

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-03>

УДК 681.3.021

Дроздук Віталій Андрійович, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-1062-0532>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ МОНО- І ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ З ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНТНИМ ПОКРИТТЯМ

Дроздук В.А. Методи оптимізації структури фотоелектричних перетворювачів на основі моно- і полікристалічного кремнію з фотолюмінісцентним покриттям. Проведено аналіз сучасних тенденцій у галузі застосування фотоелектричних перетворювачів при впровадженні концепції «Зеленої енергетики». Показано, що основним чинником низької ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі підкладок полікристалічного та монокристалічного кремнію є невідповідність спектру поглинання напівпровідника і спектру сонячного випромінювання. Вказано на переваги технології нанесення на поверхню фотоелектричного перетворювача фотолюмінісцентного шару для переведення сонячного випромінювання у довгохвильову частину сонячного спектру завдяки явищу стокового зсуву фотолюмінісценції. Запропоновано базові підходи по синтезу люмінофорів та нанесенню на поверхню кремнієвої підкладки мікрорельєфних структур. Побудовано математичну модель для вирішення задачі оптимізації структури фотоелектричного перетворювача з фотолюмінісцентним покриттям.

Ключові слова: фотоелектричне перетворення, сонячний елемент, спектр поглинання, спектр люмінесценції, фотолюмінісцентне покриття, наноструктуровані люмінофори, мікрорельєфна структура.

Дроздук В. А. Методы оптимизации структуры фотоэлектрических преобразователей на основе моно- и поликристаллического кремния с фотолюминесцентным покрытием

Проведен анализ современных тенденций в области применения фотоэлектрических преобразователей при внедрении концепции «Зеленой энергетики». Показано, что основным фактором низкой эффективности фотоэлектрических преобразователей на основе подложек поликристаллического и монокристаллического кремния является несоответствие спектра поглощения полупроводника и спектра солнечного излучения. Указано на преимущества технологии нанесения на поверхность фотоэлектрического преобразователя фотолюминесцентного слоя для перевода солнечного излучения в длинноволновую часть солнечного спектра благодаря явлению стокового смещения фотолюминесценции. Предложены базовые подходы по синтезу люминофоров и нанесению на поверхность кремниевой подложки микрорельефной структуры. Построена математическая модель для решения задачи оптимизации структуры фотоэлектрического преобразователя с фотолюминесцентным покрытием.

Ключевые слова: фотоэлектрическое преобразование, солнечный элемент, спектр поглощения, спектр люминесценции, фотолюминесцентное покрытие, наноструктурированные люминофори, микрорельефная структура.

Drozdiuk Vitalii. Methods for optimizing of the structure of the photovoltaic converters based on mono- and polycrystalline silicon with a photoluminescent coating

There were analyzed of modern trends in the field of application of photoelectric converters in the implementation of the concept of "Green energy". It is shown that the main factor of low efficiency of photovoltaic converters based on polycrystalline and monocrystalline silicon substrates is the discrepancy between the absorption spectrum of the semiconductor and the spectrum of solar radiation. The advantages of the technology of applying a photoluminescent layer to the surface of a photoelectric converter for converting solar radiation into the long-wavelength part of the solar spectrum due to the phenomenon of the Stokes shift of photoluminescence are pointed out. Basic approaches to the synthesis of luminophor and the deposition of the microrelief structure on the surface of a silicon substrate are proposed. A mathematical model has been built to solve the problem of optimizing the structure of a photoelectric converter with a photoluminescent coating.

Key words: photoelectric conversion, solar cell, absorption spectrum, luminescence spectrum, photoluminescent coatings, nanostructured luminophor, microrelief structure.

Вступ. Розробка джерел живлення, що базуються ефекті фотоелектричного перетворення є однією з найбільш актуальних задач, що має бути вирішена у рамках впровадження концепції «Зеленої енергетики» [1-3] та, зокрема, вітчизняної програми «Концепція зеленого енергетичного переходу України до 2050 року». При впровадженні екологічних систем живлення, що базуються на сонячних елементах, слід врахувати наступні фактори: ефективність процесу фотоелектричного перетворення, %; собівартість складових сонячного елемента, процесу його виготовлення, експлуатації та утилізації; життєвий цикл сонячного елемента відповідно до умов експлуатації; необхідність застосування при виготовленні сонячного елемента, а також при налагодженні інфраструктури для його експлуатації токсичних сполук і потенційно небезпечних технологій.

