

В.Ф. Онищенко, Л.А. Карачевцева

ВПЛИВ ГЛИБИНИ МАКРОПОР НА ЕФЕКТИВНИЙ ЧАС ЖИТТЯ НЕОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В МАКРОПОРИСТОМУ КРЕМНІЇ

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

В роботі наведена система рівнянь, яка визначає ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії. Система рівнянь виведена з рівняння дифузії неосновних носіїв заряду, записаного для макропористого шару та монокристалічної підкладки. Розв'язок нестационарного рівняння дифузії, записаного для макропористого шару та монокристалічної підкладки, доповнюються граничними умовами на поверхнях зразка макропористого кремнію та на межі між макропористим шаром та монокристалічною підкладкою. Ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії на монокристалічній підкладці залежить від таких величин як: об'ємний час життя неосновних носіїв заряду, коефіцієнт дифузії носіїв заряду, товщина монокристалічної підкладки, середній діаметр макропор, середня відстань між центрами макропор, швидкість поверхневої рекомбінації, об'ємна частка макропор. Ефективна рекомбінація нерівноважних носіїв заряду в макропористому кремнії визначається рекомбінацією нерівноважних носіїв заряду на поверхні макропор та обмежується дифузією носіїв заряду з монокристалічної підкладки до рекомбінаційних поверхонь в макропористому шарі. Ми, використовуючи систему рівнянь, розрахували та показали на рисунку ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії в залежності від глибини макропор. Для перевірки точності розрахунків виконаних за допомогою системи аналітичних рівнянь, яка визначає ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії на монокристалічній підкладці, ми скористалися чисельним методом. Чисельний метод показав збіг розрахунків ефективного часу життя неосновних носіїв заряду. При глибині макропор близьких до розмірів зразка макропористого кремнію, спостерігається розбіжність результатів розрахунків.

Ключові слова: час життя неосновних носіїв заряду, макропористий кремній, релаксація

ВСТУП

Макропористий кремній є перспективним матеріалом не тільки завдяки своїм фотоелектричним, оптичним та електричним властивостям, але й простоті виготовлення, можливістю інтеграції в мікросхеми. Кремнієва поверхня, структурована макропорами, пірамідками та стовпчиками, поглинає світло у широкому діапазоні довжин хвиль, завдяки цьому вона знайшла застосування в сонячних батареях [1, 2], фотодетекторах [3] та сенсорах зображення з підвищеною чутливістю [4]. Спектри фотопровідності в кремнії з текстурованими поверхнями моделюються з врахуванням багаторазового відбивання світла від поверхонь. Світло, відбиваючись від плоских та структурованих поверхонь кремнію, вловлюється сонячним елементом [5]. Кремній зі структурованими поверхнями треба ефективно пасивувати [6]. Час життя неосновних носіїв заряду в сонячних батареях

із пасивованими структурованими поверхнями дорівнює мілісекундам [7]. Розраховується залежність ефективного часу життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії [8, 9] та в чорному кремнії, структурованому конусами і пірамідками від діаметра основи конуса, сторони основи піраміди, висоти конуса і піраміди [10]. Розподіл нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію розраховується методом кінцевих різниць [11]. Виявлено швидке зменшення максимуму функції розподілу надлишкового носіїв заряду в макропористому шарі та повільне зниження функції розподілу в монокристалічній підкладці [11].

Метою даної роботи є знаходження ефективного часу життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії та визначення співвідношення між ефективним часом життя неосновних носіїв заряду та характеристиками макропористого кремнію.

