

В.Ф. ОНИЩЕНКО

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
(Просп. Науки, 41, Київ 03680; e-mail: onyshchenkovf@isp.kiev.ua)

ФОТОПРОВІДНІСТЬ У ДВОСТОРОННЬОМУ МАКРОПОРИСТОМУ КРЕМНІЇ

УДК 538.9; 621.315.592

Розраховано питому фотопровідність та концентрацію надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор та часу життя неосновних носіїв заряду в об'ємі зразка. Для розрахунку фотопровідності та концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду використовувалась дифузійна модель. Математичний опис дифузійної моделі містить загальний розв'язок рівняння дифузії та граничну умову, записану на межах монокристалічної підкладки та зразка двостороннього макропористого кремнію. Враховувалось, що світло потрапляло на монокристалічну підкладку через дно пор. Питома фотопровідність у двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор та часу життя неосновних носіїв заряду зменшується, якщо глибина пор зростає, а час життя зменшується. Концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду в залежності від координати та часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії має один максимум при однорідній генерації надлишкових носіїв заряду або два максимуми – при їх неоднорідній генерації.

Ключові слова: двосторонній макропористий кремній, фотопровідність, пористий, нерівноважні носії заряду.

1. Вступ

Двосторонній макропористий кремній є новим матеріалом. Робота над покращенням уловлювання світла макропористим кремнієм привела до думки про те, що треба підсилити розсіювання світла за рахунок створення пор на іншій стороні. Світло, розсіяне першим макропористим шаром, додатково розсіюється другим макропористим шаром, це збільшує кути розсіювання та загальне розсіювання світла в матеріалі. Відбивання світла в односторонньому макропористому кремнії відбувається таким чином. Шар макропористого кремнію зменшує відбивання світла від пористої поверхні, в порівнянні з плоскою поверхнею, завдяки проникненню світла в пори. Світло, що проникло в пори, відбивається від стінок пор. Воно частково прохо-

дить через поверхню пор при кожному відбиванні. Шар макропористого кремнію розсіює світло завдяки багаторазовому відбиванню від стінок пор та не плоскому профілю дна пор. Розсіяне світло проникає в монокристалічну підкладку під різними кутами, що збільшує його оптичний шлях та поглинання [1]. Поглинання світла залежить від структури поверхні та пор. Тривалість та режими електрохімічного травлення макропористого кремнію впливає на товщину кремнію між порами, діаметр пор та на структуру поверхні. Покращення уловлювання світла макропористим кремнієм досягається оптимізацією умов фотоелектрохімічного травлення. Макропористий кремній, який сильно поглинає світло, або чорний кремній можна створити з масивів наношпів [2]. Макропори на поверхні монокристалу кремнію покращують поглинання світла, тому структуру макропо-

© В.Ф. ОНИЩЕНКО, 2022

840

ISSN 0372-400X. Укр. фіз. журн. 2022. Т. 67, № 12

ристого кремнію використовують в сонячних елементах. Сонячний елемент з макропористого кремнію виготовлений з імплантованим борним емітером. Шар макропористого кремнію в сонячному елементі має об'ємну частку пор 26 та товщину 34 мкм. Ефективність перетворення енергії у сонячному елементі досягає 13,5% [3]. Плівки оксиду цинку, легованого алюмінієм, напильюють на поверхню макропористого кремнію для виготовлення гетеропереходу сонячного елемента. Такі сонячні елементи, виготовлені з макропористого кремнію, є недорогими, чистими, довговічними і вони ефективно перетворюють світло в електрику [4]. Запропонована теоретична модель для оптимізації кремнієвих сонячних елементів. Теоретична модель оптимізує ключові параметри кремнієвих сонячних елементів з текстурованою поверхнею такої, як напруга розімкненого кола, струм короткого замикання та ефективність фотоперетворення. Розрахункова модель враховує існуючі механізми рекомбінації та додатково включає рекомбінацію електронно-діркових пар в області просторового заряду та невідповідності оже-рекомбінацію екситонів через глибокі домішкові рівні [5]. Експериментальні температурні залежності фотоерс виміряні в двовимірній структурі макропористого кремнію при генерації надлишкових носіїв заряду світлом з довжинами хвиль 0,7, 0,94 та 0,95 мкм мають максимум при температурі 230 К. Виміряна релаксація фотопровідності двовимірної структури макропористого кремнію в діапазоні температур $T = 80\text{--}300$ К. Температурна залежність часу релаксації фотопровідності має активаційну ділянку з енергією активації 0,3 еВ в діапазоні $T = 180\text{--}300$ К і не залежить від температури при $T < 100$ К [6]. Запропонована теоретична модель для визначення часу життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії з періодичним розташуванням макропор. Теоретичні розрахунки порівнюються з експериментальними вимірюваннями ефективного часу життя неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії з середнім діаметром пор 2,4 мкм та середньою відстанню між центрами пор 5,2 мкм. Експериментальні результати узгоджуються з теоретичними при швидкості поверхневої рекомбінації 24 м/с [7]. Аналогічно виводяться рівняння, які визначають ефективний час життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії. Об'ємний час жи-