На сьогоднішній день, сонячні елементи найбільш ефективно використовуються за умов, у яких підведення інших енергетичних джерел є неможливим: як то на космічних станціях, супутниках та безпілотних літальних апаратах дальнього радіусу дії. У наземних умовах, з іншого боку, недостатній і нестабільний (протягом окремої доби та календарного року) рівень сонячного опромінення і,

відповідно, необхідність налагодження акумуляторних станцій значною мірою нівелює переваги зазначених пристроїв з огляду на їх економічність та екологічність.

Однією з ключових проблем низької ефективності сонячних елементів є невідповідність спектру сонячного випромінювання та спектру поглинання фотоелектричного перетворювача. В результаті зазначеного явища значна частина сонячної енергії відбивається поверхнею, а також йде на його нагрів і, відповідно, руйнування, що додатково зменшує ефективність пристрою через скорочення життєвого циклу. На рис. 1 представлено спектри сонячного випромінювання без врахування поглинання атмосферним шаром (космічний простір, стратосфера) та з врахуванням поглинання атмосферним шаром (наземні станції). Відповідно до шкали з довжинами хвиль нанесено діапазони $[\lambda^-; \lambda^+]$ та пікові значення спектрів поглинання λ^0 . Діапазони при цьому обирались відповідно рівня $1/e^2$ від максимуму інтенсивності. Таким чином було отримано чотири набори: $\{\lambda_S^0, [\lambda_S^-; \lambda_S^+]\}$ — пікове значення інтенсивності та діапазон випромінювання сонячного світла без врахування поглинання шаром атмосфери; $\{\lambda_{SA}^0, [\lambda_{SA}^-; \lambda_{SA}^+]\}$ — пікове значення інтенсивності та діапазон випромінювання сонячного світла з врахуванням поглинання шаром атмосфери; $\{\lambda_{mSi}^0, [\lambda_{mSi}^-; \lambda_{mSi}^+]\}$ — пікове значення та діапазон поглинання сонячного елементу на основі підкладки монокристалічного кремнію; $\{\lambda_{pSi}^0, [\lambda_{pSi}^-; \lambda_{pSi}^+]\}$ — пікове значення та діапазон поглинання сонячного елементу на основі підкладки монокристалічного кремнію.

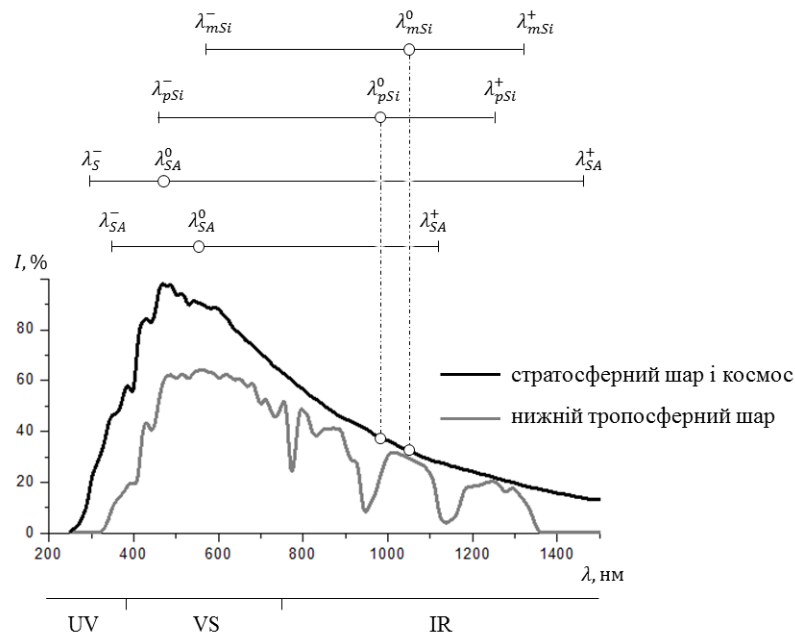


Рис. 1. Діаграма співвіднесення спектру сонячного випромінювання та діапазонів поглинання сонячних елементів на основі кремнію

