

В.Ф. Онищенко

Розподіл нерівноважних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії з однаковою товщиною пористих шарів

*Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, 03028, м. Київ, Україна,
onyshchenkovf@isp.kiev.ua*

В роботі для розрахунку розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії використовується розв'язок рівняння дифузії для стаціонарних умов, який записується для монокристалічної підкладки та макропористих шарів. Розв'язок рівняння дифузії доповнюється граничними умовами на межі макропористих шарів та монокристалічної підкладки та на межі зразка двостороннього макропористого кремнію. Розрахована залежність розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії з однаковою товщиною пористих шарів від глибини макропор, товщини зразка двосторонньому макропористому кремнії та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду. Показано, що в функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії спостерігаються два максимуми. Максимуми розташовані в фронтальному макропористому шарі, біля поверхні зразка, та в монокристалічній підкладці, біля межі фронтальний макропористий шар - монокристалічна підкладка.

Ключові слова: двосторонній макропористий кремній, пористий кремній, надлишкові носії заряду.

Подано до редакції 17.11.2021; прийнято до друку 9.03.2022.

Вступ

Макропористий кремній знайшов застосування в фотодатчиках, фотоприймачах та сонячних елементах [1]. Шар макропористого кремнію розташовується в сонячному елементі з однієї чи двох сторін. Сонячні елементи характеризуються своїми параметрами. Параметри вискоєфективних текстурованих кремнієвих сонячних елементів моделюються для їх оптимізації. Теоретично визначаються такі ключові параметри текстурованих кремнієвих сонячних елементів таких як струм короткого замикання, напруга розімкнутого кола та ефективність фотоперетворення [2]. При моделюванні враховуються такі рекомбінаційні механізми, як безвипромінювальна екситонна рекомбінація за механізмом Оже за участю глибокого рекомбінаційного рівня та рекомбінації в області просторового заряду [3]. Аналітичний опис моделі

релаксації фотопровідності показав, що час релаксації фотопровідності в макропористому кремнії визначається з системи двох трансцендентних рівнянь. Розв'язок цієї системи показав, що релаксація фотопровідності в зразку макропористого кремнію обмежена дифузією носіїв заряду від підкладки до рекомбінаційним поверхонь в кожному макропористому шарі [4]. Про це свідчить механізми перенесення носіїв заряду через поверхневий бар'єр в структурах макропористого кремнію [5] та температурна залежність кінетики фотопровідності, виміряна в макропористому кремнії при температурі 80-300 К [6]. Час релаксації фотопровідності в макропористому кремнії залежить від глибини макропор, яка визначає поверхню рекомбінації в порах. Час релаксації фотопровідності швидко зменшується зі збільшенням глибини макропор від 0 до 25 мкм завдяки швидкому зростанню поверхні рекомбінації в порах. Зменшення

часу релаксації фотопровідності сповільнюється коли глибина макропор змінюється від 25 мкм до 400 мкм. При глибині макропор від 25 мкм до 400 мкм, час релаксації фотопровідності в макропористому кремнії визначається дифузією надлишкових носіїв заряду [4].

Виводиться і застосовується модель, яка визначає ефективний час життя неосновних носіїв в зразках макропористого кристалічного кремнію в залежності від об'ємного часу життя, пасивації поверхні і морфології пор [7]. Середній діаметр пор 2,4 мкм, середня відстань між порами 5,2 мкм. Розрахунки узгоджуються з вимірюваннями при швидкості поверхневої рекомбінації $S = 0,24$ м/с на поверхні пори. Поверхня пасивується термічним окисленням. Товщину плівки двоокису кремнію збільшують, для покращення пасивації поверхні та зменшення ефективного часу життя неосновних носіїв заряду [8]. Взаємозв'язок між морфологією пористого шару, та ефективним часом життя неосновних носіїв заряду в одно та двосторонньому макропористому кремнії моделюється за допомогою аналітичної моделі. Ефективне час життя неосновних носіїв в двосторонньому макропористі кремнії залежить від таких величин, як об'ємне час життя неосновних носіїв, коефіцієнт дифузії неосновних носіїв і товщина монокристалічної підкладки. Крім того, ефективний час життя залежить від значень, властивих кожному макропористому шару: глибини макропор, середнього діаметра макропор, середньої відстані між центрами макропор, об'ємної частки макропор, швидкості поверхневої рекомбінації. Ефективна рекомбінація надлишкових носіїв заряду в двосторонньому макропористі кремнії визначається рекомбінацією надлишкових носіїв заряду на поверхні макропор та дифузією носіїв заряду від монокристалічної підкладки до рекомбінаційним поверхонь в кожному макропористі шарі [9]. Пропускання відбивання та поглинання в пористих структурах показують збільшення відбивання та поглинання за рахунок розсіювання світла в пористому шарі [10].

