
КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY

УДК 631.371

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2023.1.1>

КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА СТАБІЛІЗАЦІЇ ККД СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО І МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

Бунке О. С. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів
Національного технічного університету України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-7945-7040

Новіков П. В. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів
Національного технічного університету України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-2790-5809

Проведено аналіз ключових факторів, що обмежують коефіцієнт корисної дії сонячних елементів та вказано на проблему невідповідності спектрів поглинання фотоелектричних перетворювачів та спектру сонячного випромінювання. Проведено узагальнення методів розширення спектру поглинання фотоелектричного перетворювача шляхом нанесення на поверхню сонячного елемента шару люмінофору з фіксованим значенням стоксового зсуву, що надає можливість компенсувати розбіжність у відповідних спектрах. Було проведено узагальнення методики збільшення ККД сонячного елемента через застосування фотолюмінесцентного покриття та вказано на недоліки зазначеного підходу. У роботі зазначено вимоги до люмінофору, що включають у себе високий квантовий вихід фотолюмінесценції, спектр поглинання, що лежить у короткохвильовій частині видимого діапазону та ближньому ультрафіолетовому діапазоні, спектр фотолюмінесценції, що лежить у довгохвильовій частині видимого діапазону та ближньому інфрачервоному діапазоні. Також зазначено важливість стабільності оптичних характеристик барвника та високий рівень адгезії по відношенню до поверхні підкладки на основі полікристалічного та монокристалічного кремнію. Вказано, що просторова аморфність, що є притаманною для фотолюмінесцентного відгуку призводить до значних втрат у конвертованій частині сонячного випромінювання. З метою вирішення проблеми просторової аморфності фотолюмінесцентного відгуку запропоновано формувати сонячні елементи з мікрорельєфом поверхні, що дозволяє частково компенсувати відповідні втрати, а також стабілізувати

ККД сонячного елемента при зміні положення Сонця протягом доби. Побудовано методику розрахунку ККД фотоелектричного перетворювача відповідно геометричних розмірів структурних елементів мікрорельєфу поверхні та оптичних параметрів шару фотолюмінесцентного покриття. Зазначено, що через зміну аргументів багатомірних цільових функцій можна звести задачу оптимізації параметрів модифікованого сонячного елемента до задачі пошуку глобального або одного з локальних максимумів.

Ключові слова: сонячний елемент, фотоелектричне перетворення, полікристалічний кремній, фотолюмінесцентне покриття, мікрорельєфні структури, граничний термін експлуатації.

Bunke O. S., Novikov P. V. Complex method of stabilizing the efficiency of solar cells based on polycrystalline and monocrystalline silicon

The analysis of the key factors limiting the solar cell efficiency was carried out and the problem of the discrepancy between the absorption spectra of photoelectric converters and the spectrum of solar radiation was pointed out. The methods of expanding the absorption spectrum of the photoelectric converter by applying a layer of luminophor with a fixed Stokes shift to the surface of the solar cell have been generalized, which makes it possible to compensate for the discrepancy in the corresponding spectra. The method of increasing the efficiency of a solar cell by applying a photoluminescent coating was summarized and the shortcomings of the approach were shown. The work specifies the requirements for the luminophor, which include a high photoluminescence quantum yield, an absorption spectrum that lies in the short-wavelength part of the visible range and the near-ultraviolet range, as well as photoluminescence spectrum that lies in the long-wavelength part of the visible range and the near-infrared range. The importance of the stability of the optical characteristics of the dye and the high level of adhesion to the surface of the substrate based on polycrystalline and monocrystalline silicon is also indicated. It is noticed that the spatial amorphousness inherent in the photoluminescent response leads to significant losses in the converted part of solar radiation. In order to solve the problem of spatial amorphousness of the photoluminescent response, it is proposed to form solar cells with surface microrelief, which allows to partially compensate the corresponding losses, as well as to stabilize the efficiency of the solar cell when the position of the sun changes during the day. A methodology for calculating the efficiency of the photoelectric converter was developed according to the geometric dimensions of the structural elements of the surface microrelief and the optical parameters of the photoluminescent coating layer. It is noted that by changing the arguments of the multidimensional objective functions, the problem of optimizing the parameters of the modified solar cell can be reduced to the problem of finding a global maxima or one of the local maxima.

