

## КОНСТРУКЦІЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРОГОВОГО ФОТОПРИЙМАЧА НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

Представлені технологія та конструкція порогового фотодіоду ФД337А, виготовленого на основі монокристалічного кремнію. Приведені результати досліджень темного струму, спектральних, вольт-фарадних та вольт-амперних характеристик свідчать про відповідність даного фотодіоду кращим зарубіжним зразкам.

The technology and design of threshold photodiode ФД337А constructed on silicon single crystal base are presented. The research results of dark current, spectrum, volt-farad and volt-ampere characteristics testified about agreement between the given photodiode and the best foreign samples.

В останні роки актуальною є проблема масового виробництва професійних твердотільних датчиків  $\gamma$ -випромінювання та приладів для  $\gamma$ -спектрометрії на основі модулів "сцинтилятор-фотодіод" [1]. Такі датчики відрізняються кращою лінійністю (до 20% відхилення) у порівнянні з традиційними газорозрядними.

Необхідним елементом таких модулів є пороговий фотодіод (ФД) на основі монокристалічного кремнію. Кращим світовим виробником порогових фотодіодів є японська фірма Hamamatsu [2]. Типовим представником порогових  $p$ - $i$ - $n$  фотодіодів може бути S3590-01, який відрізняється високим рівнем чутливості в діапазоні випромінювання сцинтилятора (0,52-0,65 мкм), низькими значеннями темного струму і ємності.

Розробником та виробником сцинтиляційних матеріалів та модулів "сцинтилятор-фотодіод" у нашій країні є концерн Інститут монокристалів НАНУ (м.Харків) [1].

Для потреб Інституту монокристалів колективом виконавців ВАТ "ЦКБ Ритм" (м.Чернівці) був розроблений та впроваджений у серійне виробництво пороговий фотодіод ФД337А.

Високий рівень значень фотоелектричних параметрів ставить розроблений фотодіод в один ряд з кращими зарубіжними аналогами та дозволяє говорити про оптимальне технологічне вирішення проблеми за допомогою планарно-дифузійної технології і оптимальне конструктивне виконання.

Фотодіод виконаний як у негерметичному варіанті, так і у варіанті захисту fotocутливого елемента пластмасою. Фоточутливий кремнієвий

кристал приклеєний до сітлової підкладки. Поперечний переріз кристалу наведено на рис.1.

Зупинячись на фізичних принципах роботи ФД недоцільно. Вони описані, наприклад, в [3]. Про конструкцію та технологію виготовлення ФД337А мова йтиме нижче.

Для монохроматичного випромінювання пороговий потік визначається за формулою [4]

$$\Phi_{\text{п}} = \sqrt{i_{\text{ш}}^2 \cdot S_{I_{\lambda}}^{-1}}, \quad (1)$$

де  $i_{\text{ш}}$  - густина струму шуму в одиничній смузі частот,  $S_{I_{\lambda}}$  - струмова монохроматична чутливість.

Отже, для отримання низьких значень порогових потоків у смузі частот, де переважають дробові шуми ФД, необхідно отримати мінімально можливі значення темнових струмів (менші ЗНА при  $U=30$  В і площі fotocутливого елемента  $1 \text{ см}^2$ ) і максимально можливі значення

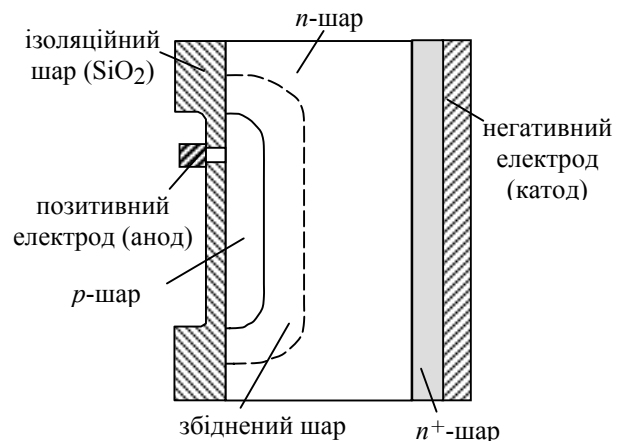


Рис.1. Поперечний перетин порогового  $p$ - $i$ - $n$  ФД.