ття, швидкість поверхневої рекомбінації, дифузія неосновних носіїв та відстань до рекомбінаційних поверхонь впливають на ефективний час життя неосновних носіїв заряду в двовимірній структурі макропористого кремнію. Глибина та діаметр пор, відстань між порами, об'ємна частка макропор визначають ефективний час життя неосновних носіїв заряду в шарі макропористого кремнію. Товщина монокристалічної підкладки та ефективна рекомбінація в макропористих шарах визначають ефективний час життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії [8]. Залежність концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду від координати в двосторонній структурі макропористого кремнію має один або два максимуми, коли зразок освітлюється світлом 0,95 мкм та 1,05 мкм, відповідно. Товщина кожного пористого шару була різною. Дифузія надлишкових носіїв заряду до пористих шарів та їх рекомбінація на поверхні пор змінює розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в двосторонній структурі макропористого кремнію [9]. Фотопровідність у пористому кремнії зі сферичними та циліндричними порами розраховується аналітичним та чисельним методом. Вона зменшується зі зростанням швидкості поверхневої рекомбінації та збільшення діаметра пор. Розбіжність між аналітичним та чисельними розрахунками спостерігаються у випадку, коли діаметр пор малий, а відстань між ними велика [10]. Роботи, вказані вище, описують фотоелектричні та електричні характеристики в одно- та двосторонньому макропористому кремнії та сонячних елементах на основі макропористого кремнію. Описується фотопровідність у односторонньому макропористому кремнії [10]. Двосторонній макропористий кремній є новим матеріалом. Дослідження фотопровідності цього матеріалу є актуальним для тих, хто займається двосторонніми сонячними елементами. Метою даної роботи є знаходження та аналіз залежності фотопровідності в двосторонньому макропористому кремнії від глибини пор та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду. Для цього розписуються вирази, які описують розподіл концентрації надлишкових носіїв заряду та фотопровідність у двосторонньому макропористому кремнії. Чисельним методом розраховується концентрація надлишкових носіїв заряду в залежності від координати та об'ємного часу

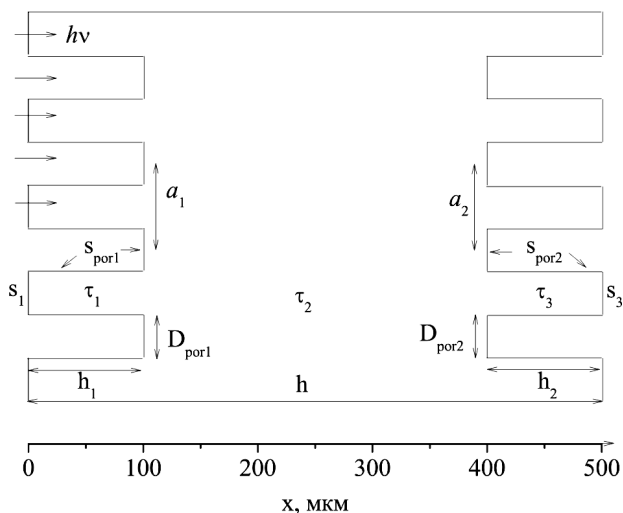


Рис. 1. Схема двостороннього макропористого кремнію

життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії. Робота буде корисна розробникам сонячних елементів та приладів на основі двостороннього макропористого кремнію.

