

УДК 66.048.6-542.41

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

С.О. Вамболь¹, Я.О. Сичікова², Н.В. Дейнеко³

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки, Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна, e-mail: sergvambol@gmail.com

²кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри методики викладання фізико-математичних дисциплін та інформаційних технологій у навчанні, Бердянський державний педагогічний університет, м. Бердянськ, Україна, e-mail: yanasuchikova@mail.ru

³кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки, Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна, e-mail: natalyadevneko@gmail.com

Анотація. В роботі наведено результати досліджень з розробки технологічного рішення щодо обробки фронтальної поверхні кремнієвих фотоперетворювачів шляхом електрохімічного травлення з подальшим відпалом у потоці азоту для підвищення ефективності ФЕП на основі монокристалічного кремнію.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, монокристалічний кремній, електрохімічне травлення, пористий шар.

IMPROVING EFFICIENCY PHOTOVOLTAIC CELLS BASED MONOCRYSTALLINE SILICON

S.O. Vambol¹, Y.O. Suchikova², N.V. Deyneko³

¹Ph.D., professor, head of department of applied mechanics, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergvambol@gmail.com

²Ph.D., associate professor of teaching methods of physical and mathematical sciences and information technology in education, Berdyansk State Pedagogical University, Berdyansk, Ukraine, e-mail: yanasuchikova@mail.ru

³Ph.D., associate professor of applied mechanics, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: natalyadevneko@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of research to develop technological solutions for handling the front surface of silicon solar cells by electrochemical etching followed by annealing in nitrogen flow to improve the efficiency of solar cells based on monocrystalline silicon.

Keywords: a photoelectric converter, monocrystalline silicon, electrochemical etching, porous layer.

Вступ. Сучасні соціально-екологічні та економічні тенденції розвитку соціуму визначають ключове значення енергетики в стратегії переходу суспільства до сталого розвитку. Питання енергетики виступають в якості ключової глобальної проблеми сучасності, від характеру вирішення яких залежать не тільки подолання екологічної кризи, а й побудова глобальної економіки і стратегій розвитку. В законі України «Про альтернативні джерела енергії» дається таке визначення: «альтернативна енергетика – сфера енергетики, що забезпечує вироблення електричної, теплової та механічної енергії з альтернативних джерел енергії» [1]. Звідси впливає актуальність пошуку альтернативних способів забезпечення людства енергією.

Завдяки наявним перевагам найбільш перспективним напрямом переходу до альтернативної енергетики виступає використання фотоелектричних перетворювачів. Однак не зважаючи на те, що механізм вентильного фотоефекту відомий з 1939 р. (Е. Беккерель), а початок його практичного застосування припадає на 50-ті роки попереднього століття, доля сонячної енергії в світовому споживанні становить лише близько 1 %, а загальна потужність встановлених сонячних електростанцій в світі не перевищує 180 ГВт [2].

До факторів, що стримують більш інтенсивний розвиток сонячної енергетики можна віднести:

- 1) висока собівартість фотоелектричних перетворювачів;
- 2) вироблення електроенергії тільки протягом світлового дня;
- 3) залежність від кліматичних умов та часу доби;
- 4) потреба у великих площах для установки фотоелектричних станцій;
- 5) висока собівартість акумуляторів енергії;
- 6) недосконалість технології та низький ККД.

Сонячні батареї з фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) на основі монокристалічного кремнію і арсеніду галію є в даний час і залишаються в доступному для огляду майбутньому основними джерелами електроенергії як для наземного використання так і для більшості космічних апаратів [3].

Тому розробка і виробництво високоефективних монокристалічних кремнієвих ФЕП відносяться до розряду актуальних проблем на вирішення яких спрямовані комплексні теоретичні та експериментальні дослідження.

Аналіз публікацій. До теперішнього часу виробництво 80% комерційних модулів сонячних елементів засноване на кристалічному Si з ефективністю $\eta \leq 20\%$ [4].

Кремній, як хімічний елемент, широко поширений в природі, його вміст в земній корі сягає 29,5%, технологічний, витримує високі температури, які зазвичай супроводжують процеси виготовлення та експлуатації пристроїв на його основі.

Однак, не зважаючи на домінуюче положення монокристалічного кремнію серед інших напівпровідникових матеріалів, активно ведуться пошуки нових конструктивно-технологічних рішень щодо підвищення його ефективності з одночасним зменшенням відходів при виробництві базових кристалів.