На діаграмі вказано невідповідність спектрів поглинання сонячних елементів на основі кремнію та спектру сонячного випромінювання, причому особливо це стосується нижнього тропосферного шару, де розташовуються наземні електростанції. Пікові значення інтенсивності сонячного випромінювання відносяться до короткохвильової частини видимого діапазону (visible spectrum, VS), а також сонячний спектр охоплює частину ближнього ультрафіолетового діапазону (ultraviolet spectrum, UV), у той час як пікове значення і більша частина спектру поглинання кремнієвих елементів відносяться до інфрачервоного діапазону (infrared spectrum, IR) і частково охоплює довгохвильову частину VS. Найбільш ефективним підходом вирішення зазначеної проблеми є побудова каскадних фотоелектричних перетворювачів, кожен з шарів якого поглинає відповідну ділянку спектру сонячного випромінювання [4, 5]. Це дозволяє значним чином збільшити ефективність процесу фотоелектричного перетворення, але, разом з тим, значно збільшує технологічну складність побудови елементу, і, відповідно, його вартість. Також, на сьогоднішній день, ефективні структури побудовані за схемою каскадного перетворювача характеризуються включенням токсичних сполук, як то GaAs. Тому у рамках зазначеного дослідження пропонується застосувати альтернативний підхід, у рамках якого на поверхню фотоелектричного перетворювача наноситься фотолюмінесцентне покриття, що завдяки ефекту стоксового зсуву надає можливість переведення сонячного випромінювання у

довгохвильову частину сонячного спектру[9]. Зазначена методика є технологічно простою і економічною, а завдяки підбору чи синтезу відповідного класу люмінофорів можливо забезпечити необхідний рівень екологічності виробництва і експлуатації відповідного класу сонячних елементів.

Аналіз наукових публікацій, що було проведено у рамках даного дослідження, включав у себе аналіз сучасних методів впровадження концепції «Зеленої енергетики» [1-3] та, зокрема, сонячної енергетики [4-8]. Також було визначено, класи фотолюмінесцентних барвників та особливості їх синтезу, що можуть бути використані для оптимізації роботи сонячних елементів шляхом стоксового зсуву сонячного випромінювання [9-11]. Проведений аналіз вказав на відсутність цілісної методологічної бази, яка може надати можливість визначити оптимальну конструкцію сонячного елементу на сонові кремнієвої підкладки з фотолюмінесцентним покриттям. У відповідності до поставленого завдання це являє собою **невирішену частину загальної проблеми**, а отже **метою дослідження** є побудова універсального алгоритму оптимізації процесу фотоелектричного перетворення шляхом застосування переведення діапазону сонячного випромінювання у довгохвильову область спектру завдяки синтезу відповідного класу люмінофорів, нанесенню фотолюмінесцентного покриття на поверхню фотоелектричного перетворювача та застосування явища стоксового зсуву фотолюмінесценції.

1. Моделювання процесу фотоелектричного перетворення на базі сонячного елементу з фотолюмінесцентним покриттям

Розглянемо базову модель оптимізації процесу фотоелектричного перетворення на базі сонячного елементу з фотолюмінесцентним покриттям. Вище було наведено діапазони випромінювання сонячного світла в залежності від висоти над рівнем моря та діапазони поглинання сонячного елементу в залежності від типу кремнієвої підкладки фотоелектричного перетворювача. На етапі розробки математичної моделі, що може бути використана при побудові алгоритму роботи сонячного елементу у відповідних уточненнях немає необхідності, але зазначимо, що у схемі, наведеній на рис. 2 для наочності вказано діапазон сонячного випромінювання для нижнього шару тропосфери і діапазон поглинання фотоелектричного перетворювача на основі монокристалічного кремнію. При цьому діапазони обирались на рівні 60%...100% від пікових значень інтенсивності випромінювання I_S^0 і поглинання k_A^0 , відповідно — таким чином, коефіцієнти для виділення актуального діапазону інтенсивності випромінювання $I_S(\lambda)$ і поглинання $k_A(\lambda)$ складають $\kappa_I = \kappa_A = 0,6$. У результаті, з метою формування математичного апарату у рамках моделі можна виділити наступні спектральні діапазони: актуальний діапазон сонячного випромінювання $\lambda \in [\lambda_S^-; \lambda_S^+]$ де для $\forall \lambda$ — $\kappa_I \cdot I_S^0 \leq I_S(\lambda) \leq I_S^0$; актуальний діапазон поглинання фотоелектричного перетворювача $\lambda \in [\lambda_{Si}^-; \lambda_{Si}^+]$ де для $\forall \lambda$ — $\kappa_A \cdot k_A^0 \leq k_A(\lambda) \leq k_A^0$; діапазон у якому відбувається перетворення енергії сонячного світла у електричну $\lambda \in [\lambda_{Si}^-; \lambda_{Si}^+]$; діапазон у якому сонячна енергія втрачається та йде на теплове руйнування сонячного елементу $\lambda \in [\lambda_S^-; \lambda_{Si}^-]$.

