

ФОРМУВАННЯ МУЛЬТИТЕКСТУРИ ФРОНТАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ КРЕМНІЮ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ

Валерій Єрохов

професор кафедри напівпровідникової електроніки

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандера 12, 79013, v.yerokhov@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5358-6103

Ігор Скрипник

аспірант кафедри напівпровідникової електроніки

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандера 12, 79013, ihor.i.skrypnyk@lpnu.ua

ORCID: 0000-0002-9752-3128

Метою роботи було вивчення та створення рентабельної у виробництві текстури фронтальної поверхні СЕ. За основу запропонованої розробки були взяті технології формування нано-, семі- і макропористого кремнію, а їх сумісність дозволила створювати великий ансамбль поруватих структур з різноманітним розміром пор, які були використані для створення ефективної мультитекстури фронтальної поверхні СЕ. Для пояснення властивостей ПК дослідники запропонували ряд моделей, які пояснюють можливі механізми виникнення пір у шарах ПК. Ці моделі можна розподілити на кілька груп. Було вивчено формування мультитекстур для фронтальних поверхонь СЕ, тобто морфологію, яка визначається розподілом речовини у просторі, що є найменшою мірою аспектом, що підпадає кількісному визначенню. На основі узагальнення отриманих експериментальних результатів було виявлено механізм та ступінь впливу мультитекстур фронтального шару ПК на вихідні параметри досліджуваних СЕ. Враховуючи, що товщина текстури ПК менше 90 нм, ми бачимо складну залежність коефіцієнта відбиття для текстури на основі тонкого шару ПК. При цьому інтегральний коефіцієнт відбиття для макротекстурованої кремнієвої пластини, отриманої хімічними методами, становить 18,5%, для макротекстурованої поверхні наповненої силіконовим органічним адсорбентом зменшується до 11,2%, а для нанотекстурованого кремнію після обробки ультразвуком становить 8,25% у спектральному діапазоні 0,4–1,0 мкм.

Ключові слова: текстура, кремній, електрохімія, сонячний елемент, поруватий кремній.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В наш час потреби людства на електроенергію значно зростає кожного дня, через зростання населення та промислової еволюції [1,2]. Однак, вже в найближчі десятиріччя виробники енергії зіткнуться з нестачею природного палива (нафти, газу, вугілля), а також з такими проблемами, як катастрофічне забруднення навколишнього середовища, до якого приводить спалювання цього палива, та потенційна небезпека ядерної енергетики. Це спричиняє різні екологічні наслідки для навколишнього середовища. Отже, постає необхідність одержання дешевої енергії з використанням відновлювальних джерел живлення при мінімальному впливі на навколишнє середовище. Тому вже зараз широкого розвитку набуває так звана "нетрадиційна" або "чиста" енергетика, яка використовує практично невичерпні ресурси.

Широке впровадження фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) різного рівня потужності, як джерела живлення електронних приладів, є найбільш перспективним способом використання сонячної енергії. Це пов'язано з виснаженням

запасів енергетичної сировини на Землі та безперервним зростанням потреб людства в дешевій електричній енергії.

Фотоелектрична сонячна енергія має стати альтернативою для генерування струму, оскільки вона має наявність невичерпних ресурсів, не вимагає великої інфраструктури, практична і безпечна і саме головне, не викликає екологічні наслідки [3,4]. Це привело до збільшення за останні роки більш ніж на 25% ринку фотоелектричної сонячної енергії в таких країнах, як Китай, Німеччина, Японія і США. Сонячні батареї (СБ), як джерело електроенергії, сьогодні вже важко назвати чимось незвичним. Уперше їх почали застосовувати для енергозабезпечення космічних станцій більше 60 років тому і сьогодні сонячні батареї міцно ввійшли в побут як джерело екологічно чистої і безкоштовної енергії.

Мета цієї роботи - розробка дешевих технологічних процесів для фотоелектричного перетворювача і створення при цьому рентабельної у виробництві текстури [5,6] фронтальної поверхні сонячного елемента (СЕ). Таку мож-

ливість можна реалізувати при використанні у виробництві більш сучасних (гібридних або функціональних) матеріалів та модернізованих технологічних процесів для них.