2. Концентрація надлишкових носіїв заряду в залежності від координати та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії

На рис. 1 показана схема двостороннього макропористого кремнію, який складається з фронтального макропористого шару (на нього падає світло), монокриссталічної підкладки та тильного макропористого шару. Концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в фронтальному макропористому шарі ($i = 1$), монокристалічній підкладці ($i = 2$) та тильному макропористому шарі ($i = 3$) за стаціонарних умов запишеться як:

$$\delta p_i(x) = A_i \cosh\left(\frac{x}{L_i}\right) - B_i \sinh\left(\frac{x}{L_i}\right) - G_i(x), \quad (1)$$

де A_i, B_i – сталі, $i = 1, 2, 3$, $G_i(x) = K_i G_i^*(x)$, $K_1 = 1$, $K_2 = K_3 = 1 + P_1(\exp(\alpha h_1) - 1)$, $G_i^*(x) = g_{0p}(\alpha) \alpha \tau_i \exp(-\alpha x) / (\alpha^2 D_p \tau_i - 1)$, α – коефіцієнт поглинання кремнію, $g_{0p}(\alpha)$ – швидкість генерації надлишкових неосновних носіїв заряду на поверхні фронтального макропористого шару, $L_i = \sqrt{D_p \tau_i}$ – довжина дифузії, τ_i – об'ємний час життя надлишкових неосновних носіїв заряду в

фронтальному макропористому шарі ($i = 1$), монокристалічній підкладці ($i = 2$) та тильному макропористому шарі ($i = 3$), відповідно, D_p – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв заряду, $P_1 = \pi D_{por1}^2 / (4a_1^2)$ – об'ємна частка пор, h_1, D_{por1}, a_1 – глибина пор (товщина), діаметр пор та відстань між центрами пор фронтального макропористого шару, відповідно (див. рис. 1). В вираз (1) входять сталі, які знаходяться з граничної умови, записаної на межі пористих шарів з монокристалічною підкладкою та на межі матеріалу. На фронтальній поверхні зразка двостороннього макропористого кремнію гранична умова запишеться як:

$$A_1 \frac{s_1 L_1}{D_p} + B_1 - G_1(0) \left(\alpha L_1 + \frac{s_1 L_1}{D_p} \right) = 0. \quad (2)$$

Гранична умова на межі монокристалічної підкладки з фронтальним та тильним макропористим шаром:

$$\begin{aligned} & \left[A_1 \sinh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) - B_1 \cosh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \right] \frac{D_p}{s_{por1} L_1} (1 - P_1) + \\ & + A_2 \left[P_1 \cosh\left(\frac{h_1}{L_2}\right) - \frac{D_p}{s_{por1} L_2} \sinh\left(\frac{h_1}{L_2}\right) \right] + \\ & + B_2 \left[P_1 \sinh\left(\frac{h_1}{L_2}\right) + \frac{D_p}{s_{por1} L_2} \cosh\left(\frac{h_1}{L_2}\right) \right] + \\ & + \alpha D_p \delta p_{g1}(h_1) - G_2(h_1) \left(\frac{\alpha D_p}{s_{por1}} + P_1 \right) = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & A_2 \left[P_2 \cosh\left(\frac{h-h_2}{L_3}\right) - \frac{D_p}{s_{por2} L_2} \sinh\left(\frac{h-h_2}{L_2}\right) \right] + \\ & + B_2 \left[P_2 \sinh\left(\frac{h-h_2}{L_3}\right) + \frac{D_p}{s_{por2} L_2} \cosh\left(\frac{h-h_2}{L_3}\right) \right] + \\ & + \left[A_3 \sinh\left(\frac{h-h_2}{L_2}\right) - B_3 \cosh\left(\frac{h-h_2}{L_2}\right) \right] \times \\ & \times \frac{D_p}{s_{por2} L_3} (1 - P_2) + \alpha D_p \delta p_{g1}(h-h_2) - \\ & - G_2(h-h_2) \left(\frac{\alpha D_p}{s_{por2}} + P_2 \right) = 0, \quad (4) \end{aligned}$$

де $P_2 = \pi D_{por2}^2 / (4a_2^2)$ – об'ємна частка пор, h_2, D_{por2}, a_2 – глибина пор (товщина), діаметр пор та відстань між центрами пор фронтального макропористого шару, відповідно (див. рис. 1). Концентрація на межі монокристалічної підкладки з макропористими шарами не повинна мати

