

В.Ф. Онищенко**ВПЛИВ ПІДКЛАДКИ ТА ПОВЕРХНІ МАКРОПОРИ НА ФОТОПРОВІДНІСТЬ У ДВОВИМІРНИХ СТРУКТУРАХ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНІЮ**

Розглянуто експериментальне та чисельне дослідження впливу монокристалічної кремнієвої підкладки та характеристик поверхні макропори на фотопровідність двовимірних структур макропористого кремнію. Показано, що вплив монокристалічної кремнієвої підкладки структури макропористого кремнію є незначним і залежить від довжини хвилі падаючого світла, об'ємної частки макропор, глибини макропор та товщини підкладки. Середня величина поверхневого потенціалу та заряду поверхневих станів визначають фотопровідність макропористого шару у двовимірній структурі макропористого кремнію.

Ключові слова: структура макропористого кремнію, фотопровідність, макропора.

1. ВСТУП

Двовимірні структури макропористого кремнію, виготовлені методом фотоанодного травлення, знайшли застосування в оптиці як фотонні кристали та мають перспективу застосування у фотоелектроніці. Це пов'язано з можливістю виготовлення структур з потрібною геометрією, великою площею внутрішньої поверхні, простою інтеграцією в мікросхеми та особливими фотоелектричними властивостями. Провідність та фотопровідність двовимірних структур макропористого кремнію визначаються процесами на поверхні макропори [1]. У роботах [1, 2] пояснюються механізми транспорту фотоносіїв у структурах макропористого кремнію з урахуванням приповерхневих областей макропори.

Температурні залежності фото-ерс у двовимірних структурах макропористого кремнію при енергіях фотонів, сумірних з енергією непрямого зона-зонного переходу, вказують на накопичення електронів на поверхневих рівнях за температури, близької до температури рідкого азоту [3]. Для пояснення фото-ерс було враховано поглинання світла за участю поверхневих станів, розташованих поблизу зони провідності [4]. Механізми транспорту носіїв заряду крізь бар'єр індій – макропористий кремній розглянуто в роботі [5].

Кінетика фотопровідності макропористого кремнію має неекспоненціальну залежність і визначається величиною поверхневого потенціалу та швидкістю поверхневої рекомбінації на поверхні макропор. У діапазоні $T = 200...300$ К температурна залежність часу релаксації фотопровідності має активаційний характер, але при подальшому зменшенні температури не залежить від неї [6]. Фотопровідність двовимірних структур макропористого кремнію розглядається в залежності від відстані між краями макропор та діаметра [7, 8].

На стан поверхні пори (зовнішнє середовище) впливає адсорбція, яка змінює концентрацію поверхневих станів, швидкість поверхневої рекомбінації та кількість накопиченого заряду на поверхні. Це впливає на провідність та ємність [9, 10], електро- та фотолюмінесценцію [11]. Вищевказані властивості поверхні повітряна пора – кремнієва матриця використовують у хімічних датчиках газу [10], вологості [9] та біологічних датчиках [12] для вимірювань розчинених біологічних об'єктів. Кремнієва матриця є фоточутливою і використовується в сонячних елементах [13], вона має форму у вигляді пор, які покращують поглинання світла, що створює антивідбиваюче покриття [14].

Мета даної роботи – виявити, в якій мірі характеристики поверхні макропори (заряд поверхневих станів, поверхневий потенціал, швидкість поверхневої рекомбінації) впливають на провідність і фотопровідність у макропористому кремнії, а також як впливає монокристалічна кремнієва підкладка на властивості двовимірних структур макропористого кремнію.

2. ЗРАЗКИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Дослідження та розрахунки фотопровідності проведено для двовимірних структур макропористого кремнію, виготовлених з пластин монокристалічного кремнію з орієнтацією [100], товщиною $H = 400$ мкм, n -типом провідності, рівноважною концентрацією електронів $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ та питомим опором $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. У монокристалічному кремнії методом електрохімічного травлення при освітленні тильного боку кремнієвої підкладки витравлювали циліндричні макропори глибиною $h_{por} = 85\text{...}100$ мкм [12]. Макропори були розміщені як періодично, так і неперіодично. Вони мали такі характеристики: середній діаметр $D_{por} = 2\text{...}6$ мкм, середня відстань між порами $1,5\text{...}8,2$ мкм, середня концентрація макропор $N_{por} = (0,5\text{...}6,5)\cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$, об'ємна частка макропор у шарі макропористого кремнію $P_{por} = 0,2\text{...}0,4$ відн. од., питома площа поверхні макропор становить $S_{por} = 942\text{...}4710 \text{ см}^2$ на одиницю об'єму структури макропористого кремнію. На свіжих бокових відколах двовимірної структури макропористого кремнію було виготовлено омичні контакти Au-Si шляхом втирання евтектики золото-кремній при її температурі плавлення.

Спектральні характеристики двовимірної структури макропористого кремнію було виміряно за допомогою автоматизованої установки, яка містила спектрометр МДР-23, селективний фазовий нановольтметр Unipan 232В та комп'ютер, як джерело світла використовували глобар. Для розрахунків використовували програму Matcad.

3. ВПЛИВ ПІДКЛАДКИ НА ФОТОПРОВІДНІСТЬ СТРУКТУР

Інтенсивність світла при проникненні углиб зразка змінюється за законом $I(x) = I(0)\exp(-kx)$, де $I(0)$ – інтенсивність на поверхні, k – коефіцієнт поглинання світла. Питома фотопровідність на відстані x від поверхні освітлення становить:

$$\Delta\sigma(x) = e\delta n(x) (\mu_n + \mu_p). \quad (1)$$

Для підкладки з кремнію концентрацію фотоносіїв на відстані x запишемо як $\delta n(x) = k\beta\tau I(x)$, а для пористого кремнію знаходимо, як в роботі [1]. Причому треба врахувати, що безрозмірний поверхневий потенціал визначимо як $Y = Y(x)$, швидкість поверхневої рекомбінації $s = s(x)$ та концентрацію електронів на поверхневих рівнях $n_t = n_t(x)$. Монокристалічна підкладка освітлюється світлом з інтенсивністю $I_{m1}(0)$, яке пройшло крізь повітряну пору площею S_{1por} і безпосередньо падає на монокристалічну підкладку, та світлом з інтенсивністю $I(h)$, яке пройшло крізь матрицю з монокристалічного кремнію в шарі макропористого кремнію товщиною h . Потужність, яка поглинається частиною монокристалічної підкладки площею, що припадає на одну пору, має вигляд:

$$I_{mb}(0)/N_{por} = I_{m1}(0)S_{1por} + I(h)(1 - S_{1por}),$$

де N_{por} – концентрація пор. Ефективна інтенсивність на поверхні підкладки:

$$I_{mb}(0) = P_{por}I_{m1}(0) + (1 - P_{por})I(h). \quad (2)$$

Питому фотопровідність монокристалічної кремнієвої підкладки на межі макропористий кремній – кремнієва підкладка запишемо як:

$$\Delta\sigma_{mb}(0) = e\beta k(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p)[P_{por}I_{m1}(0) + (1 - P_{por})I(h)]. \quad (3)$$

Причому при вертикальному освітленні $I_{m1}(0) = I(0)$, де $I_{m1}(0)$ враховує відбивання від внутрішньої поверхні пори. Якщо ми освітлюємо структуру паралельно порам, то інтенсивність світла з глибиною буде змінюватись, що приведе до зміни фотопровідності. У такому випадку провідність та фотопровідність у напрямку паралельно порам слід розглянути як послідовне з'єднання елементів з провідністю:

$$d\sigma^*(x) = \frac{\sigma(x)}{N_{por} dx}, \quad (4)$$

$\sigma(x)$ – питома провідність при освітленні на відстані x .

При освітленні структури паралельно порам ефективна питома провідність у напрямку паралельно порам структури макропористого кремнію на кремнієвій підкладці набуває вигляду:

$$\sigma_{1H} = H_{por} \left[\left(\int_0^{h_{por}} \frac{dx}{\sigma_{por1}(x)} \right) + (k\sigma_0)^{-1} \ln \left(\frac{\Delta\sigma_{mb}(0) + \sigma_0 \exp(kH_{por})}{\Delta\sigma_{mb}(0) + \sigma_0 \exp(kh_{por})} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

де $\sigma_{por1}(x)$ – питома провідність пористого матеріалу паралельно порам на відстані x при освітленні, σ_0 – питома темнова провідність монокристалічної кремнієвої підкладки. Перший доданок у (5) відповідає за обернену ефективну питому провідність при освітленні у макропористому шарі, а другий – у монокристалічній підкладці і є розв'язком відповідного інтеграла.

