

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

УДК 621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2019.1.159492>

ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СОНЯЧНИХ БАТАРЕЯХ

В. Ю. Єрохов, Ю. М. Ховерко, С. І. Нічкало

Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, тел. (032)2582627,
e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СОНЯЧНИХ БАТАРЕЯХ

В. Ю. Єрохов, Ю. М. Ховерко, С. І. Нічкало

Анотація. Досліджено вплив технологічного процесу формування антивідбивних шарів на основі поруватого кремнію на стан фронтальної контактної системи кремнієвих сонячних елементів. Для оптимізації даної технології використано електроліт $C_2H_5OH:H_2O:HF=1:1:1$ при поверхневій густині анодного заряду $0,46 \text{ Кл/см}^2$. Зменшення часу анодування в такому електроліті до 10 с дозволило отримати шари поруватого кремнію без суттєвого пошкодження контактної струмозбиральної гребінки. Встановлено механізм і ступінь впливу фронтального шару поруватого кремнію на основні параметри досліджуваних зразків сонячних елементів. Для моно- і мультикристалічних сонячних елементів приріст фотоструму перевищував 50%, коефіцієнт корисної дії підвищився на 25% і 22%, відповідно для монокристалічних і мультикристалічних зразків. При цьому виявлено зменшення напруги неробочого ходу на 2,5% для всіх досліджуваних зразків.

Ключові слова: поруватий кремній; сонячний елемент; антивідбивне покриття; електрохімічне травлення

OPTIMIZATION OF POROUS SILICON CHARACTERISTICS FOR SOLAR BATTERIES

V. Yerokhov, Yu. Khoverko, S. Nichkalo

Abstract. The influence of the technological formation process of anti-reflective layers based on porous silicon on the state of the front contacts of silicon solar cells is studied. To optimize this technology, an electrolyte $C_2H_5OH:H_2O:HF=1:1:1$ was used at anodic charge density of 0.46 C/cm^2 . Reducing the anodizing time in such an electrolyte to 10 s allowed to obtain layers of porous silicon without a significant damage to the current-collecting contact comb. The mechanism and degree of influence of the front porous silicon layer on the main solar cell parameters are established. For mono- and multicrystalline solar cells, the photocurrent gain exceeded 50%, the efficiency increased by 25% and 22% for monocrystalline and multicrystalline specimens, respectively. In this case, the reduction of the open-circuit voltage by 2.5% was found for all the samples under study.

Keywords: porous silicon; solar cell; antireflection coating; electrochemical etching

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ

В. Ю. Ерохов, Ю. Н. Ховерко, С. И. Ничкало

Аннотация. Исследовано влияние технологического процесса формирования антиотражающих слоев на основе пористого кремния на состояние фронтальной контактной системы кремниевых солнечных элементов. Для оптимизации данной технологии использован электролит $C_2H_5OH:H_2O:HF=1:1:1$ при поверхностной плотности анодного заряда $0,46\text{ Кл/см}^2$. Уменьшение времени анодирования в таком электролите до 10 с позволило получить слои пористого кремния без существенного повреждения контактной токособирающей гребенки. Установлен механизм и степень влияния фронтального слоя пористого кремния на основные параметры исследуемых образцов солнечных элементов. Для моно- и мультикристаллических солнечных элементов прирост фототока превышал 50%, коэффициент полезного действия повысился на 25% и 22% соответственно для моно- и мультикристаллических образцов. При этом выявлено уменьшение напряжения холостого хода на 2,5% для всех исследуемых образцов.