розрив, тому:

$$A_1 \cosh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) - B_1 \sinh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) - A_2 \cosh\left(\frac{h_1}{L_2}\right) + B_2 \sinh\left(\frac{h_1}{L_2}\right) - G_1(h_1) + G_2(h_1) = 0, \quad (5)$$

$$A_2 \cosh\left(\frac{h-h_2}{L_2}\right) - B_2 \sinh\left(\frac{h-h_2}{L_2}\right) - A_3 \cosh\left(\frac{h-h_2}{L_3}\right) + B_3 \sinh\left(\frac{h-h_2}{L_3}\right) - G_2(h-h_2) + G_3(h-h_2) = 0. \quad (6)$$

На тильній поверхні зразка двостороннього макропористого кремнію гранична умова запишеться як:

$$A_3 \left[\sinh\left(\frac{h}{L_3}\right) + \frac{s_3 L_3}{D_p} \cosh\left(\frac{h}{L_3}\right) \right] - B_3 \left[\frac{s_3 L_3}{D_p} \sinh\left(\frac{h}{L_3}\right) + \cosh\left(\frac{h}{L_3}\right) \right] + G_3(h) \left(\alpha L_3 - \frac{s_3 L_3}{D_p} \right) = 0, \quad (7)$$

де $s_1, s_{\text{por1}}, s_{\text{por2}}, s_3$ – швидкість поверхневої рекомбінації на фронтальній поверхні зразка, поверхні пор фронтального та тильного макропористого шару та на тильній поверхні зразка (див. рис. 1). Рівняння (1)–(7) математично моделюють залежність концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду від відстані в двосторонньому макропористому кремнії. Питому провідність паралельно макропорам слід розглядати як послідовне з'єднання елементів, тому можна записати:

$$\sigma = e(\mu_n + \mu_p)h \left(\frac{1}{1 - P_1} \int_0^{h_1} \frac{dx}{\delta p_1(x)} + \int_{h_1}^{h-h_2} \frac{dx}{\delta p_2(x)} + \frac{1}{1 - P_2} \int_{h-h_2}^h \frac{dx}{\delta p_3(x)} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Питому провідність перпендикулярно макропорам слід розглядати як паралельне з'єднання елементів, тому запишемо:

$$\sigma = \frac{e(\mu_n + \mu_p)}{h} \left(\frac{1 - P_1}{1 + P_1} \int_0^{h_1} \delta p_1(x) dx + \int_{h_1}^{h-h_2} \delta p_2(x) dx + \frac{1 - P_2}{1 + P_2} \int_{h-h_2}^h \delta p_3(x) dx \right). \quad (9)$$

3. Розрахунок концентрації

надлишкових носіїв заряду в залежності від координати та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії

Концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду в залежності від координати (відстані від поверхні, що освітлюється, див. рис. 1) та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії, коли світло з довжиною хвилі 0,95 мкм та 1,05 мкм генерує надлишкові носіїв заряду, показана на рис. 2 та рис. 3, відповідно. Для розрахунку концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду використовувались вирази (1)–(7). Глибини пор кожного макропористого шару були однаковими і дорівнювали 100 мкм. Товщина зразка 500 мкм. Середній діаметр макропор 1 мкм. Середня відстань між центрами пор 2 мкм. Швидкість поверхневої рекомбінації на поверхні зразка та на поверхні пор кожного макропористого шару була 1 м/с. Об'ємний час життя неосновних носіїв заряду змінювався від 1 мкс до 100 мкс. Ефективний об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в обох шарах макропористого кремнію змінювався відповідно до об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду.

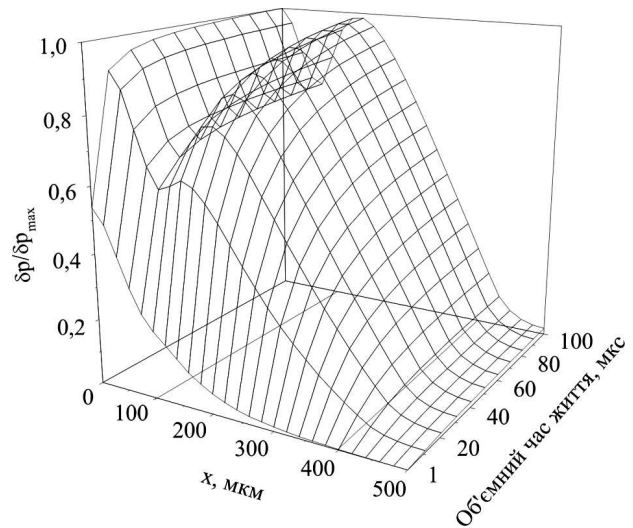


Рис. 2. Концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду в залежності від координати та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії. Генерація надлишкових носіїв заряду відбувається світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм

3.1. Генерація надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм

З рис. 2 видно, що залежність концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду від координати та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії має два максимуми, коли світло з довжиною хвилі 0,95 мкм генерує надлишкові носіїв заряду.