Метою даної роботи є застосування дифузійної моделі з граничними умовами на межі монокристалічної підкладки з пористими шарами та на межі зразка для розрахунку та дослідження розподілу неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії.

I. Методика розрахунку

Розглянемо пластину двошарового макропористого кремнію. Дві сторони пластини макропористого кремнію мають пори. Нехай одна з цих сторін освітлюється світлом. Початок координат вибраний на освітлюваній поверхні зразка. Вісь x має напрям в глибину пор. Рівняння дифузії неосновних носіїв заряду для одновимірного випадку в стаціонарних умовах має вигляд:

$$D_p \frac{\delta^2}{\delta x^2} \delta p(x) - \frac{\delta p(x)}{\tau_b} + g_0(x) \exp(-\alpha x) = 0 \quad (1)$$

де D_p - коефіцієнт дифузії неосновних носіїв заряду, $\delta p(x)$ - концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду, τ_b - об'ємний час життя неосновних носіїв заряду, α - коефіцієнт поглинання кремнію, $g_0(x)$ - швидкість генерації надлишкових неосновних носіїв заряду на освітленій поверхні. Рівняння дифузії (1) треба доповнити граничними умовами, які для стаціонарних умов записуються як:

$$g_s(x_0) - s_p \delta p(x_0) = e^{-1} j_p(x_0), \quad (2)$$

де e - елементарний заряд, $\delta p(x_0)$ - концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду на поверхні, $g_s(x_0)$ - темп поверхневої генерації надлишкових неосновних носіїв заряду на поверхні, $j_p(x_0)$ - густина струму надлишкових неосновних носіїв заряду біля поверхні, s_p - швидкість поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду на поверхні. Макропористий шар на який падає світло назвемо фронтальним макропористим шаром, інший макропористий шар назвемо тильним.

Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду за стаціонарних умов в фронтальному макропористому шарі в напрямку x запишеться як:

$$\delta p_1(x) = C_1 \cosh\left(\frac{x}{L_1}\right) - C_2 \sinh\left(\frac{x}{L_1}\right) - \delta p_{g1}(x), \quad (3)$$

де C_1, C_2 , сталі, $L_1 = \sqrt{D_p \tau_1}$, τ_1 - довжина дифузії та ефективний об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в фронтальному макропористому шарі, $\delta p_{g1}(x) = \frac{g_0 \alpha \tau_1 \exp(-\alpha x)}{(\alpha L_1)^2 - 1}$ - темп поверхневої генерації надлишкових неосновних носіїв заряду на поверхні зразка макропористого кремнію (фронтального макропористого шару). Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду за стаціонарних умов в монокристалічній підкладці запишеться як:

$$\delta p_2(x) = C_3 \cosh\left(\frac{x}{L_2}\right) - C_4 \sinh\left(\frac{x}{L_2}\right) - \delta p_{g2}(x), \quad (4)$$

де C_2, C_3 сталі, $L_2 = \sqrt{D_p \tau_2}$, τ_2 - довжина дифузії та ефективний об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в монокристалічній підкладці відповідно, $\delta p_{g2}(x) = \frac{g_0 \alpha \tau_2 ((1-P_1) \exp(-\alpha x) + P_1 \exp(-\alpha(x-h_1)))}{(\alpha L_2)^2 - 1}$ - темп поверхневої генерації надлишкових неосновних носіїв заряду на поверхні фронтальний макропористий кремній - монокристалічна підкладка, $P_1 = \pi D_{por1}^2 / (4a_1^2)$ - об'ємна частка пор, h_1, D_{por1}, a_1 - глибина пор, діаметр пор та відстані між центрами пор фронтального макропористого шару відповідно. Цей темп поверхневої генерації враховує генерацію на дні макропор фронтального макропористого шару та світло яке пройшло через фронтальний макропористий шар. Зауважимо що поверхню дна макропор обох шарів ми віднесемо до поверхні монокристалічної підкладки. Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду за стаціонарних умов в монокристалічній підкладці