ЕФЕКТИВНИЙ ЧАС ЖИТТЯ НЕОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В МАКРОПОРИСТОМУ КРЕМНІЇ

Нехай об'ємна генерація носіїв заряду виключена при $t=0$. Для одновимірного випадку нестационарне рівняння дифузії для надлишкових неосновних носіїв заряду запишеться так:

$$\frac{\partial}{\partial t} \delta p(x, t) = D_p \frac{\partial^2}{\partial x^2} \delta p(x, t) - \frac{\delta p(x, t)}{\tau_b}, \quad (1)$$

де, $\delta p(x, t)$ – концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду, t є час, x є координата, D_p – коефіцієнт дифузії для неосновних носіїв заряду, τ_b – час життя надлишкових неосновних носіїв заряду в об'ємі монокристалу кремнію. Граничні умови:

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

де e – елементарний заряд, $\delta p(x_0, t)$ – концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду на поверхні, яка перпендикулярна вісі x і проходить через точку x_0 , $g_s(x_0, t)$ – темп поверхневої генерації надлишкових носіїв заряду на цій поверхні, $j_p(x_0, t)$ – густина діркового струму біля цієї поверхні, s_p – швидкість поверхневої рекомбінації носіїв заряду на цій поверхні. Дифузійний струм надлишкових неосновних носіїв заряду j_p , який тече до поверхні записується зі знаком мінус. Загальний розв'язок рівняння (1) записується так [9]:

$$\delta p(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \cos(n a_s x), \quad (3)$$

де A_n – коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є початкового розподілу надлишкових неосновних носіїв заряду, τ_n – характеристичні часи, n є натуральні числа, a_s – стале характеристичне число. Між τ_n та a_s існує співвідношення:

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_b} + D_p a_s^2 n^2. \quad (4)$$

Ефективний час життя неосновних носіїв заряду дорівнює $\tau_{eff} = \tau_1$, поверхневий час життя $\tau_s = (D_p a_s^2)^{-1}$. Поверхневий час життя показує вплив поверхневої рекомбінації на

ефективний час життя неосновних носіїв заряду.

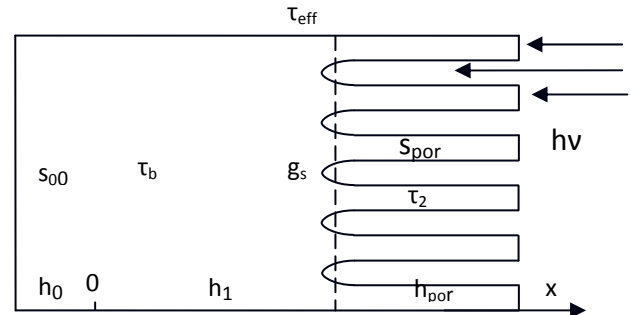


Рис. 1. Макропористий кремній

Нехай макропористий кремній освітлюється світлом з боку макропор паралельно макропорам, як показано на рис. 1. Світло проникає в пори та освітлює монокристалічну підкладку через дно макропор. Водночас в монокристалічну підкладку потрапляє світло, що пройшло через кремній між порами. Освітлення, релаксація та дифузія надлишкових носіїв заряду в макропористому кремнії та монокристалічній підкладці різняться, тому різняться їх початкові функції розподілу. За умови коли $t \gg \tau_{eff}$ за початкову функцію розподілу в рівнянні (3) відповідає сталий коефіцієнт A_1 , який є першим коефіцієнтом розкладання в ряд Фур'є цієї функції. З рівняння (3) функції розподілу надлишкових носіїв заряду на монокристалічній підкладці $\delta p_1(x)$ та макропористому кремнії $\delta p_2(x)$ запишемо так:

$$\delta p_1(x, t) = A_{11} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{eff}}\right) \cos(a_{s1} x), \quad (5)$$

$$\delta p_2(x, t) = A_{12} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{eff}}\right) \cos(a_{s2} x), \quad (6)$$

де A_{11} , A_{12} є сталі коефіцієнти функції розподілу надлишкових носіїв заряду в монокристалічній підкладці та макропористому кремнії. Відстань між макропорами набагато менша за довжину дифузії надлишкових носіїв та відстань між поверхнями монокристалічної підкладки, тому ефективний час життя надлишкових неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії буде менше за такий в монокристалічній підкладці. За таких умов, концентрація надлишкових носіїв заряду в