3.1.1. Залежність концентрації надлишкових носіїв заряду від координати

Максимуми залежності концентрації надлишкових носіїв заряду від координати спостерігаються в фронтальному макропористому шарі та монокристалічній підкладинці, біля освітлюваних поверхонь. Світло потрапляє на поверхню монокристалічної підкладинки, якою є дно пор, завдяки розповсюдженню світла по порам. Максимуми зумовлені великим часом життя неосновних носіїв заряду та освітленням поверхні фронтального макропористого шару та монокристалічної підкладинки. Вони спостерігаються біля поверхонь тому, що генерація надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм є поверхневою. Максимуми концентрації надлишкових неосновних носіїв за-

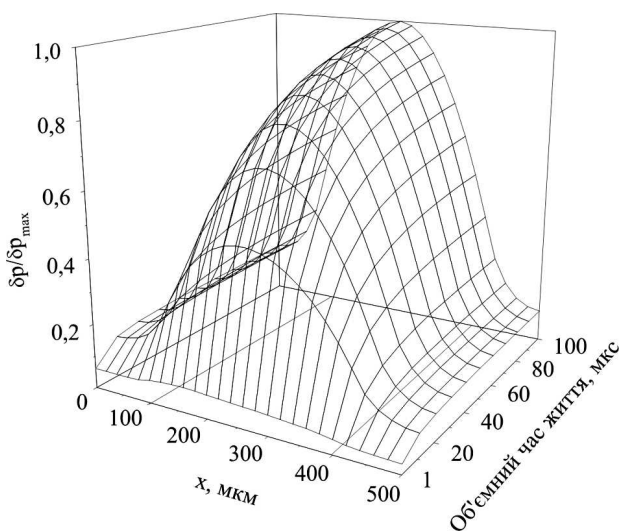


Рис. 3. Концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду в залежності від координати та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії. Генерація надлишкових носіїв заряду відбувається світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм

ряду зменшуються, при зменшенні об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду, причому, максимум, який спостерігався в монокристалічній підкладинці, зменшується набагато швидше.

3.1.2. Залежність концентрації надлишкових носіїв заряду від об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду

Якщо об'ємний час життя неосновних носіїв заряду дорівнює 1 мкм, концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду має тільки один чітко виражений максимум, який розміщений в фронтальному макропористому шарі (див. рис. 2). Максимум концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду, який спостерігався в монокристалічній підкладинці поступово зменшувався та став майже не помітним. Генерація надлишкових носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії є неоднорідною, завдяки високому поглинанню світла з довжиною хвилі 0,95 мкм та освітленню монокристалічної підкладинки. Незважаючи на те, що генерація надлишкових носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії є неоднорідною, спостерігається тільки один чітко виражений максимум. Поверхневий час життя неосновних носіїв заряду дорівнює 1 мкм, якщо швидкість поверхневої рекомбінації дорівнює 1 м/с. Якщо об'ємний час життя неосновних носіїв заряду дорівнює об'ємному часу життя, тоді надлишковим носіям заряду не треба рухатись до рекомбінаційних поверхонь, бо вони встигають рекомбінуватися в об'ємі монокристалічної підкладинки. Надлишкові носії заряду, які генеровані освітленням підкладинки, створюють градієнт концентрації, який дифузують надлишкових носіїв заряду розмивається по об'єму. За таких умов, максимум концентрації в монокристалічній підкладинці майже не помітний. Розподіл концентрації надлишкових носіїв заряду в монокристалічній підкладинці зумовлюється дифузєю надлишкових носіїв заряду тому, що світло з довжиною хвилі 0,95 мкм сильно поглинається і генерація надлишкових носіїв заряду є поверхневою. Надлишкові носії заряду, які знаходяться в тильному макропористому шарі, не генеровані світлом в тильному макропористому, дифундували з монокристалічної підкладинки в тильний макропористий шар. Вплив тильного макропористого шару на зміну концентрації надлишкових носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії

полягає тільки в тому, що надлишкові носії заряду, які дифундували з монокристалічної підкладки, рекомбінують на поверхні макропор.