При освітленні у напрямку паралельно порам ефективна питома провідність перпендикулярно порам структури макропористого на кремнієвій підкладці:

$$\sigma_{2H} = H_{por}^{-1} \left[\sigma_0 (2 - P_{por}) + P_S \sigma_S + \int_0^{h_{por}} \Delta\sigma_{por2}(x) dx + \Delta\sigma_{mb}(0) (\exp(-H_{por}x) - \exp(-h_{por}x)) \right], \quad (6)$$

де $\sigma_{por2}(x)$ – провідність пористого матеріалу перпендикулярно порам на відстані x . Провідність перпендикулярно порам ми розглядали як паралельне з'єднання елементів з провідністю $\sigma(x)dx$.

Проаналізуємо залежність фотопровідності монокристалічної підкладки від довжини хвилі падаючого випромінювання. Фотопровідність матеріалу залежить від кількості поглинутих фотонів, яка визначається коефіцієнтом поглинання. Коефіцієнт поглинання залежить від матеріалу та довжини хвилі електромагнітного випромінювання.

На рис. 1 показано спектральну залежність відносної фотопровідності двовимірної структури макропористого кремнію, розраховану з урахуванням коефіцієнта поглинання світла кремнієм, а також експериментальні дані зразків, характеристики яких наведено у другому параграфі. Крива 5 показує питому відносну фотопровідність монокристалічної кремнієвої підкладки як відношення фотопровідності підкладки до її темної провідності. Генерація фотонів у кремнієвій підкладці зумовлена двома складовими: освітлення крізь макропори та освітлення крізь кремнієву матрицю. При довжинах хвиль менших ніж 0,9 мкм фотопровідність зумовлена тільки освітленням крізь макропори. При довжинах хвиль більших за 0,9 мкм світло вже проникає крізь кремнієву матрицю товщиною 100 мкм і збільшує провідність підкладки, а при 1 мкм фотопровідність зменшується, оскільки матеріал такої товщини стає прозорим для цих довжин хвиль. Криві 2 і 3 рис. 1 показують теоретичну залежність, а крива 3* – експериментальні дані відносної фотопровідності зразків двовимірних структур

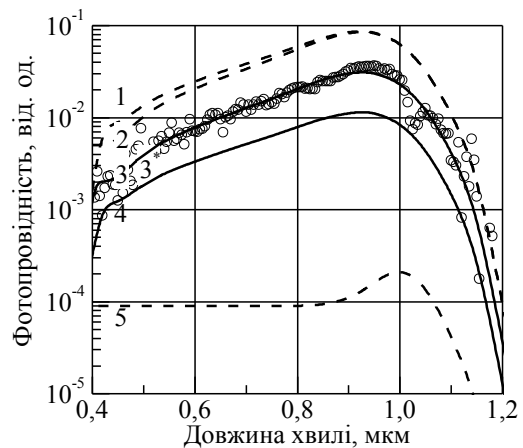


Рис. 1. Залежність відносної фотопровідності від довжини хвилі, виміряної перпендикулярно порам (1, 3), паралельно порам (2, 4), для макропористого кремнію (1, 2); макропористого кремнію на підкладці (3, 4); 3* – експериментальні дані; 5 – підкладка. Освітлення у напрямку паралельно порам. Товщина пористого шару 100 мкм, підкладки 300 мкм, об'ємна частка пор 0,2.