Як зазначено в роботах [5-6] рекордне значення коефіцієнта корисної дії (ККД) (24,5 - 24,7%) в умовах наземного випромінювання демонструють ФЕП на основі монокристалічного кремнію з PERL -структурою. Такі ФЕП виготовлені на основі базових кристалів кремнію покращеної якості, вирощених методом безтигельної зонної плавки. В ФЕП з PERL - структурою знижено швидкість поверхневої рекомбінації за рахунок зменшення площі контакту метал-напівпровідник та додаткової пасивації поверхні, що не контактує з електродами, шаром SiO_2 . Для зменшення втрат на відбивання та ефективного поглинання сонячного випромінювання поверхня ФП була текстурована з подальшим нанесенням просвітлюючого покриття ZnS/MgF_2 . В результаті відбиття від фронтальної поверхні ФЕП не перевищує 3%. Конструктивні особливості таких ФЕП, а також їх технологічні аспекти дозволили досягти наступних значень вихідних параметрів ($U_{\text{xx}} - 704-706$ мВ, $J_{\text{кз}} - 42,2$ мА/см², $FF - 0,82-0,83$). Але незважаючи на високу ефективність ФП з PERL -структурою, вони не призначені для масового виробництва, оскільки їх вартість є дуже високою.

Серед ФП на основі монокристалічного кремнію перспективним для масового виробництва можна виділити ФЕП з DSBC-структурою. Запропонований авторами [7] фотоелектричний перетворювач має двусторонню чутливість та виготовляється на базових кристалах як p- так і n- типу. Зменшення швидкості поверхневої рекомбінації в таких ФЕП забезпечується при реалізації методики характерної для ФЕП з PERL-структурою. Ефективне поглинання сонячного випромінювання забезпечено шляхом використання хаотичної текстури типу прямих пірамід без подальшої фотолітографії. Коефіцієнт відбиття від фронтальної поверхні ФЕП з DSBC-структурою становить 5-8%. Такі ФП в режимі опромінення AM1,5 мають наступні вихідні параметри $U_{\text{xx}} - 704-706$ мВ, $J_{\text{кз}} - 42,2$ мА/см², $FF - 0,82-0,83$. Також їх технологічні аспекти дозволили досягти наступних значень вихідних параметрів: $U_{\text{xx}} - 663-665$ мВ, $J_{\text{кз}} - 32,6-36,6$ мА/см², $FF - 0,76-0,78$ $\eta - 16,8-18,6$ %.

Авторами роботи [5] було запропоновано ресурсозберігаючу промислову технологію виготовлення радіаційностійких ФЕП n+ -p-p+ типу площею 7 см² на основі дешевого монокристалічного кремнію марки КДБ- 10, вирощеного методом Чохральського, з товщиною $t_{\text{к}} = 350 \pm 50$ мкм, орієнтацією (111) і (100) і часом життя неосновних носіїв заряду $\tau_{\text{н}} \approx 100$ мкс, які в режимі

опромінення АМО мають ефективність 12-15 %. Розробка таких ФЕП забезпечила можливість їх використання для компонування сонячної батареї космічного апарату КС5МФ2 «Мікрон» – першого в Україні з космічних апаратів серії «Мікросупутник».

Однак, у зв'язку з необхідністю підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі монокристалічного кремнію, при зменшенні їх маси, стає актуальним зниження коефіцієнта відбиття сонячного випромінювання фронтальною поверхнею та збільшення її площі.

Метою даного дослідження є розробка технологічного рішення щодо обробки фронтальної поверхні кремнієвих фотоперетворювачів та встановлення доцільності формування на їх поверхні пористого шару.

Матеріали та результати досліджень. Для досягнення поставленої мети в якості експериментальних зразків було обрано пластини кремнію марки КДБ-10 з орієнтацією поверхні: (111), (100), (001) та $\tau_n \approx 25$ мкс.

Шари пористого кремнію було сформовано шляхом електрохімічного травлення в розчинах плавикової кислоти при кімнатній температурі. Як відомо із [6] цей метод є найпоширенішим для виготовлення пористих напівпровідників, завдяки простоті та дешевизні.

Крім того, цей метод відрізняється від інших швидкістю та контролюваністю процесу. У технічному відношенні можлива багатоваріантна реалізація способу, його поєднання з іншими додатковими (зовнішніми) фізико-технологічними впливами, факторами, полями і т.д [10 – 11].

Травлення зразків відбувалося при щільності струму – від 10 мА/см² до 2,2 А/см² та зміненні часу травлення від 5 до 30 хв. В якості електроліту було обрано розчин плавикової кислоти HF:H₂O=1:1 з температурою 20°C.

Після очистки зразків для стабілізації властивостей пористого шару пластин проводився відпал у потоці азоту.

В результаті проведеної обробки на поверхні пластин монокристалічного кремнію з'явилась розвинена структура у вигляді пор розмірами від 0,2 до 3 мкм. Товщина пористого прошарку сягає приблизно 35 мкм з розповсюдженням пористості на 70 %.

На основі вище викладеного встановлено, що пористість, тобто частка пор в поверхневому шарі, залежить від щільності струму та складу електроліту. При використанні досить низької щільності струму (10 - 200 мА/см²) відбувається локальний розчин поверхні монокристалічного кремнію. Зародкові пори утворюються у місцях скупчення поверхневих дефектів, далі відбувається ріст пор в глибину кремнієвої пластини.