Ключевые слова: пористый кремний; солнечный элемент; антиотражающее покрытие; электрохимическое травление

1. Вступ

Сонячні батареї, або сонячні елементи (СЕ), уперше почали застосовувати для енергозабезпечення космічних станцій більше 50 років тому, і сьогодні вони ввійшли в побут як джерело екологічно чистої і безкоштовної енергії [1, 2]. Глобальний попит на електроенергію зростає кожного дня внаслідок збільшення кількості населення та розвитку промисловості, що спричиняє різні екологічні наслідки для навколишнього середовища [3]. У цьому контексті фотоелектричну сонячну енергію розглядають як альтернативу для генерування струму, оскільки вона невичерпна, не вимагає складної інфраструктури, безпечна і найголовніше – екологічна [4]. Це привело до збільшення на 25% ринку сонячної енергії в таких країнах як США, Китай, Німеччина і Японія. Примітно, що від 1975 р. і до сьогодні ціна кремнієвих сонячних батарей зменшилась з 101,5 \$/Вт до 0,3 \$/Вт, тобто приблизно у 340 разів. Вдосконалення існуючих і розроблення нових технологій створення матеріалів будуть сприяти подальшому зниженню вартості, підвищенню технічних і фотоелектричних параметрів СЕ [5–8].

Ефективність кремнієвих СЕ значною мірою залежить від фотогенераційних втрат, зумовлених високим коефіцієнтом відбивання, який для планарного кремнію може сягати 30%. Для зменшення оптичних втрат та збільшення ефективності СЕ застосовують антивідбивні покриття (АВП) [9, 10], різні типи текстур поверхні [11–14], а також фронтальні контактні системи [15, 16], які необхідно технологічно правильно нанести на поверхню СЕ. Зазначені обставини стимулюють розроблення оптимізованих технологій отримання СЕ з використанням поруватих шарів, АВП і технологічно правильно нанесеної на поверхню СЕ фронтальної контактної системи, які в перспективі могли б замінити традиційні і були набагато дешевші.

Метою роботи було формування антивідбивних шарів поруватого кремнію на поверхні структури СЕ за наявності на робочій поверхні струмозбиральної контактної гребінки, а також дослідження впливу стану фронталь-

ної контактної системи СЕ після травлення на основні характеристики СЕ.

2. Обґрунтування та деталі експерименту

Оптимізація технології електрохімічного формування шарів поруватого кремнію дозволяє суттєво покращити їх антивідбивні та пасивувальні властивості. Але для того, щоб поруватий кремній ефективно використовувався як АВП в структурі кремнієвих СЕ, його параметри і технологія одержання повинні задовільняти таким вимогам:

- параметри просвітлювальних поруватих шарів не повинні негативно впливати на вихідні електричні характеристики і коефіцієнт корисної дії (ККД) СЕ;
- технологічні процеси формування і гідрогенізація шарів поруватого кремнію повинні бути сумісними з технологією створення кремнієвих СЕ та не ускладнювати її.

Отже, згідно першої вимоги товщина поруватого шару не повинна перевищувати 100 нм. За таких умов вплив високого питомого опору поруватого кремнію ($\sim 10^6$ – 10^7 Ом \times см) на послідовний опір структури СЕ буде знаходитись в допустимих межах. Згідно другої вимоги формування шарів поруватого кремнію найдоцільніше проводити на завершальному етапі створення структури СЕ, тобто після нанесення на його фронтальну поверхню контактної гребінки. При цьому немає необхідності здійснювати фотолітографію, що є обов'язковим в разі формування поруватого кремнію перед створенням контактної системи. Варто зауважити, що необхідно враховувати можливість пошкодження контактної гребінки під час електрохімічної обробки структури СЕ в електроліті. Відтак, необхідність дослідження впливу процесу формування АВП на основі поруватого кремнію на стан фронтальної контактної системи СЕ цілком виправдана.