та тильному макропористому шарі в напрямку x запишеться як:

$$\delta p_3(x) = C_5 \cosh\left(\frac{x}{L_3}\right) - C_6 \sinh\left(\frac{x}{L_3}\right) - \delta p_{g3}(x), \quad (5)$$

де C_5, C_6 , сталі, $L_3 = \sqrt{D_p \tau_3}$, τ_3 - довжина дифузії та об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в тильному макропористому шарі відповідно, $\delta p_{g3}(x) = \frac{g_0 \alpha \tau_3 ((1-P_1) \exp(-\alpha x) + P_1 \exp(-\alpha(x-h_1)))}{(\alpha L_3)^2 - 1}$ - темп поверхневої генерації надлишкових неосновних носіїв заряду на поверхні монокристалічна підкладка - тильний макропористий кремній.

Граничні умови (2) в двостороннього макропористого кремнію запишемо у вигляді:

$$\frac{dp_1}{dx}(0) = s_1 p_1(0), \quad (6)$$

$$\frac{dp_2}{dx}(h) = s_2 p_2(h), \quad (7)$$

$$(1 - P_1)D \frac{dp_1}{dx}(h_1) = D \frac{dp_2}{dx}(h_1) - P_1 s_{por1} p_2(h_1), \quad (8)$$

$$p_1(h_1) = p_2(h_2) \quad (9)$$

$$(1 - P_2)D \frac{dp_3}{dx}(h-h_2) = D \frac{dp_2}{dx}(h-h_2) - P_2 s_{por2} p_2(h-h_2), \quad (10)$$

$$p_2(h-h_2) = p_3(h-h_2), \quad (11)$$

де $s_1, s_2, s_{por1}, s_{por2}$ - швидкість поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду на фронтальній та тильній поверхні зразка та пор відповідно, $P_2 = \pi D_{por2}^2 / (4a_2^2)$ - об'ємна частка пор, h_2, D_{por2}, a_2 - глибина пор, діаметр пор та відстані між центрами пор тильного макропористого шару відповідно. Система рівнянь (6) - (11) має точний розв'язок, який можна знайти одним з методів розв'язку системи лінійних рівнянь, також її можна розв'язати і чисельно.

II. Розподіл надлишкових носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії від глибини пор

Світло падає на поверхню зразка паралельно порам. Воно освітлює поверхню макропористого кремнію та поверхню дна пор, розповсюджуючись в порах. Для розрахунку розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії використовувались такі параметри макропористого кремнію. Об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в монокристалічній кремнієвій підкладці був 10 мкс. Товщина макропористого кремнію 500 мкм.

Середній діаметр макропор 1 мкм. Середня відстані між центрами пор 2 мкм. Ефективний об'ємний час життя в обох шарах макропористого кремнію був 1 мкс. Швидкість поверхневої рекомбінації на поверхні зразка та на поверхні пор кожного макропористого шару була 1 м/с. Генерація надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм є неоднорідною по зразку завдяки тому, що кремній сильно поглинає електромагнітне випромінювання цієї довжини хвилі. Світло з довжиною хвилі 1,05 мкм слабо поглинається кремнієм, тому генерація надлишкових носіїв заряду цією електромагнітною хвилею є однорідною в монокристалічній підкладці та макропористих шарах. Світло створює додаткову генерацію надлишкових носіїв заряду в монокристалічній підкладці та тильному макропористому шарі падаючи на поверхню дна пор.

Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії від глибини пор при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною 0,95 мкм та 1,05 мкм показаний на рис. 1 та рис. 2. Глибина пор фронтального макропористого шару дорівнювала глибині пор тильного макропористого шару. Глибина пор кожного шару змінюється від нуля (відсутність пор, тобто це монокристал кремнію) до половини товщини зразка двостороннього макропористого кремнію, тобто пори стають наскрізними.