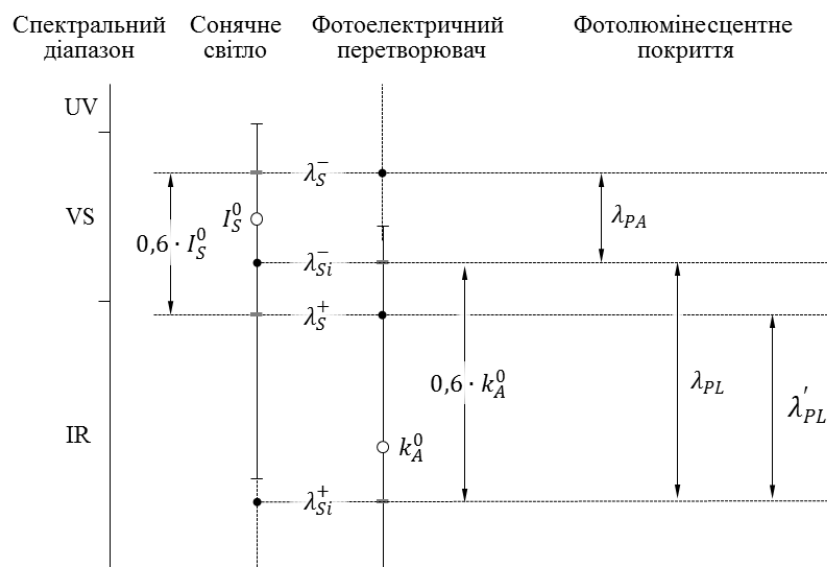


Рис. 2. Діаграма спектральних діапазонів, що характеризують процес фотоелектричного перетворення на базі сонячного елементу з фотолюмінесцентним покриттям

Відповідно до цього можна розрахувати оптимальні характеристики фотолюмінесцентного покриття, що наноситься з метою зменшення рівня втрат сонячної енергії шляхом переведення сонячної енергії короткохвильового діапазону у довгохвильовий діапазон (область поглинання фотоелектричного перетворювача): діапазон поглинання люмінофора відповідає діапазону втрат сонячної енергії $\lambda_{PA} \in [\lambda_S^-; \lambda_{Si}^-]$; діапазон фотолюмінесценції люмінофора відповідає діапазону поглинання фотоелектричного перетворювача $\lambda_{PL} \in [\lambda_{Si}^-; \lambda_{Si}^+]$; бажаний діапазон фотолюмінесценції люмінофора відповідає діапазону поглинання фотоелектричного перетворювача за виключення довгохвильового діапазону сонячного випромінювання $\lambda'_{PL} \in [\lambda_S^+; \lambda_{Si}^+]$.

Введення діапазону $\lambda'_{PL} \in [\lambda_S^+; \lambda_{Si}^+]$ пов'язано з тим, що для кремнієвих фотоелектричних перетворювачів максимальні значення поглинання лежать у довгохвильовій області і, таким чином, синтез люмінофора з більшим значення стоксового зсуву дозволить додатково збільшити ефективність сонячного елемента.