макропористому кремнію буде спадати набагато сильніше, ніж в монокристалічній підкладці. Виникне градієнт концентрації, який обумовить дифузію носіїв з монокристалічної підкладки в макропористий шар. Тобто, буде відбуватися поверхнева генерація надлишкових носіїв заряду з площини, яка проходить через дно макропор, в макропористий шар. Причому, поверхнева генерація буде залежати від часу завдяки тому, що відбувається релаксація та дифузія надлишкових носіїв заряду в структурі макропористого кремнію. Через $t \gg \tau_{eff}$ релаксація надлишкових носіїв заряду буде відбуватися за експонентою, як в макропористому кремнії так і в монокристалічній підкладці з ефективним часом релаксації τ_{eff} . Розглянемо випадок коли глибина макропор $h_{por} \gg L_2$, де $L_2 = L_{eff,p,por} = \sqrt{D_p \tau_2}$ є ефективна довжина дифузії неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії. Ефективний час життя надлишкових неосновних носіїв заряду в шарі макропористого кремнію τ_2 записується так [9]:

$$\frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{\pi D_{por} s_{por}}{a_{por}^2 - 0.25 \pi D_{por}^2}, \quad (7)$$

де D_{por} – діаметр макропор, a_{por} – середня відстань між центрами макропор, s_{por} – швидкість поверхневої рекомбінації на поверхні пори.

В об'ємі монокристалічної підкладки функція розподілу надлишкових неосновних носіїв заряду буде мати максимум, тому що на поверхнях монокристалічної підкладки відбувається рекомбінація носіїв заряду. Виберемо в точці максимуму початок координат вісі x , як показано на рис. 1. Вісь x направимо в сторону макропор, паралельно порам. Позначимо координату точки площини, що проходить через дно макропор та перпендикулярна вісі x через h_1 , координату точки вільної поверхні монокристалічної підкладки через h_0 , вона буде від'ємна.

Для того щоб зв'язати функції розподілу надлишкових неосновних носіїв заряду в макропористому шарі та монокристалічній підкладці запишемо граничні умови в площині, що проходить через дно макропор.

Дно макропор віднесемо до поверхні монокристалічної підкладки. Для будь-якого значення часу $t \gg \tau_{eff}$ в площині монокристалічної підкладки, що проходить через дно макропор, граничну умову (2) можна записати так:

$$-(1-P)g_s(h_1, t) - P s_{por} \delta p_1(h_1, t) = -j_{1p}(h_1, t), \quad (8)$$

де $g_s(h_1, t)$ – поверхнева генерація надлишкових носіїв заряду в площині, що проходить через дно пор в напрямку пор, P – об'ємна часка пор, $j_{1p}(h_1, t)$ – густина дифузійного струму надлишкових неосновних носіїв заряду в площині, що проходить через дно пор. Ми перед генерацією поставили знак мінус тому що, в площині, що проходить через дно макропор, йде процес зникнення носіїв заряду, які прийшли з монокристала кремнію. Враховуючи рівняння (5), густина дифузійного діркового струму біля поверхні, що проходить через дно пор, записується так:

$$j_{1p}(h_1, t) = -D_p \frac{\partial}{\partial x} \delta p_1(h_1, t) = D_p \delta p_1(h_1, t) a_{s1} \tan(a_{s1} h_1). \quad (9)$$

Для будь-якого значення часу $t \gg \tau_{eff}$ граничну умову (2) для макропористого шару в площині, що проходить через дно макропор, запишемо так:

$$g_s(h_1, t) = j_{2p}(h_1, t) = -D_p \frac{\partial}{\partial x} \delta p_2(h_1, t). \quad (10)$$

Ми не врахували поверхневу рекомбінацію на дні макропор, тому що дно макропор ми віднесли до поверхні монокристалічної підкладки. Підставимо в (8) рівняння (9) та (10) маємо:

$$(1-P)D_p \frac{\partial}{\partial x} \delta p_2(h_1, t) - P s_{por} \delta p_1(h_1, t) = -D_p \delta p_1(h_1, t) a_{s1} \tan(a_{s1} h_1). \quad (11)$$