Key words: solar cell, photoelectric conversion, polycrystalline silicon, photoluminescent coating, microrelief structures, service lifetime.

Вступ. Оптимізація та впровадження сонячних елементів на сьогоднішній день є однією з актуальних задач, що розглядається у рамках концепції «Зеленої енергетики» [1–4]. Проведення оцінки продуктивності технології по розробці зазначеного класу елементів включає у себе розрахунок ККД процесу фотоелектричного перетворення і загальну собівартість складових, а також процесу їх виготовлення та утилізації відповідно до граничного терміну експлуатації. Дослідники зазначають, що обмеження на максимально можливий рівень ККД, що складає $\eta_{mSi} = 15 - 24\%$ для стандартних елементів на основі монокристалічного кремнію (mSi: Monocrystalline Silicon) та $\eta_{mSi} = 13 - 16\%$ – для полікристалічного кремнію (pSi: Polycrystalline Silicon), пов'язано з розбіжністю спектру поглинання відповідної підкладки фотоелектричного перетворювача та спектру сонячного випромінювання [5–7].

Як показано на рис. 1 спектр сонячного випромінювання, представлений, зокрема, для нижнього тропосферного шару, лежить у ближньому ультрафіолетовому (NUV: Near Ultraviolet), видимому (VS: Visible Spectrum) та ближньому інфрачервоному (NIR: Near Infrared) діапазонах, причому головний максимум сонячного випромінювання лежить у короткохвильовій частині VR. У той же час спектр поглинання як монокристалічного так і полікристалічного кремнію лежить у довгохвильовій частині VR та NIR. Стандартний підхід по збільшенню ККД

через формування монокристалічної підкладки субмікронної товщини $d \sim 30..70$ не змінює форми спектру поглинання фотоелектричного перетворювача, а отже не усуває розбіжності спектрів. При цьому технологія виготовлення тонких монокристалічних кремнієвих підкладок високоефективних сонячних елементів з $\eta_{mSi} \sim 24\%$ характеризується високою складністю, що очевидним чином впливає на їх загальний кошторис.

Як показав **аналіз наукових досліджень** типовим підходом по компенсації ефекту розбіжності спектрів є створення каскадних елементів, де кожен з шарів поглинає відповідну частину спектру сонячного випромінювання [4, 5, 8–10]. Але формування зазначених багатошарових структур включає у себе застосування токсичних сполук, зокрема, GaInP, GaAs, CIS та ін., причому загальний кошторис каскадного сонячного елемента, відповідно до складності його виготовлення зазвичай перевищує кошторис сонячного елемента на основі монокристалічного кремнію. Це не відповідає екологічним нормам, а отже звужує область застосування каскадних сонячних елементів до тих галузей де немає альтернативи високоефективним засобам сонячної енергетики, як то орбітальні комплекси, арктичні та антарктичні станції, військові бази, безпілотні літальні пристрої дальнього радіусу дії, тощо. Альтернативним підходом є нанесення на поверхню підкладки фотоелектричного перетворювача шару люмінофору, що завдяки ефекту стокового зсуву надає можливість провести конверсію сонячного випромінювання короткохвильового діапазону VS та NUV у випромінювання довгохвильового діапазону VS та NIR [5, 11–13].

Зазначена методика розглядається як надзвичайно перспективна у зв'язку з технологічною простотою реалізації відповідної технології, а отже і низьким кошторисом модифікованого сонячного елемента. Слід зазначити, що на сьогоднішній день проведено синтез кількох класів люмінофорів, що можуть бути використані як матеріал покриття фотоелектричного перетворювача [5, 11–17]. Тим не менш, відсутність цілісної методології оцінки ефективності конверсії сонячного випромінювання відповідно цільових показників ефективності роботи сонячного елемента, не дає можливість формалізувати вимоги до параметрів люмінофору, а також вказати на фактори, які призводять до зменшення ККД фотоелектричного перетворювача і запропонувати підходи по їх компенсації, що розглядається як **невирішена частина** загального дослідження.