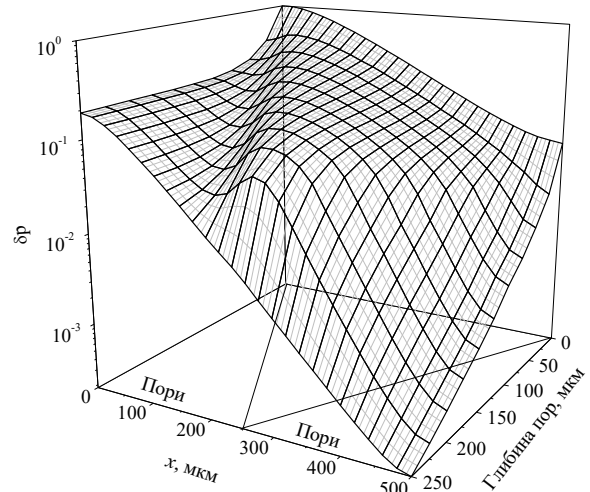


Рис. 1. Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм.

Коли пори відсутні, тобто в монокристалічному кремнії, функція розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду має максимум, який спостерігається біля освітлюваної поверхні (див. рис.1 та рис.2). До глибини пор рівній 100 мкм максимум функція розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії має один максимум, який спостерігається в монокристалічній підкладці біля межі фронтальний макропористий шар - монокристалічна підкладка.. З рис. 1 видно, що

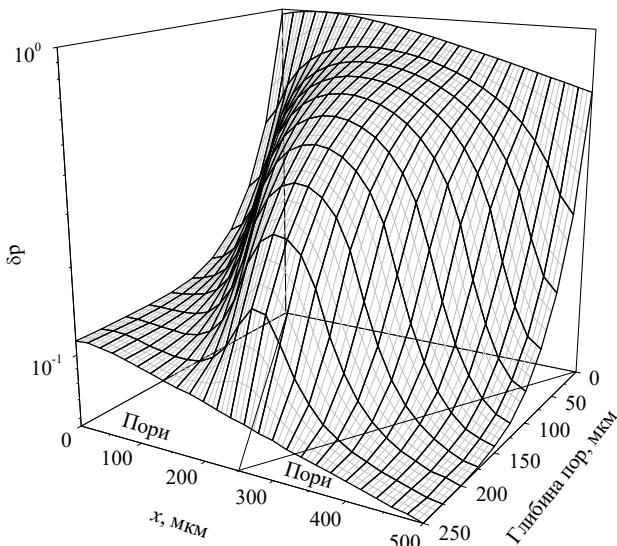


Рис. 2. Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм.

концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду на фронтальній поверхні зразка зі збільшенням глибини пор до 100 мкм зменшується, а далі не змінюється. Коли концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду на фронтальній поверхні зразка перестає змінюватись в функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії з'являється два максимуми (див. рис. 1). Вони спостерігаються в фронтальному макропористому шарі, біля поверхні зразка, та в монокристалічній підкладці, біля межі фронтальний макропористий шар - монокристалічна підкладка (див. рис. 1). Два максимуми обумовлені: сильним поглинанням кремнієм світла з довжиною хвилі 0,95 мкм, наявністю двох поверхонь на які падало електромагнітне випромінювання та дифузією надлишкових носіїв заряду.

При генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм (див. рис. 2), розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії має один максимум, який знаходиться посередині монокристалічної підкладки. Як видно з рис. 2, один максимум в функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду спостерігається для глибини пор менших 200 мкм. Два максимуми спостерігаються у тому випадку, коли глибина пор більше 200 мкм (див. рис. 2). Аналізуючи розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії при освітленні світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм та 1,05 мкм можна прийти до висновку, що два максимуми у функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду тоді, коли глибина проникнення світла в кремній порівняна з глибиною пор фронтального макропористого шару.