3. Результати досліджень та їх аналіз

Для дослідження впливу електрохімічного травлення на стан фронтальної контактної

системи СЕ було проведено низку експериментів по створенню оптимізованих шарів поруватого кремнію на зразках СЕ з повністю сформованими структурами без АВП. Оптимізація технології полягала у побудові залежностей спектру відбивання шару поруватого кремнію від його товщини і показника заломлення. Отримані результати свідчать про те, що у вибраному спектральному діапазоні мінімальне відбивання від поверхні поруватого шару досягається у випадку, коли товщина поруватого кремнію знаходиться в межах від 70 до 100 нм, а показник заломлення – від 1,35 до 1,9. Такі значення оптичних параметрів поруватого шару отримували для шарів, які вирощували впродовж 2–6 с при густині анодного струму 40–100 мА/см². Результати експериментального дослідження впливу густини анодного струму та тривалості анодування на величину інтегрального коефіцієнта відбивання поруватого кремнію в діапазоні 550–850 нм зображено на рис. 1.

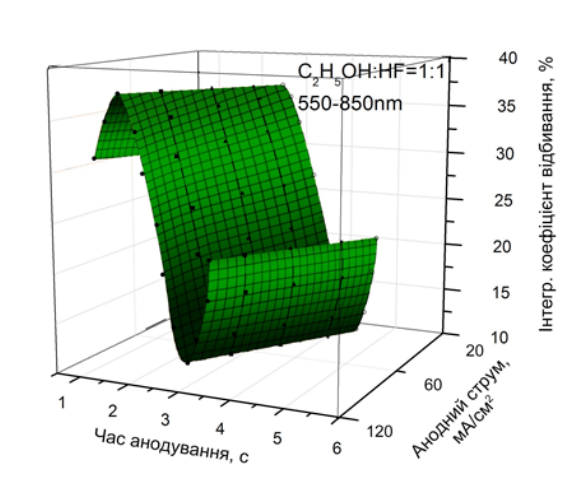


Рис. 1. Експериментальна залежність інтегрального коефіцієнта відбивання шару поруватого кремнію в діапазоні 550–850 нм від технологічних умов його отримання, густини анодного струму і тривалості електрохімічного анодування.

Як для залежності коефіцієнта відбивання від анодного струму, так і для його залежності від часу анодування спостерігається область мінімального відбивання (див. рис. 1), що в результаті дозволяє звузити досліджуваний діапазон оптимальних технологічних умов. Однак така оптимізація передбачає

проведення великої кількості експериментів по оптичній спектроскопії шарів поруватого кремнію, сформованих за різних значень густини анодного струму і часу анодування [17–20]. Насамперед це пов'язано з тим, що сукупний вплив даних технологічних умов на антивідбивні властивості поруватого кремнію є багатограним та складним.

Технологічний процес формування фронтальної контактної системи включав почергове термовакuumне напылення на кремнієву поверхню через металічні трафарети шарів титану (Ti), паладію (Pd) і срібла (Ag) з товщинами 30 нм, 20 нм, 30 нм, відповідно. Ширина контактних пальців становила 30 мкм, а відстань між ними >1 мм. Загальна площа затінення робочої поверхні не перевищувала 5%. Для зменшення контактного опору товщина шару Ag була збільшена гальванічним методом до 25 мкм. На завершальному етапі створення контактної гребінки здійснювали відпал одержаних структур у атмосфері азоту з вмістом водню 5% за температури 400 °C протягом 20 хв. Фрагмент конфігурації фронтальної контактної гребінки кремнієвого СЕ показано на рис. 2.

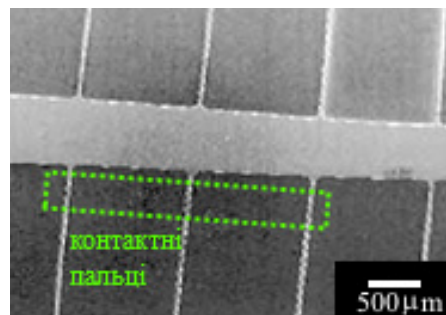
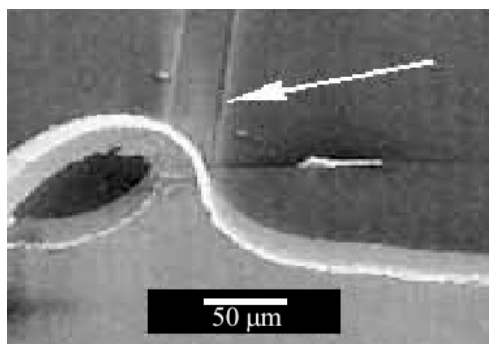
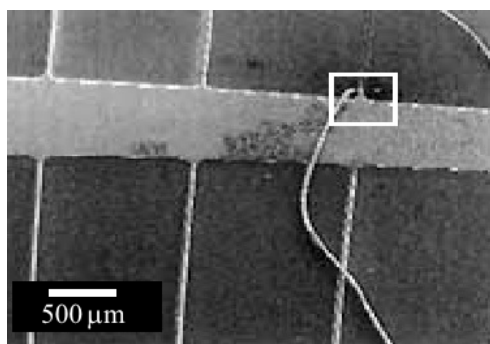