Таким чином, **метою роботи** стала побудова комплексної методології збільшення та стабілізації рівня ККД сонячних елементів на основі стандартних одношарових фотоелектричних перетворювачів, зокрема таких, що базуються на підкладках з полікристалічного і монокристалічного кремнію, через нанесення на поверхню підкладки мікрорельєфної структури і фото-люмінесцентного покриття.

1. Розширення спектру поглинання фотоелектричного перетворювача на основі полікристалічного та монокристалічного кремнію

Узагальнена схема розширення діапазону поглинання фотоелектричного перетворювача сонячного елемента шляхом нанесення на поверхню підкладки шару люмінофору з фіксованим значенням стокового зсуву, що надає можливість компенсувати розбіжність у відповідних спектрах через конверсію короткохвильової частини спектру у довгохвильову представлено на рис. 2. Діапазон VS у даному випадку поділено на короткохвильову (SVS: Short-wave Visible Spectrum) і довгохвильову частину (LVS: Long-wave Visible Spectrum), причому зазначені діапазони розділяються умовно, відповідно до спектру поглинання підкладки фотоелектричного перетворювача. Фотолюмінесцентним шаром покриття поглинається

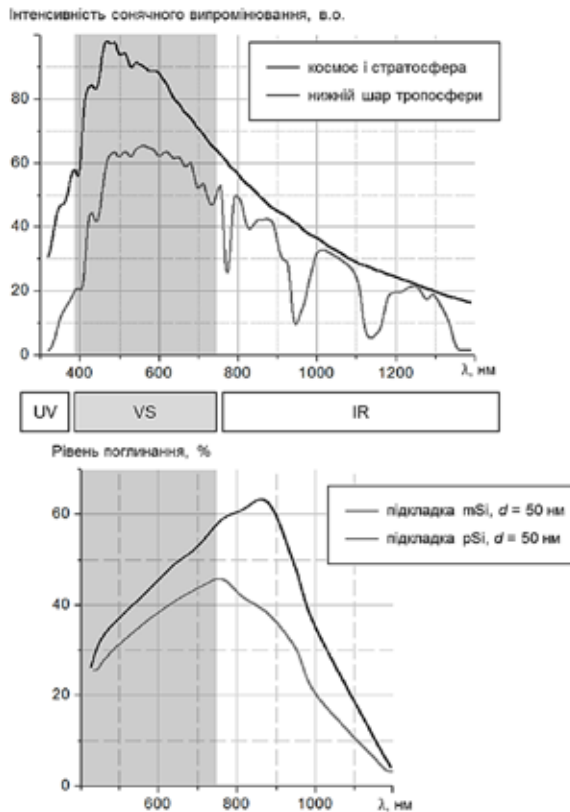


Рис. 1. Співвіднесення спектру сонячного випромінювання зі спектрами поглинання монокристалічного та полікристалічного кремнію

сонячне випромінювання у діапазонах NUV і SVS і конвертується у область поглинання підкладки фотоелектричного перетворювача (діапазони LVS і NIR). Ефективність процесу конверсії визначається процентом сонячного випромінювання у діапазонах NUV і SVS, що поглинається фотолюмінесцентним шаром, а також фотолюмінесцентним відгуком, тобто інтенсивністю фотолюмінесценції та положенням головного піку фотолюмінесценції по відношенню до піку поглинання підкладки фотоелектричного перетворювача. Додаткові втрати можуть бути пов'язані з частковим поглинанням фотолюмінесцентним шаром, частини спектрального діапазону поглинання підкладки фотоелектричного перетворювача, внаслідок чого ККД модифікованого може бути навіть меншим ніж ККД базового сонячного елемента.

