіоди (ФД). Вони використовуються як для цивільних, так і військових потреб: для вимірювання відстаней (далекоміри) в геодезії чи будівництві, в ракетній техніці та ін.

ФД у сучасному виробництві виготовляються за дифузійно-планарною технологією [1], визначальною операцією якої є дифузія. Саме дифузійною на поверхні кремнієвих пластин формуються фоточутливі елементи (ФЧЕ). При створенні ФЧЕ виникає завдання внесення такої концентрації легуючої домішки, яка б забезпечувала високий рівень фоточутливості при мінімальних значеннях темнових струмів. Адже при легуванні поверхневого  $n^+$ -шару підкладки збільшується його коефіцієнт поглинання, що є негативним явищем, оскільки при виготовленні

ФД потрібно забезпечувати максимальне поглинання випромінювання в високоомній  $p$ -області підкладки. Отже, визначення оптимальної концентрації легуючої домішки, яка б забезпечувала отримання низьких темнових струмів (та інших електричних параметрів) при мінімальних втратах фоточутливості є актуальним науково-технічним завданням.

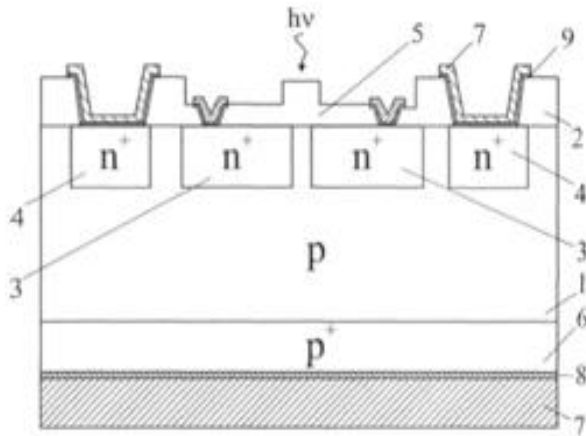
Огляд даного питання в наукових джерелах показав, що вплив концентрації легуючої домішки фосфору на параметри  $p-i-n$ -ФД не вивчені, а більшість праць присвячено дослідженню кремнієвих сонячних елементів. Так, в [2] розглянуті причини і механізми впливу поверхні на зворотні характеристики  $p-n$  структур. Зроблено огляд технологічних методів обробки структур напівпровідникових приладів, у тому числі і методів гетерування, спрямованих на запобігання впливу поверхневих ефектів на електричні параметри приладів. В [3] розглянуто механізми утворення темнового струму в  $p-i-n$ -ФД та принцип дії охоронного кільця. Досліджено вплив напруги на охоронному кільці на темновий струм ФЧЕ при різних

режимах роботи охоронного кільця. Але детальних даних про вплив легування на характеристики ФД у літературі не відображено.

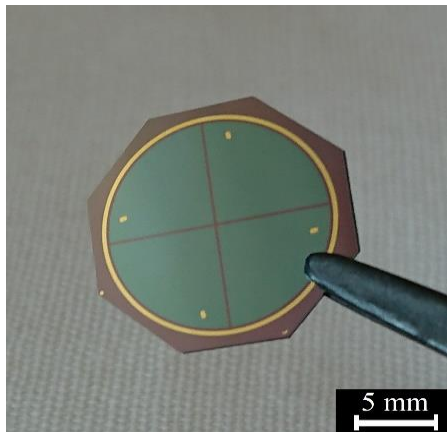
Виходячи із вказаного, метою цієї статті є дослідження впливу концентрації фосфору в  $n^+$ -шарі кремнієвих  $p-i-n$ -ФД на їх електричні параметри, зокрема темнові струми.

## I. Методика експерименту

Дослідження проводились на кремнієвих чотириелементних  $p-i-n$  ФД з охоронним кільцем (ОК)(Рис. 1, 2) з робочими напругою живлення  $U_{зм} = 120$  В та довжині хвилі  $\lambda_o = 1,064$  мкм.



**Рис.1.** Переріз кристала чотири - сегментного фотодіода: 1 – $i$ -область; 2 –маскуючий шар  $\text{SiO}_2$ ; 3 – фоточутливі площадки; 4– охоронне кільце; 5 –просвітлюючий шар  $\text{SiO}_2$ ; 6 – область, гетерована бором; 7 – шар золота; 8, 9 – підшар хрому на зворотній та лицевій стороні відповідно.



**Рис. 2.** Кристал фотодіода.

Термічні процеси, зокрема дифузія, проводились за допомогою дифузійної системи типу СДО – 125/3 – 12.

Контроль темнових струмів  $I_m$  проводився при  $U_{зм} = 120$  В. Надалі буде вказуватись густина струму  $J_m$  в  $\text{нА} / \text{мм}^2$ , яка розраховується по формулі (1).

$$J_T = \frac{I_T}{A_{ФЧЕ}} \quad (1)$$

де  $A_{ФЧЕ}$  – ефективна площа ФЧЕ.

Вимірювання поверхневого опору ( $R_S$ ) здійснювалось чотиризондовим методом [4].