Рис. 2. СЕМ мікрофотографія фронтальної струмозбиральної контактної гребінки.

Результати дослідження електрохімічного анодування структур зі сформованою на робочій поверхні контактною системою показали, що стан струмозбиральної гребінки найбільш чутливий до концентрації фтористоводневої кислоти (HF) в електроліті і часу анодування. Було виявлено, що для всіх робочих електролітів існує певне критичне значення часу перебування структури СЕ в електроліті, перевищення якого призводить до пошкодження

контактних пальців фронтальної струмозбиральної гребінки (рис. 3). Встановлено, що при анодуванні в електроліті $C_2H_5OH:HF=1:1$ критичний час становить 45 с.



б

Рис. 3. СЕМ мікрофотографії лінійки (а) і окремого контактного пальця (б) фронтальної струмозбиральної гребінки після електрохімічного анодування структури СЕ в розчині $C_2H_5OH:HF=1:1$ протягом 45 с.

Дослідження характеру пошкоджень фронтальної контактної системи за допомогою сканувального електронного мікроскопа (СЕМ) показали, що в процесі електрохімічної обробки в основному має місце відшарування контактних пальців струмозбиральної гребінки (рис. 3а). Оскільки в місці контакту з кремнієвою поверхнею спостерігаються залишки контактної металізації (показано стрілкою на рис. 3б), а відшарування зазнає тільки товстий шар срібла, то логічно припустити, що таке явище не є результатом незадовільної адгезії чи бокового підтравлювання контактних пальців зі сторони кремнієвої поверхні. Найімовірніше, відбувається підтравлювання адгезійного шару Ti , який хімічно нестійкий до HF . Шари Ag та Pd не зазнають травлен-

ня в HF (в ряді напруг Ag та Pd розташовані справа від водню) і деформуються внаслідок власних механічних напружень або за рахунок інтенсивного газовиділення під час процесу анодування.

Отже, аналіз результатів дослідження впливу електрохімічного анодування на стан фронтальної контактної системи дає підстави вважати, що формування антивідбивного шару поруватого кремнію на поверхні структури СЕ може бути здійснено за наявності на робочій поверхні струмозбиральної гребінки. Для запобігання її пошкодження під час анодування необхідно максимально мінімізувати час перебування структури СЕ в електроліті і зменшити вміст у ньому HF . Хоча, як було показано в роботах [18, 21, 22], надмірне зменшення концентрації HF в електроліті зумовлює погіршення антивідбивних властивостей створених шарів поруватого кремнію. Тому оптимізацію умов електрохімічного анодування найдоцільніше здійснювати за рахунок зменшення тривалості анодного оброблення.

З метою усунення пошкодження контактної гребінки під час анодування тривалість електрохімічного оброблення зменшено до 3–6 секунд. При цьому поверхнева густина анодного заряду залишалась у діапазоні оптимальних значень, що досягалося за рахунок збільшення анодного струму. На наступному етапі завдяки удосконаленню конструкції електрохімічної комірки вдалось збільшити тривалість перебування структури СЕ в електроліті до 12–15 с. Як результат, такі вдосконалення технологічного процесу дозволили уникнути пошкодження контактної гребінки СЕ під час формування на його фронтальній поверхні АВП на основі шару поруватого кремнію. З використанням оптимізованих умов процесу електрохімічного анодування на поверхні структур моно- та мультикристалічних кремнієвих СЕ сформовано АВП на основі шару поруватого кремнію. Технологічну послідовність зведено в Таблицю 1.

