

В.Ф. Онищенко

РОЗПОДІЛ НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В СТРУКТУРІ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНІЮ ПРИ ЇХ ОДНОРІДНІЙ ГЕНЕРАЦІЇ ПО ОБ'ЄМУ ЗРАЗКА

Досліджено розподіл концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурах макропористого кремнію. Показано, що при збільшенні глибини макропор до 10 мкм концентрація нерівноважних носіїв заряду різко зменшується як між порами, так і в монокристалічному шарі під порами. Шляхом розрахунку показано, що при глибині макропор від 100 до 200 мкм концентрація нерівноважних носіїв заряду між макропорами майже не змінюється. Проаналізовано розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду між макропорами та у монокристалічному шарі при зменшенні товщини монокристалічного шару та при швидкостях поверхневої рекомбінації від 0,1 до 100 м/с.

Ключові слова: структура макропористого кремнію, монокристалічний шар, нерівноважні неосновні носії заряду.

1. ВСТУП

Пористий кремній використовується в сенсорах, приймачах, інтегральних мікросхемах. Завдяки простоті виготовлення структур з потрібною геометрією, можливості формування нано-, мезо- та макроструктур, матеріал має перспективу в електроніці та фотоелектроніці. Провідність та фотопровідність структури макропористого кремнію визначаються процесами на поверхні макропори та монокристалічною підкладкою [1]. Біля поверхні макропори існує область просторового заряду, яка хоч і збіднена основними носіями заряду, але впливає на провідність та фотопровідність у структурах макропористого кремнію [2, 3]. У результаті дослідження кінетики фотопровідності макропористого кремнію показано вплив поверхневого потенціалу та швидкості поверхневої рекомбінації на процеси релаксації фотопровідності [4]. Температурні залежності фото-ерс в структурах індій – макропористий кремній вказують на накопичення електронів на поверхневих рівнях на поверхні макропор за температури близької до температури рідкого азоту [5, 6]. У макропористому кремнії при однорідній генерації фотоносіїв методом кінцевих елементів розраховано стаціонарну фотопровідність і час релаксації фотопровідності від швидкості рекомбінації нерівноважних носіїв на поверхнях макропор, радіуса макропор та середньої відстані між ними [7].

У роботі [8] отримано та застосовано модель ефективного часу життя неосновних носіїв заряду в шарі макропористого кремнію в залежності від пасивації поверхні та морфології макропор. Для розрахунку використовується об'ємний час життя в монокристалічному кремнії. Вводиться та розраховується ефективна швидкість поверхневої рекомбінації в структурах макропористого кремнію, яка дорівнює 10 м/с при пасивації поверхні макропор. Макропористий кремній з довільно розташованими макропорами досліджується як сонячний елемент [9, 10]. Фотогенерація в сонячних елементах на основі макропористого кремнію відповідала максимальній густині струму $40,8 \text{ mA/cm}^{-2}$. Мезопористий і макропористий кремній досліджуються для застосування у фотоелектричних пристроях [11]. Поверхня кремнієвого сонячного елемента у вигляді невеличких пор покращує поглинання світла, тому проводяться дослідження макропористого кремнію як поглинач та антивідбиваючого покриття для кремнієвих сонячних елементів [12].

Метою даної роботи є розрахунок та аналіз стаціонарного розподілу концентрації нерівноважних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію, а також встановлення впливу на стаціонарний розподіл концентрації нерівноважних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію, зміни глибини макропор, товщини монокристалічного шару під макропорами та швидкості поверхневої рекомбінації.

2. РОЗПОДІЛ КОНЦЕНТРАЦІЇ НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ

Монокристал з макропорами, які мають певну структуру розташування, називають структурою макропористого кремнію. Якщо глибина макропор не дорівнює товщині структури макропористого кремнію, то виділяють шар монокристалічного кремнію з макропорами, так званий шар макропористого кремнію або макропористий шар, та шар монокристала під макропорами, який називають монокристалічною кремнієвою підкладкою. Товщина шару макропористого кремнію дорівнює глибині макропор, товщина монокристалічної кремнієвої підкладки дорівнює різниці товщини структури макропористого кремнію і товщини шару макропористого кремнію. Структура макропористого кремнію з наскрізними порами або макропористий кремній – це монокристал зі структурою макропор, які протравлені наскрізь.