В площині, яка проходить через дно макропор, не повинно бути розриву функції, тобто $p_1(h_1, t) = p_2(h_1, t)$, тому рівняння (11) запишеться як:

$$\frac{\partial}{\partial x} \delta p_2(h_1, t) D_p (1-P) - P S_{por} = -D_p a_{s1} \tan(a_{s1} x), \quad (12)$$

або:

$$a_{s1} \tan(a_{s1} h_1) = \frac{1}{D_p} \left(P S_{por} - \frac{\partial}{\partial x} \delta p_2(h_1, t) D_p (1-P) \right). \quad (13)$$

Запишемо граничні умови на вільних площинах зразка макропористого кремнію.

$$s \delta p_1(h - (h_{por} + h), t) = D_p \frac{\partial}{\partial x} \delta p_1(h - (h_{por} + h), t), \quad (14)$$

$$s \delta p_2(h_{por} + h_1, t) = D_p \frac{\partial}{\partial x} \delta p_2(h_{por} + h_1, t), \quad (15)$$

де s – швидкість поверхневої рекомбінації на поверхнях зразка макропористого кремнію на монокристалічній підкладці.

Загальним розв'язком рівняння (1) є рівняння (3), яке складається з доданків добутків. В кожному добутку змінні t , x розділені, x є аргументом функції косинус, а t є показником експоненти. За умови, коли $t \gg \tau_{eff}$ релаксація надлишкових носіїв заряду буде відбуватися за експонентою, яка є першим доданком, що і показано рівняннями (5) та (6). Це означає, що ми маємо стаціонарний розподіл функції концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду по координаті, яка постійно множиться на експоненту з показником t . Стаціонарний розв'язок рівняння (1) помножений на експоненту з часом, запишеться так:

$$\delta p_2(x, t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_{eff}}\right) \left(C_1 \exp\left(\frac{x}{L_2}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{x}{L_2}\right) \right), \quad (16)$$

Запишемо відношення похідної по x функції з рівняння (16) від h_1 до цієї функції від h_1 :

$$\frac{\partial}{\partial x} \delta p_2(h_1, t) = \frac{1}{L_2} \frac{C_1 \exp\left(\frac{h_1}{L_2}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{h_1}{L_2}\right)}{C_1 \exp\left(\frac{h_1}{L_2}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{h_1}{L_2}\right)}. \quad (17)$$

Розділимо чисельник та знаменник рівняння (17) на C_2 з експонентою та виділимо цілу частину, тоді рівняння (17) запишеться так:

$$\frac{\partial}{\partial x} \delta p_2(h_1, t) = \frac{1}{L_2} \left(1 - \frac{2}{\frac{C_1}{C_2} \exp\left(\frac{2h_1}{L_2}\right) + 1} \right). \quad (18)$$

Підставимо рівняння (16) в рівняння (15) та запишемо:

$$s \left(C_1 \exp\left(\frac{h_{por} + h_1}{L_2}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{h_{por} + h_1}{L_2}\right) \right) - \frac{D_p}{L_2} \left(C_1 \exp\left(\frac{h_{por} + h_1}{L_2}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{h_{por} + h_1}{L_2}\right) \right) = 0, \quad (19)$$

або:

$$C_1 \exp\left(\frac{h_{por} + h_1}{L_2}\right) (S - 1) + C_2 \exp\left(-\frac{h_{por} + h_1}{L_2}\right) (S + 1) = 0. \quad (20)$$

де через $S = sL_p/D_p$ позначено безрозмірну швидкість поверхневої рекомбінації. З рівняння (20) знайдемо відношення сталих, яке запишеться так:

$$\frac{C_1}{C_2} = -\exp\left(\frac{-2(h_{por} + h_1)}{L_2}\right) \frac{S - 1}{S + 1}. \quad (21)$$

або, відокремивши цілу частину, запишемо:

$$\frac{C_1}{C_2} = \exp\left(\frac{-2(h_{por} + h_1)}{L_2}\right) \left(\frac{2}{S_0 + 1} - 1 \right). \quad (22)$$