чутливості 0,25-0,35 А/Вт в діапазоні 0,5-0,65 мкм (діапазон вторинного випромінювання кристалів CsJ та ZnSe під дією  $\gamma$ -випромінювання). Одночасно необхідно отримати мінімально можливі значення ємності (не більші 150 пФ при  $U=30$  В і площі фоточутливого елемента 1 см<sup>2</sup>).

Складність полягає в тому, що завдання одночасного отримання низьких значень темнового струму, ємності та високої чутливості у вищезгаданій області містить в собі взаємовиключні протиріччя і конструкція ФД потребує певної оптимізації та компромісних рішень.

Відомо, що струмова монохроматична чутливість ФД визначається за формулою [5]:

$$S_{I_\lambda} = (1 - R)T \cdot \gamma Q \frac{\lambda}{1,24}, \quad (2)$$

де  $R$  - коефіцієнт відбивання поверхні ФД,  $T$  - коефіцієнт пропускання вхідного вікна ФД,  $\gamma$  - коефіцієнт збирання генерованих світловим випромінюванням носіїв,  $Q$  - внутрішня квантова ефективність,  $\lambda$  - довжина хвилі світлового випромінювання у мікрометрах. Якщо перші два параметри оптимізуються конструктивно ( $Q \approx 1$  для  $\lambda=0,52-0,65$  мкм), то коефіцієнт  $\gamma$  залежить від багатьох факторів. Неоптимальний стан границі розділу Si-SiO<sub>2</sub> (наявність позитивного заряду в окислі та висока концентрація поверхневих енергетичних рівнів) приводить до підвищеної рекомбінації на поверхні [6]. Відомо, що глибина поглинання світлового випромінювання в  $e$  разів, наприклад, для  $\lambda=0,55$  мкм рівна  $\sim 1,4$  мкм [7]. Так як  $p$ -шар, створений методом дифузії, є досить дефектна зона, то це підвищує рекомбінацію генерованих світлом носіїв в  $p$ -області. Забруднення об'єму важкими металами або недостатньо ефективного проведення гетерування об'єму кристалу призводить до підвищеної рекомбінації генерованих носіїв в об'ємі. Проте, наявність зовнішнього електричного поля і збідненої області, а також мала глибина поглинання короткохвильового випромінювання дещо компенсують роль об'ємної рекомбінації. Усі вищезгадані негативні фактори зменшують коефіцієнт збирання носіїв, а значить і струмову монохроматичну чутливість.

Таким чином, для отримання високих значень чутливості ФД необхідно отримати ідеальний стан об'єму і поверхні кристалу при глибині  $p$ - $n$  переходу, меншій 1 мкм.

Проте отримати односторонній різкий перехід з глибиною, меншою 1 мкм, який би не пробирався при високих напругах (більших 30 В), з

прийнятним процентом виходу якісних кристалів проблематично [8].

Тому оптимальним для отримання високого рівня чутливості в діапазоні 0,52-0,65 мкм та запобігання пробою до напруг більших 30 В є створення  $p$ - $n$  переходу в кристалі глибиною 1,2-1,5 мкм методом планарно-дифузійної технології. При цьому важливим є підбір оптимальної послідовності термічних процесів для створення потрібних глибин та концентрацій в дифузійній області і ефективного гетерування об'єму кристалу для збереження часу життя неосновних носіїв заряду.

Як було показано вище, для отримання низьких значень порогових потоків необхідно мінімізувати густину струму ФД, яка в смузі частот, де шум має дробову природу, визначається за формулою

$$i_{ш} = \sqrt{2q(I_T + I_\Phi)\Delta f}, \quad (3)$$

де  $q$  - заряд електрона,  $I_T$  - темновий струм ФД,  $I_\Phi$  - фоновий струм, викликаний паразитною підсвіткою.