## II. Експериментальна частина

При виготовленні використовувалась монокристалічний кремній  $p$ -типу з питомим опором  $\rho \approx 18$   $\text{кОм}\cdot\text{см}$ , що відповідає концентрації домішки  $N_b \approx 7,7 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-3}$ . ФД виготовлялись за дифузійно-планарною технологією при використанні двостадійної дифузії для створення фоточутливих елементів та охоронного кільця  $n^+$ -типу провідності. Спочатку проводили загонку – коротку дифузію із необмеженого джерела при  $T=1323$  К в атмосфері азоту, отримуючи в підкладці тонкий дифузійний шар. Далі проводили розгонку при  $T=1423$  К в атмосфері кисню, при цьому дифузійний шар являвся джерелом з обмеженою кількістю домішки. Після кожної із вказаних операцій проводився контроль  $R_S$ . Змінюючи час загонки отримували різні значення  $R_S$ . Тривалість розгонки завжди була однаковою для вирощування однакового просвітлюючого покриття та отримання однакової глибини  $p-n$  переходу в кожній серії ФД.

Усі результати, отримані при серійному виробництві фотодіодів. Але для чистоти експерименту та відсутності впливу різних чинників, було проведено експериментальну партію, в якій всі пластини окислялись в єдиному процесі, далі серія поділялась на підсерії і проводилась загонка фосфору з різною тривалістю, після чого єдина розгонка та дифузія бору.

Для зручності, при обговоренні досліджень буде вказуватись саме поверхневий опір отриманих зразків, адже даний параметр найчастіше використовується в практиці. Значення  $R_S$  отриманих зразків наведено в Таблиці 1.

**Таблиця 1.**

Значення поверхневого опору отриманих ФД при різній тривалості загонки

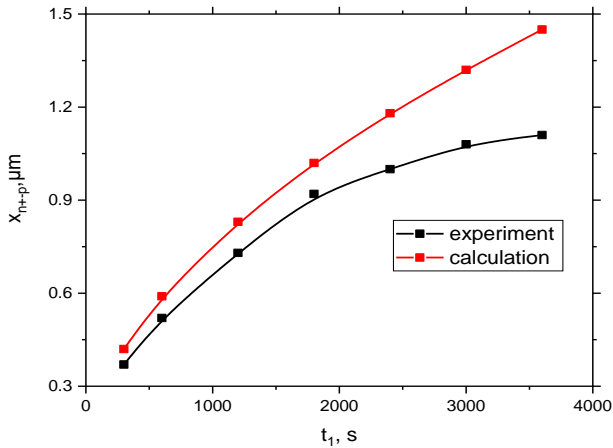
$t, c$ – час загонки	$R_S, \text{Ом}/\square$ – після загонки	$R_S, \text{Ом}/\square$ – після розгонки
300	12.7	8.1
600	8.4	5.0
1200	5.4	3.3
1800	4.1	2.7
2400	3.7	2.4
3000	3.3	2.2
3600	3.1	1.9

Але часто при виготовленні та дослідженні електронних приладів із  $p-n$ -переходами виникає потреба в попередньому визначенні глибини гетеропереходу (в даному випадку  $n^+-p$ -переходу  $x_{n+p}$ ) та розподілу концентрації домішок для отримання заданих значень ( $N_{x,t}$ ). Ці параметри можна визначити як розрахунковим методом так і експериментальним на контрольних зразках. Так  $x_{n+p}$  після загонки, згідно [5], можна оцінити за формулою (2):

$$x_{n+p} = 5,4\sqrt{D_1 t_1} \quad (2)$$

де  $D_1$  – коефіцієнт дифузії при  $T=1323$  К,  $D_1=2\cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с [6];  $t_1$  – тривалість загонки.

Глибина гетеропереходу також була визначена експериментально методом косого шліфа [7]. Експериментальний та розрахунковий графіки залежності  $x_{n+p}$  від тривалості загонки зображено на рис. 3.



**Рис. 3.** Експериментальний та розрахунковий графіки залежності глибини гетеропереходу від тривалості загонки.

Як бачимо з рис. 3 експериментальні значення добре варифікуються із теоретичними з деяким відхиленням.

Поверхневу концентрацію ( $N_0$ ) внесених домішок можна визначити із формули провідності напівпровідника  $n$ -типу (3) [8], виразивши електропровідність через питомий опір:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = en\mu_n \quad (3)$$

де  $\sigma$  – електропровідність напівпровідника;  $\rho$  – питомий опір;  $e$  – заряд електрона;  $n$  – концентрація електронів;  $\mu_n$  – рухливість електронів.

