

©2011 р. В.М. Годованюк, І.В. Докторович, М.В. Олексюк\*,  
В.В. Рюхтін, В.Г. Юр'єв

ВАТ "ЦКБ Ритм", Чернівці,  
\*Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, Чернівці

## ВІДМІННОСТІ ВЕЛИЧИН ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ТА ПРИЧИНИ ЇХ ВИНИКНЕННЯ

Наведено результати досліджень причин значного збільшення інтегральної чутливості кремнієвих фотодіодів, які серійно випускаються, від норми, установленої в технічній документації на виріб. Рекомендовано ввести зміни в конструкцію, замінивши матеріал фотодіода на більш дешевий і з меншим часом життя неосновних носіїв заряду.

**Ключові слова:** фотоприймач, інтегральна чутливість, темновий струм.

Приведены результаты исследований причин значительного увеличения интегральной чувствительности серийно выпускаемых кремниевых фотодиодов от нормы, установленной в технической документации на изделие. Рекомендовано ввести изменения в конструкцию, заменив материал фотодиода на более дешевый и с более малым временем жизни неосновных носителей заряда.

**Ключевые слова:** фотоприемник, интегральная чувствительность, темновой ток.

The paper presents results of research into the causes significant increase in-sensitivity of commercially available the integrandsilicon photodiodes from the norm, we set forth in technical documentation for the product. Recommended a change in design, material replacing the photodiode to the cheaper and more with a short lifetime of minority carriers.

**Keywords:** detector, the integral sensitivity, dark current.

При замовленні фотоприймачів (ФП) споживач виробу часто керується економічною доцільністю. Тому в перелік вимог щодо якості ФП вводить мінімальну кількість параметрів і характеристик, які для нього є критичними. І це вірно. Проте у виробництві ФП можуть бути використані технологія або матеріали з відхиленнями, які не погіршують рівень установлених замовником параметрів, наприклад, використання кремнію з іншим питомим опором від заданого у КД забезпечує рівень темнових струмів і інтегральної чутливості фотодіода, але інші параметри можуть бути гіршими.

У даній праці наведено результати досліджень чотирьохелементного кремнієвого фотодіода, критеріями придатності якого споживач установив величину темнового струму і інтегральної чутливості до джерела типу А. Проблема в тому, що при випробуваннях виробів на відповідність вимогам, деякі з них мали у 1,4–1,6 разів більшу чут-

ливість від основної кількості виробів, чутливість яких відповідає вимогам технічного завдання. Для визначення причин відмінностей чутливості були відібрані фотодіоди з середніми і з максимальним відхиленням від середнього значеннями чутливості.

### Припущення та програма досліджень параметрів і характеристик фотодіодів

Насамперед було проведено вимірювання інтегральної чутливості ФД (надалі вони мають номери №1 і №2) за методикою, наведеною у технічних умовах (ТУ) на виріб. У площині фоточутливих елементів (ФЧЕ) ФД (рис.1) за допомогою лампи розжарювання створено освітленість  $E=100$  лк, по чергово з кожного ФЧЕ (1,2,3,4 – рис.1) визначено фотосигнали  $I_1, \dots, I_4$ . Далі, з урахуванням геометричної площі фоточутливого елемента ( $A_{\text{геом}}=4 \times 4 \text{ мм}^2$ ), розраховано чутливість  $S_{\text{інт}}$ .

$$S_{\text{інт}} = \frac{I_{1(2,3,4)}}{E \cdot A_{\text{геом}}} \quad (1)$$

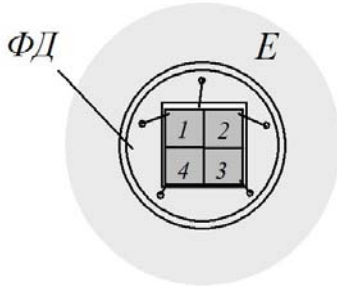


Рис. 1. Вимірюваний ФД в полі світлового потоку, що створює освітленість  $E$ .

Отримали такі значення інтегральної чутливості  $S_{\text{ІНТ}}^{\text{№1}} = 4,3$  мА/лм і  $S_{\text{ІНТ}}^{\text{№2}} = 7,7$  мА/лм.  $k_1 = S_{\text{ІНТ}}^{\text{№1}} / S_{\text{ІНТ}}^{\text{№2}} = 1,8$  (раз).