Слід вказати, що у загальному випадку відповідна схема може бути використана і при конверсії світла у короткохвильову частину VS і NUV через застосування ефекту антистоксового зсуву або двохфотонної фотолюмінесценції, якщо у цій області лежить пік спектру поглинання підкладки фотоелектричного перетворювача. Але антистоксів зсув та двохфотонна фотолюмінесценція не є характерними для режимів експлуатації сонячних елементів, а отже не розглядається у рамках даного дослідження.

Наведена на рис. 2 схема відповідно до зазначених факторів втрат у рівні ККД, надає можливість визначити вимоги до матеріалу люмінофору, як то:

- високий рівень поглинання у короткохвильовій частині VS та NUM, що надає можливість ефективно здійснити фотоелектричне перетворення для основної частини спектру сонячного випромінювання;
- знаходження діапазону фотолюмінесценції у довгохвильовій частині VS та NIR відповідно до положення максимуму поглинання матеріалу підкладки фотоелектричного перетворювача;
- високий показник квантового виходу (QY: Quantum Yield) фотолюмінесценції, що надає можливість зменшити втрати при конверсії сонячного випромінювання у довгохвильову частину спектру.

Також, необхідно зазначити важливість забезпечення стабільності оптичних характеристик люмінофора та високий рівень адгезії відповідного матеріалу по відношенню до поверхні підкладки на основі полікристалічного та монокристалічного кремнію відповідно задачі збільшення граничного терміну експлуатації модифікованого сонячного елемента. Цим вимогам значним чином задовольняють органічні люмінофори, що базуються на піразолінових фотолюмінесцентних барвниках [5, 14–17], що характеризуються квантовим виходом фотолюмінесценції $k_{QY} = 75..85\%$, поглинанням у діапазоні довжин хвиль $\lambda_A \in [320; 450]$ і фотолюмінесценцією у діапазоні довжин хвиль $\lambda_A \in [630; 1050]$ нм. При цьому завдяки включення домішок полімерів та наноструктурування люмінофору через введення у пори цеоліту можна змінити форму спектрів поглинання та фотолюмінесценції у залежності від спектру поглинання обраного фотоелектричного перетворювача, а також стабілізувати барвник, як відповідно збереження оптичних

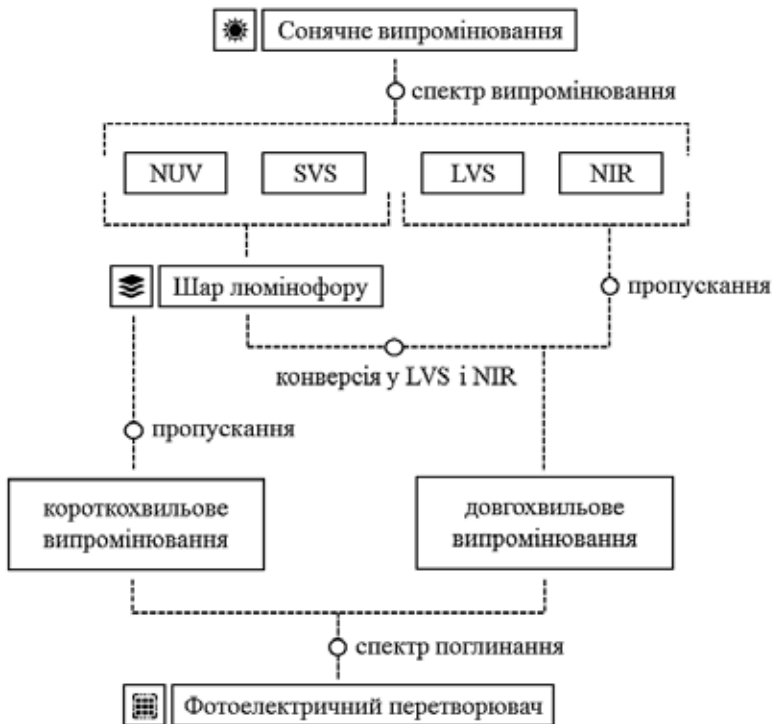


Рис. 2. Схема збільшення ККД сонячного елемента через застосування ефекту стоксового зсуву фотолюмінесцентного покриття

характеристик, так і відповідно адгезії по відношенню до підкладки, що згідно результатів експериментального дослідження надає можливість утримувати граничний термін експлуатації сонячного елемента у межах 15..20 років.