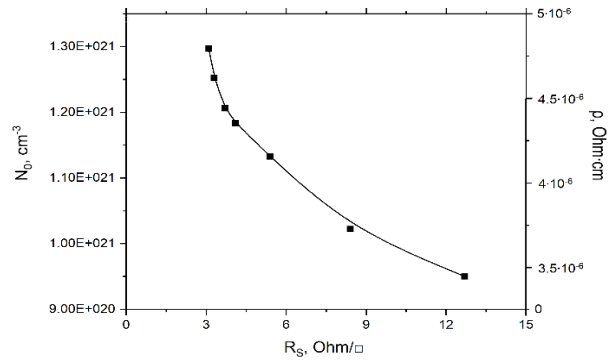
Вважаючи, що всі внесені домішки фосфору іонізовані та  $N_0=n$ , для поверхневої концентрації отримаємо:

$$N_0 = \frac{1}{e\rho\mu_n} \quad (4)$$

Відповідно для визначення  $N_0$  потрібно знати  $\rho$  після загонки фосфору, що можна визначити із формули [8]:

$$R_S = \frac{\rho}{x_{n+p}} \quad (5)$$

Результати розрахунку поверхневої концентрації і питомого опору та їх залежності від поверхневого опору наведено на рис. 4.



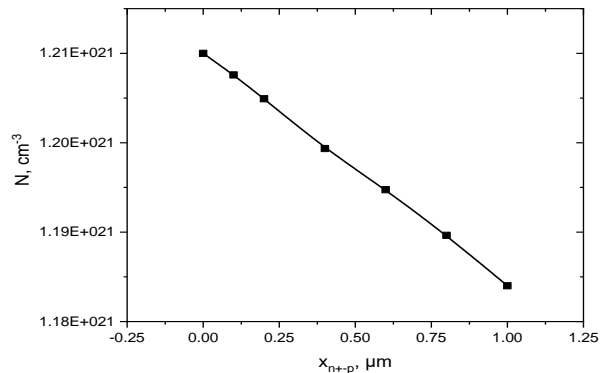
**Рис. 4.** Залежність поверхневої концентрації і питомого опору від поверхневого опору.

Знаючи поверхневу концентрацію Фосфору після загонки, можна визначити розподіл концентрації домішки по глибині  $p$ -переходу  $N_{x,t}$  за формулою [5]:

$$N_{x,t} = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} \quad (6)$$

де  $\operatorname{erfc}(x)$  – додаткова функція помилок.

Ця характеристика гетеропереходу при двохстадійній дифузії слугує лише для оцінки рівномірності обмеженого джерела дифузанта. Проведемо розрахунок для одного варіанту тривалості дифузії, наприклад при  $t_1=2400$  с. Результати розрахунку розподілу домішки після загонки зображені на рис. 5.



**Рис.5.** Розрахунковий графік розподілу фосфору після загонки тривалістю  $t_1=2400$  с.

Куди важливішими параметрами  $p$ - $n$ -переходу фотодіодів є кінцева глибина гетеропереходу та кінцевий розподіл концентрації домішки в  $n^+$ -шарі. Відмітимо що після розгонки фосфору проводять ще дифузії бору в тильну сторону кристала при  $T=1223$  К. Але при проведенні нами дослідження зміни  $x_{n+p}$  до і після останньої термічної операції зростання глибини  $p$ - $n$ -переходу не спостерігалось, оскільки:

$$D_3 t_3 \ll D_2 t_2 \quad (7)$$

де  $D_2$  – коефіцієнт дифузії фосфору при  $T=1423$  К,  $D_2=10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с [6];  $t_2$  – тривалість розгонки фосфору,  $t_2=5100$  с;  $D_3$  – коефіцієнт дифузії фосфору при  $T=1223$  К;  $t_3$  – тривалість дифузії бору.

Відповідно кінцеву  $x_{n+p}$  в даному випадку формує саме розгонка фосфору. Даний параметр можна оцінити за формулою [9]:

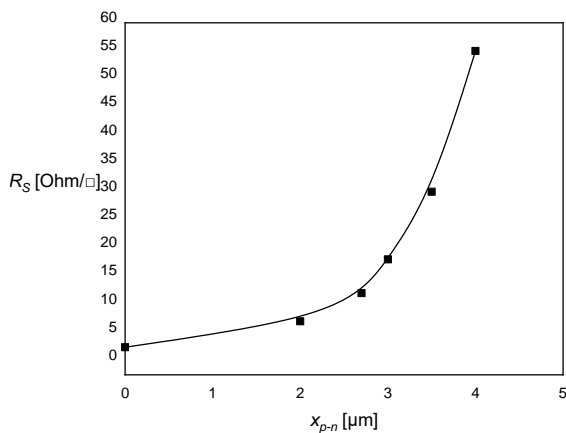
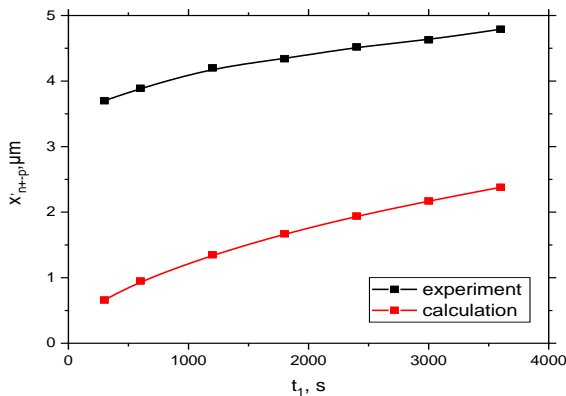
$$x_{n+p} = 2\sqrt{D_1 t_1} \cdot \sqrt{\ln \frac{Q}{N_b \sqrt{\pi D_2 t_2}}} \quad (8)$$

де  $Q$  – доза легування (кількість домішки, яка поступає в кремній під час загонки).