Таблиця 1

Порівняння етапів виготовлення моно- та мультикристалічних кремнієвих СЕ з антивідбивним покриттям на основі поруватого кремнію

Технологічний крок	Монокристалічний СЕ	Мультикристалічний СЕ
Стандартна хімічна очистка вихідних кремнієвих пластин	+	+
Анізотропне хімічне текстурування фронтальної поверхні	+	–
Формування n^+ -р-переходу глибиною 0,4 мкм	+	+
Алюмінієва металізація тильної сторони структури СЕ	+	+
Створення фронтальної контактної гребінки на основі шарів Ti/Pd/Ag	+	+
Формування антивідбивного шару на основі поруватого кремнію	+	+

Вимірювання вихідних електричних характеристик СЕ до та після формування на їх поверхні АВП на основі шару поруватого кремнію проводили з використанням імітатора спектру сонячного світла при АМ 1,5. Результати вимірювань опрацьовували за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, на основі чого побудовано вольт-амперну характеристику (ВАХ) фотоперетворювача із вказанням значень струму короткого замикання ($I_{кз}$), напруги неробочого ходу ($V_{нх}$), коефіцієнта заповнення ВАХ (FF) і ККД СЕ (η). Всі характеристики СЕ представлено в Таблиці 2.

На основі узагальнення отриманих експериментальних результатів було виявлено механізм і ступінь впливу фронтального шару поруватого кремнію на вихідні параметри досліджуваних СЕ. Встановлено, що як для монокристалічних, так і для мультикристалічних СЕ найбільший ефект від використання в їх структурі шару поруватого кремнію досягається для струму короткого замикання. Для обох типів СЕ приріст фотоструму перевищував 50%. У той же час для усіх досліджених СЕ спостерігалось зменшення напруги неробочого ходу, яке знаходилося в межах 2,5%.

Таблиця 2

Характеристики СЕ з антивідбивним покриттям на основі гідрогенізованого мультикристалічного пористого кремнію

Характеристики СЕ	СЕ з АВП	
	монокристалічний	мультикристалічний
Потужність освітлення (АМ 1,5)	1000 Вт/м ²	1000 Вт/м ²
$I_{кз}$ (струм короткого замикання)	30,8 мА	28,5 мА
$V_{нх}$ (напруга неробочого ходу)	0,66 В	0,63 В
Активна поверхня СЕ	0,93 см ²	0,93 см ²
η (ККД)	16,1%	12,6%

Більш суттєвої деградації зазнав коефіцієнт заповнення – на 10,7% та 18,8% для моно- та мультикристалічних СЕ, відповідно. Незважаючи на це, для всіх елементів дослідної серії отримано суттєвий приріст ККД. Для найкращих монокристалічних СЕ ефективність фотовольтаїчного перетворення після формування на їх поверхні шару поруватого кремнію зросла з 12,9% до 16,1%, тобто приблизно на чверть. Для мультикристалічних СЕ – приріст не перевищив 22%, тобто для найкращих дослідних зразків ефективність перетворення зросла з 10,8% тільки до 12,6% (табл. 2.)

Спектри відбивання текстурованих зразків з АВП на основі поруватого кремнію, сформованих при оптимальних значеннях поверхневої густини анодного заряду зображено на рис. 4.