2. Оптимізація структури сонячного елемента з фотолюмінесцентним покриттям

Очевидні недоліки запропонованої схеми оптимізації сонячного елемента шляхом нанесення фотолюмінесцентного покриття включають у себе наступні фактори: технологічна складність дотримання при синтезі люмінофора фотолюмінесцентного покриття сонячного елемента оптичних параметрів відповідно зазначених обмежень для спектрів поглинання, люмінесценції і, відповідно, стоксового зсуву; необхідність синтезу люмінофора з високим квантовим виходом та довгостроковим збереженням оптичних характеристик; наявність 50% втрат фотолюмінесцентного випромінювання у зв'язку просторовою анізотропністю фотолюмінесцентного світла.

Наявність зазначених факторів у загальному випадку може призвести до того, що втрати, пов'язані з поглинанням фотолюмінесцентним покриттям сонячного світла довгохвильової частини спектри навіть перевищуватимуть зростання ефективності фотоелектричного перетворення, пов'язане з переведенням сонячного світла короткохвильового діапазону у довгохвильову частину спектру.

Задачу синтезу люмінофора з високим квантовим виходом та широкою полосою поглинання, границі якої можна варіювати пропонується вирішити шляхом застосування органічних барвників піразолінової групи [9-11]. Зазначені барвників характеризуються оптичними параметрами, що є наближеними до бажаних відповідно поставленої задачі: квантовий вихід фотолюмінесценції $Q_{PL} = 70.80\%$, широка полоса поглинання у коротко-хвильовій області видимого діапазону та ближньому UV-діапазоні, широка полоса фотолюмінесценції у довгохвильовій області видимого діапазону. Діапазон $[\lambda_{PL}^-; \lambda_{PL}^+]$ і, відповідно, значення стоксового зсуву $\Delta\lambda_{PL}$ пропонується змінювати шляхом введення домішок поліметилметакрилату, полістиролу та UV-лаквів, що слугують основою барвника, а також варіюванням базового люмінофора. Важливим етапом дослідження є наноструктурування барвника, що дозволяє звузити головний пік спектру фотолюмінесценції (при достатній величині $\Delta\lambda_{PL}$ це надає можливість додатково збільшити ефективність переведення сонячного випромінювання у область поглинання фотоелектричного перетворювача). Характерно, що головним недоліком наноструктурованих середовищ є міграція наночастинок, що призводить до зміни оптичних характеристик матеріалу протягом часу (особливо за умов постійного опромінення сонячним світлом). Тому для сонячних елементів пропонується синтезувати наноструктуровані люмінофори фотолюмінесцентного покриття шляхом введення частинок люмінофору матрицю білого цеоліту високого ступеню очистки. Відповідно зазначеного підходу частинки фотолюмінесцентного барвника фіксуються у структурі цеоліту і спектри поглинання та спектр фотолюмінесценції залишається незмінним протягом 10-15 років навіть за умов теплового впливу та постійного UV-опромінення [9-11].

У свою чергу проблема просторової анізотропності фотолюмінесцентного випромінювання частково нівелюється шляхом нанесення на поверхню кремнієвої підкладки мікрорельєфної структури яка надалі вкривається фотолюмінесцентним покриттям. Зазначений підхід суттєво ускладнює побудову математичної моделі через наявність ефекту перевідбиття між елементами структури, але надає можливість значним чином збільшити ефективність сонячного елемента.

3. Математична модель сонячного елемента з мікрорельєфною структурою поверхні та фотолюмінесцентним покриттям

Побудова комплексної моделі процесу фотоелектричного перетворення сонячного світла у структурі сонячного елемента з мікрорельєфною структурою поверхні та фотолюмінесцентним покриттям включає у себе представлення у вигляді чисельних наборів (матриць) наступних параметрів загальної системи: спектр сонячного випромінювання (одномірна матриця інтенсивності сонячного випромінювання $\mathbf{A}(n)$, розмірність якої визначається через $n \in [N_A^-; N_A^+]$, та одномірна матриця кутів падіння $\mathbf{H}(\alpha(t))$, розмірність якої визначається через $\alpha \in (0; 2\pi)$), де $t \in [T_h^-; T_h^+]$ — час для якого