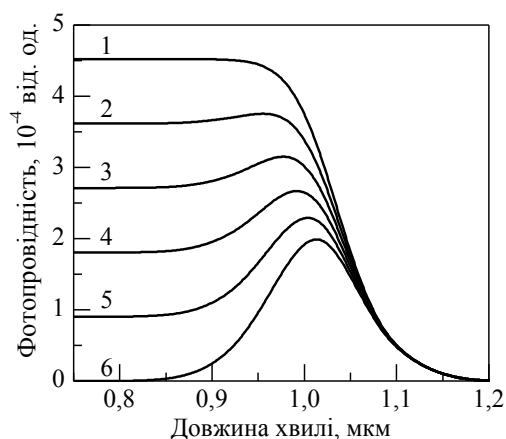


Рис. 2. Залежність відносної фотопровідності монокристалічної підкладки товщиною 100 мкм від довжини хвилі. Товщина пористого шару 100 мкм та об'ємна частка пор: 1 (1), 0,8 (2), 0,6 (3), 0,4 (4), 0,2 (5), 0 (6). Освітлення у напрямку паралельно порам.

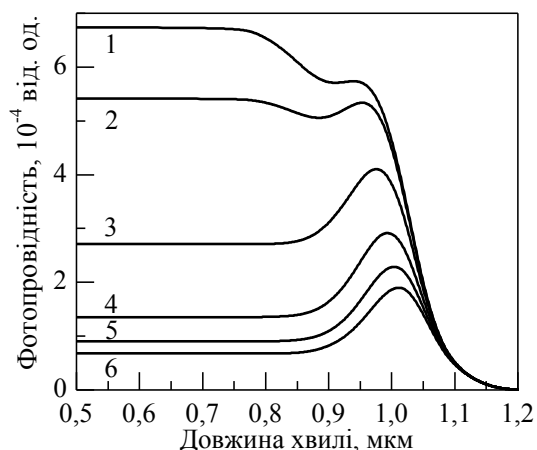


Рис. 3. Залежність відносної фотопровідності монокристалічної підкладки від довжини хвилі при глибині пористого шару 100 мкм. Об'ємна частка пор 0,2, товщина підкладки, мкм: 40 (1), 50 (2), 100 (3), 200 (4), 300 (5), 400 (6). Освітлення та провідність у напрямку паралельно порам.

макропористого кремнію, характеристики яких наведено у другому параграфі. За такої об'ємної частки пор 0,2 та товщині макропористого шару 100 мкм відносна фотопровідність матеріалу перевищує відносну фотопровідність монокристалічної підкладки товщиною 300 мкм як в напрямку паралельному, так і перпендикулярному порам. Розраховані криві 1 і 2 рис.1 показують відносну фотопровідність макропористого шару, яка за своєю залежністю від довжини хвилі аналогічна розглянутій раніше, але перевищує на порядок. Також видно деяке відхилення відносної фотопровідності в залежності від напрямку вимірювання при довжинах хвиль менших за 0,8 мкм.

Проаналізуємо залежність фотопровідності монокристалічної підкладки від об'ємної частки пор макропористого шару. Об'ємна частка пор визначає, скільки світла безпосередньо попаде на монокристалічну підкладку, пройшовши по повітряних порах і практично не змінивши своєї інтенсивності. Інтенсивність світла, що дійшло до монокристалічної підкладки, може змінитися завдяки додатковому поглинанню світла, яке зайшло в кремнієву матрицю крізь поверхню макропор або крізь поверхню зразка.

На рис. 2 наведено розраховану спектральну залежність відносної фотопровідності структури макропористого кремнію на кремнієвій підкладці від об'ємної частки пор і макропористого шару з урахуванням коефіцієнта поглинання світла кремнієм. Серія кривих 1–6 з кроком 0,2 показує, що об'ємна частка пор макропористого шару дуже сильно впливає на відносну фотопровідність при освітленні світлом з довжиною хвиль до 1 мкм, а далі для всіх кривих спостерігаємо зменшення відносної фотопровідності, пов'язане з товщиною матеріалу. Для монокристала без покриття макропорами, тобто об'ємна частка пор дорівнює одиниці, відносна фотопровідність не залежить від довжини хвилі аж до 1 мкм, а далі спадає. Зі зменшенням об'ємної частки пор відносна фотопровідність монокристалічної підкладки сильніше спадає для довжин хвиль до 1 мкм, завдяки чому з'являється максимум біля 1 мкм. Відмітимо також, що максимум відносної фотопровідності зі зменшенням об'ємної частки пор повільно зсувається у більш довгі хвилі від 0,98 мкм до 1,02 мкм.