Так як для діоду, що працює в модулі із сцинтилятором  $I_\Phi=0$ , то шум ФД визначається рівнем  $I_T$ . Темновий струм в кремнієвому  $p$ - $n$  переході залежить від трьох складових, що мають різну природу і визначені наступним чином [9]:

$$I_T = \sqrt{I_{Td}^2 + I_{Tg}^2 + I_{Tp}^2}, \quad (4)$$

де  $I_{Td}$  - дифузійна складова темного струму,  $I_{Tg}$  - генераційна складова темного струму,  $I_{Tp}$  - поверхнева складова темного струму.

Для різкого  $p$ - $n$  переходу з низькою концентрацією основних носіїв заряду в  $n$ -області і високою в  $p$ -області згідно [8]

$$I_{Td} = \frac{q \cdot n_i^2 \cdot D_p}{N_d \cdot L_p} \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \cdot A, \quad (5)$$

де  $n_i$  - власна концентрація носіїв в кремнії,  $D_p$  - коефіцієнт дифузії дірок в  $n$ -області,  $N_d$  - концентрація донорів в  $n$ -області,  $L_p$  - дифузійна довжина дірок в  $n$ -області,  $U$  - прикладена до діоду напруга,  $k$  - стала Больцмана,  $T$  - температура в К,  $A$  - площа фоточутливого елемента.

У випадку, коли дифузійна довжина  $L_p$  перевищує довжину квазінейтральної області  $W$ , у формулі (5) замість  $L_p$  повинна бути  $W$ . Для випадку ФД337А це приблизно 300 мкм. При зміщеннях більших 100 мВ експоненційним членом у формулі (5) можна знехтувати. Отже, ди-

фузійна складова прямує до насичення.

При достатньо високому рівні проведення термічних процесів, високому рівні електронно-вакуумної гігієни та збереженні, у зв'язку з цим, дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, дифузійна складова є дуже малою і не вона визначає рівень темного струму ФД.

Поверхнева складова темного струму має генераційну природу в збідненій приповерхневій області і визначається згідно [8] співвідношенням:

$$I_{\text{ТГ}} = qn_i \cdot N_{st} \cdot v_{\text{тн}} \cdot \sigma \cdot A_F, \quad (6)$$

де  $N_{st}$  - густина центрів генерації-рекомбінації на поверхні,  $v_{\text{тн}}$  - теплова швидкість носіїв,  $\sigma$  - перетин захоплення центрів генерації-рекомбінації на поверхні,  $A_F$  - площа збідненої зони на поверхні

$$A_F = P \cdot Xds, \quad (7)$$

де  $P$  - периметр фоточутливого елемента,  $Xds$  - ширина збідненої приповерхневої зони.

Ширина збідненої приповерхневої зони приблизно рівна (не більша) ширині збідненої зони в об'ємі

$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon \cdot \varepsilon_o (\varphi - U)}{q \cdot N_d}}, \quad (8)$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична проникливість кремнію,  $\varepsilon_o$  - діелектрична стала,  $\varphi$  - контактна різниця потенціалів в кремнієвому  $p$ - $n$  переході.

В залежності від технології обробки та відмивки поверхні пластини, термічних процесів для кремнію  $N_{st}$  лежить в межах  $10^{10}$ - $10^{13}$  см<sup>-2</sup>, а  $\sigma$  - в межах  $10^{-15}$ - $10^{-17}$  см<sup>2</sup>. Ці величини можна і потрібно мінімізувати шляхом вибору матеріалу кристалографічної орієнтації (100) та покращенням рівня технології. Розрахунки згідно (6), (7), (8) показують, що досягнення рівня темного струму меншого 1 нА для напруг більших 30 В є цілком реальним.

