

**В.Ф. Онищенко**

## **РОЗПОДІЛ ФОТОНОСІЇВ У МАКРОПОРИСТОМУ КРЕМНІЇ ПРИ ЇХ НЕОДНОРІДНІЙ ГЕНЕРАЦІЇ**

Виконано чисельний розрахунок розподілу фотодірок у макропористому кремнії при освітленні світлом з довжинами хвиль 0,95 та 1,05 мкм. Розрахунки проведено для макропористого кремнію з різною глибиною макропор та різною товщиною монокристалічної підкладки. Показано, що існує два максимуми в розподілі фотоносіїв заряду в макропористому кремнії, якщо він освітлюється світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм. Перший максимум розподілу фотодірок у макропористому кремнії знаходиться в макропористому шарі, другий максимум – у монокристалічній підкладці. Також було показано існування одного максимуму розподілу фотоносіїв у макропористому кремнії, який знаходиться в монокристалічній підкладці, при освітленні світлом довжиною хвилі 1,05 мкм.

**Ключові слова:** макропористий кремній, просторово неоднорідна генерація, фотоносії, надлишкові неосновні носії заряду.

### **1. ВСТУП**

Пористий кремній має особливості, які використовуються в сенсорах, приймачах, в інтегральних мікросхемах. Кремнієва матриця з порами ефективно поглинає світло і є фоточутливою [1]. Фотопровідність макропористого кремнію та її кінетика визначається процесами в області просторового заряду на поверхні макропори [2, 3]. Для структур макропористого кремнію розраховується розподіл фотоносіїв у шарі макропористого кремнію та монокристалічній підкладці при їх однорідній генерації по об'єму зразка [4, 5]. Розрахунок показав, що при збільшенні глибини макропор до 10 мкм концентрація нерівноважних неосновних носіїв заряду різко зменшується [5]. Кінетика фотопровідності макропористого кремнію вказує на вплив поверхневого потенціалу на релаксацію фотопровідності [6]. Макропористий кремній застосовується як сонячний елемент [7]. Така сонячна комірка забезпечує ефективність перетворення енергії 12,7% [8]. Макропористий кремній використовується в ролі антивідбиваючого покриття для кремнієвих сонячних елементів [9]. Розроблено газові датчики на основі пористого кремнію з CMOS-сумісним виготовленням [10].

Метою даної роботи є дослідження та аналіз чисельно розрахованого розподілу фотодірок у макропористому кремнії при неоднорідній генерації носіїв заряду, що є подальшим розвитком роботи [5].

### **2. КОНЦЕНТРАЦІЯ ФОТОНОСІЇВ У МАКРОПОРИСТОМУ КРЕМНІЇ ПРИ ЇХ НЕОДНОРІДНІЙ ГЕНЕРАЦІЇ**

Рівняння дифузії для фотодірок у шарі макропористого кремнію в напрямку паралельно порам записується у вигляді [11]:

$$D_p \frac{\partial^2 \delta p(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta p(x)}{\tau_{eff}} + g_p \exp(-\alpha x) = 0, \quad (1)$$

де  $D_p$  – коефіцієнт дифузії дірок,  $\delta p(x)$  – концентрація фотодірок,  $\tau_{eff}$  – ефективний час життя фотодірок у макропористому кремнії, який описано в роботі [12],  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла в кремнії,  $g_p$  – темп оптичної генерації фотодірок. Загальний розв’язок рівняння (1) має вигляд [11]:

$$\delta p(x) = C_1 \cosh(X) - C_2 \sinh(X) - \frac{g_p \tau_{eff} \exp(-\alpha x)}{(\alpha L_{eff})^2 - 1}, \quad (2)$$

де  $C_1, C_2$  – константи,  $X = x/L_{eff}$ ,  $L_{eff} = \sqrt{D_p \tau_{eff}}$ . Застосуємо рівняння (2) для кожної частини зразка та запишемо розподіл концентрації фотодірок від координати  $x$  для шару макропористого кремнію та монокристалічної підкладки:

$$\delta p_1(x) = C_1 \cosh(X_1) - C_2 \sinh(X_1) - \delta p_{g1}(x), \quad (3)$$

$$\delta p_2(x) = C_3 \cosh(X_2) - C_4 \sinh(X_2) - \delta p_{g2}(x), \quad (4)$$

де 
$$\delta p_{g1}(x) = \frac{g_p \alpha \tau_1 \exp(-\alpha x)}{(\alpha L_1)^2 - 1}, \quad \delta p_{g2}(x) = \frac{g_p \alpha \tau_2 [(1-P) \exp(-\alpha x) + P \exp(-\alpha(x-h_1))]}{(\alpha L_2)^2 - 1}$$