Дозу легування можна визначити з рівняння (9) [5]:

$$Q = 2N_0 \left( \frac{D_1 t_1}{\pi} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Отрmano розрахунковий графік залежності  $x'_{n+p}$  від тривалості загонки згідно (8), та для порівняння отримано такий же графік експериментальним шляхом (Рис. 6). З рисунку можна побачити погану варифікацію розрахункових даних та експериментальних. Першою причиною є повільне охолодження пластин після розгонки, що збільшує глибину гетеропереходу, а в (8) це не враховано. Також імовірною причиною розбіжності можливе емпіричне походження деяких рівнянь, використовуваних для розрахунку процесів дифузії, які були отримані для низькоомного кремнію.



а)

**Рис. 6.** Експериментальний та розрахунковий графіки залежності глибини гетеропереходу після розгонки від тривалості загонки.

Щодо концентрації внесених домішок, то при збільшенні глибини дифузійного шару концентрація зменшується. Розподіл концентрації домішки по глибині при двостадійній дифузії можна визначити по формулі [5]:

$$N'_{x,t} = \frac{2N_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) \quad (10)$$

Варто відмітити, що при розрахунку розподілу концентрації домішки в нашому випадку виникають деякі труднощі. Адже при внесених домішок в уже легований кремній відбувається відхилення значень коефіцієнтів дифузії від сталого значення, яке відповідає температурі процесів. Тому значення залежність  $N'_{x,t}$  отримано експериментальним шляхом.

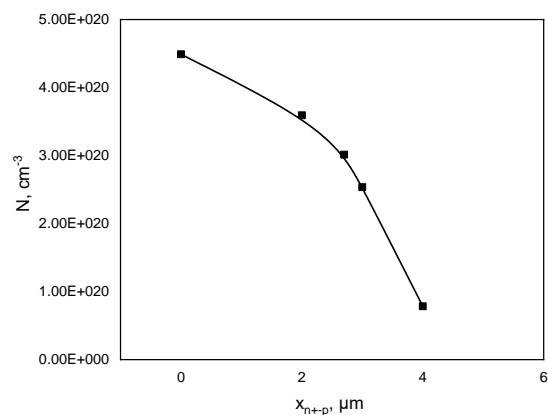
Для оцінки розподілу домішки по глибині дифузійного шару напівпровідникова підкладка після дифузії фосфору з  $R_S \approx 2,4$  Ом/□ пошарово стравлювалась у повільному травнику ( $HNO_3$ :  $HF$ :  $CH_3 COOH = 20$ : 1: 1) методом хімікодинамічного полірування та після кожного травлення вимірювався поверхневий опір. Результати експерименту зображено на рис. 7.

З рис. 7, як і в формулі (1) можна побачити експоненційну залежність розподілу фосфору по глибині дифузійного шару. Якщо поверхневий опір складав 2,4 Ом/□ ( $4,5 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>), то при  $x_{n+p} = 4$  мкм -  $R_S \approx 55$  Ом/□ ( $7,8 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>).

### III. Обговорення та результати досліджень

#### 3.1. Темнові струми ФЧЕ

Вимірювались темнові струми ФЧЕ та охоронних кілець на двох етапах виготовлення: завершений fotocутливий кристал та завершений ФД. Значення  $I_d$  fotocутливих елементів ФД приблизно на 10% вищі



б)

**Рис. 7.** Експериментальні криві розподілу домішки фосфору по глибині дифузійного шару після розгонки: а) залежність  $R_S(x_{n+p})$ ; б) залежність  $N(x_{n+p})$ .

ніж в кристалів. Щодо охоронних кілець, то рівень їх темнових струмів  $I_{OK}$  після приварювання контактних виводів та герметизації зростає приблизно вдвічі порівняно із значеннями фоточутливих кристалів. Це можна пояснити впливом контактних явищ, похибки вимірювань, чи зростанням поверхневої складової темного струму в процесі виготовлення.

Результати вимірювання  $I_m$  фоточутливих кристалів наведено в Таблиці 2. Для відображення чіткої картини, щодо розкиду значень темнових струмів по площадках, наведено  $I_m$  характерних зразків із кожної підсерії.

**Таблиця 2.**

Значення темнових струмів фоточутливих кристалів при різному поверхневому опорі (буде вказано густину темного струму  $J_m$ ).