Розглянемо макропористий кремній (структуру макропористого кремнію з наскрізними каналами), який має форму прямокутної пластини. Задача з макропористим кремнієм аналогічна задачі для монокристалічної пластини. При об'ємній генерації нерівноважних носіїв заряду стаціонарне рівняння неперервності для одновимірного випадку по товщині прямокутної пластини, записане в безрозмірній формі, має вигляд:

$$\frac{d^2 P}{dX^2} = \delta P, \quad (1)$$

де $X = x/L_p$ – безрозмірна величина розмірної координати x , вісь якої має напрямок від монокристалічної кремнієвої підкладки до макропористого шару кремнію паралельно порам, L_p – довжина дифузії неосновних носіїв заряду. Виберемо початок координат у точці X_0 такій, що $P(X_0) = P_{\max}$ є максимумом безрозмірної концентрації носіїв, тому:

$$\left. \frac{dP(X)}{dX} \right|_{X=X_0} = 0. \quad (2)$$

Позначимо через $X_A = A$ відстань від точки максимуму X_0 до поверхні A , $X_B = B = H - A$ – відстань до іншої поверхні, g_A – генерацію, $r_{A,B} = s\delta p$ – поверхневу рекомбінацію та їх безрозмірні величини: $G_A = g_A L_p / D_p$, $R_A = S_A (P + 1)$, D_p – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв заряду. Гранична умова в точках X_A , X_B набуває вигляду:

$$\mp \left. \frac{dP(X)}{dX} \right|_{X=X_{\pm A,B}} = G_{A,B} + S_{A,B} (P + 1), \quad (3)$$

де $S_A = s_A L_p / D_p$ є безрозмірною величиною швидкості поверхневої рекомбінації s_A . Розв'язком (3) є $P = C_1 e^X + C_2 e^{-X}$, де C_1 , C_2 – сталі. З умови (2) випливає, що $C = C_1 = C_2$ і відповідно $P = \cosh(X)C$, похідна від безрозмірної концентрації носіїв: $dP/dX = \sinh(X)C$. Стала C визначається з рівняння (3):

$$-\sinh(A)C = S_A (\cosh(A)C + 1). \quad (4)$$

При однаковій швидкості поверхневої рекомбінації на поверхні зразка $A = H/2$, де $H = h / L_p$ – безрозмірна величина товщини зразка h . При різних швидкостях поверхневої рекомбінації на поверхнях зразка S_A та S_B

$$(\cosh(A) - \cosh(H - A))S_A S_B = \sinh(H - A)S_A - \sinh(A)S_B. \quad (5)$$

Концентрація нерівноважних носіїв заряду в матеріалі визначається як

$$\delta p(x) = g \tau_b \left(1 - \frac{\cosh(X-A)S_A}{\cosh(A)S_A + \sinh(A)} \right), \quad (6)$$

де τ_b – об’ємний час життя неосновних носіїв заряду, а X пробігає від 0 до H .

Розв’яжемо рівняння (1) для структури макропористого кремнію, яка складається з шару макропористого кремнію та монокристалічної кремнієвої підкладки і має форму прямокутної пластини. Задача аналогічна задачі для прямокутної пластини, що складається з двох частин, які мають різні часи рекомбінації на рекомбінаційних центрах в кожному з об’ємів та контактують спільною площиною. Розв’яжемо рівняння (1) для кожної з частин, які представляють собою прямокутні пластини та врахуємо наявність макропор. Позначимо товщину частини пластини через h , тоді безрозмірна $H = h/L_p$, а відстань початку координат до спільної площини через A . Запишемо граничну умову (3) при $G_A = 0$ для зовнішньої поверхні в кожній частині (відстань від точки X_0 до поверхні $h - A$):

$$-\sinh(H-A)C = S_{H-A}(\cosh(H-A)C + 1). \quad (7)$$

Врахуємо те, що немає розриву концентрації і струму та наявність макропор:

$$\Delta n_1(A_1) = \Delta n_2(A_2), \quad (8)$$

$$D_p \frac{dp_1(A_1)}{dx} = s_{A1}(1-P_s)\delta p_1(A_1) + D_p P_s \frac{dp_2(A_2)}{dx}, \quad (9)$$