визначається кут падіння сонячних променів (відповідно регіону); спектр поглинання фотоелектричного перетворювача (одномірна матриця $\mathbf{B}(n)$, де $n \in [N_B^-; N_B^+]$); спектр поглинання фотолюмінесцентного покриття (одномірна матриця $\mathbf{C}(n)$, де $n \in [N_C^-; N_C^+]$); спектр люмінесценції фотолюмінесцентного покриття (одномірна матриця $\mathbf{D}(n)$, де $n \in [N_D^-; N_D^+]$); спектр відбиття фотоелектричного перетворювача в залежності від кута падіння світла (двомірна матриця $\mathbf{E}(n, \theta)$, де $n \in [N_E^-; N_E^+]$ і $\theta \in (0; 2\pi)$); спектр відбиття фотолюмінесцентного покриття в залежності від кута падіння світла (двомірна матриця $\mathbf{F}(n, \theta')$, де $n \in [N_F^-; N_F^+]$ і $\theta' \in (0; 2\pi)$); параметри структури рельєфу поверхні фотоелектричного перетворювача (одномірна матриця набору кутів $\mathbf{G}(\gamma)$ де $\gamma \in (0; 2\pi)$) та одномірна матриця набору лінійних розмірів елементів $\mathbf{G}(k)$, де $k \in [1; K]$.

Вхідні дані та параметри математичної моделі сонячного елемента задаються відповідно точності оцифрування спектрів, що визначає точність моделювання та навантаження на обчислювальний ресурс апаратного комплексу. Точність визначення інтенсивності опромінення ΔI_S та показника поглинання Δk_A визначає крок оцифрування спектрів по довжині хвилі $\Delta \lambda$ як функції зазначених показників для сонячного світла ΔI_S і фотолюмінесценції ΔI_{PL} , для поглинання кремнієвою підкладкою Δk_A^{Si} і фотолюмінесцентним шаром Δk_A^{PL} : $\Delta \lambda = \min(\Delta \lambda(\Delta I_S), \Delta \lambda(\Delta k_A^{Si}), \Delta \lambda(\Delta I_{PL}), \Delta \lambda(\Delta k_A^{PL}))$. Аналогічним чином для вказаного ΔI_S визначається Δt . Відповідно до $\Delta \lambda$ і Δt визначаються діапазони і елементи матриць $\mathbf{A}(n)$, $\mathbf{H}(\alpha(t))$, $\mathbf{B}(n)$, $\mathbf{C}(n)$ і $\mathbf{D}(n)$. При моделюванні процесу фотоелектричного перетворення на базі сонячного елемента змікроструктурованою поверхнею та фотолюмінесцентним покриттям розраховуються ефекти поглинання, відбиття та фотолюмінесценції відповідно до структури, що будується через матрицю $\mathbf{G}(\gamma)$ і $\mathbf{G}(k)$. Точність з якою розраховується перевідбиття визначається відповідно до значення $\Delta I = \min(\Delta I_S, \Delta I_{PL})$. Для розрахунку ефективності роботи сонячного елемента функція поглинання світла фотоелектричним перетворювачем послідовно інтегрується відповідно наступних діапазонів: діапазони спектрів випромінювання, поглинання, відбиття і фотолюмінесценції для окремого сегменту загальної структури сонячного елемента: $n \in [N_A^-; N_A^+]$, $n \in [N_B^-; N_B^+]$, $n \in [N_C^-; N_C^+]$, $n \in [N_D^-; N_D^+]$, $n \in [N_E^-; N_E^+]$ і $n \in [N_F^-; N_F^+]$; діапазони повної мікроструктурованої поверхні сонячного елемента: $k \in [1; K]$ і $\gamma \in (0; 2\pi)$, де розрахунок проводиться для відповідних значень $\theta \in (0; 2\pi)$ і $\theta' \in (0; 2\pi)$; часовий діапазон у межах світлового дня $t \in [T_h^-; T_h^+]$; часовий діапазон у межах календарного року $t \in [T_d^-; T_d^+]$. Максимум цільової функція поглинання світла фотоелектричним перетворювачем визначається для параметрів фотолюмінесцентного покриття $\mathbf{D}(n)$, $\mathbf{C}(n)$ і $\mathbf{F}(n, \theta')$ для заданих характеристик фотоелектричного перетворювача $\mathbf{B}(n)$ і $\mathbf{E}(n, \theta)$, а також параметрів сонячного випромінювання $\mathbf{A}(n)$ згідно регіональних умов $\mathbf{H}(\alpha(t))$.