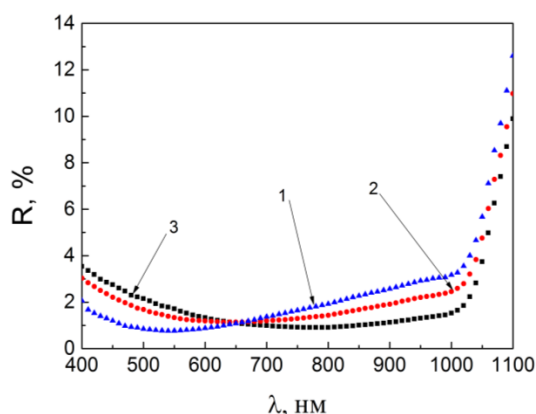


Рис. 4. Спектри коефіцієнта відбивання (R) шарів поруватого кремнію, сформованих на кремнієвій підкладці з текстурованою поверхнею за різних значень поверхневої густини анодного заряду: 1 – 0,4 Кл/см²; 2 – 0,5 Кл/см²; 3 – 0,59 Кл/см².

Із отриманих спектральних характеристик можна зробити висновок, що використання текстурованої поверхні з шарами поруватого кремнію різної поруватості для зменшення коефіцієнта відбивання, тобто збільшення просвітлення, ефективніше, ніж використання типових АВП. Так, при використанні шару поруватого кремнію інтегральний коефіцієнт відбивання в діапазоні 400–1100 нм зменшується до 2,4%, в той час як застосування шару SiO₂ дозволяє знизити інтегральний коефіцієнт відбивання в даному діапазоні тільки

до 3%. Мінімальне відбивання від текстурованої поверхні з АВП на основі поруватого кремнію на довжині хвилі 550 нм становить 0,77%, і є співрозмірним зі значенням для структурованої поверхні з АВП на основі MgF₂/ZnS [10].

Висновки

Результати дослідження процесу електрохімічного формування просвітлювальних шарів поруватого кремнію на фронтальній поверхні СЕ показали, що оптимізація даної технології передбачає використання електроліту C₂H₅OH:H₂O:HF=1:1:1 при поверхневій густині анодного заряду 0,46 Кл/см². Зменшення часу анодування в такому електроліті до 10 с дозволяє отримувати шари поруватого кремнію без суттєвого пошкодження контактної струмозбиральної гребінки. Також встановлено механізм і ступінь впливу фронтального шару поруватого кремнію на вихідні параметри досліджуваних СЕ. Зокрема виявлено, що як для монокристалічних, так і для мультикристалічних СЕ найбільшого ефекту від використання в їх структурі шару поруватого кремнію досягається для струму короткого замикання – приріст фотоструму перевищував 50%. У той же час для усіх досліджених СЕ спостерігалось зменшення значення напруги неробочого ходу, яке знаходилось в межах 2,5%.

Список використаної літератури

- [1]. L. L. Kazmerski. Photovoltaics: A review of cell and module technologies // Renewable & Sustainable Energy Reviews, 1, pp. 71-170 (1997).
- [2]. A. P. Oksanych, V. A. Terban, S. O. Volokhov, M. I. Kliui, V. A. Skryshevskyi, V. P. Kostylov, A.V. Makarov. Suchasni tekhnolohii vyrobnytstva kremniiu ta kremniievychk fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv soniachnoi enerhii. Mineral, Kryvyi Rih. 266 s. (2010).
- [3]. J. Eisenlohr, N. Tucher, H. Hauser, M. Graf, J. Benick, B. Blasi, J.C. Goldschmidt, M. Hermle. Efficiency increase of crystalline silicon solar cells with nanoimprinted rear side

gratings for enhanced light trapping // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 155, pp. 288-293 (2016).

[4] A. Luque. Will we exceed 50 % efficiency in photovoltaics? // *Journal of Applied Physics*, 110, pp. 031301-1–031301-19 (2011).

[5]. V. Yerokhov, I. Melnyk. Porous silicon in solar cell structures: A review of achievements and modern directions of further use // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 3, pp. 291-322 (1999).