де $P_s = \pi r_0^2/a^2$, r_0 – радіус пори, $a = N_p^{-1/2}$ – період або середня відстань між центрами пор. Знайдемо сталі C_1, C_2 з (7). Підставивши розв’язок $P = \cosh(X)C$ у (8) та (9), одержимо систему рівнянь для визначення A_1, A_2 :

$$\tau_b(1 - C_1 \cosh(A_1)) = \tau_p(1 - C_2 \cosh(A_2)), \quad (10)$$

$$C_1 \tau_b \sinh(A_1) - S_{A1} \tau_b P_s (1 - C_1 \cosh(A_1)) = C_2 \tau_p (1 - P_s) \sinh(A_2), \quad (11)$$

τ_p – ефективний час життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії. Розподіл нерівноважної концентрації носіїв в зразку:

$$\delta p_i = \tau_{bi} g (1 - C_i \cosh(X)), \quad (12)$$

де $C_i = \frac{S_i}{S_i \cosh(H_i - A_i) + \sinh(H_i - A_i)}$, $i = 1, 2$ вказує на частину зразка, сталі A_1, A_2

знаходимо з системи рівнянь (10), (11). Ефективне середнє стаціонарне значення нерівноважної концентрації носіїв для монокристалічної та макропористої частин зразка знаходимо з рівняння:

$$\overline{\delta p_i} = g \tau_{bi} \left(1 - \frac{S_i \sinh(A_i) + \sinh(H_i - A_i)}{H_i \cosh(H_i - A_i) S_i + \sinh(H_i - A_i)} \right). \quad (13)$$

Тоді при великих швидкостях поверхневої рекомбінації середнє стаціонарне значення нерівноважної концентрації носіїв заряду в монокристалічній підкладці, а отже, і в структурі макропористого кремнію на монокристалічній підкладці дорівнює $\overline{\delta p} = g \tau_b (1 - 2H^{-1})$.

3. МОДУЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНОГО РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ НЕРІВНОВАЖНИХ НЕОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В СТРУКТУРІ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНІЮ

Стаціонарну концентрацію нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію представимо у безрозмірному вигляді $\delta p(x)/(g\tau_b)$. На рис. 1 показано стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію за її товщиною, розрахований за формулою (12) в залежності від глибини макропор при незмінній товщині монокрис-

талічного шару під порами. При розрахунку використовували швидкість поверхневої рекомбінації 0,9 м/с. Товщина монокристалічного шару під порами 400 мкм. Генерація носіїв заряду є однорідною по об'єму структури. Кривим 1-5 відповідають товщини макропористого шару 0, 10, 40, 80, 160 мкм, що спостерігається при поступовому стравленні макропористого шару. Як видно з рис. 1, розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в монокристалі без макропор (крива 1) є симетричним відносно середини. При появі макропор нерівноважні носії заряду починають рекомбінувати на їх поверхні. Поява додаткової рекомбінаційної поверхні приводить до зменшення концентрації нерівноважних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію. При збільшенні глибини макропор (криві 2, 3) до 40 мкм поверхня макропор рекомбінує на собі з монокристалічного шару все більше нерівноважних носіїв заряду, порушуючи симетрію розподілу безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в монокристалічному шарі. При глибині макропор від 80 до 160 мкм (криві 4, 5) і більше стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в монокристалічній підкладці та макропористому шарі практично не змінюється.