У випадку високої щільності струму (0,3 - 1 А/ см²), забезпечується рівномірне травлення поверхні кремнію та утворюється гладка поверхня підкладки (так званий процес електролітичного полірування).

На рис. 1 наведено морфологію поверхні після електрохімічного травлення.

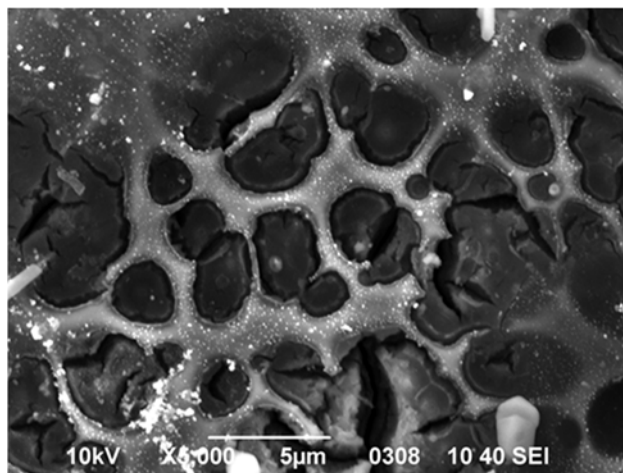


Рис. 1. Морфологія por-Si (100): щільність струму $j=150\text{mA}/\text{cm}^2$, час травлення $t=20$ хв, електроліт $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:1$

Як видно з рис. 1 на поверхні пластини при вказаних умовах проведення електрохімічного травлення спостерігається неоднорідність розповсюдження пор та зміна товщини прошарку з розвиненою структурою. Швидше за все, це відбувається через наявність бульбашок, які формуються в електроліті та приклеюються до поверхні кремнію.

Щоб уникнути цієї неоднорідності, концентрація HF повинна бути локально постійною на поверхні кремнієвої підкладки. Видалення бульбашок з поверхні кремнієвої пластини, а отже і отримання однорідних шарів пористого кремнію здійснюється за допомогою перемішування електроліту.

Висновки. Таким чином, в роботі продемонстровано спосіб створення пористого шару кремнію шляхом електрохімічної обробки в розчині плавикової кислоти. Доведено, що формування пористого шару на поверхні ФЕП дозволить знизити коефіцієнт відбиття та збільшити площу його фотоприймальної поверхні. Встановлено залежності формування однорідності пористої структури від щільності струму та складу електроліту.

Отримані результати демонструють можливість підвищення ефективності ФЕП за рахунок запропонованого технологічного рішення

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20 лютого 2003 року №555-IV із змінами: [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/555-15>

2. Renewables 2015 global status report: [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
3. Колтун М .М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. – С 280.
4. W.A. Badawy, S.A. Elmeniaawy, A.N. Hafez Improvement of the power of industrially fabricated solar cells by etching of the Si surface and the use of surface analytical techniques Egypt J Anal Chem, 22 (2013) . – P 97–113.
5. Zhao J, Wang A, Green MA. 24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates. Progress in Photovoltaics 1999. – P 471–474.
6. Zhao J, Wang A, Green MA. Double layer antireflection coating for high efficiency passivated emitter silicon solar cells. IEEE Transactions on Electron Devices 1994; ED-41. – P 1592–1594.
7. Листратенко А.М. Исследование и разработка малозатратной технологии изготовления высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей космического применения // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2001. Вып. 121. – С. 121-125.
8. Jordan D, Nagle JP. Buried contact concentrator solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 1994 ;2:171-176.
9. Suchikova Y.A. Morphology of porous n-InP (100) obtained by electrochemical etching in HCl solution/ Y.A. Suchikova, V.V. Kidalov, G.A. Sukach // Functional Materials. – 2010. – Vol.17, №1.– P. 1 – 4.
10. Сычикова Я.А. Пористый фосфид индия – перспективный материал радиоэлектроники / Я.А. Сычикова, С.А. Вамболь // Современные методы и материалы радиофизики : материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 120-летию дня изобретения радио (Якутск, 19–20 мая 2015 г.) / редкол А. М. Тимофеев. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – С. 46-47.
11. Сичікова Я.О. Електрохімічна технологія отримання наноструктур на поверхні напівпровідників // Я.О. Сичікова, С.О. Вамболь // Наукова Україна. Збірник матеріалів Всеукраїнської студентської наукової конференції з міжнародною участю (25 травня 2015 р.). – Дніпропетровськ: «SeKum Software», 2015. – С. 233-235.

УДК 621.74.002.6:669.131.7

ОТЛИВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ КОМПЛЕКСНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

Л.Х. Иванова¹, Ю.О. Юрченко²

¹доктор технических наук, профессор кафедры литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: ivanovalitvo@gmail.com

²студент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

Аннотация. В работе приведены результаты исследований по усовершенствованию технологической схемы обработки расплавов комплексными модификаторами на основе редкоземельных металлов для получения прокатных валков из чугуна с шаровидным графитом.