Однією з причин зростання інтегральної чутливості кремнієвих ФД до дії випромінювання джерела з кольоровою температурою  $T_k = 2856$  К може бути зміщення у довгохвильову частину спектральної характеристики чутливості ФД його максимуму ( $\lambda_{\text{max}}$ ), який, як відомо [1-4], може знаходитися в межах від 0,75 до 0,95 мкм. Якщо фотодіоди мають однакову чутливість у максимумі спектральної характеристики і однакову її форму, то інтегральна чутливість буде більшою у того ФД, у якого максимум знаходиться ближче до максимуму спектральної характеристики потоку випромінювання. Максимум випромінювання використовуваного джерела, за законом Віна, знаходиться в області одного мікрметра. Тобто, ФД з максимумом  $\lambda_{\text{max}} = 0,95$  мкм буде мати більшу інтегральну чутливість проти інших.

Для визначення спектральної характеристики чутливості використовували установку, структурну схему якої приведено на рис.2.

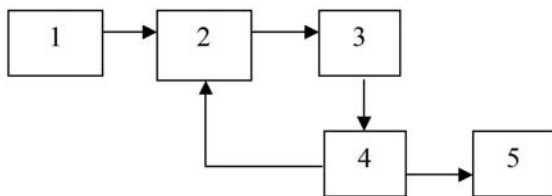


Рис. 2. Установка для визначення спектральної характеристики чутливості. 1 – джерело випромінювання, 2 – спектральний комплекс КСВУ-23, 3 – контрольний (досліджуваний) ФД, 4 – прецизійний перетворювач струм-напруга ППТН-1 ІДНМ 4.001.0000, 5 – вольтметр цифровий В7-34А.

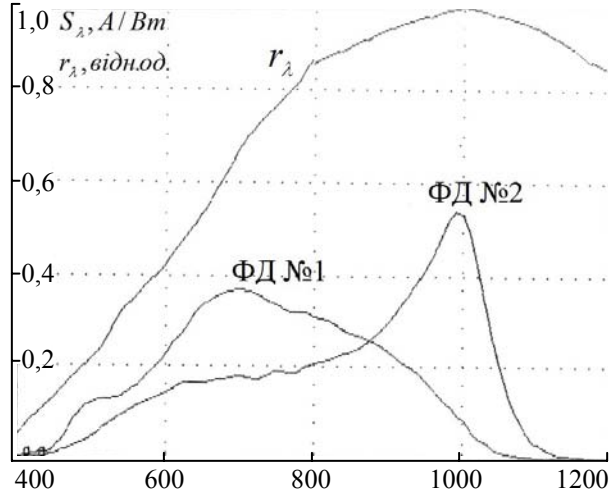


Рис. 3. Спектральні характеристики досліджуваних ФД та розподіл потоку випромінювання джерела типу А ( $r_\lambda$ ).

Вимірювання проводилися методом порівняння чутливості досліджуваного ФД  $S_{\lambda\text{д}}$  з чутливістю контрольного  $S_{\lambda\text{к}}$

$$S_{\lambda\text{д}} = S_{\lambda\text{к}} \frac{U_{\lambda\text{д}}}{U_{\lambda\text{к}}}, \quad (2)$$

де  $U_{\lambda\text{д}}$  і  $U_{\lambda\text{к}}$  – фотосигнали на виході досліджуваного і контрольного ФД. Спектральні характеристики досліджуваних ФД наведено на рис.3.

Як бачимо, величина чутливості у максимумі ФД №2 більша ( $S_{\lambda_{\text{max}}}^{\text{№2}} = 0,53$  А/Вт) за чутливість ФД №1 ( $S_{\lambda_{\text{max}}}^{\text{№1}} = 0,35$  А/Вт). Окрім цього, його максимум ( $\lambda_{\text{max}} = 0,90$  мкм) майже співпадає з максимумом випромінювання  $r_\lambda$  ( $\lambda_{\text{max}} = 1,05$  мкм). Отримані результати майже однозначно пояснюються тим, що час життя неосновних носіїв заряду (н.н.з.) для ФД №2 значно більший, ніж у зразків №1. При цьому збільшується інерційність ФД, що не завжди задовольняє споживача виробу. Для зменшення часу проводиться додаткове легування, наприклад, золотом. Вносячи додаткові центри рекомбінації ми зменшуємо час життя н.н.з. У нашому випадку була підібрана інша марка кремнію (дешевша) з меншим часом життя вихідного матеріалу.