Підставимо рівняння (18) і (22) в рівняння (13) та запишемо:

$$a_{s1} \tan(a_{s1} h_1) = \frac{1}{L_2} \left(P S_{por} + (1-P) \left(\frac{2}{\exp\left(\frac{-2h_{por}}{L_2}\right) \left(\frac{2}{S_0 + 1} - 1 \right) + 1} - 1 \right) \right), \quad (23)$$

де $S_{por} = s_{por}L_2/D_p$ позначено безрозмірну швидкість поверхневої рекомбінації на поверхні пори. Сума в дужках рівняння (23) еквівалентна безрозмірній швидкості поверхневої рекомбінації в площині, яка проходить через дно макропор. Вона складається з безрозмірної швидкості поверхневої рекомбінації на поверхні пори (перший доданок в дужках) та швидкості протікання носіїв заряду з монокристалічної підкладки в макропористий шар (другий доданок в дужках). Об'ємна частка пор показує відповідне співвідношення швидкостей. Стале характеристичне число в монокристалічній підкладці a_{s1} знаходиться з системи рівнянь, в яку входить рівняння (23) та рівняння, яке запишеться так:

$$a_{s1}D_p \tan(a_{s1}(h - (h_{por} + h_1))) = s_0. \quad (24)$$

Рівняння (24) отримане з рівнянь (5) та (14). Знаючи a_{s1} , ефективний час життя неосновних носіїв заряду знаходиться з рівняння (4); коли $n=1$, воно запишеться так:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + D_p a_{s1}^2. \quad (25)$$

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОГО ЧАСУ ЖИТТЯ НЕОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГЛИБИНИ МАКРОПОР

На рис. 2 представлена залежність ефективного часу життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнію від глибини макропор. Залежність розрахована з системи рівнянь (7), (23)–(25) та показана суцільною кривою. Для порівняння розраховано чисельним методом, який представлений в роботі [9, 11], ефективний час життя неосновних носіїв заряду для окремих товщин макропористого шару, який показано зафарбованими кружечками. Для розрахунку використовувались: час життя в об'ємі монокристалічного кремнію 10 мкм, швидкість поверхневої рекомбінації на всіх поверхнях була однаковою і дорівнювала 0.9 м/с, діаметр макропор 2 мкм, період макропор 4 мкм. Розрахований ефективний час життя в кремнії між порами за рівнянням дорівнював (7) часу життя на поверхні макропор, що дорівнює 1 мкм. З рис. 2 видно,

що ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії на монокристалічній підкладці повільно зменшується. Така залежність ефективного часу життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії на монокристалічній підкладці пояснюється тим, що рекомбінація на поверхні макропор обмежується дифузією нерівноважних носіїв заряду до рекомбінаційних поверхонь. Зі збільшенням глибини макропор зростає і площа макропор, а отже, і рекомбінація нерівноважних носіїв заряду. На поверхні макропор рекомбінують нерівноважні носії заряду, які генерувалися безпосередньо в макропористому шарі та ті носії заряду, які дифундували з монокристалічної підкладки. Рекомбінація не може зростати більше певної величини, бо вона буде обмежуватися дифузією нерівноважних носіїв заряду до рекомбінаційних поверхонь. Просто, нерівноважні носії зряду не будуть встигати дифундувати до рекомбінаційних поверхонь, і цим буде обмежуватись рекомбінація. Таким чином, якою б великою швидкість поверхневої рекомбінації не була, вона буде обмежуватись дифузією, і тоді поверхневий час життя визначається не швидкістю поверхневої рекомбінації, а часом дифузії носіїв заряду до рекомбінаційних поверхонь, який залежить від коефіцієнта дифузії. В цьому випадку швидкість поверхневої рекомбінації втрачає сенс, бо вона нічого не буде характеризувати. Дифузія нерівноважних носіїв заряду в макропористому кремнії на підкладці характеризується ефективною довжиною дифузії в макропористому шарі та довжиною дифузії в монокристалічній підкладці. Якщо нерівноважні носії заряду дифундують на відстань довжини дифузії, то їх концентрація зменшиться в $e = 2.17$ раз і на відстані, що дорівнює двом, трьом довжинам дифузії, їх концентрація буде невеликої і кількість рекомбінованих носіїв на поверхні буде малою. Таким чином, дифузія нерівноважних носіїв заряду до рекомбінаційних поверхонь та вплив поверхні на рекомбінаційні процеси обмежується, як в часі – часом дифузії носіїв заряду до рекомбінаційних поверхонь (коефіцієнтом дифузії), так просторово – довжиною дифузії. Як видно з рис. 2, ефективний час життя неосновних носіїв