3.2. Генерація надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм

На рис. 3 представлена концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду в залежності від координати (відстані від поверхні, що освітлюється, див. рис. 1) та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії, коли світло з довжиною хвилі 1,05 мкм генерує надлишкові носіїв заряду. Залежність концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду має один максимум, який розміщений по середині монокристалічної підкладки (див. рис. 3). Освітлення поверхні фронтального макропористого шару та монокристалічної підкладки не створює максимумів концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду, завдяки слабкому поглинанню світла з довжиною хвилі 1,05 мкм. Генерація надлишкових носіїв заряду світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм відбувається по всьому об'єму зразка макропористого кремнію, а не тільки біля освітлюваних поверхонь. Спад концентрації надлишкових носіїв заряду в монокристалічній підкладці зумовлюється дифузією носіїв заряду з монокристалічної підкладки до центрів рекомбінації, які знаходяться на поверхні пор кожного макропористого шару. Максимум концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду розміщується по середині монокристалічної підкладки, завдяки симетричності зразка двостороннього макропористого кремнію, оскільки пори кожного макропористого шару мають однакову глибину, діаметр та відстані між порами. На рис. 3 видно, що максимум концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду зменшуються та стає більш широким зі зменшенням об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду. Він більш високий, коли в об'ємі рекомбінуються менша кількість надлишкових носіїв заряду.

4. Фотопровідність у двосторонньому макропористому кремнії

Питома фотопровідність в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду

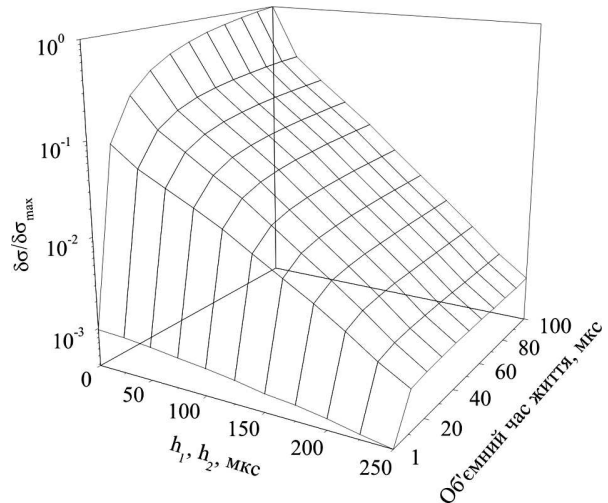


Рис. 4. Нормована питома фотопровідність в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду. Генерація надлишкових носіїв заряду відбувається світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм

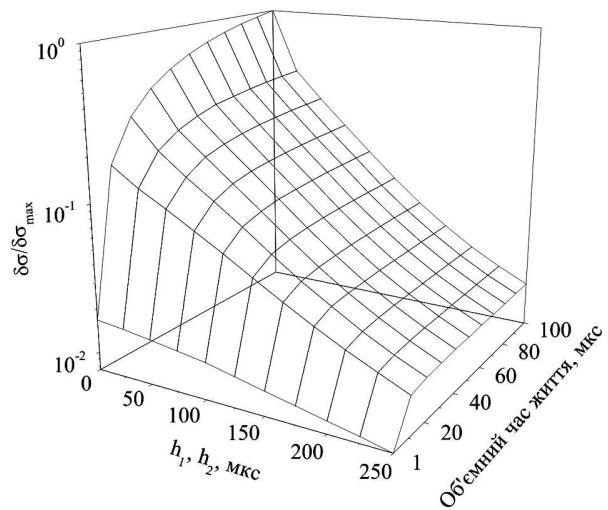


Рис. 5. Нормована питома фотопровідність в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду. Генерація надлишкових носіїв заряду відбувається світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм

ду при генерації надлишкових носіїв заряду електромагнітною хвилею з довжиною 0,95 мкм та 1,05 мкм, показана на рис. 4 та рис. 5 відповідно. Для розрахунку питомої фотопровідності в напрямку паралельно порам використовувались вирази (1)–(8). Питома фотопровідність у двосторон-

ньому макропористому кремнії нормована на максимальне значення фотопровідності в монокристалічному кремнії. Глибина пор кожного макропористого шару була однаковою і змінювалася від нуля до 250 мкм. Коли глибина пор обох макропористих шарів дорівнює 250 мкм, тобто, половині товщини зразка макропористого кремнії, пори стають наскрізними. Середній діаметр макропор 1 мкм. Середня відстані між центрами пор 2 мкм. Швидкість поверхневої рекомбінації на поверхні зразка та на поверхні пор кожного макропористого шару була 1 м/с. Об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в монокристалі кремнії (монокристалічній кремнієвій підкладинці) змінювався від 1 мкс до 100 мкс. Ефективний об'ємний час життя неосновних носіїв заряду в обох шарах макропористого кремнії змінювався відповідно до об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду.