Проаналізувавши результати вимірювань спектральних характеристик чутливості,

можна стверджувати (опосередковано, так як форми спектральних характеристик різняться), що інтегральна чутливість ФД №2 буде дещо вищою від чутливості ФД №1. Для визначення впливу відмінності спектральних характеристик на величину інтегральної чутливості проведено розрахунки чутливостей:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{інт.№1}} &= \int_{\lambda_1=0,4}^{\lambda_2=1,2} \frac{U_{\lambda, \text{№1}}}{r_{\lambda}} d\lambda \\ S_{\text{інт.№2}} &= \int_{\lambda_1=0,4}^{\lambda_2=1,2} \frac{U_{\lambda, \text{№2}}}{r_{\lambda}} d\lambda \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2$  – спектральні межі чутливості ФД,  $U_{\lambda, \text{№1}}$  і  $U_{\lambda, \text{№2}}$  – фотосигнали ФД на довжинах хвиль  $\lambda$ .

За результатами розрахунків визначено співвідношення  $k_2 = S_{\text{інт.№2}}/S_{\text{інт.№1}} = 1,2$ . Як бачимо, співвідношення розрахункових значень чутливостей  $k_2$  значно менші вимірюваних  $k_1 = 1,8$  і не повністю пояснює збільшення інтегральної чутливості за рахунок зміни спектральної характеристики ФД. Що ще може бути причиною впливу на величину чутливості?

Оскільки фотодіод складається з чотирьох фоточутливих елементів сформованих на одному кристалі, то не виключено, що між фоточутливими елементами існує, так званий, фотоелектричний зв'язок [5,6] – при одночасному опроміненні всіх елементів частина фотосигналу з сусідніх елементів додається до фотосигналу з вимірюваного ФЧЕ. Для перевірки цього припущення виконані вимірювання величини коефіцієнта фотоелектричного зв'язку ( $k_{\text{фзв}}$ ). Вимірювання  $k_{\text{фзв}}$  проводилися на тій же установці, що і вимірювання інтегральної чутливості. При цьому на один із чутливих елементів ФД установлювалася діафрагма (рис. 4) з розмірами отвору меншими за розмір ФЧЕ ( $\text{Øдіфр} = 2 \text{ мм}$ ). Для інших елементів діафрагма служила екраном.

Зазначимо, що взаємозв'язок між ФЧЕ складніший ніж розглянутий нами і залежить від умов засвітки: якщо опромінення відбувається всіх елементів – це одна умова; засвітка за допомогою оптичного зонда одно-

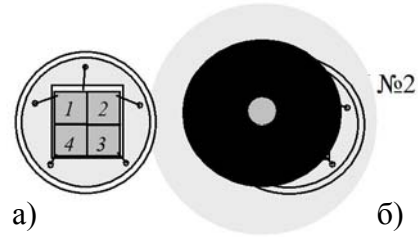


Рис. 4. Розміщення діафрагми при вимірюваннях коефіцієнта фотоелектричного зв'язку.

го елемента – це інша. Ми розглядали ситуацію, коли відбувалося опромінення одного ФЧЕ, а сигнал зв'язку визначався з решти трьох елементів, які з'єднані паралельно.

Коефіцієнт фотоелектричного зв'язку  $k_{\text{фзв}}$  визначався за співвідношенням

$$k_{\text{фзв}} = \frac{U_{2+3+4}}{U_1} 100\%, \quad (4)$$

де  $U_{2+3+4}$  – сигнал із затемнених (екранованих) ФЧЕ;  $U_1$  – фотосигнал з опроміненого ФЧЕ. Отримали такі результати вимірювань: коефіцієнт  $k_{\text{фзв}}^{\text{№1}} = 0,4\%$ ,  $k_{\text{фзв}}^{\text{№2}} = 35\%$ . Коефіцієнт фотоелектричного зв'язку тим більший, чим більша довжина дифузії н.н.з.  $L_h$ , яка пов'язана з часом життя  $\tau_h$  співвідношенням [8]

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h}, \quad (5)$$

де  $D_h$  – коефіцієнт дифузії, в нашому випадку, дірок.

Це означає, що фотосигнал ФД №2 на третину (на 35%) збільшується за рахунок сусідніх ФЧЕ, тобто, штучно збільшується інтегральна чутливість.

Отже, відмінність чутливостей буде складати  $k_3 = k_2 \cdot 1,35 = 1,62$ , що знову менше  $k_1 = 1,8$ .

Як зазначалося вище, вимірювання чутливості проводяться при опроміненні всіх елементів (див.рис.1). Відомо, що ефективна площа чутливого елемента [5] не завжди дорівнює геометричній [7]. За визначенням, ефективна площа – це площа ФЧЕ еквівалентного по фотосигналу ФД, чутливість якого рівномірно розподілена по ФЧЕ і дорівнює номінальному значенню локальної чутливості даного ФД [6].