заряду різко спадає зі зростанням глибини макропор, якщо товщина зразка макропористого кремнію дорівнює 10 мкм – 200 мкм. При товщині зразка макропористого кремнію більше ніж 200 мкм, ефективний час життя неосновних носіїв заряду спадає повільно, але коли товщина монокристалічної підкладки стає менше 100 мкм, спостерігається різке зменшення ефективний час життя. Повільне спадання ефективний час життя неосновних носіїв заряду пояснюється обмеженням дифузії притоку нерівноважних носіїв заряду до рекомбінаційних поверхонь. Різкий спад пояснюється близькістю рекомбінаційних поверхонь та відсутністю обмеження рекомбінації дифузіїю носіїв заряду.

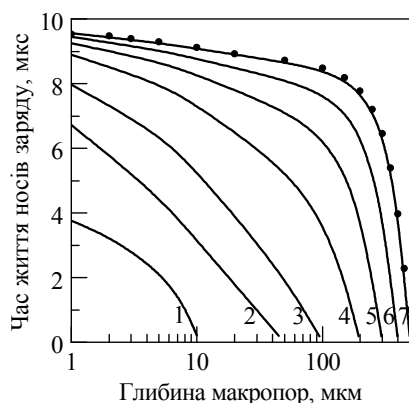


Рис. 2. Ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії в залежності від глибини макропор, розрахований для товщини зразка макропористого кремнію, мкм: 1 – 10, 2 – 50, 3 – 100, 4 – 200, 5 – 300, 6 – 400, 7 – 500. Зафарбованими кружечками на кривій 7 позначено ефективний час релаксації розподілу надлишкових неосновних носіїв заряду, розрахований методом кінцевих різниць [9, 11]

ВИСНОВКИ

Аналітично показано, що ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії знаходиться з системи двох рівнянь. Перше рівняння описує процеси дифузії та рекомбінації в шарі макропористого кремнію та рекомбінацію на межі шару макропористого кремнію – монокристалічна підкладка. Друге рівняння описує дифузіїю біля поверхні та рекомбінацію на поверхні монокристалічної підкладки.

Виявлено, що на ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії впливає рекомбінація в об'ємі, яка характеризується об'ємним часом життя нерівноважних неосновних носіїв заряду та дифузіїю, яка характеризується коефіцієнтом дифузії носіїв заряду. Також, на ефективний час життя впливає рекомбінація на поверхні, яка залежить від швидкості поверхневої рекомбінації, товщини монокристалічної підкладки та характеристик макропористого шару: глибини макропор, середнього діаметра макропор, середньої відстані між центрами макропор, об'ємної частки макропор.

Показано, що ефективний час життя неосновних носіїв заряду в зразку макропористого кремнію обмежується дифузіїю носіїв заряду з підкладки до рекомбінаційних поверхонь в макропористому шарі, якщо час доставки дифузіїю нерівноважних носіїв заряду до рекомбінаційних поверхонь шару макропористого кремнію стає більшим за ефективний час рекомбінації в макропористому шарі.