$R_S$ , Ом/□ – після розгонки	$J_m$ , нА/см <sup>2</sup>				$J_{OK}$ , мкА/см <sup>2</sup> - кристал
1.9 – 2.4	70.1	64.9	70.1	72.7	3.9
	77.9	77.9	75.3	75.3	4.0
	70.1	80.5	72.7	70.1	3.0
	67.5	64.9	64.9	62.3	2.3
2.7	83.1	77.9	83.1	77.9	2.6
	77.9	77.9	72.7	75.3	4.4
	85.7	83.1	75.3	90.9	3.8
	93.5	88.3	85.7	80.5	2.5
3.3	72.7	90.9	80.5	83.1	2.7
	77.9	75.3	80.5	77.9	3.4
	140.3	140.3	119.5	244.2	5.2
	174.0	93.5	132.5	127.3	3.0
5.0	88.3	93.5	109.1	119.5	4.7
	200.0	142.9	124.7	98.7	3.8
	106.5	171.4	114.3	90.9	5.1
	509.1	368.8	381.8	571.4	9.2
8.1	335.1	368.8	322.1	296.1	6.6
	488.3	444.2	384.4	376.6	6.0
	293.5	290.9	355.8	280.5	4.7
	428.6	467.5	646.8	506.5	6.5
8.1	1298.7	1236.4	1485.7	1797.4	8.5
	963.6	1150.6	1007.8	859.7	5.3
	1207.8	974.0	898.7	1051.9	4.2
	1251.9	1041.6	1031.2	1324.7	5.5
	932.5	1176.6	1142.9	1246.8	5.2

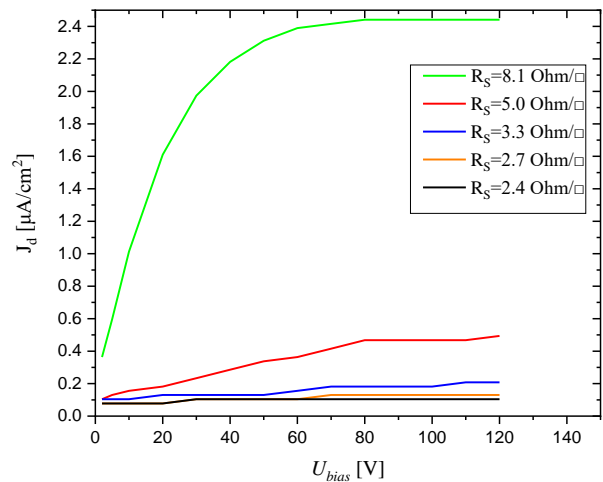
Як видно із Табл. 2, зі збільшенням поверхневого опору (зменшенням концентрації) темнові струми ФЧЕ зростають. Також можна побачити, що зразки з  $R_S=1,9 - 2,4$  Ом/□ мають приблизно однаковий рівень темнових струмів, тобто подальше збільшення концентрації носіїв заряду не вносить ніяких змін. Відповідно збільшувати тривалість дифузії для подальшого зменшення  $I_m$  не має змісту. Зменшення темного струму зі збільшенням концентрації

фосфору можна пояснити гетеруванням металевих домішок і дефектів структури в об'ємі зразків. Оскільки ефект гетерування збільшується із зростанням концентрації фосфору. Відомо [10], що для заданої температури існує деяке максимальне значення  $R_S$ , підвищене значення якого зробить гетерування неефективним. В даному випадку це значення  $R_S = 2,4$  Ом/□.

Варто відмітити, що при збільшенні  $R_S$  зростає розкид темнових струмів по площадках по абсолютному значенню, але характерна для всіх підпартій ФД розбіжність в відсотковому співвідношенні складала порядку 10-20% відносно середнього. Зазначимо, що розкид по площадках одного ФД в два рази вважався браком. Відповідно побачено, що відсоток бракованих виробів по даному критерію, при зменшенні рівнів темнових струмів, зростає.

Щодо темнових струмів ОК, то в даному випадку зростання  $I_{OK}$  при зростанні  $R_S$  носить значно менший характер. Так, якщо при зміні  $R_S$  від 1,9 – 2,4 Ом/□ до 8,1 Ом/□  $I_m$  зросли приблизно в 10-20 разів, то  $I_{OK}$  збільшується вдвічі. Це пояснюється тим, що темновий струм ОК ФД більшою мірою залежить від стану периферії кристалу, (зарядових станів на межі розділу  $Si-SiO_2$  чи наявності дефектів в даній області кристалу), а не від ступені легування.

Досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) оберненозмощених ФД з різним поверхневим опором (Рис. 8) з яких видно, що при  $U_{зм}=60-80$  В темнові струми виходять в насичення. Криві для  $R_S=1,9 - 2,4$  Ом/□ фактично співпадають, а крива для  $R_S=2,7$  Ом/□ зміщена на одиниці нанометрів вгору по осі ординат.