У розрахунках інтегральної чутливості ФД (1) використовується величина геометричної площі приймача. Зрозуміло, що більша

ефективна площа призведе до збільшення фотосигналу і, без врахування її величини, штучно збільшується величина інтегральної чутливості. Тому до переліку можливих факторів збільшення чутливості було внесено вплив ефективної площі ФЧЕ ( $A_{\text{еф}}$ ), яка визначалася методом порівняння площ [7]. Коротко методика полягає в наступному.

Оскільки вихідний фотосигнал фотоприймача пропорційний площі фоточутливого елемента, то встановивши перед вхідним вікном ФП діафрагму товщиною 0,3–0,5 мм з розмірами у 1,5–2 рази меншими геометричних розмірів ФЧЕ, отримаємо усереднене значення фотосигналу  $I_{\text{діафр}}$ . Знявши діафрагму ми отримаємо фотосигнал  $I_{\text{ФД}}$  саме такого, еквівалентного за площею фотоприймача. Іншими словами, при вимірюванні в такий спосіб фотосигналу враховується вплив чутливості за геометричними межами ФЧЕ.

Величина ефективної фоточутливої площі  $A_{\text{еф}}$  визначалася за співвідношенням:

$$A_{\text{еф}} = A_{\text{д}} \frac{I_{\text{ФД}}}{I_{\text{діафр}}}, \quad (6)$$

де  $A_{\text{д}}$  – площа діафрагми.

У результаті вимірювань отримали значення ефективних площ:  $A_{\text{еф}}^{\text{№1}} = 15,7 \text{ мм}^2$  і  $A_{\text{еф}}^{\text{№2}} = 17,5 \text{ мм}^2$ , водночас геометричні розміри  $A_{\text{геом}} = 16,0 \text{ мм}^2$ . Дещо менша ефективна площа ФД №1 від геометричної пояснюється похибкою вимірювань і нерівномірністю чутливості по ФЧЕ.

Співвідношення площ визначає коефіцієнт  $k_4 = A_{\text{еф}}^{\text{№2}} / A_{\text{еф}}^{\text{№1}} = 1,1$ . Вплив розглянутих факторів на різницю інтегральних чутливостей буде  $k_5 = k_3 \cdot 1,1 = 1,78$ , що співпадає з  $k_1 = 1,8$ .

Певно, що коефіцієнти  $k_1$  і  $k_5$  відрізняються через похибки вимірювань, неточності установки діафрагм, нерівномірності чутливості по елементу, нелінійності енергетичної характеристики чутливості тощо. Проте вплив відмінностей спектральних характеристик, фотоелектричного зв'язку і додаткової чутливої площі ФД присутній і суттєвий. Якщо зростання чутливості, спричинене

формою спектральної характеристики, незначно вплине на споживчі якості ФД, то збільшення чутливої площі, а особливо наявність фотоелектричного зв'язку між елементами, – це ті параметри, які небажані при використанні багатоеlementного ФД.

### Висновки

Для зменшення ризику отримання неякісних виробів, по-перше, споживач не повинен обмежуватися примітивним переліком параметрів, а по-друге, виробник повинен забезпечувати на ранніх стадіях виробництва технологічний контроль для виявлення ФД з відхиленнями параметрів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електронний ресурс. [www.СКВ-Rhythm.narod.ru](http://www.СКВ-Rhythm.narod.ru)
2. *Ишанин Г.Г.* Приёмники излучения оптических и оптико-электронных приборов. – Ленинград: Машиностроение, 1986.
3. *Игнатов А.Н.* Оптоэлектронные приборы и устройства. – М.: Экотрендз, 2006.
4. *Анисимова И.Д., Викулин И.М., Заитов Ф.А., Курмашев Ш.Д.* Полупроводниковые фотоприёмники ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / Под ред. В.И. Стафеева. – М.: Радио и связь, 1984.
5. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик: ГОСТ 17772-88 приёмники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприёмные устройства. – М., 1988.
6. Термины и определения: ГОСТ 17772-88 приёмники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприёмные устройства. – М., 1988.
7. *Бутенко В.К., Годованюк В.Н., Докторович И.В., Рюхтин В.В., Юрьев В.Г.* Методика определения эффективной площади фоточувствительного элемента фотодиода // ТКЭА. 2007. – №3. – С38-40.
8. *Пасынков В.В., Чиркин Я.К.* Полупроводниковые приборы. – М.: Высш. школа, 1987 с.