Середнє значення безрозмірної концентрації нерівноважних носіїв заряду структури макропористого кремнію визначається її середнім значенням в монокристалічній підкладці. Ця величина, помножена на час життя неосновних носіїв заряду в об'ємі матеріалу, дорівнює ефективному часу життя неосновних носіїв заряду структури макропористого кремнію, який буде близьким до часу релаксації фотопровідності структури [11].

На рис. 2 наведено стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурах макропористого кремнію різної товщини, що мали глибину макропор 100 мкм. Швидкість поверхневої рекомбінації 0,9 м/с, генерація носіїв заряду є однорідною по об'єму структури. Це буде спостерігатись, коли в структурі макропористого кремнію поступово стравлюється монокристалічний шар під порами. Як видно з рис. 2, розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду між макропорами та в області близькій до них майже не змінюється. Тільки при товщині структури макропористого кремнію 200 мкм (крива 2) спостерігається невелике зменшення концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в області близькій до макропор. Водночас зі зменшенням розміру зразка, а отже, і товщини монокристалічного шару під порами концентрація нерівноважних неосновних носіїв заряду суттєво зменшується. Невелике збільшення концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду між порами (криві 1, 2) приводить до суттєвого зменшення концентрації в монокристалічному шарі.

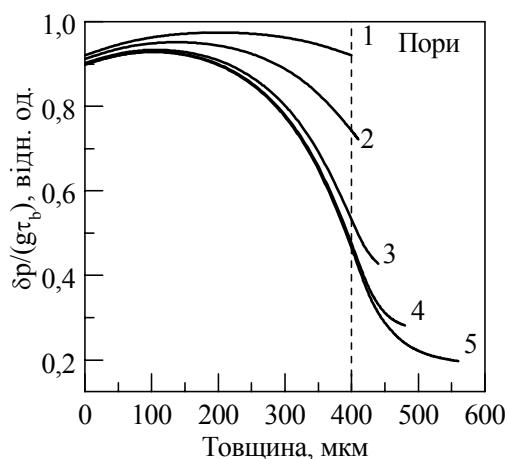


Рис. 1. Стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію при глибині макропор, мкм: 0 (1), 10 (2), 40 (3), 80 (4), 160 (5).

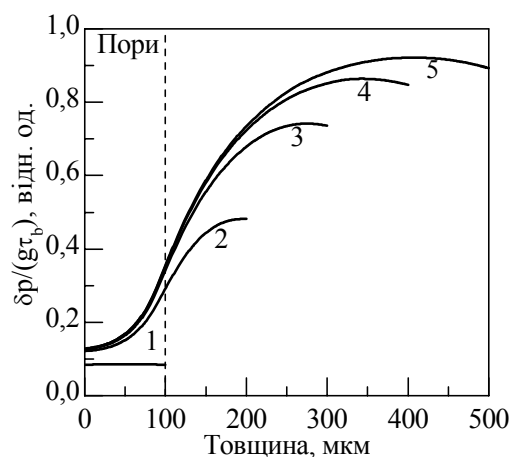


Рис. 2. Стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію товщиною, мкм: 100 (1), 200 (2), 300 (3), 400 (4), 500 (5).

На рис. 3 показано розрахований за формулою (12) стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію товщиною 500 мкм при різній глибині макропор. Швидкість поверхневої рекомбінації становить 90 м/с при однорідній генерації в об'ємі. Така ситуація може спостерігатися, наприклад, при фотоелектрохімічному витравлюванні мікропор. Кривою 1 показано стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних носіїв заряду в монокристалі товщиною 500 мкм. Вже при витравлених макропорах глибиною 10 мкм (крива 2) концентрація нерівноважних носіїв заряду різко зменшується як між порами, так і в монокристалічному шарі під порами. При глибині макропор від 100 до 200 мкм (криві 4-6) концентрація нерівноважних носіїв заряду між порами досягає насичення. Стаціонарний розподіл концентрації нерівноважних носіїв заряду зміщується разом з глибиною макропор.