Проаналізуємо залежність фотопровідності монокристалічної підкладки від її товщини. При збільшенні товщини монокристалічної підкладки відносна стаціонарна фотопровідність зменшується завдяки тому, що світло не доходить до нижніх шарів підкладки.

На рис. 3 наведено теоретичну спектральну залежність відносної фотопровідності структури макропористого кремнію на кремнієвій підкладці від товщини монокристалічної підкладки з урахуванням коефіцієнта поглинання. Серія кривих 1–6 показує, що для довжин хвиль до 0,8 мкм відносна фотопровідність не залежить від довжини хвилі, бо навіть при такій товщині підкладки випромінювання повністю поглинається. При товщині монокристалічної підкладки від 40 до 400 мкм спостерігається максимум, який зростає зі зменшенням товщини підкладки, зсуваючись від 0,98 до 1,03 мкм. Це пояснюється різними глибинами проникнення світла. При товщині 40–50 мкм з'являється мінімум, пов'язаний з тим, що максимумами двох складових освітлення не збігаються.

4. ВПЛИВ ПОВЕРХНІ МАКРОПОРИ НА ФОТОПРОВІДНІСТЬ СТРУКТУР

Кількість генерованих світлом носіїв зменшується з глибиною проникнення світла, оскільки інтенсивність світла спадає завдяки поглинанню. Певній кількості генерованих носіїв буде відповідати поверхневий потенціал, заряд поверхневих станів, швидкість поверхневої рекомбінації та фотопровідність. При товщині кремнію між порами, яка порівняна з двома шарами Шоттки, вищевказані величини будуть відігравати важливу роль і будуть сильно взаємопов'язаними. Захоплення заряду на поверхню або його рекомбінація суттєво знизить кількість нерівноважних носіїв у приповерхневому шарі, з якого і буде фактично складатися матеріал. Для знаходження ефективних характеристик структур макропористого кремнію треба знайти середні величини на певній довжині, тобто проінтегрувати ці змінні з глибиною. Наприклад, для знаходження ефективної величини швидкості поверхневої рекомбінації треба скористатися розрахунком, наведеним у роботі [1], а потім проінтегрувати по глибині:

$$s = \frac{1}{h} \int_0^h s(x) dx. \quad (7)$$

Для знаходження відносної ефективної величини розділимо значення ефективної величини при освітленні на значення ефективної величини без освітлення.

На рис. 4 представлено розраховану залежність відносних ефективних величин заряду поверхневих станів (крива 1), поверхневого потенціалу (крива 2), фотопровідності (крива 3), швидкості поверхневої рекомбінації (крива 4) від товщини макропористого кремнію при освітленні світлом з довжиною хвилі 0,95 мкм та інтенсивністю 2,1 Вт/м². Як видно з рис. 4, всі залежності відносних величин є лініями у напівлогарифмічному масштабі, це і зрозуміло, тому що інтенсивність генерації нерівноважних носіїв має аналогічну залежність. Найбільше змінюється заряд поверхневих станів – майже на три рівноважних значення заряду на поверхні, яка освітлюється. При товщині шару макропористого кремнію у 100 мкм ефективна величина заряду, розрахована на всі поверхневі центри, змінюється у два рази. Величина ефективного поверхневого потенціалу зміниться лише на 0,06 від рівноважного, в той час як на поверхні на 0,2. Ефективна фотопровідність зміниться на 0,03 від рівноважної на поверхні 0,05. За вищевказаних умов, найменше змінюється ефективна швидкість поверхневої рекомбінації: 0,008 для зразка та 0,02 на поверхні. Ми бачимо суттєві відмінності, тому треба використовувати ефективні величини. Ефективні величини грають важливу роль при розрахунку параметрів вимірної фотопровідності двовимірних структур макропористого кремнію.