В реальних умовах поверхневі тональні витоки можуть призводити до збільшення струму в частині ФД, що приводить до зменшення проценту виходу справних приладів. Тому для правильно сконструйованого кристалу ФД, навіть при високому рівні проведення технології, велику роль відіграє генераційна складова темного струму в збідненій області в об'ємі ФД.

Генераційна складова темного струму визначається тепловою генерацією носіїв через генераційно-рекомбінаційні рівні в збідненій області і дрейфом їх у полі, що виникає при при-

кладенні до  $p$ - $n$  переходу зворотньої напруги. Природа генераційно-рекомбінаційних рівнів різноманітна. Це і наявність важких металів у вихідному матеріалі, і забруднення об'єму неконтрольованими домішками. Крім того, деякі глибокі рівні, через які генерація носіїв при малих зміщеннях практично не йде, при прикладенні достатньо великих зовнішніх електричних напруг стають енергетично близькими до середини забороненої зони і їхня генераційна здатність різко зростає.

Тому очевидно, що для отримання малих значень генераційної складової темного струму важливим є все: чистота вихідного монокристалічного матеріалу, дотримання електронно-вакуумної гігієни, висока степінь чистоти хімічних реактивів, ефективність гетерування, оптимальна послідовність термічних процесів. Найбільш складним в рамках планарно-дифузійної технології є проведення гетерування приповерхневої лицевої зони глибиною до 40 мкм.

Генераційна складова, як відомо, визначається за формулою

$$I_{\text{ТГ}} = \frac{q \cdot n_i \cdot x_i}{\tau_0} \left( e^{\frac{qU}{2kT}} - 1 \right) \cdot A, \quad (9)$$

де  $x_i$  - зона найбільш інтенсивного генерування носіїв,  $\tau_0$  - величина, обернена до усередненого темпу генерації носіїв через генераційно-рекомбінаційні рівні в області  $x_i$ .

Область  $x_i$  при невеликих зміщеннях може значним чином відрізнятись від збідненої області  $x_d$  [8]. Однак, при зміщеннях більших 30 В для високоомного матеріалу з питомим опором 1000 Ом·см  $x_i \approx 0,9x_d$ . Зрозуміло, що при зміщеннях більших 200 мВ експоненційним членом в формулі (9) можна знехтувати.

Якщо вважати, що темновий струм визначається саме генераційною складовою, то для отримання струмів до 3 нА при зміщенні 3 В необхідно мати  $\tau_0 \leq 2,6 \cdot 10^{-2}$  с. Як показують дані по кращим зарубіжним аналогам, зокрема S3590-01, досягнення таких рівнів є цілком реальним. Питання реалізації вимог по ємності в основному зводиться до вибору оптимального питомого опору вихідного матеріалу.

Для різкого переходу на основі високоомного матеріалу  $n$ -типу ємність визначається за формулою [8]:

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot N_d}{2 \cdot (\varphi - U)}} \cdot A. \quad (10)$$

Розрахунки показують, що для отримання ємності не більшої за 150 пФ при зміщенні 30 В і площі фоточутливого елемента  $A=1 \text{ см}^2$  необхідно взяти матеріал з питомим опором не меншим 800 Ом·см.

### Конструкція та технологія виготовлення ФД337А

Для реалізації завдання був вибраний матеріал КДЭ1 60С згідно ТУ 48-0513-05.0-91 випуску Запорізького титано-магнієвого комбінату. Питомий опір матеріалу становить  $\sim 1500 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , радіальний розкид питомого опору не більший 5%, що гарантує високу однорідність кремнію. Час життя неосновних носіїв заряду (дірок) 1500 мкс. Діаметр злитка 60 мм. Кристалографічна орієнтація (111) звичайно не оптимальна, проте мова йде не про експеримент, а про серійний випуск і економічно недоцільно використовувати матеріал орієнтації (100) марки КБО-1-ЭМ/25-Т згідно ТУ 48-4-504-88, оскільки діаметр такого злитку 25 мм і на ньому розміщується лише один кристал площею  $1 \text{ см}^2$ .