На рис. 4 наведено стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію, розрахований за формулою (12), від швидкості поверхневої рекомбінації. Глибина макропор становить 100 мкм при однорідній генерації в об'ємі. Як видно з рис. 4, при збільшенні швидкості поверхневої рекомбінації концентрація нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію починає несиметрично збіднюватись, що логічно вказує на те, що крізь поверхню макропор рекомбінує більша кількість нерівноважних носіїв заряду. При збільшенні швидкості поверхневої рекомбінації до 10 м/с концентрація нерівноважних неосновних носіїв заряду зменшується (криві 1-5). Але при значеннях швидкості поверхневої рекомбінації від 50 до 100 м/с стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію майже не змінюється завдяки зменшенню припливу нерівноважних носіїв заряду з об'єму монокристалічного шару.

На рис. 5 показано залежності ефективної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду від швидкості поверхневої рекомбінації, розраховані за формулою (13). Розрахунок проведено для структури макропористого кремнію з товщиною макропористого кремнію 100 мкм, товщиною монокристалічної підкладки 400 мкм з середнім діаметром макропор 2 мкм та середньою відстанню між центрами макропор 4 мкм. Середню безрозмірну концентрацію нерівноважних неосновних носіїв заряду в монокристалічній підкладці (крива 1), в структурі макропористого кремнію на монокристалічній підкладці (крива 2) та в макропористому кремнії (крива 3) було розраховано за формулою (13).

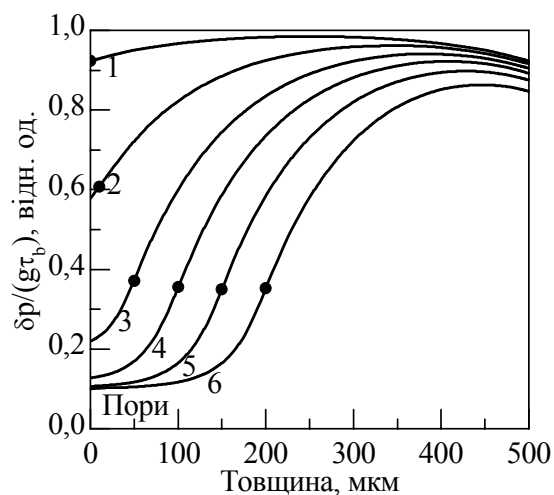


Рис. 3. Стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію товщиною 500 мкм при глибині макропор (позначено кружечками), мкм: 0 (1), 10 (2), 50 (3), 100 (4), 150 (5), 200 (6).

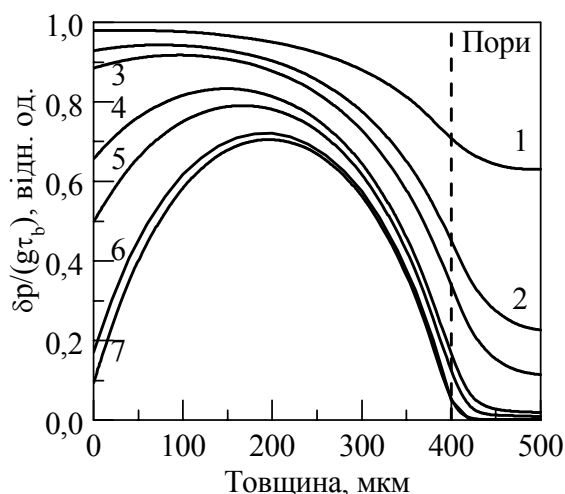


Рис. 4. Стаціонарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію товщиною 500 мкм при швидкості поверхневої рекомбінації, м/с: 0,1 (1), 0,5 (2), 1 (3), 5 (4), 10 (5), 50 (6), 100 (7).