4.1. Залежність фотопровідності в двосторонньому макропористому кремнії від глибини пор

На рис. 4 та рис. 5 показана питома фотопровідність в двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду. Питома фотопровідність в двосторонньому макропористому кремнії зменшується, якщо глибина пор зростає, а об'ємний час життя зменшується. Вона різко зменшується, коли глибина пор зростає від 0 до 50 мкм. Зменшення фотопровідності зумовлено зростанням площі рекомбінації надлишкових носіїв заряду при зростанні глибини пор. Це спостерігається у тому випадку, коли рекомбінація на поверхні визначає фотопровідність. У випадку, коли об'ємний час життя неосновних носіїв заряду змінюється від 1 мкс до 10 мкс, різкого зменшення фотопровідності не спостерігається, при зростанні глибини пор 0 до 50 мкм (див. рис. 4 та рис. 5). Зменшення фотопровідності в двосторонньому макропористому кремнії відбувається майже за експонентою, при зростанні глибини пор від 50 мкм до 250 мкм. Незважаючи на те, що розподіл концентрації надлишкових неосновних носіїв заряду в макропористому кремнії є різним, при генерації надлишкових носіїв заряду з довжиною хвилі 0,95 мкм та 1,05 мкм (див. рис. 2 та рис. 3), залежність нормованої фотопровідності від глибини пор є схожою (див. рис. 4 та рис. 5).

4.2. Залежність фотопровідності в двосторонньому макропористому кремнії від об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду

Фотопровідність у двосторонньому макропористому швидко збільшується, коли об'ємний час життя неосновних носіїв заряду збільшується від 1 мкс до 20 мкс (див. рис. 4 та рис. 5). В цьому випадку, об'ємний час життя визначає фотопровідність тому, що рекомбінація в об'ємі переважає рекомбінацію на поверхні. Фотопровідність не залежить від об'ємного часу життя, коли об'ємний час життя збільшується від 20 мкс до 100 мкс. В цьому випадку, об'ємний час життя не впливає на фотопровідність тому, що рекомбінація на поверхні пор визначає фотопровідність. Це спостерігається, коли глибина пор змінюється від 50 мкм до 250 мкм. Фотопровідність збільшується, коли об'ємний час життя неосновних носіїв заряду збільшується від 1 мкс до 100 мкс, а глибина пор не більше 50 мкм (див. рис. 4 та рис. 5). Це вказує на те, що рекомбінація в об'ємі переважає рекомбінацію на поверхні зразка та пор.

4.3. Залежність фотопровідності в макропористому кремнії з наскрізними порами та монокристалі кремнії від об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду

На рис. 4 та рис. 5 показана фотопровідність у монокристалі кремнії (відсутність пор) та макропористому кремнії з наскрізними порами (глибина пор дорівнює 250 мкм). Об'ємний час життя неосновних носіїв заряду має найбільший вплив на фотопровідність у монокристалі кремнії. При зменшенні об'ємного часу життя в монокристалі кремнії фотопровідність зменшується. В макропористому кремнії з наскрізними порами головну роль відіграє ефективний об'ємний час життя неосновних носіїв заряду. Ефективний об'ємний час життя визначається рекомбінацією нерівноважних носіїв заряду на поверхні пор, яка характеризується поверхневим часом життя неосновних носіїв заряду. З рис. 4 та рис. 5 видно, що фотопровідність у макропористому кремнії з наскрізними порами не залежить від об'ємного часу життя, якщо об'ємний час життя неосновних носіїв заряду змінюється від 10 мкс до 100 мкс. Фотопровідність у двосторонньому макропористому кремнії різко

спадає, коли об'ємний час життя зменшується від 10 мкс до 1 мкс. Якщо об'ємний час життя сумірний з поверхневим часом життя на поверхні пор кожного макропористого шару, тоді фотопровідність у двосторонньому макропористому кремнії з наскрізними порами залежить від об'ємного часу життя та різко спадає.