Виготовлення кристалу з ФД здійснювалось методом традиційної планарно-дифузійної технології. Особлива увага була звернена на якість хіміко-механічної і хіміко-динамічної обробки поверхонь пластин кремнію. Найкращий ефект дала послідовність хімічних очисток в складі 1:1:4 ( $\text{NH}_4:\text{H}_2\text{O}_2:4\text{H}_2\text{O}$ ) і 1:1:1 ( $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ ).

При проведенні термічних процесів після максимальної температури термообробки (окислення)  $1150^\circ\text{C}$  наступні термообробки проводились по спадаючій за температурами послідовності. Відзначимо значну інтенсивність.

Великі пошукові роботи були проведені по відпрацюванню оптимального режиму термічного гетерування фосфором.

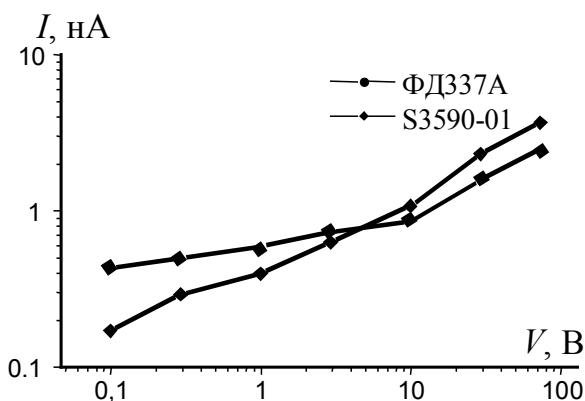


Рис.2. Вольт-амперні характеристики ФД337А та S3590-01.

В подальшому кристал приклеювався до силіконової підкладки точковим методом і розварювався алюмінієвим дротом діаметром 30 мкм. Фоточутливий елемент ФД захищався тонким шаром (до 100 мкм) лаку БМК.

### Результати вимірювань та досліджень.

Дослідження темного струму ФД337А проводилось у порівнянні з даними рекламного проспекту фірми Hamamatsu [2].

По абсолютним значенням темнові струми аналогів близькі між собою (рис.2). Характерний нахил вольт-амперної характеристики говорить про генераційну природу темного струму в збідненій зоні і на поверхні. Дещо збільшений нахил ВАХ ФД337А свідчить про менше значення  $\tau_0$  у ФД337А порівняно з S3590-01. Це пов'язано з наступними причинами: використання фірмою Hamamatsu більш якісного кремнію фірми Wokker (Німеччина), орієнтацією матеріалу, використаного Hamamatsu, і, що ймовірно, кращим станом приповерхневої зони, що пов'язано з орієнтацією матеріалу і використанням технології іонного легування. Проте, у будь-якому випадку можна відзначити відповідність ФД337А сучасному кращому зарубіжному аналогу.

Температурна залежність темнових струмів двох аналогів наведена на рис.3. Тут також спостерігається висока степінь відповідності. Краща температурна залежність у ФД337А пов'язана з меншою температурною залежністю характеристик генераційних центрів в об'ємі і на поверхні у ФД337А у порівнянні з S3590-01.

Спектральна характеристика чутливості аналогів (рис.4) свідчить про більш високий час

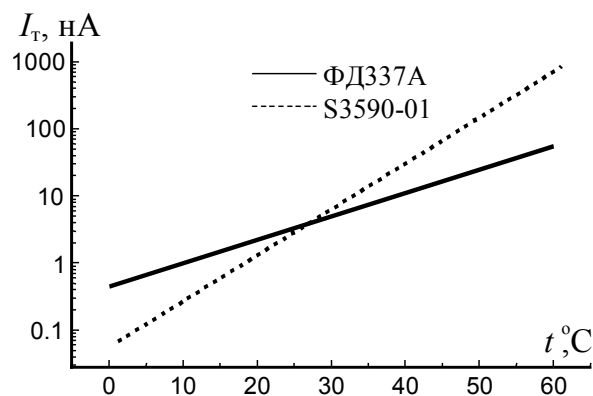


Рис.3. Температурні залежності темнових струмів ФД337А та S3590-01.