концентрація фотодірок від координати  $x$  у макропористому шарі та в монокристалічній підкладці,  $h_1$  – глибина пор,  $X = \frac{x}{L}$ ,  $X_1 = \frac{x}{L_1}$ ,  $X_2 = \frac{x}{L_2}$ ,  $L_1 = L_{eff}$ ,  $L_2 = \sqrt{D_p \tau_2}$ ,  $\tau_2$  – час життя дірок у монокристалічній підкладці,  $P$  – об’ємна частка пор.

Невідомі коефіцієнти  $C_1, C_2, C_3, C_4$  можна знайти з граничної умови, записаної для зовнішньої поверхні шару макропористого кремнію та зовнішньої поверхні шару монокристалічної підкладки.

$$D_p \frac{d\delta p_1}{dx}(0) = s_1 \delta p_1(0), \quad (5)$$

$$D_p \frac{d\delta p_2}{dx}(h_2) = -s_2 \delta p_2(h_2), \quad (6)$$

де  $h_2$  – товщина зразка макропористого кремнію,  $s_1, s_2$  – швидкості поверхневої рекомбінації на зовнішній поверхні макропористого кремнію та на зовнішній поверхні монокристалічної підкладки. Граничні умови (5) і (6) доповнимо граничними умовами на уявній площині. В цій площині повинні бути рівними концентрація фотодірок та струми.

$$\delta p_1(h_1) = \delta p_2(h_1), \quad (7)$$

$$D_p \left( (1-P) \frac{d\delta p_1}{dx}(h_1) + \frac{d\delta p_2}{dx}(h_1) \right) - P s_{por} \delta p(h_1) = 0, \quad (8)$$

де  $s_{por}$  – швидкість поверхневої рекомбінації на поверхні всередині макропор. Підставимо значення концентрацій фотодірок  $\delta p_1$  та  $\delta p_2$  у рівняння, які описують граничні умови (5)–(8), та отримаємо систему рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів:

$$C_1 S_1 + C_2 - \Delta p_{g1}(0)(\alpha L_1 + S_1) = 0, \quad (9)$$

$$C_3 [\sinh(H_2) + S_2 \cosh(H_2)] - C_4 [S_2 \sinh(H_2) + \cosh(H_2)] + \delta p_{g2}(h_2)(\alpha L_2 - S_2) = 0, \quad (10)$$

$$[C_1 \sinh(H_1) - C_2 \cosh(H_1)] S_{1por}^{-1} (1 - P) + C_3 [P \cosh(H_{12}) - S_{2por}^{-1} \sinh(H_{12})] + \\ + C_4 [P \sinh(H_{12}) + S_{2por}^{-1} \cosh(H_{12})] + \alpha D \delta p_{1g}(h_1) - \delta p_{2g}(h_2)(\alpha L_2 S_{2por}^{-1} + P) = 0, \quad (11)$$

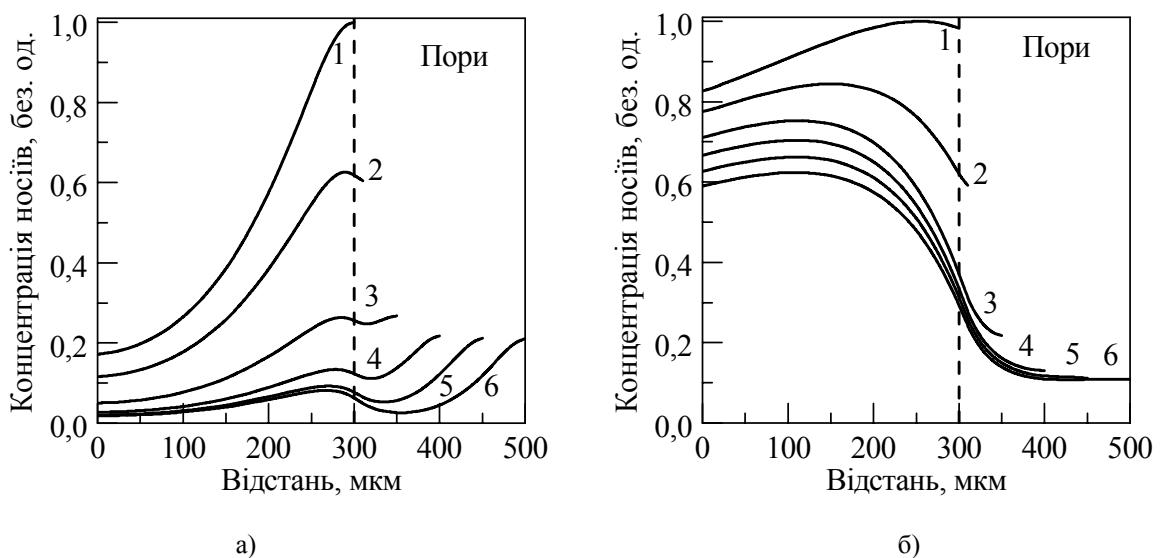
$$C_1 \cosh(H_1) - C_2 \sinh(H_1) - C_3 \cosh(H_{12}) + C_4 \sinh(H_{12}) - \delta p_{1g}(h_1) - \delta p_{2g}(h_2) = 0. \quad (12)$$