III. Розподіл надлишкових носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії від його товщини

Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії від товщини зразка двостороннього макропористого кремнію, при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною 0,95 мкм та 1,05 мкм, показаний на рис. 3 та рис. 4 відповідно. Глибини пор кожного макропористого шару були однаковими і дорівнювала 50 мкм. Товщина зразка двостороннього макропористого кремнію змінювалась від 100 мкм до 500 мкм. Пори були наскрізними, коли товщина зразка була 100 мкм. Об'ємний час життя в монокристалічній кремнієвій підкладці був 10 мкс. Середній діаметр макропор 1 мкм. Середня відстані між центрами пор 2 мкм. Ефективний об'ємний час життя в обох шарах макропористого кремнію був 1 мкс. Швидкість поверхневої рекомбінації на поверхні зразка та на поверхні пор кожного макропористого шару була 0,1 м/с.

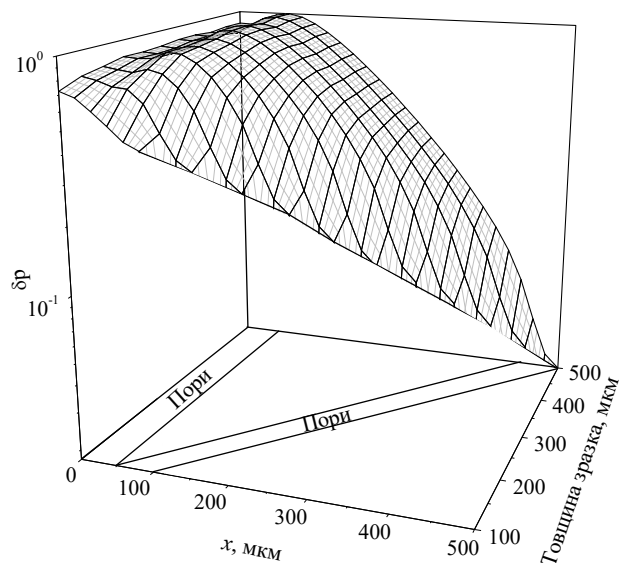


Рис. 3. Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від товщини зразка при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм. Глибина пор кожного макропористого шару 50 мкм.

Як видно з рис. 3, при генерації надлишкових носіїв заряду світлом 0,95 мкм та глибині пор 50 мкм, функція розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії має один максимум. Другий максимум ще не спостерігається завдяки тому, що глибина проникнення світла в кремній порівняна з глибиною пор. Глибина макропор в зразку постійна, тому розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в кожному макропористому шарі не змінюється. При зменшенні товщини зразка

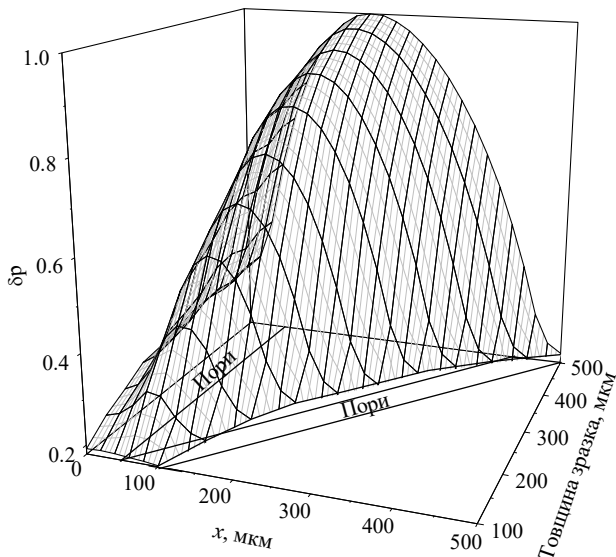


Рис. 4. Розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від товщини зразка при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм. Глибина пор кожного макропористого шару 50 мкм.

двостороннього макропористого кремнію висота максимуму функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду не змінюється (див. рис. 3).

Як видно з рис. 4, при генерації надлишкових носіїв заряду світлом 1,05 мкм та глибині пор 50 мкм, функція розподілу концентрації надлишкових

неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії має один максимум, який знаходиться посередині монокристалічної підкладки. При зменшенні товщини зразка двостороннього макропористого кремнію від 500 мкм до 100 мкм, висота максимуму функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду поступово зменшується в 5 разів (див. рис. 4).