5. Висновки

Питома фотопровідність у двосторонньому макропористому кремнії в залежності від глибини пор та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду зменшується, якщо глибина пор зростає, а об'ємний час життя зменшується. Питома фотопровідність у макропористому кремнії з наскрізними порами не залежить від об'ємного часу життя, якщо він набагато менше поверхневого часу життя на поверхні пор, та різко зменшується в іншому випадку. Концентрація надлишкових неосновних носіїв заряду в залежності від координати та об'ємного часу життя неосновних носіїв заряду в двосторонньому макропористому кремнії має один або два максимуми, якщо генерація надлишкових носіїв заряду відбувається світлом з довжиною хвилі 1,05 мкм та 0,95 мкм, відповідно.

1. M. Treideris, V. Bukauskas, A. Reza, I. Simkiene, A. Setkus, A. Maneikis, V. Strazdiene. Macroporous silicon structures for light harvesting. *Mater. Sci. E* **21**, 3 (2015).
2. G. Loget, A. Vacher, B. Fabre, F. Gouttefangeas, L. Joanny, V. Dorcet. Enhancing light trapping of macroporous silicon by alkaline etching: application for the fabrication of black Si nanopike arrays. *Materials Chemistry Frontiers* **9**, 1881 (2017).
3. M. Ernst, H. Schulte-Huxel, R. Niepelt, S. Kajari-Schroder, R. Brendel. Thin crystalline macroporous silicon solar cells with ion implanted emitter. *Energy Procedia* **38** 910 (2013).
4. N. Mendoza-Aguero, V. Agarwal, H.I. Villafan-Vidales, J. Campos-Alvarez, P.J. Sebastian. A heterojunction based on macroporous silicon and zinc oxide for solar cell application. *J. New Mater. for Electrochem. Systems*. **18** (4), 225 (2015).
5. A.V. Sachenko, V.P. Kostilyov, R.M. Korkishko, V.M. Vlasnyuk, I.O. Sokolovskiy, B.F. Dvernikov, V.V. Chernenko,

M. Evstigneev. Key parameters of textured silicon solar cells of 26.6 photoconversion efficiency. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* **24** (2), 175 (2021).

6. L.A. Karachevtseva, V.F. Onyshchenko, A.V. Sachenko. Kinetics of Photoconductivity in Macroporous Silicon Structures. *Ukr. J. Phys.* **53** (9), 874 (2008).
7. M. Ernst, R. Brendel. Modeling effective carrier lifetimes of passivated macroporous silicon layers. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **95** (4), 1197 (2020).
8. V.F. Onyshchenko, L.A. Karachevtseva. Effective minority carrier lifetime in double-sided macroporous silicon. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* **23** (1), 29 (2020).
9. V.F. Onyshchenko. Distribution of excess charge carriers in bilateral macroporous silicon with different thicknesses of porous layers. *J. Nano-Electron. Phys.* **13** (6), 06010 (2021).
10. L.S. Monastyrskii, B.S. Sokolovskii, M.R. Pavlyk. Analytical and numerical calculations of photoconductivity in porous silicon. *Ukr. J. Phys.* **56** (9), 902 (2011).

Одержано 04.01.22

V.F. Onyshchenko

PHOTOCONDUCTIVITY IN BILATERAL MACROPOROUS SILICON

The specific photoconductivity and the excess minority carrier concentration in bilateral macroporous silicon depending on the pore depth and the bulk lifetime of minority charge carriers are calculated. The diffuse model is used to calculate the photoconductivity and the excess minority carrier concentration. The mathematical description of the diffusion model contains a general solution to the diffusion equation and a boundary condition written at the boundaries of a monocrystalline substrate and a sample of bilateral macroporous silicon. It is taken into account that light illuminates the monocrystalline substrate through the bottom of the pores. The dependence of the specific photoconductivity of bilateral macroporous silicon on the pore depth and the bulk lifetime of minority charge carriers decrease, if the pore depth increases, and if the bulk lifetime decreases. The dependence of the excess minority carrier concentration on the coordinate and bulk lifetime of minority charge carriers in bilateral macroporous silicon has one maximum in the case of uniform generation of excess charge carriers or two maxima in the case of inhomogeneous generation of excess charge carriers.

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