Як видно з рис. 5, концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в монокристалічній підкладці (крива 1) та структурі макропористого кремнію (крива 2) є подібними та виходять на насичення при швидкості поверхневої рекомбінації 60 м/с без урахування того, що середня безрозмірна концентрація нерівноважних неосновних носіїв заряду в макропористому шарі продовжує знижуватись. Це відбувається завдяки обмеженню припливу нерівноважних носіїв з об'єму монокристалічної підкладки. При цьому нерівноважні носії заряду в макропористому шарі продовжують рекомбінувати, тому їх концентрація зменшується.

Визначивши час релаксації фотопровідності в структурі макропористого кремнію експериментальним шляхом, можна визначити швидкість поверхневої рекомбінації в структурі за кривою 2 з рис. 5. Час релаксації фотопровідності в структурі макропористого кремнію близький до ефективного часу життя нерівноважних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію. Поділивши час релаксації фотопровідності в структурі макропористого кремнію, який був визначений експериментальним шляхом, на об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в кремнії, ми отримаємо концентрацію нерівноважних неосновних носіїв заряду, знайдемо ефективну швидкість поверхневої рекомбінації в структурі макропористого кремнію на монокристалічній підкладці. Одержане значення швидкості поверхневої рекомбінації має бути ближчим до швидкості поверхневої рекомбінації на поверхні макропор, оскільки зовнішньою рекомбінацією можна знехтувати, тому що зовнішня площа на два порядки менша за внутрішню.

Також можна оцінити час релаксації фотопровідності в макропористому шарі за кривою 3 на рис. 5. Ми виміряли час релаксації фотопровідності 8,2 мкс в структурі макропористого кремнію, що вказує на те, що швидкість поверхневої рекомбінації становить приблизно 0,9 м/с, якщо час життя фотоносіїв у монокристалі кремнію дорівнює 10 мкс. Одержана швидкість поверхневої рекомбінації є низькою, що пояснюється пасивацією воднем поверхні макропор під час їх формування.

4. ВИСНОВКИ

Розраховано та проаналізовано розподіл концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурах макропористого кремнію. Встановлено, що при збільшенні глибини макропор поверхня макропор рекомбінує з монокристалічного шару все більше нерівноважних носіїв заряду, порушуючи симетрію розподілу безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в монокристалічному шарі.

Розраховано та показано, що розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду між макропорами та в області близькій до них майже не змінюється при суттєвому зменшенні товщини монокристалічного шару під порами.

Показано, що при витравлених макропорах глибиною до 10 мкм концентрація нерівноважних носіїв заряду різко зменшується як між порами, так і в монокристалічному шарі під порами. При глибині макропор від 100 до 200 мкм концентрація нерівноважних

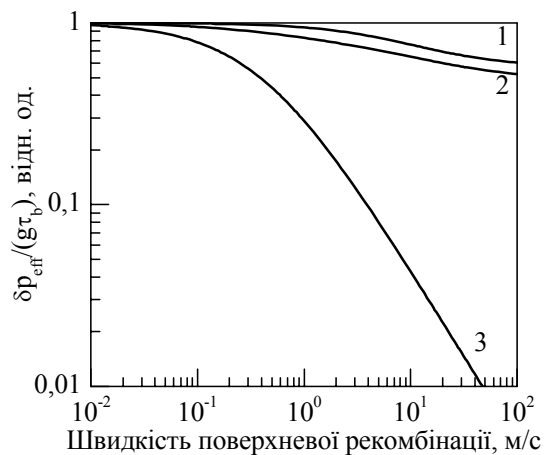


Рис. 5. Залежність ефективної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду від швидкості поверхневої рекомбінації: 1 – монокристалічна підкладка, 2 – структура макропористого кремнію з підкладкою, 3 – шар макропористого кремнію. Товщина шару макропористого кремнію 100 мкм, монокристалічної підкладки 400 мкм.

носіїв заряду між порами досягає насичення. Стационарний розподіл концентрації нерівноважних носіїв заряду зміщується разом з глибиною макропор.