**Рис. 8.** ВАХ фоточутливих елементів ФД в залежності від  $R_S$ .

Варто відмітити, що криві для  $R_S=1,9 - 2,7$  Ом/□ володіють мінімальним приростом темнових струмів при змщенні  $U_{зм}$ . Це свідчить про те, що в сильнолегованих напівпровідникових шарах при збільшенні напруженості електричного поля рухливість носіїв заряду зростає в меншій ступені, що не призводить до значного зростання темного струму. Інші криві характеризуються більшим приростом темного струму при зростанні напруги



зміщення. Так, для зразків з  $R_S=1,9 - 2,7 \text{ Ohm}/\square$   $I_{m,2B}=77,9 \text{ нА}/\text{см}^2$ ,  $I_{m,120B}=103,9 \text{ нА}/\text{см}^2$ , а для  $R_S=8,1 \text{ Ом}/\square$  –  $I_{m,2B}=363,6 \text{ нА}/\text{см}^2$ ,  $I_{m,120B}=2441,6 \text{ нА}/\text{см}^2$ .

### 3.2. Темнові струми ОК

Також отримано ВАХ охоронних кілець залежно від  $R_S$ , навання вибраних ФД із кожної підсерії (Рис. 9). З рисунку можна побачити, що для ОК відсутнє зростання рівнів  $I_{OK}$  при зростанні  $R_S$  та відсутня закономірність як у випадку ФЧЕ. Це підтверджує той факт, що темновий струм охоронного кільця ФД більшою мірою залежить від стану периферії кристалу, а не від степені легування.

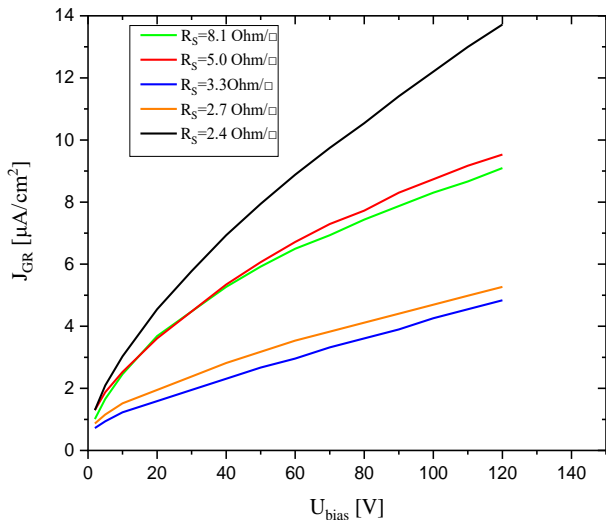


Рис. 9. ВАХ охоронних кілець ФД при різному  $R_S$ .

З рисунку видно, що криві ВАХ ОК при збільшенні зміщення не виходять на насичення в діапазоні досліджуваних напруг, а при подальшому збільшенні зміщення  $I_{GR}$  зростатиме до деякого максимального значення. Причиною цього є зростання області просторового заряду (ОПЗ) охоронного кільця при збільшенні напруги в сторону периферії кристалу (Рис. 10). Адже ОПЗ ОК обмежене областю просторового заряду ФЧЕ та тильною стороною підкладки (Рис. 10). Так, якщо товщина кристалу складає 420-470 мкм, то при  $U_{zm}=120 \text{ В}$ , згідно [11], ширина ОПЗ  $W_i$  сягає близько 490 мкм, що можна вирахувати по формулі:

$$W_i = \left( \frac{2\epsilon\epsilon_0(\phi_k - U_{zm})}{eN_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

де  $\epsilon, \epsilon_0$  - діелектричні сталі для кремнію і вакууму відповідно;

$e$  - заряд електрона;  $\phi_k$  - контактна різниця потенціалів;  $U_{zm}$  - напруга зміщення;  $N_A$  - концентрація домішки в підкладці.

На Рис. 10 ОПЗ охоронного кільця зі сторони периферії позначено штриховою лінією. При досягненні області просторового заряду тильної сторони підкладки, при певному значенні напруги зміщення, ОПЗ при подальшому зростанні  $U_{zm}$

зростатиме в сторону периферії внаслідок чого зростатиме  $I_{OK}$ .

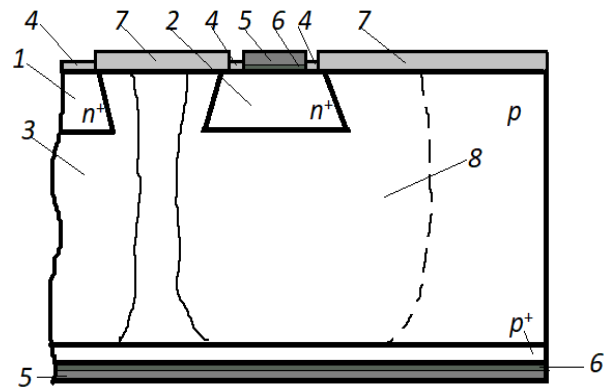


Рис.5. Схематичне зображення перерізу кристалу ФД: 1 - ФЧЕ; 2 - ОК; 3 – ОПЗ ФЧЕ; 4 – провідний шар  $SiO_2$ ; 5 – шар золота; 6 – підшар хрому; 7 – маскуючий  $SiO_2$ ; 8 – ОПЗ ОК.