Мета цієї статті: Метою роботи було вивчення та створення рентабельної у виробництві текстури фронтальної поверхні SE. За основу запропонованої розробки були взяті технології формування нано-, семі- і макропористого кремнію, а їх сумісність дозволила створювати великий ансамбль поруватих структур з різноманітним розміром пор, які були використані для створення ефективної мультитекстури фронтальної поверхні SE.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Моделювання структур мультипоруваної текстури поруваного кремнію (ПК). Поруватість (або щільність), товщина, швидкість росту та склад електроліту є основними параметрами плівок ПК та технологічного процесу. При створенні моделі технологічного процесу найважливішою є залежність цих параметрів від температури, щільності анодного струму, концентрації електроліту, тривалості анодної обробки та інших умов проведення електро- чи хімічного травлення.

Починаючи з моменту відкриття ПК, генерувалася велика кількість ідей, що пояснюють формування поруваної структури в кремнії монокристалу, але єдиної думки щодо механізму формування поруватих шарів на поверхні кремнію не існує й досі. Розширення режимів обробки кремнієвих підкладок, тобто отримання ПК в нових режимах анодного травлення або інших типах кремнієвих підкладок, призводило до того, що старі, добре перевірені теорії виявлялися недосконалими, і це змушувало в черговий раз дослідників шукати нові пояснення отриманим результатам і переглядати старі механізми порутворення. У багатьох теоріях невизначеним залишається момент відліку, тобто процес ініціалізації пір при анодному травленні. Це пов'язано з тим, що за початковий момент відліку при поясненні процесу анодного травлення, у більшості теорій іноді приймається наявність просторової неоднорідності на поверхні підкладки кремнію, а цей момент у більшості випадків не можна вважати достовірним фактом.

Для пояснення властивостей ПК дослідники запропонували ряд моделей, які пояснюють можливі механізми виникнення пір у шарах ПК. Ці моделі можна розподілити на кілька груп: а) моделі, які описують квантове обмеження носіїв заряду в кристалах Si нанометричного розміру

[7]; б) моделі, що описують локалізовану емісію, що викликана полісиланами Si або гідридами, що утворюються на поверхні ПК під час його зростання, внаслідок пасивації обірваних зв'язків на поверхні [8]; в) моделі, що описують утворення специфічного класу Si-O-H сполук (силоксені) [9]; г) моделі, в яких поєднані теорії квантового обмеження носіїв та існування ділянок з локальними дефектами по поверхні [10] (так звані гібридні моделі), які досконало описують оптичні властивості поруваної плівки.

Можна відзначити два базові методи формування поруваної текстури на поверхні кремнію, на яких формуються всі інші, та які можна поєднувати між собою для отримання складних мультипоруватих структур. Метод отримання ПК при травленні в хімічному розчині без застосування електричного потенціалу є найпростішим з технологічної точки зору, тому що не потребує створення складних хімічних реакторів. Такий метод отримання ПК, спосіб травлення, називають SE-процесом (Stain Etching) або неоднорідним хімічним травленням [11]. Застосування електричного потенціалу під час електрохімічної обробки кремнію є відмінною рисою другого методу одержання ПК. Застосування електричного потенціалу дає додаткову можливість змінювати структуру та глибину одержуваних плівок під час процесу травлення. Цей процес називають анодним травленням (anodic etching), тому що пластина кремнію в цій схемі одержання ПК виступає як анод. Використання стандартних методик отримання ПК призводить до отримання типових плівок (Рис.1).

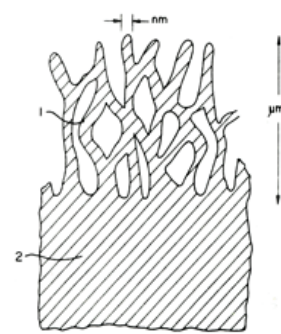


Рис. 1 Класична модель ПК, що створюється стандартними електрохімічними методами

Но сьогоднішня технологія пішла набагато далі і використовує "накопичений" технологіями

"багаж", за допомогою якого можна створювати структури, які ідеально підходять під певні прилади (наприклад, сенсори різної модифікації [12-16], ФЕП, оптоелектронні прилади різної модифікації - світловипромінюючі діоди [13], фото детектори [14], оптичні фільтри [15], хвилеводи [15, 16] тощо).

Формування мультитекстур для фронтальних поверхонь СЕ. Морфологія, яка визначається розподілом речовини у просторі, є найменшою мірою аспектом, що підпадає кількісному визначенню. Важко систематично характеризувати морфологію ПК, яка має виключно цінні деталі щодо діапазону зміни розміру пір, їх форми, орієнтації, розгалуження, взаємозв'язаності та поділу [17,18]. Бажано враховувати чотири різні аспекти, такі як орієнтацію пір, заповнення мікропор, розгалуження та зміна глибини ПК. На рис.2. представлена модель мультитекстури ПК із різним заповненням макропори.