Перед початком роботи слід провести тестування та налаштування сам алгоритм оптимізації параметрів сонячного елемента змікроструктурованою поверхнею та фотолюмінесцентним покриттям. Для цього необхідно варіювати параметри ΔI_S , Δk_A^{PL} , ΔI_{PL} і Δk_A^{Si} з метою знаходження мінімуму цільової функції навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмного комплексу та максимуму цільової функції точності моделювання відповідно статистичних даних експериментального дослідження.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було визначено тенденції впровадження фотоелектричних перетворювачів у рамках концепції «Зеленої енергетики». Зазначено, що основними параметрами, що характеризують функціональність сонячних елементів як екологічних джерел енергії є ефективність процесу фотоелектричного перетворення, собівартість виготовлення елемента та наявність у структурі елемента і технології його виробництва токсичних сполук. Показано, що чинником низької ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі підкладок полікристалічного та монокристалічного кремнію є невідповідність спектру поглинання зазначеного напівпровідника і спектру сонячного випромінювання. Вказано на необхідність впровадження технології нанесення на поверхню фотоелектричного перетворювача фотолюмінесцентного шару з метою переведення сонячного випромінювання у довгохвильову частину сонячного спектру завдяки явищу стоксового зсуву фотолюмінесценції. Запропоновано методичні рекомендації по синтезу люмінофорів та нанесенню на поверхню сонячного елемента мікрорельєфних структур. Побудовано математичну модель, на основі якої запропоновано провести пошук оптимальної структури фотоелектричного перетворювача з фотолюмінесцентним покриттям. Вказано на методику оцінки якості аналізу на базі математичної моделі та підходи по її розширенню для більш широкого класу задач.

References

1. The concept of green energy transition in Ukraine until 2050. (n.d.). Retrieved March 16, 2021. <https://mepr.gov.ua/files/images/Концепція%20зеленого%20енергетичного%20переходу.pdf>.
2. Mertens, R. (2008), Trends in solar cell research. *15th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA '08)*, 1–5.
3. Kurt Aagaard Nielsen, Bo Elling, Maria Figueroa and ErlingJelsoe. *A New Agenda for Sustainability*. Burlington: Ashgate Publishing, Ltd (2012). 316 p.
4. Goetzberger, A., Knobloch, J., & Voß, B. (2014). *Si Solar Cell Technology*. Crystalline Silicon Solar Cells, 133-162. doi:10.1002/9781119033769.ch7 Zhu, J., Yu, X., Hu, L., & Dai, S. (2013). The Application of Molecular Metal Chalcogenide Complexes in Semiconductor Sensitized Solar Cells. *International Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM)*, 113-127.
5. Guha, S., Yang, J., & Yan, B. (2013). High efficiency multi-junction thin film silicon cells incorporating nanocrystalline silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 1-11.
6. Sarkar, K., Banerjee, S., Chakraborty, A. K., & Ghosh, K. K. (2017). Optimal Designing of Higher Efficiency Chalcogenide Thin Film Solar Cell. *Springer Proceedings in Physics Advances in Optical Science and Engineering*, 189-195.
7. Chen, A., & Zhu, K. (2012). Computer simulation of a-Si/c-Si heterojunction solar cell with high conversion efficiency. *Solar Energy*, 86(1), 393-397.
8. Ganji, J. (2017). Numerical simulation of thermal behavior and optimization of a-Si/a-Si/C-Si/a-Si/A-Si solar cell at high temperatures. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1(6), 47-52. doi:10.20998/2074-272x.2017.6.07.
9. 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.
10. Beliak, I., & Butenko, L. (2011). Development of fluorescent multilayer disc structure. *22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World*. doi:10.1117/12.901595.
11. Petrov, V., Kryuchyn, A., Beliak, I., & Lapchuk, A. (2016). *Multi-Photon microscopy and Optical Recording*. doi:10.15407/akademperiodyka.311.156.