2. Формування мікрорельєфної структури поверхні фотоелектричного перетворювача

Основний недолік представленого підходу розширення спектру поглинання фотоелектричного перетворювача полягає у просторовій аморфності фотолюмінесцентного відгуку, що призводить до втрат короткохвильової частини сонячного спектру у процесі конверсії у довгохвильову частину спектру згідно з зазначеною схемою. Втрати енергії сонячного випромінювання при цьому складають більше 50%: половина сигналу розсіюється, а залишок падає на підкладку у діапазоні кутів від $\gamma = 90^\circ$, що відповідає максимальному рівню поглинання фотоелектричного перетворювача κ_{Si}^{max} до $\gamma \rightarrow 0^\circ$, що відповідає мінімальному рівню поглинання $\kappa_{Si}^{min} \sim 0$. При цьому збільшується залежність ККД сонячного елемента від кута падіння сонячних променів, що протягом доби також змінюється у межах $[0^\circ; 90^\circ]$.

З метою збільшення та стабілізації ККД модифікованого сонячного елемента було запропоновано нанести на поверхню фотоелектричного перетворювача мікрорельєфну структуру, що разом з фотолюмінесцентним шаром покриття формуватиме фотолюмінесцентний концентратор світла. На рис. 3. представлено базову схему відповідної структури у вертикальному розрізі. Як показано на рисунку мікрорельєф складається з горизонтальних елементів довжиною x , та трикутних виступів з довжиною стінок y розташованих під кутом α до поверхні горизонтальних елементів. При цьому розширення кута поглинання фотоелектричного перетворювача збільшується у залежності від довжини горизонтальних ділянок та висоти виступів h у межах від $\gamma \in [90^\circ; 180^\circ]$. Оптимальні параметри структури при цьому визначаються відповідно математичної моделі, на основі якої інтенсивність сонячного випромінювання, що було переведено у довгохвильовий діапазон спектру та поглинуто фотоелектричним перетворювачем, може бути розраховано як сума відповідних показників для окремих ділянок мікрорельєфу.

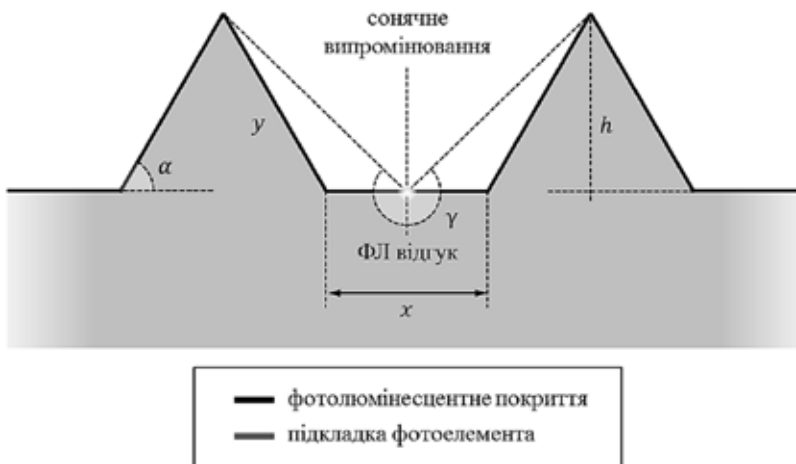


Рис. 3. Схема фотоелектричного перетворювача з мікрорельєфом поверхні та фотолюмінесцентним шаром

Для цього необхідно визначити наступні показники, що характеризують режим роботи модифікованого сонячного елемента:

- залежність коефіцієнту поглинання фотоелектричного перетворювача від довжини хвилі та кута падіння світла $\kappa_{Si}(\lambda, \gamma)$ визначена для актуального діапазону $\lambda \in [\lambda_-; \lambda_+]$;
- залежність коефіцієнту поглинання люмінофору від довжини хвилі та кута падіння сонячного випромінювання $\kappa_A(\lambda, \beta)$ визначена для актуального діапазону $\lambda \in [\lambda_-; \lambda_+]$;
- спектр фотолюмінесценції люмінофору як залежність інтенсивності фотолюмінесцентного (ФЛ) відгуку від довжини хвилі $I_{ФЛ}^0(\lambda)$ визначена для актуального діапазону $\lambda \in [\lambda_-; \lambda_+]$.

Цільовий показник $\Delta\eta$, який визначає приріст ККД пов'язаний з модифікацією структури сонячного елемента через створення мікрорельєфної структури та нанесення фотолюмінесцентного покриття, таким чином, може бути визначено через суму енергетичного внеску від ділянки χ та ділянки γ :

$$\Delta\eta = \int_0^\lambda \left(\int_0^x (F_x(I_{ФЛ}(\lambda, \beta) \cdot \kappa_A(\lambda, \beta)) dx + F_y(I_{ФЛ}(\lambda, \beta) \cdot \kappa_A(\lambda, \beta)) dy) \right) d\lambda, \quad (1)$$

де функція $I_{ФЛ}(\lambda, \beta)$ визначається як

$$I_{ФЛ}(\lambda, \beta) = I_{ФЛ}^0(\lambda) \cdot \kappa_A(\lambda, \beta). \quad (2)$$

Очевидно, інтегрування у даному випадку не може бути проведено на аналітичному рівні, а отже показник $\Delta\eta$ визначається чисельними методами. Відповідна величина розглядається як цільова функція аргументами якої виступають геометричні розміри мікрорельєфу поверхні, а також оптичні параметри фотолюмінесцентного шару. Змінюючи кожен з актуальних аргументів з обраним кроком у актуальних межах і апроксимуючі отримані набори значень як багатомірну функцію можна вирішити задачу оптимізації параметрів модифікованого сонячного елемента як задачу пошуку глобального або одного з локальних максимумів цільової функції.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було проаналізовано особливості організації сонячних елементів структура яких включає фотоелектричний перетворювач на основі підкладки з монокристалічного або полікристалічного кремнію з мікрорельєфним структуруванням поверхні та фотолюмінесцентним шаром, який наноситься з метою конверсії сонячного випромінювання короткохвильового спектру у довгохвильову область, що дозволяє збільшити та стабілізувати показник ККД.

З цією метою у рамках дослідження було проведено:

- співвіднесення спектру сонячного випромінювання зі спектрами поглинання монокристалічного та полікристалічного кремнію з метою визначення актуальних параметрів люмінофору, що використовується при конверсії сонячного випромінювання у довгохвильову частину спектру;
- узагальнення методики збільшення ККД сонячного елемента через застосування фотолюмінесцентного покриття та вказано на недоліки зазначеного підходу;

• формалізацію процедури визначення показника приросту ККД, що пов'язаний з модифікацією сонячного елемента через створення мікрорельєфної структури на поверхні підкладки та нанесення фотолюмінесцентного покриття.