[6]. I. I. Ivanov, V. A. Skryshevsky, T. Nychporuk, M. Lemiti, A. V. Makarov, N. I. Klyui, O. V. Tretyak. Porous silicon Bragg mirrors on single- and multi-crystalline silicon for solar cells // *Renewable Energy*, 55, pp. 79-84 (2013).

[7]. Ya.O. Sychikova. Zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky shliakhom vykorystannia porystykh napivprovidnykiv dlia soniachnoi enerhetyky // *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, T. 6, No 5, ss. 26-33, (2016).

[8]. S. Yuan, D. Hu, X. Yu, L. He, Q. Lei, H. Chen, X. Zhang, Y. Xu, D. Yang. Multicrystalline silicon crystal assisted by silicon flakes as seeds // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, pp. 202-205 (2018).

[9]. H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair, S. Ramakrishna. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review, 4, pp. 3779-3804 (2011).

[10]. R. Sharma, A. Gupta, A. Viridi. Effect of single and double layer antireflection coating to enhance photovoltaic efficiency of silicon solar // *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 9, pp. 02001-1–02001-4 (2017).

[11]. A. A. Druzhinin, V. Y. Yerokhov, S. I. Nichkalo, Y. I. Berezhanskyi, M. V. Chekaylo. Texturing of the silicon substrate with nanopores and Si nanowires for anti-reflecting surfaces of solar cells // *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 7(2), pp. 1-6 (2015).

[12]. M. F. Abdullah, M. A. Alghoul, H. Naser, N. Asim, S. Ahmadi, B. Yatim, K. Sopian. Research and development efforts on texturization to reduce the optical losses at front surface of silicon solar cell // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 66, pp. 380-398 (2016).

[13]. A. Druzhinin, V. Yerokhov, S. Nichkalo, Y. Berezhanskyi. Micro- and nanotextured silicon for antireflective coatings of solar cells // *Journal of Nano Research*, 39, pp. 89-95 (2016).

[14]. V. Yerokhov, O. Ierokhova. Development of efficient solar cells with the use of multifunctional multitextures // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2, pp. 45-51 (2017).

[15]. E. Van Kerschaver, G. Beaucarne. Back-contact solar cells: A review // *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 14, pp. 107-123 (2006).

[16]. M. K. Mat Desa, S. Sepeai, A. W. Azhari, K. B. Sopian, M. Y. Sulaiman, N. Amin, S. H. Zaidi. Silicon back contact solar cell configuration: A pathway towards higher efficiency // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 60, pp. 1516-1532 (2016).

[17]. X. G. Zhang. Morphology and formation mechanisms of porous silicon // *Journal of The Electrochemical Society*, 151, pp. 69-80 (2004).

[18]. K. Omar, K.A. Salman. Effects of electrochemical etching time on the performance of porous silicon solar cells on crystalline n-type (100) and (111) // *Journal of Nano Research*, 46, pp. 45-56 (2017).

[19]. N. H. Maniya, J. Ashokan, D. N. Srivastava. Application of porous silicon in solar cell // *AIP Conference Proceedings*, 11 May 2018, 1961, 030019 (2018).

[20]. R. Suryana, D. K. Sandi, O. Nakatsuka. The morphological study of porous silicon formed by electrochemical anodization method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 333, 012034 (2018).

[21]. V. Yerokhov, O. Ierokhova. Improved porous silicon-based multifunctional materials for the solar cells antireflection coating // *2016 International Conference on Electronics and Information Technology, EIT 2016 - Conference Proceedings*, 27 June 2016, 7500990.

[22]. M. Ramesh, H. S. Nagaraja. The effect of etching time on structural properties of porous silicon at the room temperature // *Materials Today: Proceedings*, 3, pp. 2085-2090 (2018).

Стаття надійшла до редакції 02.10.2018 р.

UDC 621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2019.1.159492>

OPTIMIZATION OF POROUS SILICON CHARACTERISTICS FOR SOLAR BATTERIES

V. Yerokhov, Yu. Khoverko, S. Nichkalo

Lviv Polytechnic National University

Summary

The aim is to form the anti-reflective layers of porous silicon on the solar cell surface in the presence of the current-collecting contact comb at the effective area, as well as the study of the state of front contact system of solar cells after etching on their main characteristics.