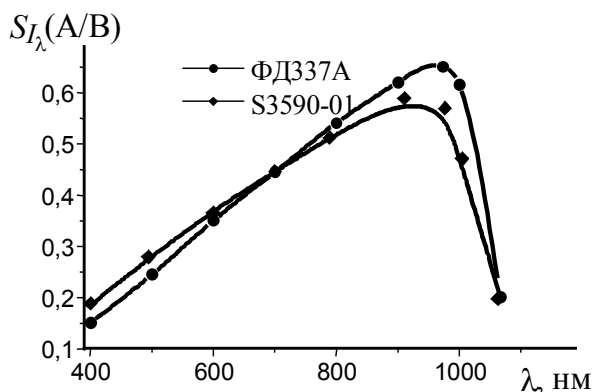


Рис.4. Спектральні характеристики ФД337А та S3590-01.

життя неосновних носіїв заряду у ФД337А порівняно з S3590-01. Це впливає з того, що у ФД337А вища чутливість у максимумі і сам максимум чутливості зсунутий у більш довгохвильову область. Чутливості в області 0,52-0,65 мкм у аналогів близькі. Більш висока чутливість у S3590-01 у короткохвильовій зоні пов'язана з використанням матеріалу орієнтації (100). Очевидні переваги ФД337А у довгохвильовій області дозволяють розширити сферу використання вітчизняного ФД.

Вольт-фарадні характеристики ФД337А і S3590-01 (рис.5) підтверджують використання зарубіжною фірмою більш високоомного матеріалу. В даному випадку говорити про переваги чи недоліки не доводиться. При потребі, використовуючи матеріал відповідного питомого опору, реалізація аналогічних значень ємності не становить проблеми.

З проведених досліджень слідує, що фотодіод ФД337А може представляти великий інтерес для широкого кола споживачів завдяки високим експлуатаційним якостям та значно нижчою, порівняно з аналогом, ціною.

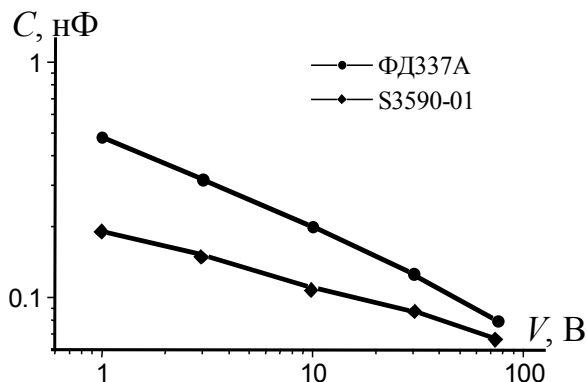


Рис.5. Вольт-фарадні характеристики ФД337А та S3590-01.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.

1. Рыжков В.Д., Волков В.Г. и др. Сцинтилляционные детекторы радиации (СЭЛДИ) – твердотельные детекторы нового поколения. Состояние, перспективы развития, промышленное использование. - Харьков, 1996 (Препринт).
2. Hamatsu. Photodiodes. Cat. №KPD0001E06, Dec. 1997.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 т. - М.: Мир, 1984. Т.2.
4. Анисимова Н.Д., Викулин И.М.. Полупроводниковые фотоприемники. Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. - М.: Радио и связь, 1984.
5. Трищенко М.А., Фример А.И. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с *p-n*-переходами // Полупроводниковые приборы и их применение. Вып.25. - М.: Сов. Радио, 1971.
6. Ouchi H., Mukai T., Kamei T., Okamura M. Silicon *p-n*-junction photodiodes sensitive to ultraviolet radiation // IEEE. - 1979. - **ED-26**, №12. - P.1965-1969.
7. Бузакова Л.К., Глиберман А.Я. Полупроводниковые фотоприемники. - М.: Энергия, 1976.
8. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. - М.: Мир, 1989.
9. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. - М.: Мир, 1979.