Позначимо безрозмірні величини товщини та швидкості поверхневої рекомбінації:

$$H_1 = \frac{h_1}{L_1}, H_2 = \frac{h_2}{L_2}, H_{12} = \frac{h_1}{L_2}, S_1 = \frac{s_1 L_1}{D_p}, S_2 = \frac{s_2 L_2}{D_p}, S_{1por} = \frac{s_{por} L_1}{D_p}, S_{2por} = \frac{s_{por} L_2}{D_p}.$$

### 3. РОЗРАХУНОК КОНЦЕНТРАЦІЇ ФОТОНОСІВ У МАКРОПОРИСТОМУ КРЕМНІЇ ПРИ ЇХ НЕОДНОРІДНІЙ ГЕНЕРАЦІЇ

На рисунку наведено розраховану за рівняннями (9)-(12) концентрацію фотодірок у макропористому кремнії з різною глибиною макропор. Довжини хвиль, для яких розраховано розподіл безрозмірної концентрації фотодірок, дорівнювали 0,95 мкм та 1,05 мкм. Товщина монокристалічного шару була незмінною та дорівнювала 300 мкм. Для розрахунку концентрації фотодірок було використано такі параметри: діаметр макропор 1 мкм, відстань між центрами макропор 2 мкм, що відповідає концентрації макропор  $2,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ . Об'ємна частка макропор 0,2. Швидкість поверхневої рекомбінації 1 м/с. Об'ємний час життя дірок дорівнює 10 мкс. Коефіцієнт дифузії дірок в кремнії дорівнює  $12 \text{ см}^2/\text{с}$ . Указані дані відповідають зразкам, наведеним у роботі [3]. Концентрації фотодірок у макропористому кремнії було нормовано на їх максимальне значення. Як видно з рисунка, концентрація фотодірок у монокристалі товщиною 300 мкм спадає за експоненціальним законом (крива 1).



Концентрація фотодірок у макропористому кремнії при падінні на нього електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі 0,95 (а) та 1,05 мкм (б). Глибина макропор, мкм: 0 (1), 10 (2), 50 (3), 100 (4), 150 (5), 200 (6).

При глибині макропор 10 мкм спостерігається максимум концентрації фотодірок, який знаходиться у монокристалічній підкладці біля дна макропор (крива 2). Максимум зумовлений тим, що електромагнітне випромінювання падає на дно макропор, проникає в монокристалічну підкладку і генерує в ній додаткові фотодірки. При генерації носіїв заряду електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі 0,95 мкм спостерігається другий максимум концентрації фотодірок, що знаходиться в макропористому шарі біля зовнішньої поверхні макропористого шару (рис. а, криві 3-6). Максимуми концентрації фотодірок зумовлені дифузією фотодірок. На рис. а видно збільшення концентрації фотодірок у макропористому шарі. Це збільшення концентрації фотодірок зумовлено дифузією фотодірок з монокристалічної підкладки в макропористий шар. Дифузія фотодірок викликана збільшенням концентрації фотодірок у монокристалічній підкладці. Концентрація фотодірок збільшилась завдяки попаданню електромагнітного випромінювання на дно макропор. При генерації носіїв заряду електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі 1,05 мкм другий максимум не з'являється (рис. б, криві 2-6), тому що електромагнітне випромінювання з цією довжиною хвилі поглинається слабо і генерація фотоносіїв майже рівномірна по об'єму. Головну роль в цьому випадку відіграє об'ємна рекомбінація в монокристалічній підкладці та рекомбінація на поверхні макропор у макропористому шарі. При збільшенні товщини макропористого шару, при незмінній товщині монокристалічної підкладки спостерігається насичення розподілу концентрації фотоносіїв у макропористому шарі (криві 4-6). При генерації носіїв заряду електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі 0,95 мкм концентрація фотодірок на поверхні зразка не змінюється (рис. а, криві 4-6). На цьому ж рисунку ми спостерігаємо збіг кривих 5 і 6. Криві збігаються, тому що рекомбінація в уявній площині вийшла на насичення. З цієї ж причини криві 4-6 на рис. б також збігаються.