The analysis of the influence of electrochemical etching on the state of the solar cell front contact system without antireflection coating was carried out on the basis of the dependences of the reflectance spectrum of porous silicon on its thickness and refractive index. In the range of wavelengths of 550-850 nm, a minimal reflection from the porous layer surface for the thickness of porous silicon from 70 to 100 nm was found, and its refractive index ranges from 1.35 to 1.9.

The critical time of staying of the solar cell structure in the electrolyte, the excess of which leads to the damage of contact fingers of the front current-collecting contact comb was found. For anodization in an electrolyte $C_2H_5OH:HF=1:1$, the critical time was 45 s. The reduction of the anodizing time to 10 s at anodic charge density of 0.46 C/cm^2 allowed to obtain porous silicon layers without significant damage to the current-collecting comb. By reducing the duration of electrochemical treatment to 3-6 s and increasing the anode current, it was possible to completely prevent the damage of the contact system.

The results of study of the main solar cell parameters before and after formation of anti-reflective layer on the basis of porous silicon showed that for mono- and multicrystalline solar cells the increase in photocurrent exceeded 50%, the efficiency increased by 25% and 22% respectively for mono- and multicrystalline samples. At the same time, for all tested samples, the open-circuit voltage decreased by 2.5%, and the fill factor degraded by 10.7% and 18.8% for mono- and multicrystalline solar cells, respectively.

Keywords: porous silicon; solar cell; antireflection coating; electrochemical etching

УДК 621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2019.1.159492>

ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СОНЯЧНИХ БАТАРЕЯХ

В. Ю. Єрохов, Ю. М. Ховерко, С. І. Нічкало

Національний університет “Львівська політехніка”

Реферат

Мета роботи – формування антивідбивних шарів поруватого кремнію на поверхні структури сонячних елементів за наявності на робочій поверхні струмозбиральної контактної гребінки, а також дослідження впливу стану фронтальної контактної системи сонячних елементів після травлення на їх основні характеристики.

Аналіз впливу електрохімічного травлення на стан фронтальної контактної системи сонячних елементів без антивідбивного покриття здійснювали на основі залежностей спектру відбивання шару поруватого кремнію від його товщини і показника заломлення. В діапазоні довжин хвиль 550–850 нм виявлено мінімальне відбивання від поверхні поруватого шару за товщини поруватого кремнію від 70 до 100 нм, а його показник заломлення знаходиться в межах від 1,35 до 1,9.

Виявлено критичний час перебування структури сонячного елемента в електроліті, перевищення якого призводить до пошкодження контактних пальців фронтальної струмозбиральної гребінки. При анодуванні в електроліті $C_2H_5OH:HF=1:1$ критичний час становив 45 с. Зменшення часу анодування до 10 с при густині анодного заряду $0,46 \text{ Кл/см}^2$ дозволило отримати шари поруватого кремнію без суттєвого пошкодження контактної струмозбиральної гребінки. При зменшенні тривалості електрохімічного оброблення до 3–6 с і підвищенні анодного струму вдалось повністю запобігти пошкодженню контактної системи.

Результати досліджень основних параметрів сонячних елементів до та після формування на їх поверхні антивідбивного шару на основі поруватого кремнію показали, що для моно- і мультикристалічних сонячних елементів приріст фотоструму перевищував 50%, коефіцієнт корисної дії підвищився на 25% і 22%, відповідно для моно- і мультикристалічних зразків. При цьому для всіх досліджуваних зразків напруга неробочого ходу зменшилась на 2,5%, а коефіцієнт заповнення – на 10,7% та 18,8% для моно- та мультикристалічних зразків, відповідно.

Ключові слова: поруватий кремній; сонячний елемент; антивідбивне покриття; електрохімічне травлення