### 3.3. Темнові струми при $T=85^\circ\text{C}$ , ємність ФЧЕ, опір взаємозв'язку

Для випробування стабільності роботи ФД при підвищених температурах було виміряно темнові струми при  $T=85^\circ\text{C}$ . Дане випробування проводиться більшою мірою для оцінки  $I_{OK}$  при підвищених температурах, а саме його стабільність. Адже іноді може спостерігатися деяка нестабільність темнового струму ОК, викликана зарядовими станами на межі розділу  $Si-SiO_2$ , яка при кімнатній температурі не спостерігається [12]. Дана нестабільність може проявлятися як незначним повільним зростанням  $I_{OK}$  відносно початкового (від моменту прикладення напруги) так і неконтрольованим лавиноподібним зростанням. Отримані результати можна побачити в Таблиці 3 (2-3 стовбець).

Відомо [13], що при збільшенні температури ФД на  $10^\circ\text{C}$  темнові струми зростають в 2-3 рази. Отримані значення підтверджують даний факт.

Таблиця 3.

Темнові струми ФЧЕ та ОК при  $T=85^\circ\text{C}$ , ємність та опір взаємозв'язку у залежності від різного поверхневого опору та  $U_{zm}=120 \text{ В}$  (буде вказано густину темнового струму  $J_m$ )

$R_S$ , Ohm/ $\square$	$J_d$ , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$J_{GR}$ , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$C_{RE}$ , pF	$\sum R_{con}$ , MOhm
1.9-2.4	18.7- 24.7	606.5- 866.4	11.9 – 13.4	10
2.7	19.5- 34.8	563.2- 895.3	12.3 – 13.2	10
3.3	21.0- 42.1	462.1- 953.1	12.1 – 13.3	10
5.0	56.9- 103.9	722.0- 1444.0	12.3 – 13.6	5-6.7
8.1	167.5- 337.7	599.3- 1588.4	12.4 – 13.2	4-5

Примітка: вказано діапазон від найнижчого до найвищого значення.

Щодо ємності ФЧЕ ( $C_{ФЧЕ}$ ), то залежності від

поверхневого опору  $n^+$ -шару не помічено (Табл. 3, 4 стовбцець). Адаже  $C_{ФЧЕ}$  залежить від прикладеної напруги та площі ФЧЕ [13]:

$$C_{ФЧЕ} = A_{ФЧЕ} \left( \frac{\varepsilon \varepsilon_0 e N_A}{2(\phi_k - U_{зм})} \right)^2 \quad (12)$$

Також виміряно опір взаємозв'язку між ФЧЕ та ОК ( $R_{зв}$ ) (табл. 3, 5 стовбцець). В практиці частіше використовують суму опорів взаємозв'язку кожної fotocутливої площадки і ОК ( $\sum R_{зв}$ ). Даний параметр характеризує опір ізоляції ( $SiO_2$ ) та поверхневого інверсійного каналу  $n^+$ -типу між fotocутливими елементами та ОК. Опір взаємозв'язку повинен бути високим (порядку МОм). Адаже, як відомо [3], при зворотному зміщенні ОК «збирає» зворотній струм не лише із власної площі, а й з периферії кристалу, включаючи торці і половину зазора між ФЧЕ та ОК, вкриті інверсійним шаром. Відповідно, при низькому  $R_{зв}$  відбувається «перетікання» темного струму з ОК в fotocутливі площадки, внаслідок чого зростає  $I_m$ .

Помічено деяку залежність  $\sum R_{зв}$  від  $R_S$ , а саме при збільшенні поверхневого опору опір взаємозв'язку зменшується (табл. 3). Враховуючи, що ФД були виготовлені в єдиному технологічному циклі, то, відповідно, вони характеризувалися однаковим рівнем поверхневих зарядових станів, тобто їх вклад у величину темнових струмів однаковий. З цього можна зробити висновок про залежність  $\sum R_{зв}$  від рівнів темнових струмів (зокрема  $I_{ок}$ ) при однакових рівнях зарядових станів.

## Висновки

Отримано кремнієві чотириелементні  $p-i-n$ -ФД з ОК із різним  $R_S$   $n^+$ -шару. Досліджено вплив концентрації фосфору в даному шарі на електричні параметри та встановлено:

При зменшенні  $R_S$  темнові струми ФЧЕ зменшуються.

Оптимальним значенням поверхневого опору для отримання мінімальних темнових струмів є  $R_S \approx 2,4$  Ом/□. При подальшому збільшенні тривалості дифузії зменшення  $I_d$  не спостерігалось.

Вплив поверхневого опору на темнові струми охоронних кілець носить значно менший характер. Так, при зміні  $R_S$  від 1,9 – 2,4 Ом/□ до 8,1 Ом/□  $I_m$  зросли приблизно в 10-20 разів, то  $I_{ок}$  збільшується вдвічі. Це пояснюється тим, що темновий струм ОК ФД більшою мірою залежить від стану периферії кристалу, (зарядових станів на межі розділу  $Si-SiO_2$  чи наявності дефектів в даній області кристалу), а не від ступені легування.