Розглянемо залежність ефективних величин від довжини хвилі падаючого випромінювання. На рис. 5 наведено розраховану ефективну залежність відносних величин заряду поверхневих станів (крива 1), поверхневого потенціалу (крива 2), фотопровідності (крива 3), швидкості поверхневої рекомбінації (крива 4) від довжини хвилі падаючого випромінювання інтенсивністю 2,1 Вт/м² у шарі макропористого кремнію. Як видно з рис. 5,

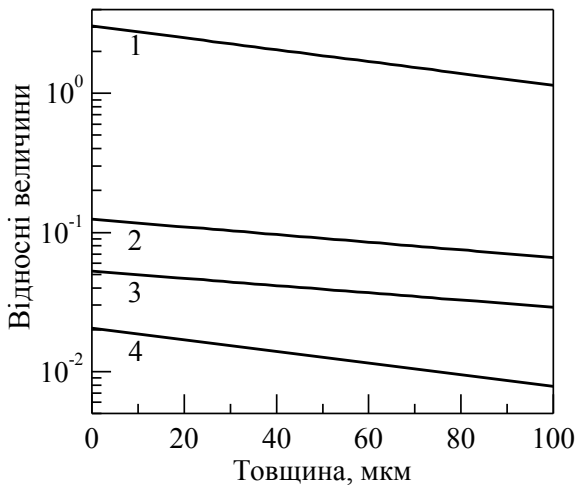


Рис. 4. Залежність відносних величин: заряду поверхневих станів (1), поверхневого потенціалу (2), фотопровідності (3), швидкості поверхневої рекомбінації (4) – від товщини макропористого кремнію. Довжина хвилі 0,95 мкм.

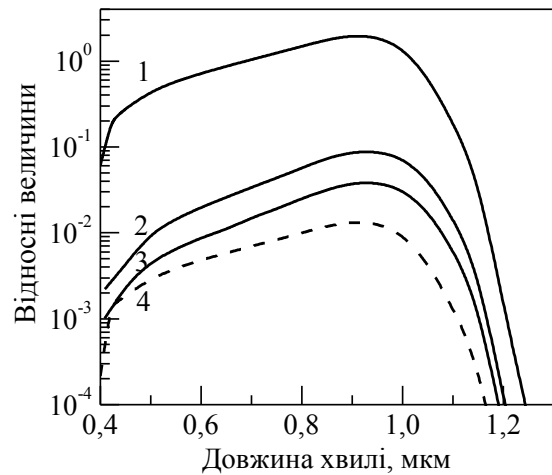


Рис. 5. Залежність відносних величин: заряду поверхневих станів (1), поверхневого потенціалу (2), фотопровідності (3), швидкості поверхневої рекомбінації (4) – від довжини хвилі в шарі макропористого кремнію. Для макропористого кремнію товщиною 100 мкм.

всі ефективні відносні величини (криві 1–4) зростають за експонентою при довжинах хвиль від 0,5 до 0,9 мкм. При 0,95 мкм мають максимум і різко спадають при довжинах хвиль більших за 1 мкм, що пов'язано з тим, що глибина проникнення стала більшою за товщину зразка. Також спостерігається спад при довжинах менших за 0,5 мкм, що пов'язано з різким зменшенням коефіцієнта поглинання. У напівлогарифмічному масштабі відносний поверхневий потенціал має однаковий нахил з відносною фотопровідністю і майже на порядок відрізняється при довжинах хвиль 0,5 та 0,95 мкм.

5. ВИСНОВКИ

Проведено експериментальне та чисельне дослідження впливу монокристалічної кремнієвої підкладки та характеристик поверхні макропори на фотопровідність двовимірних структур макропористого кремнію.

Встановлено, що вплив монокристалічної кремнієвої підкладки структури макропористого кремнію є незначним і залежить від довжини хвилі падаючого світла, об'ємної частки макропор, глибини макропор та товщини підкладки.

Проаналізовано залежність фотопровідності монокристалічної підкладки від об'ємної частки пор макропористого шару. Об'ємна частка пор визначає, скільки світла безпосередньо попаде на монокристалічну підкладку, пройшовши по повітряних порах, а скільки – крізь кремнієву матрицю, поглинаючись у ній.

Встановлено, що відносна фотопровідність монокристалічної підкладки сильніше спадає зі зменшенням об'ємної частки пор у макропористому шарі, що знаходиться перед нею, для довжин хвиль до 1 мкм, а її максимум зсувається у більш довгі хвилі від 0,98 до 1,02 мкм.