Встановлено, що при збільшенні швидкості поверхневої рекомбінації концентрація нерівноважних неосновних носіїв заряду зменшується. При швидкостях поверхневої рекомбінації від 50 до 100 м/с стационарний розподіл безрозмірної концентрації нерівноважних неосновних носіїв заряду в структурі макропористого кремнію майже не змінюється завдяки зменшенню припливу нерівноважних носіїв заряду з об'єму монокристалічного шару.

V.F. Onyshchenko

DISTRIBUTION OF NON-EQUILIBRIUM CHARGE CARRIERS IN MACROPOROUS SILICON STRUCTURE UNDER CONDITIONS OF THEIR HOMOGENEOUS GENERATION OVER THE SIMPLE BULK

Distribution of non-equilibrium minority charge carrier concentration in macroporous silicon structures has been investigated. It has been shown that non-equilibrium charge carrier concentration sharply decreases both between pores and in monocrystalline layer under pores with increasing the macropore depth to 10 μm . Via calculations, it has been shown that the concentration of non-equilibrium charge carriers between macropores hardly changes when the depth of macropores ranges from 100 to 200 μm . The authors have analyzed the distribution of dimensionless concentration of non-equilibrium charge carriers between macropores and in monocrystalline layer when the thickness of the monocrystalline layer is decreased and the values of the surface recombination velocity varies from 0.1 to 100 m/s.

Keywords: macroporous silicon structure, distribution, non-equilibrium minority charge carriers.

1. *Онищенко В.Ф.* Вплив підкладки та поверхні макропори на фотопровідність у двовимірних структурах макропористого кремнію // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. – 2014. – Вип. 49. – С. 75-81.
2. *Onyshchenko V.F., Karachevtseva L.A.* Conductivity and photoconductivity of two-dimensional macroporous silicon structures // *Ukr. J. Phys.* – 2013. – **58**, No. 9. – P. 846-852.
3. *Karachevtseva L., Onyshchenko V., Sachenko A.* Photocarrier transport in 2D macroporous silicon structures // *Opto-Electronics Review*. – 2010. – **18**, No. 4. – P. 394-399.
4. *Karachevtseva L.A., Onyshchenko V.F., Sachenko A.V.* Kinetics of photoconductivity in macroporous silicon structures // *Ukr. J. Phys.* – 2008. – **53**, No. 9. – P. 874-881.
5. *Onyshchenko V.F., Sachenko A.V., Karachevtseva L.A.* Anomalous-sign photo-emf in macroporous silicon at photon energies comparable to that of indirect band-to-band transition // *Ukr. J. Phys.* – 2009. – **54**, No. 12. – P. 1212-1218.
6. *Karachevtseva L.A., Onyshchenko V.F., Sachenko A.V.* Photoeffect peculiarities in macroporous silicon structures // *Chemistry, physics and technology of surface*. – 2010. – **1**, No. 1. – P. 87-93.
7. *Monastyrskii L.S., Sokolovskii B.S., Pavlyk M.R.* Analytical and numerical calculations of photoconductivity in porous silicon // *Ukr. J. Phys.* – 2011. – **56**, No. 9. – P. 902-906.
8. *Ernst M., Brendel R.* Modeling effective carrier lifetimes of passivated macroporous silicon layers // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2011. – **95**, No. 4. – P. 1197-1202.
9. *Ernst M., Brendel R.* Lambertian light trapping in thin crystalline macroporous Si layers // *phys. status solidi RRL*. – 2014. – **8**, No. 3. – P. 235-238.
10. *Maiolo J.R., Atwater H.A., Lewis N.S.* Macroporous silicon as a model for silicon wire array solar cells // *J. Phys. Chem. C*. – 2008. – **112**, No. 15. – P. 6194-6201.
11. *Ernst M., Brendel R., Ferre R. et al.* Thin macroporous silicon heterojunction solar cells // *phys. status solidi RRL*. – 2012. – **6**, No. 5. – P. 187-189.
12. *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**, No. 6. – P. 1860-1864.

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

Отримано 07.05.2015