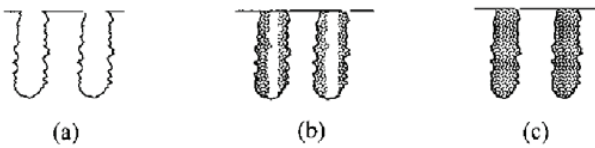


Рис. 2. Модель мультитекстури ПК із заповнення макропори: (а) не заповнені пори ПК; б) частково заповнені; (с) повністю заповнені;

При цьому (рис.3) показано змішання різновидів текстур ПК (мультипоруватість): (а) проста текстура ПК; (б) простий шар текстури ПК з маленькими порами біля поверхні; (с) шар текстури мікро-ПК на вершині макро-ПК.

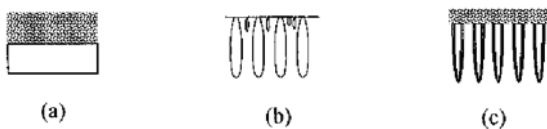


Рис. 3. Модель мультитекстури ПК: Змішування різновидів шарів ПК (мультипоруватість) (а) проста текстура ПК; (б) простий текстура ПК з маленькими порами біля поверхні; (с) текстура мікро-ПК на вершині макро-ПК (пори можуть прикривати або заповнювати мікропори)

Аналіз результатів дослідження впливу електрохімічного анодування на стан текстури фронтальної поверхні СЕ дає підстави вважати, що ріст мультитекстури ПК на поверхні структури СЕ може бути здійснено в широкому діапазоні довжин хвиль та показників заломлень.

Результати досліджень свідчать про те, що надмірне зменшення концентрації фтористоводневої кислоти в електроліті веде до погіршення антивідбивних властивостей створених текстур ПК [19,20]. Тому оптимізацію умов електрохімічного анодування більш доцільно здійснювати за рахунок зменшення тривалості анодного оброблення.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ. На основі узагальнення отриманих експериментальних результатів було виявлено механізм та ступінь впливу мультитекстур фронтального шару ПК на вихідні параметри досліджуваних СЕ. Встановлено, що як для монокристалічних, так і для мульткристалічних СЕ найбільший ефект від використання в їх структурах шарів мультитекстур ПК отримується електрохімічною технологією.

Прораховано залежність коефіцієнта відбивання від довжини хвилі та показника заломлення для зразків кремнієвих пластин зі сформованим на фронтальній поверхні $n^+ - p$ -переходом та мультитекстури на основі ПК (рис. 4).

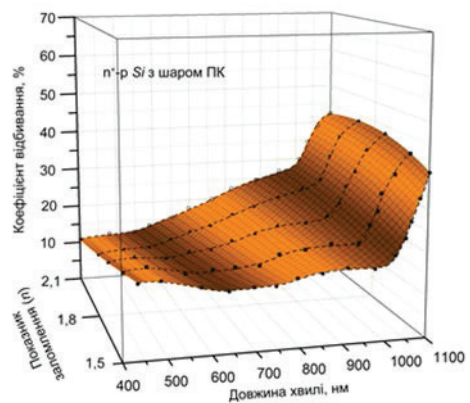


Рис. 4. Залежність коефіцієнта відбивання від довжини хвилі та показника заломлення для зразків кремнієвих пластин зі сформованим на фронтальній поверхні $n^+ - p$ -переходом та мультитекстури на основі ПК.

Враховуючи, що товщина текстури ПК менше 90 нм, ми бачимо складну залежність коефіцієнта

відбиття для текстури на основі тонкого шару ПК [21]. При цьому інтегральний коефіцієнт відбиття для макротекстурованої кремнієвої пластини, отриманої хімічними методами, становить 18,5%, для макротекстурованої поверхні наповненої силіконовим органічним адсорбентом зменшується до 11,2%, а для нанотекстурованого кремнію після обробки ультразвуком становить 8,25% у спектральному діапазоні 0,4–1,0 мкм.