#### **4. ВИСНОВКИ**

Виявлено існування двох максимумів розподілу фотоносіїв у макропористому кремнії при падінні на зразок електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі 0,95 мкм та одного максимуму, якщо довжина хвилі дорівнювала 1,05 мкм.

Розраховано та показано, що для макропористого кремнію з наскрізними макропорами концентрація фотоносіїв спадає за експоненціальним законом подібно до аналогічній залежності для монокристала. Але в цьому випадку об'ємному часу життя фотодірок у монокристалі відповідає ефективний час життя фотодірок у макропористому кремнії.

**V.F. Onyshchenko**

#### **DISTRIBUTION OF PHOTOCARRIERS IN MACROPOROUS SILICON IN CASE OF THE SPATIALLY INHOMOGENEOUS GENERATION OF CHARGE CARRIERS**

The numerical calculation of the photohole distribution in macroporous silicon when exposing to light with the wavelengths 0.95, 1.05  $\mu\text{m}$  has been performed. The calculation has been performed for macroporous silicon with various depths of macropores and various thicknesses of the single-crystal substrates. It has been shown that there are two maxima in the distribution of photocarriers in macroporous silicon if it is exposed to light with the wavelength 0.95  $\mu\text{m}$ . The first maximum of photohole distribution in macroporous silicon is located in the macroporous layer, the second maximum – in the single-crystal substrate. It has been also shown that there is one maximum in the photocarrier distribution in macroporous silicon that are located in the single-crystal substrate when exposing to light with the wavelength 1.05  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** macroporous silicon, spatially inhomogeneous generation, photocarriers, excess minority carriers.

1. Ernst M., Brendel R., Ferre R. et al. Thin macroporous silicon heterojunction solar cells. *phys. status solidi RRL*. 2012. **6**, № 5. P. 187–189.
2. Onyshchenko V.F., Karachevtseva L.A. Conductivity and photoconductivity of two-dimensional macroporous silicon structures. *Ukr. J. Phys.* 2013. **58**, № 9. P. 846–852.
3. Karachevtseva L., Onyshchenko V., Sachenko A. Photocarrier transport in 2D macroporous silicon structures. *Opto-electronics review*. 2010. **18**, № 4. P. 394–399.
4. Онищенко В.Ф. Вплив підкладки та поверхні макропори на фотопровідність у двовимірних структурах макропористого кремнію. *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*. 2014. № 49. С. 75–81.
5. Онищенко В.Ф. Розподіл нерівноважних носіїв заряду в структурах макропористого кремнію при їх однорідній генерації по об'єму зразка. *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*. 2015. № 50. С. 125–131.
6. Karachevtseva L.A., Onyshchenko V.F., Sachenko A.V. Kinetics of photoconductivity in macroporous silicon structures. *Ukr. J. Phys.* 2008. **53**, № 9. P. 874–881.
7. Ernst M., Brendel R., Ferre R. et al. Thin macroporous silicon heterojunction solar cells. *phys. status solidi RRL*. 2012. **6**, № 5. P. 187–189.
8. Ernst M. and Brendel R. Macroporous silicon solar cells with an epitaxial emitter. *IEEE J. Photovolt.* 2013. **3**, №2. P. 723–729.
9. Selj J.H., Marstein E., Thogersen A. et al. Porous silicon multilayer antireflection coating for solar cells; process considerations. *phys. status solidi C*. 2011. **8**, № 6. P. 1860–1864.
10. Varillaro G., Strambini L.M. An integrated CMOS sensing chip for NO<sub>2</sub> detection. *Sensors and Actuators B*. 2008. **134**, № 2. P. 585–590.
11. Зи С. *Физика полупроводниковых приборов*: в 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
12. Онищенко В.Ф. Нерівноважні носії заряду в структурах макропористого кремнію: дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07. НАН України, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова. Київ, 2015. 162 с.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
41, проспект Науки  
03680 Київ, Україна  
E-mail: onyshchenkovf@isp.kiev.ua

Отримано 24.11.2016