Висновки

Показано, що в функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії спостерігаються два максимуми. Максимуми розташовані в фронтальному макропористому шарі, біля поверхні зразка, та в монокристалічній підкладці, біля межі фронтальний макропористий шар - монокристалічна підкладка.

Два максимуми у функції розподілу концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду спостерігаються тоді, коли глибина проникнення світла в кремній порівняна з глибиною пор фронтального макропористого шару в іншому випадку спостерігається один максимум. Максимуми спостерігаються при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною 0,95 мкм та 1,05 мкм.

Онищенко В.Ф. – к.ф.-м.н., старший науковий співробітник.

- [1] M. Ernst, R. Brendel, R. Ferre, N.P. Harder, *Physic Status Solidi – Rapid Research Letters* 6(5), 187 (2012); <https://doi.org/10.1002/pssr.201206113>.
- [2] A.V. Sachenko, V.P. Kostylyov, R.M. Korkishko, V.M. Vlasyuk, I.O. Sokolovskyi, B.F. Dvernikov, V.V. Chernenko, and M. Evstigneev, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics* 24(2), 175 (2021); <https://doi.org/10.15407/spqeo24.02.175>.
- [3] A.V. Sachenko, V.P. Kostylyov, R.M. Korkishko, V.M. Vlasiuk, I.O. Sokolovskyi, B.F. Dvernikov, V.V. Chernenko, M.A. Evstigneev, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics* 24(3), 319 (2021); <https://doi.org/10.15407/spqeo24.03.319>.
- [4] V.F. Onyshchenko, L.A. Karachevtseva, M.I. Karas', *Emerging Science journal* 4(3), 192 (2020); <https://doi.org/10.28991/esj-2020-01223>.
- [5] L.A. Karachevtseva, V.F. Onyshchenko, A.V. Sachenko, *Ukrainian Journal of Physics* 53(9), 874 (2008).
- [6] L. Karachevtseva, M. Karas', V. Onishchenko, F. Sizov, *Proceedings of SPIE* 5360, 381 (2004); <https://doi.org/10.1117/12.530446>.
- [7] M. Ernst, R. Brendel, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95(4), 1197 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.017>.
- [8] L. Karachevtseva, M. Kartel, V. Kladko, O. Gudymenko, Wang Bo, V. Bratus, O. Lytvynenko, V. Onyshchenko, O. Stronska, *Applied Surface Science* 434, 142 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.029>.
- [9] V.F. Onyshchenko, L.A. Karachevtseva, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 23(1), 29 (2020); <https://doi.org/10.15407/spqeo23.01.29>.
- [10] P.O. Gentsar, A.V. Stronski, L.A. Karachevtseva, V.F. Onyshchenko, *Physics and Chemistry of Solid State* 22(3), 453 (2021); <https://doi.org/10.15330/pcss.22.3.453-459>.

V.F. Onyshchenko

Distribution of Excess Charge Carriers in Bilateral Macroporous Silicon with the Same Thickness of Porous Layers

*V.Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
onyshchenkovf@isp.kiev.ua*

In this work, to calculate the distribution of the excess minority carrier concentration in bilateral macroporous silicon, the solution of the diffusion equation for stationary conditions is used, which is written for a monocrystalline substrate and macroporous layers. The solution to the diffusion equation is supplemented by boundary conditions at the interface between macroporous layers and a monocrystalline substrate and at the boundaries of a bilateral macroporous silicon sample. The dependence of the distribution of the excess minority carrier concentration in bilateral macroporous silicon with the same thickness of porous layers on the depth of macropores, the thickness of the sample of bilateral macroporous silicon, and the bulk lifetime of minority charge carriers is calculated. It is shown that the distribution function of the excess minority carrier concentration in bilateral macroporous silicon exhibits two maxima. The maxima are located in the frontal macroporous layer, near the surface of the sample, and in a monocrystalline substrate, near the interface, the frontal macroporous layer - monocrystalline substrate.

Keywords: bilateral macroporous silicon, porous silicon, excess charge carriers.