На рис. 5 показано залежність коефіцієнта відбиття від довжини хвилі для полірованої кремнієвої пластини, хімічно текстурованої кремнієвої пластини без антивідбитного покриття (ARC), електрохімічно текстурованої кремнієвої пластини та хімічно текстурованої кремнієвої пластини з нанопорами з ARC. Як видно, електрохімічно текстурованому Si та електрохімічно текстурованому Si з текстурою на основі ПК притаманні найнижчі значення відбиття. Найцікавішим є те, що лише ці зразки текстурованого кремнію мали найменший коефіцієнт відбиття в порівнянні з іншими текстурами, що підтверджує всі попередні думки.

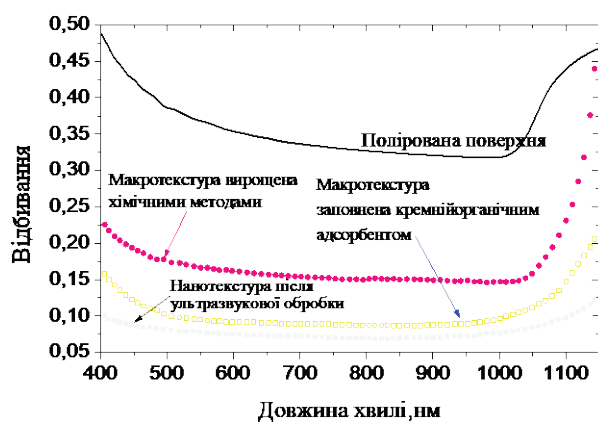


Рис. 5. Залежність відбивної здатності від довжини хвилі для полірованої кремнієвої пластини, хімічно текстурованої кремнієвої пластини без ARC, електрохімічно текстурованої кремнієвої пластини та хімічно текстурованої кремнієвої пластини з ARC

Для обох типів СЕ приріст фотоструму перевищує 50%. В той же час для усіх досліджених СЕ спостерігалось зменшення напруги неробочого ходу Voc, яке знаходилось в межах 2,5% [4, 6, 12].

Більш суттєвої деградації зазнав фактор заповнення FF - 10,7% та 18,8% для моно- та мульти-

кристалічних СЕ відповідно. Незважаючи на це, для всіх елементів дослідної серії було одержано суттєвий приріст ефективності СЕ. Для кращих мультикристалічних СЕ ефективність фотовольтаїчного перетворення після формування на їх поверхні текстури ПК зросла з 11,3% до 14,5%, що становить приблизно 31%.

ВИСНОВКИ. Перспективним є застосування електрохімічних та хімічних методів формування текстур різного формату для виготовлення фронтальної мультитекстури на основі ПК СЕ. Можна сформувати мікротекстуровану ПК поверхню з низькою відбивною здатністю, змінюючи концентрацію електроліту в електрохімічній техніці з правильно підбраною щільністю анодного заряду. У той же час метод електрохімічного травлення з правильно підбраною щільністю дозволив сформувати нанопорувату поверхню на кремнієвій пластині та, як наслідок, покращити мультитекстурні властивості поверхні Si в оптичному спектральному діапазоні. Ці методи текстурування з використанням ПК можуть бути впроваджені в промислове виробництво СЕ як антивідбиваючі покриття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kazmerski L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1997. 1(1-2). P.71-170.
2. Tasmiat R., Ruy S., et al. Passivation of all-angle black surfaces for silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. 160. P.444–453. doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.044
3. Huang H., Lv J., Bao Y., Xuan R., Sun S. 20.8% industrial PERC solar cell: ALD Al₂O₃ rear surface passivation, efficiency loss mechanisms analysis and roadmap to 24%. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2017. 161. P.14–30.
4. Yerokhov V., Ierokhova O. Improved porous silicon-based multifunctional materials for the solar cells anti-reflection coating. *2016 International Conference on Electronics and Information Technology. EIT 2016. Conference Proceedings, Ukraine*. 2016. P.49-52.
5. Hamamoto S., Ishihara T., Sato T., Fujikawa M. Investigation for 19% efficiency at multi-crystalline Si solar cells by industrially probable approach. *24th EUPVSEC*. Germany. 2009. P.1410–1413.
6. Druzhinin A., Nishkalo S., et al. Texturing of the silicon substrate with nanopores and Si nanowires for anti-reflecting surfaces of solar cells. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2015. 7(2). P.1–6.
7. Sanders G.D. and Chang Y.C. Theory of optical properties of quantum wires in porous silicon. *Phys. Rev. B*. 1992. 45. P.9202–9213.