При довжинах хвиль, менших ніж максимум фотопровідності, середні величини фотопровідності, поверхневого потенціалу, заряду поверхневих станів, швидкості поверхневої рекомбінації зростають за експонентою. Ефективні (по глибині пори) величини поверхневого потенціалу та заряду поверхневих станів визначають фотопровідність у структурах макропористого кремнію.

V.F. Onyshchenko

**INFLUENCE OF SUBSTRATE AND MACROPOROUS SURFACE
ON PHOTOCONDUCTIVITY IN TWO-DIMENSIONAL STRUCTURES
OF MACROPOROUS SILICON**

The experimental and numerical investigations of the influence of single-crystal silicon substrate and characteristics of macropore surface on the photoconductivity of two-dimensional structures of macroporous silicon have been performed. It has shown that the influence of single-crystal silicon substrate of macroporous silicon structure is negligible and depends on the wavelength of the incident light, the macropore volume fraction, macropore depth and thickness of the substrate. The mean values of the surface potential and charge of surface states determine the photoconductivity of macroporous layer in two-dimensional structure of macroporous silicon.

Keywords: macroporous silicon structure, photoconductivity, macropores, substrate.

1. *Onyshchenko V.F., Karachevtseva L.A.* Conductivity and photoconductivity of two-dimensional macroporous silicon structures // Ukr. J. Phys. – 2013. – **58**, № 9. – P. 846-852.
2. *Karachevtseva L., Onyshchenko V., Sachenko A.* Photocarrier transport in 2D macroporous silicon structures // Opto-electronics review. – 2010. – **18**, № 4. – P. 394-399.
3. *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**, № 12. – P. 1212-1218.
4. *Karachevtseva L.A., Onyshchenko V.F., Sachenko A.V.* Photoeffect peculiarities in macroporous silicon structures // Chemistry, physics and technology of surface. – 2010. – **1**, № 1. – P. 87-93.
5. *Karachevtseva L., Onishchenko V., Sukach A. et al.* Charge carrier transport in barrier “In-macroporous silicon” structures // Proc. SPIE. – 2006. – **6127**. – P. 61270O1-61270O10.
6. *Karachevtseva L.A., Onyshchenko V.F., Sachenko A.V.* Kinetics of photoconductivity in macroporous silicon structures // Ukr. J. Phys. – 2008. – **53**, № 9. – P. 874-881.
7. *Karachevtseva L.A., Onishchenko V.F., Karas' M.I. et al.* Photoelectrical characteristic of two-dimensional macroporous silicon structures // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2004. – **7**, № 4. – P. 436-441.
8. *Ivanov V.I., Karachevtseva L.A., Karas' M.I. et al.* Photoconductivity in macroporous silicon with regular structure of macropores // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2007. – **10**, № 4. – P. 72-76.
9. *Jalkanen T., Makila E., Maattanen A. et al.* Porous silicon micro- and nanoparticles for printed humidity sensors // Appl. Phys. Lett. – 2012. – **101**, № 26. – P. 26110-26113.
10. *Barillaro G., Lazzerini G.M., Strambini L.M.* Modeling of porous silicon junction field effect transistor gas sensors: Insight into NO₂ interaction // Appl. Phys. Lett. – 2010. – **96**, № 16. – P. 162105-162108.
11. *Ray M., Jana A., Ghanta U. et al.* Photoluminescence from oxidized macroporous silicon: Nanoripples and strained silicon nanostructures // Device and Materials Reliability. – 2013. – **13**, № 1. – P. 87-92.
12. *Roychoudhuri C., Kanungo J., Das R.D. et al.* Electrical sensing of biochemicals using macroporous silicon // Smart Sensors and Sensing Technology. – 2008. – **20**. – P. 101-116.
13. *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**, № 15. – P. 6194-6201.
14. *Selj J.H., Marstein E., Thøgersen A. et al.* Porous silicon multilayer antireflection coating for solar cells; process considerations // Phys. status solidi (c). – 2011. – **8**, № 6. – P. 1860-1864.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова
НАН України
проспект Науки, 41
03028 Київ
E-mail: onyshchenkovf@isp.kiev.ua

Отримано 03.04.2014