Effect of pore depth on the effective minority carrier lifetime in macroporous silicon

V.F. Onyshchenko, L.A. Karachevtseva

*V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
41 Nauki Ave., Kyiv, 03680, Ukraine, onyshchenkovf@isp.kiev.ua*

The paper presents a system of equations that determines the effective lifetime of minority charge carriers in macroporous silicon. The system of equations was found from the diffusion equation of minority carriers recorded for the macroporous layer and the single-crystal substrate. The solution of nonstationary diffusion equation written for a macroporous layer and a single-crystal substrate is complemented by boundary conditions at the surfaces of a sample of macroporous silicon and at the interface between the macroporous layer and the single-crystal substrate. The effective lifetime of minority charge carriers in macroporous silicon on a single crystal substrate depends on such values as: the minority carrier lifetime in the bulk, the diffusion coefficient of charge carriers, the thickness of the single crystal substrate, the average diameter of the macropores, the average distance between the centers of macropores, the surface recombination rate, the volume fraction macropore. The effective recombination of excess charge carriers in macroporous silicon is determined by the recombination of excess charge carriers on the surface of macropores and limited by the diffusion of charge carriers from the single crystal substrate to the recombination surfaces in the macroporous layer. Using the system of equations, we calculated and shown in the figure the effective lifetime of minority charge carriers in macroporous silicon dependent on the depth of the macropores. To verify the accuracy of calculations performed using a system of analytical equations, which determines the effective lifetime of minority charge carriers in macroporous silicon on a single crystal substrate, we used a numerical method. The numerical method showed the coincidence of the calculations on the effective lifetime of minority carriers. When the depth of macropores is close to the size of the sample of macroporous silicon, a discrepancy of calculations is observed.

Keywords: *life time of minority charge carriers, macroporous silicon, relaxation*

Влияние глубины макропор на эффективное время жизни неосновных носителей заряда в макропористом кремнии

В.Ф. Онищенко, Л.А. Карачевцева

*Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва Национальной Академии Наук Украины
пр. Науки, 41, Киев, 03680, Украина, onyshchenkovf@isp.kiev.ua*

В работе представлена система уравнений, которая определяет эффективное время жизни неосновных носителей заряда в макропористом кремнии. Система уравнений найдена из уравнения диффузии неосновных носителей заряда, записанного для макропористого слоя и монокристаллической подложки. Решение нестационарного уравнения диффузии, записанного для макропористого слоя и монокристаллической подложки, дополняется граничными условиями на поверхностях образца макропористого кремния и на границе между макропористым слоем и монокристаллической подложкой. Эффективное время жизни неосновных носителей заряда в макропористом кремнии на монокристаллической подложке зависит от таких величин как: объемное время жизни неосновных носителей заряда, коэффициент диффузии носителей заряда, толщина монокристаллической подложки, средний диаметр макропор, среднее расстояние между центрами макропор, скорость поверхностной рекомбинации, объемная доля макропор. Эффективная рекомбинация неравновесных носителей заряда в макропористом кремнии определяется рекомбинацией неравновесных носителей заряда на поверхности макропор и ограничивается диффузией носителей заряда с монокристаллической подложки к рекомбинационным поверхностям в макропористом слое. Мы, используя систему уравнений, рассчитали и показали на рисунке эффективное время жизни неосновных носителей заряда в макропористом кремнии в зависимости от глубины макропор. Для проверки точности расчетов, выполненных с помощью системы аналитических уравнений, которая определяет эффективное время жизни неосновных носителей заряда в макропористом кремнии на монокристаллической подложке, мы воспользовались численным методом. Численный метод показал совпадение расчетов эффективного времени жизни неосновных носителей заряда. При глубине макропор, близкой к размерам образца макропористого кремния, наблюдается расхождение расчетов.

Ключевые слова: *время жизни неосновных носителей заряда, макропористой кремний, релаксация*