8. Ramizy A., Hassan Z., et al. New optical features to enhance solar cell performance based on porous silicon surfaces. *Applied Surface Science*. 2011. 257. P.6112–6117.
9. Shivaganaik H., Jangamshetti S.H. Modeling and analysis of multi-junction solar cells. *International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. ICETECT 2011*. 2011. P.174-179.
10. Lehmann V., Ronnebeck S. The Physics of Macropore Formation in Low-Doped p-Type Silicon. *Journal of the Electrochemical Society*. 1999. 146. P.2968. doi: 10.1149/1.1392037
11. Druzhinin A., Nichkalo S., et al. Micro- and nanotextured silicon for antireflective coatings of solar cells. *Journal of Nano Research*. 2016. 39, P.89–95.
12. Yerokhov V., Ierokhova O. Coatings of the Black-Silicon type for silicone solar cells. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the 13th International Conference on TCSET 2016*. 2016. P.388-391.
13. Alia J.M.Y., Shanmugama V., Khannaa A., Wanga P. Analysis of nanosecond and femtosecond laser ablation of rear dielectrics of silicon wafer solar. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2019. 192. P.117–122.
14. Macabebe E.Q.B., Sheppard C.J., Van Dyk E.E. Parameter extraction from I-V characteristics of PV devices. *Solar Energy*. 2011. 85(1). P.12-18.
15. Glunz S.W. High-efficiency crystalline silicon solar cells. *Adv. Optoelectron*, 2007. 1. P.1–27.
16. Dzhabarov T., Bayramov A. Porous silicon and solar cells. *Handbook of Porous Silicon: Second Edition*. 2018. 2-2. P.1479-1492.
17. Nelson J., The Physics of Solar cells. *Imperial College Press*. 2003. London.
18. Zhang X.G. Morphology and Formation Mechanisms of Porous Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*. 2004. 151(1). P.69. doi: 10.1149/1.1632477
19. Derbali L., Ezzaouia H. Electrical properties improvement of multicrystalline silicon solar cells using a combination of porous silicon and vanadium oxide treatment. *Applied Surface Science*. 2013. 271. P.234-239. doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.166
20. Eisenlohr J., Tucher N. et al. Efficiency increase of crystalline silicon solar cells with nano-imprinted rear side gratings for enhanced light trapping. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. 155. P.288-293.
21. De Vos A. Photovoltaics in a single dimension. *Solid-State Electron*. 1997. 30, P.853-858.

CREATING A MULTITEXTURE OF THE FRONT SILICON SURFACE FOR SOLAR CELLS USING POROUS SILICON

Valerij Yerokhov

Professor at the Semiconductor Electronics Department

Institute for Telecommunication, Radioelectronics and Electronic Engineering Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013, v.yerokhov@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5358-6103

Igor Skrypnyk

Postgraduate student at the Semiconductor Electronics Department

Institute for Telecommunication, Radioelectronics and Electronic Engineering Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013, ihor.i.skrypnyk@lpnu.ua

ORCID: 0000-0002-9752-3128

Purpose. The purpose of the work was to study and create a cost-effective texture of the front surface of the solar cells (SC). Technologies for the formation of nano-, semi- and macroporous silicon were taken as the basis of the proposed development, and their compatibility made it possible to create a large ensemble of porous structures with various pore sizes, which were used to create an effective multi-texture of the front surface of the SC. **Methodology.** To explain the properties of porous silicon (PS), researchers have proposed a number of models that explain the possible mechanisms of the formation of pores in PS layers. These models can be divided into several groups. The formation of multi-textures for SC frontal surfaces was studied, that is, the morphology determined by the distribution of matter in space, which is the least quantifiable aspect. Based on the generalization of the obtained experimental results, the mechanism and degree of influence of the multitextures of the frontal layer of the PC on the initial parameters of the investigated SEs were revealed. Considering that the thickness of the PS texture is less than 90 nm, we can see the complex dependence of the reflectance for the texture based on the thin layer of PS. At the same time, the integral reflection coefficient for a macrot textured silicon plate obtained by chemical methods is 18.5%, for a macrot textured surface filled with silicone organic adsorbent it decreases to 11.2%, and for nanotextured silicon after ultrasound treatment it is 8.25% in the spectral range 0.4-1.0 μm . The use of standard methods of obtaining PS results in obtaining typical textures. But today's technology has gone much further and uses the "baggage" "accumulated" by technologists, with the help of which it is possible to create structures that are ideally suited for certain devices (for example, sensors of various modifications, FEP, optoelectronic devices of various modifications - light-emitting diodes, photo detectors, optical filters, waveguides, etc.). **Originality.** Formation

of multitextures for frontal surfaces of SC. Morphology, which is determined by the distribution of matter in space, is the least quantifiable aspect. It is difficult to systematically characterize PS morphology, which has exceptionally valuable details regarding the range of pore size variation, pore shape, orientation, branching, interconnection, and separation. It is desirable to consider four different aspects such as pore orientation, micropore filling, branching, and PS depth variation. **Practical value.** The prospects of creating efficient solar cells using multifunctional multitextures of PS are shown. References 21, figures 5.