У результаті проведеного дослідження зазначено, що задача оптимальних параметрів структури сонячного елемента з мікрорельєфом поверхні підкладки фотоелектричного перетворювача та нанесення фотолюмінесцентного покриття може бути вирішена через визначення максимумів цільової функції, у якості якої виступає показник приросту ККД.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Mukhopadhyay S. Solar energy and gasification of MSW: two promising green energy options. *Green Energy Systems*. 2023. P. 93–125. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95108-1.00003-3> (date of access: 28.02.2023).
2. Urbina A. The Energy Balance of Solar Electricity. *Green Energy and Technology*. Cham, 2022. P. 157–177. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91771-5_6 (date of access: 28.02.2023).
3. Renewable Energy for a Green Future: Electricity Produced from Efficient Luminescent Solar Concentrators / A. V. Rodrigues et al. *Solar Energy Advances*. 2022. P. 100013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100013> (date of access: 28.02.2023).
4. Abbassi A. Advanced Materials for Solar Cell Applications: Case of Simple and Composite Oxides. *Advanced Technologies for Solar Photovoltaics Energy Systems*. Cham, 2021. P. 1–13. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64565-6_1 (date of access: 28.02.2023).
5. Kryuchyn A. A., Beliak I. V. Development of nanostructured luminophor coating for broadening of solar cell absorption spectrum. *SPIE Solar Energy + Technology*, San Diego, California, United States / ed. by O. V. Sulima, G. Conibeer. 2014. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2060832> (date of access: 28.02.2023).
6. Sugianto S. Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. *INTEK: Jurnal Penelitian*. 2020. Vol. 7, no. 2. P. 92. URL: <https://doi.org/10.31963/intek.v7i2.2625> (date of access: 28.02.2023).
7. Monocrystalline Silicon Solar Cell Simulation With Reduced Absorber Thickness and Efficiency Exceeding 25% / D. Sherman et al. *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Fort Lauderdale, FL, USA, 20–25 June 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9518818> (date of access: 28.02.2023).
8. Verma M., Prasad Mishra G. TOPcon route with quantum wells in GaInP/Si dual junction cell for efficiency enhancement. *Solar Energy*. 2023. Vol. 250. P. 409–417. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.053> (date of access: 28.02.2023).
9. Lu S. Room-temperature wafer bonded GaInP/GaAs/InGaAsP/InGaAs four-junction solar cell grown by all-solid state molecular beam epitaxy. *Optical Nanostructures and Advanced Materials for Photovoltaics*, Suzhou. Washington, D.C., 2015. URL: <https://doi.org/10.1364/pv.2015.ptu3b.2> (date of access: 01.03.2023).
10. Kim H. J., Kim Y. W. High efficiency GaInP/GaAs double junction Solar cell on Si substrate assisted by the electron beam treatment. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Washington, DC, 25–30 June 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366606> (date of access: 01.03.2023).
11. Indoor/outdoor light-harvesting by coupling low-cost organic solar cell with a luminescent solar concentrator / F. Mateen et al. *Solar Energy*. 2020. Vol. 207. P. 379–387. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.104> (date of access: 01.03.2023).
12. Silicon solar cell efficiency improvement employing photoluminescent properties of chlorophyll-A / R. Lopez-Delgado et al. *Microelectronic Engineering*. 2019. Vol. 216. P. 111047. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111047> (date of access: 01.03.2023).

13. Broadband photoluminescent quantum yield optimisation of Er³⁺-doped β -NaYF₄ for upconversion in silicon solar cells / S. K. W. MacDougall та ін. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014. Т. 128. С. 18–26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.05.004> (дата звернення: 01.03.2023).

14. Multi-Photon Microscopy and Optical Recording / V. V. Petrov et al. PH "Akademperiodyka", 2016. URL: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.311.156> (date of access: 01.03.2023).

15. Beliak Ie.V., Kryuchyn A.A., Manko D.Yu. Optimization of photoelectric converters. *10th Juilee International Conference «Nanotechnologies and Nanomaterials» (NANO-2022)*, 25–27 of August 2022. 2022. Lviv, House of Scientists.

16. Beliak Ie.V., Kryuchyn A.A., Manko D.Yu. Methodology for photomatrix's photosensitivity and color rendering indexes increasing by applying a luminescent coating. *The 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications COIA-2022*, 24–26 August 2022. 2022. Baku, Azerbaijan.

17. Anikin P.S. & Beliak, Ie.V. Development of multispectral recording media for multilayer photoluminescent information recording. *Electronics and Information Technologies*. 2019. (12), p. 3–13.