Отримано ВАХ ФЧЕ та ОК. Та побачено, що при  $U_{зм}=60-80$  В темнові струми ФЧЕ виходять в насичення. Криві для  $R_S=1,9 - 2,7$  Ом/□ володіють мінімальним приростом темнових струмів при збільшенні  $U_{зм}$ . Криві для  $R_S=1,9 - 2,4$  Ом/□ фактично співпадають, а крива  $R_S=2,7$  Ом/□ зміщена на одиниці нанометрів вгору по осі ординат. Лінії ВАХ ОК при збільшенні зміщення не виходять в насичення в діапазоні досліджуваних напруг, а при подальшому збільшенні зміщення  $I_{ок}$  зростатиме до деякого максимального значення. Причиною цього є зростання області просторового заряду охоронного кільця при збільшенні напруги в сторону периферії кристалу.

Залежності ємності ФЧЕ від поверхневого опору  $n^+$ -шару не помічено. Адаже  $C_{ФЧЕ}$  залежить лише від питомого опору підкладки та площі ФЧЕ.

Виявлено незначну залежність  $\sum R_{зв}$  від  $R_S$  - при збільшенні поверхневого опору опір взаємозв'язку зменшується. Причиною цього є незначне зростання  $I_{GR}$  при збільшенні  $R_S$ , при умові однакових рівнів поверхневих зарядових станів.

**Кукурудзяк М.С.** – інженер-технолог. Акціонерне товариство «Ритм Оптиелектроніка», м. Чернівці, Україна.

- [1] M.S. Kukurudziak, O.P. Andreeva, V.M Lipka, *High-resistivity p-type silicon-based p-i-n photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm*, Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 5–6, 16 (2020); <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16>.
- [2] B.T. Marozas, W.D. Hughes, X. Du. et al., *Surface dark current mechanisms in III-V infrared photodetectors*, Optical Materials Express, 8(6), 1419 (2018); <https://doi.org/10.1364/OME.8.001419>
- [3] Jonak-Auer, Ingrid, Frederic Roger, and Olesia Synooka, *Optimized integrated PIN photodiodes with improved backend layers*, Sensors & Transducers, 237(9/10), 67 (2019).
- [4] C.M. Polley, W.R. Clarke, J.A. Miwa. et al., *Microscopic four-point-probe resistivity measurements of shallow, high density doping layers in silicon*, Appl. Phys. Lett., 101, 262105 (2012); <https://doi.org/10.1063/1.4773485>.
- [5] Z.Yu. Gotra *Technology of microelectronic devices*. Directory. M.: Radio and communication, P. 149 (1991) [in Russian].
- [6] I.M. Makintosh., J. Electrochem. Soc., 109, 392 (1962).
- [7] A.E. Shupenev, N.S. Pankova, I.S. Korshunov et al., *An Analysis of Destructive Methods of Thin Films Thickness Measurement*, Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building, 3, 31 (2019); <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-3-31-39>.
- [8] Zi S. *Semiconductor physics*. Moscow, Mir, 456 (1984).
- [9] Liu, AnYao, et al. *Effective impurity gettering by phosphorus-and boron-diffused polysilicon passivating contacts for silicon solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 179, 136 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.004>.

- [10] M.S. Kukurudziak, Yu.G. Dobrovolsky, *Silicon p – i – n photodiode of increased pulse responsivity*, Technology and design in electronic equipment, 1-2, 61 (2021); <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.61> [in Ukrainian].
- [11] 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).
- [12] V.O.Chadiuk, *Optoelectronics: from macro to nano, Transmission, conversion and detection of optical radiation*, 1 (2018). Kyiv: Igor Sikorsky KPI, Polytechnic Publishing House. [in Ukrainian].

M.S. Kukurudziak<sup>1,2</sup>

## **Influence of Surface Resistance of Silicon p-i-n Photodiodes n<sup>+</sup>-Layer on their Electrical Parameters**

<sup>1</sup>*Rhythm Optoelectronics Shareholding Company, Chernivtsi, Ukraine, [mykola.kukurudzyak@gmail.com](mailto:mykola.kukurudzyak@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine,*

Silicon quadrant *p-i-n* photodiodes of different concentrations of diffused phosphorus in the  $n^+$ - layer were fabricated. The experimental curve of phosphorus impurity distribution along the depth of the diffusion layer is obtained. The influence of charge carrier concentration in this layer on the dark currents of responsive elements and the guard ring was studied. Volt-ampere characteristics of photodiodes were measured. It was seen that when the surface resistance of the  $n^+$ -layer decreases, the dark currents decrease, the samples with a surface resistance of 1.9 – 2.4 Ohm /  $\square$  have approximately the same level of dark currents of responsive areas, i.e. further increase in charge carrier concentration makes no change. As to dark currents of photodiode guard rings, it was found that for the most part they depend on the state of the periphery of the crystal (outside the guard ring) but not on the level of doping. The influence of the surface resistance of the  $n^+$ -layer on interconnection resistance between the responsive areas and the protective ring, and no influence on the capacitance of the photodiodes were revealed.

**Key words:** photodiode, surface resistance, dark current, guard ring.