Key words: texture, silicon, electrochemistry, solar cell, porous silicon.

REFERENCES

1. Kazmerski L.L. (1997). Photovoltaics: A review of cell and module technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1(1-2). pp. 71-170.
2. Tasmiat, R., Ruy, S., et al. (2017). Passivation of all-angle black surfaces for silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 160. pp. 444-453. doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.044.
3. Huang, H., Lv, J., Bao, Y., Xuan, R., Sun, S. (2017). 20.8% industrial PERC solar cell: ALD Al₂O₃ rear surface passivation, efficiency loss mechanisms analysis and roadmap to 24%. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 161. pp. 14-301.
4. Yerokhov V., Ierokhova, O. (2016). Improved porous silicon-based multifunctional materials for the solar cells antireflection coating. *2016 International Conference on Electronics and Information Technology. EIT 2016. Conference Proceedings*. Ukraine. pp. 49-52.
5. Hamamoto, S., Ishihara, T., Sato, T., Fujikawa, M. (2009). Investigation for 19% efficiency at multi-crystalline Si solar cells by industrially probable approach. *24th EUPVSEC*. Germany. pp. 1410-1413.
6. Druzhinin, A., Nichkalo, S., et al. (2015). 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.
7. Sanders G.D. and Chang Y.C. (1992) Theory of optical properties of quantum wires in porous silicon. *Phys. Rev. B*. 45. pp.9202-9213.
8. Ramizy A., Hassan Z., et al. (2011) New optical features to enhance solar cell performance based on porous silicon surfaces. *Applied Surface Science*. 257. pp.6112-6117.
9. Shivaganaik H., Jangamshetti S.H. (2011) Modeling and analysis of multi-junction solar cells. *International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. ICETECT 2011*. pp.174-179.
10. Lehmann V., Ronnebeck S. (1999) The Physics of Macropore Formation in Low-Doped p-Type Silicon. *Journal of the Electrochemical Society*. 146. pp.2968. doi: 10.1149/1.1392037
11. Druzhinin, A., Nichkalo, S., et al. (2016). Micro- and nanotextured silicon for antireflective coatings of solar cells. *Journal of Nano Research*. 39. pp. 89-95.
12. Yerokhov, V., Ierokhova, O. (2016). Coatings of the Black-Silicon type for silicone solar cells. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the 13th International Conference on TCSET 2016*. pp. 388 -391.
13. Alia, J.M.Y., Shanmugama, V., Khannaa, A., Wanga, P. (2019). Analysis of nanosecond and femtosecond laser ablation of rear dielectrics of silicon wafer solar. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 192. pp. 117-122.
14. Macabebe, E.Q.B., Sheppard, C.J., Van Dyk, E.E. (2011). Parameter extraction from I-V characteristics of PV devices. *Solar Energy*. 85(1). pp. 12-18.
15. Glunz, S.W. (2007). High-efficiency crystalline silicon solar cells. *Adv. Optoelectron*. 1. pp. 1-27.
16. Dzhaferov, T., Bayramov, A. (2018). Porous silicon and solar cells. *Handbook of Porous Silicon: Second Edition*. 2-2. pp. 1479-1492.
17. Nelson, J. (2003). The Physics of Solar cells. *Imperial College Press*. London.
18. Zhang, X.G. (2004). Morphology and Formation Mechanisms of Porous Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*. 151(1). pp. 69. doi: 10.1149/1.1632477
19. Derbali, L., Ezzaouia, H. (2013). Electrical properties improvement of multicrystalline silicon solar cells using a combination of porous silicon and vanadium oxide treatment. *Applied Surface Science*. 271. pp. 234-239. doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.166
20. Eisenlohr, J., Tucher, N., et al. (2016). Efficiency increase of crystalline silicon solar cells with nano-imprinted rear side gratings for enhanced light trapping. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 155. pp. 288-293.
21. De Vos, A. (1997). Photovoltaics in a single dimension. *Solid-State Electron*. 30. pp. 853-858.

Стаття надійшла 12.05.2022