REFERENCES:

1. Mukhopadhyay, S. (2023). Solar Energy and gasification of MSW: Two promising green energy options. *Green Energy Systems*, 93–125. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95108-1.00003-3>

2. Urbina, A. (2022). The energy balance of solar electricity. *Green Energy and Technology*, 157–177. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91771-5_6

3. Rodrigues, A. V., de Souza, D. A., Garcia, F. D., & Ribeiro, S. J. (2022). Renewable energy for a green future: Electricity produced from efficient luminescent solar concentrators. *Solar Energy Advances*, 2, 100013. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100013>

4. Abbassi, A. (2021). Advanced materials for solar cell applications: Case of simple and composite oxides. *Advanced Technologies for Solar Photovoltaics Energy Systems*, 1–13. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64565-6_1

5. Kryuchyn, A. A., & Beliak, I. V. (2014). Development of nanostructured luminophor coating for broadening of solar cell absorption spectrum. *Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion V*. doi: 10.1117/12.2060832

6. Sugianto, S. (2020). Comparative analysis of solar cell efficiency between monocrystalline and Polycrystalline. *INTEK: Jurnal Penelitian*, 7(2), 92. <https://doi.org/10.31963/intek.v7i2.2625>

7. Sherman, D., Marquez, J., Ramirez, Y., Urbina, M., Meza, A., & Hodges, D. (2021). Monocrystalline silicon solar cell simulation with reduced absorber thickness and efficiency exceeding 25%. *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. <https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9518818>

8. Verma, M., & Prasad Mishra, G. (2023). Topcon route with Quantum Wells in GaInP/Si dual junction cell for efficiency enhancement. *Solar Energy*, 250, 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.053>

9. Lu, S. (2015). Room-temperature wafer bonded GaInP/GaAs/InGaAsP/InGaAs four-junction solar cell grown by all-solid state molecular beam epitaxy. *Light, Energy and the Environment 2015*. <https://doi.org/10.1364/pv.2015.ptu3b.2>

10. Kim, H. J., & Kim, Y. W. (2017). High efficiency GaInP/GaAs double junction solar cell on Si substrate assisted by the electron beam treatment. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366606>

11. Mateen, F., Ahsan Saeed, M., Won Shim, J., & Hong, S.-K. (2020). Indoor/outdoor light-harvesting by coupling low-cost organic solar cell with a luminescent solar concentrator. *Solar Energy*, 207, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.104>.

12. Lopez-Delgado, R., Tostado-Plascencia, M., Álvarez-Ramos, M. E., & Ayón, A. (2019). Silicon solar cell efficiency improvement employing photoluminescent properties of chlorophyll-a. *Microelectronic Engineering*, 216, 111047. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111047>
 13. MacDougall, S. K. W., Ivaturi, A., Marques-Hueso, J., Krämer, K. W., & Richards, B. S. (2014). Broadband photoluminescent quantum yield optimisation of Er³⁺-doped β -NaYF₄ for upconversion in Silicon Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.05.004>
 14. Petrov, V., Kryuchyn, A., Beliak, I., & Lapchuk, A. (2016). *Multi-Photon microscopy and Optical Recording*. doi: 10.15407/akademperiodyka.311.156
 15. Beliak, Ie.V., Kryuchyn, A.A., Manko, D.Yu. (2022) Optimization of photoelectric converters. *10th Juilee International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2022)*, 25–27 of August 2022. Lviv, House of Scientists.
 16. Beliak, Ie.V., Kryuchyn, A.A., Manko, D.Yu. (2022) Methodology for photomatrix's photosensitivity and color rendering indexes increasing by applying a luminescent coating. *The 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications COIA-2022*, 24–26 August 2022 Baku, Azerbaijan.
 17. Anikin P.S. & Beliak, Ie.V. (2019) Development of multispectral recording media for multilayer photoluminescent information recording. *Electronics and Information Technologies*. (12), p. 3–13.
-