ЛІТЕРАТУРА

1. Ernst M., Brendel R., Ferre R. et al. Thin macroporous silicon heterojunction solar cells // *Phys. Stat. Sol. RRL.* – 2012. – V. 6, N 5. – P. 187–189.
2. Ernst M., Brendel R. Macroporous silicon solar cells with an epitaxial emitter // *IEEE J. Photovoltaics.* – 2013. – V. 3, N 2. – P. 723–729.
3. Juntunen M.A., Heinonen J., Vähänissi V. et al. Near-unity quantum efficiency of broadband black silicon photodiodes with an induced junction // *Nature Photonics.* – 2016. – V. 10, N 12. – P. 777–781.
4. Otto M., Algasinger M., Branz H. et al. Black silicon photovoltaics // *Adv. Opt. Mater.* – 2015. – V. 3, N 2. – P. 147–164.
5. Bett A.J., Eisenlohr J., Höhn O. et al. Wave optical simulation of the light trapping properties of black silicon surface textures // *Opt. Express.* – 2016. – V. 24, N 6. – P. 434–445.
6. Karachevtseva L., Kartel M., Kladko V. et al. Functionalization of 2D macroporous silicon under the high-pressure oxidation // *Appl. Surf. Sci.* – 2018. – V. 434. –P. 142–147.
7. Ernst M., Brendel R. Modeling effective carrier lifetimes of passivated macroporous silicon layers // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* – 2011. – V. 95, N 4. – P. 1197–1202.
8. Monastyrskii L.S., Sokolovskii B.S., Pavlyk M.R. Analytical and numerical calculations of photoconductivity in porous silicon // *Ukr. J. Phys.* – 2011. – V. 56, N 9. – P. 902–906.
9. Onyshchenko V.F., Karachevtseva L.A. Effective minority carrier lifetime and distribution of steady-state excess minority carriers in macroporous silicon // *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni.* – 2017. – V. 8, N 3. – P. 322–332.
10. Onyshchenko V.F., Karachevtseva L.A., Lytvynenko O.O. et al. Effective lifetime of minority carriers in black silicon nano-textured by cones and pyramids // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.* 2017. – V. 20, N 3. – P. 325–329.
11. Karachevtseva L.A., Onyshchenko V.F. Relaxation of excess minority carrier distribution in macroporous silicon // *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni.* – 2018. – V. 9, N 2. – P. 158–166.

REFERENCES

1. Ernst M., Brendel R., Ferre R., Harder N P. Thin macroporous silicon heterojunction solar cells. *Phys. Stat. Sol. RRL.* 2012. **6**(5): 187.
2. Ernst M., Brendel R. Macroporous silicon solar cells with an epitaxial emitter. *IEEE J. Photovoltaics.* 2013. **3**(2): 723.
3. Juntunen M.A., Heinonen J., Vähänissi V., Repo P., Valluru D., Savin H. Near-unity quantum efficiency of broadband black silicon photodiodes with an induced junction. *Nature Photonics.* 2016. **10**(12): 777.
4. Otto M., Algasinger M., Branz H., Geseman B. Black silicon photovoltaics. *Adv. Opt. Mater.* 2015. **3**(2): 147.
5. Bett A.J., Eisenlohr J., Höhn O., Repo P., Savin H., Bläsi B., Goldschmidt J.C. Wave optical simulation of the light trapping properties of black silicon surface textures. *Opt. Express.* 2016. **24**(6): 434.
6. Karachevtseva L., Kartel M., Kladko V., Gudymenko O., Bo Wang, Bratus V., Lytvynenko O., Onyshchenko V., Stronska O. Functionalization of 2D macroporous silicon under the high-pressure oxidation. *Appl. Surf. Sci.* 2018. **434**: 142.
7. Ernst M., Brendel R. Modeling effective carrier lifetimes of passivated macroporous silicon layers. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2011. **95**(4): 1197.
8. Monastyrskii L.S., Sokolovskii B.S., Pavlyk M.R. Analytical and numerical calculations of photoconductivity in porous silicon. *Ukr. J. Phys.* 2011. **56**(9): 902.
9. Onyshchenko V.F., Karachevtseva L.A. Effective minority carrier lifetime and distribution of steady-state excess minority carriers in macroporous silicon. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni.* 2017. **8**(3): 322.
10. Onyshchenko V.F., Karachevtseva L.A., Lytvynenko O.O., Plakhotnyuk M.M., Stronska O.Y. Effective lifetime of minority carriers in black silicon nano-textured by cones and pyramids. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.* 2017. **20**(3): 325.
11. Karachevtseva L.A., Onyshchenko V.F. Relaxation of excess minority carrier distribution in macroporous silicon. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni.* 2018. **9**(2): 158.

Надійшла 24.06.2019, прийнята 20.08.2019