

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОГЛИНАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

© Кирисов І.Г., Буданов П.Ф.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Кирисов Ігор Геннадійович (Кирисов Игорь Геннадьевич, Kyrysov Ihor): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-8880>; e-mail: kirisovui1980@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Буданов Павло Феофанович (Буданов Павел Феофанович, Budanov Pavlo): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1542-9390>; e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглянуті та проаналізовані основні вимоги до тонкоплівкових сонячних елементів: наявність базового шару з більшим показником поглинання оптичного випромінювання; при утворенні гетеропереходу, необхідний відповідний широкозонний шар; забезпечення ефективного збору зарядів шляхом електричного сполучення шарів; надійність омичних контактів.

Виявлено основні складності, пов'язані з виробництвом тонких плівок, а саме з теоретичними і практичними труднощами: границі зерен впливають на рекомбінацію, струмоперенесення, дифузію й сегрегацію; існує проблема контактних явищ для структур з декількох матеріалів через необхідність електричного сполучення різних шарів сонячного елемента; точкові дефекти в тонкоплівкових сонячних елементах, недостатньо вивчені.

Визначено, що при виготовленні сонячних елементів, важливо оцінити якість кожного з його шарів на етапі нанесення для того, щоб реально уявляти про їх кристалічну структуру, хімічний склад, оптичні й електричні властивості.

Відзначається, що при тривалій експлуатації сонячних панелей і сонячних батарей, відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії й вихідної потужності.

Запропоновано, розглянути дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для сонячного елемента, на основі наступних основних методів дослідження: сканувальна зондова (ємнісна) і тунельна мікроскопія (спектроскопія); атомна силова мікроскопія; рентгеноскопія; електронний мікроаналіз; сканувальна електронна мікроскопія; еліпсометрія; спектроскопічна еліпсометрія; електронна оже-спектроскопія; мас-спектрометрія вторинних іонів; фотолюмінісценція ; сканувальна лазерна мікроскопія

Показана також можливість застосування цілого ряду оптичних, електричних, рентгенівських та інших досліджень, для оцінки якості плівок, що становлять структуру сонячного елемента, а також їх використання, для оцінки технологічних процесів при виготовленні сонячного елемента.

Обґрунтовано, що застосування описаних методів, сприяє розробці надійних, ефективних і дешевих сонячних елементів, однак очевидно, що жоден метод діагностики, не здатний відбити всю розмаїтість інформації, щодо параметрів тонкоплівкових сонячних елементів.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, метод, поглинаюча поверхня, спектр, сонячний елемент, мікроскопія

Kyrysov I., Budanov P. “Research methods of the absorbing surface of solar elements”.

The article considers and analyzes the main requirements for thin-film solar elements, namely the presence of a base layer with a high absorption coefficient of optical radiation; an appropriate wide-gap layer, which is required in the formation of a heterojunction; ensuring efficient collection of charges by electrical conjugation of layers; reliability of ohmic contacts.

The main difficulties associated with the production of thin films are identified, both theoretical and practical, namely grain boundaries affect recombination, current transfer, diffusion and segregation; there is a problem of contact phenomena for structures of several materials due to the need for electrical coupling of different layers of the solar element; point defects in thin-film solar elements are not well understood.

It is determined that when manufacturing solar elements, it is important to evaluate the quality of each of its layers at the deposition stage in order to realistically represent their crystal structure, chemical composition, optical and electrical properties.

It is noted that during long-term operation of solar panels and solar batteries, there is a significant decrease in their performance, due to the deterioration of the main parameters, which are efficiency and output power.

It is proposed to consider the study of physical processes in the structure of the semiconductor layer of a solar element, as well as the study of the physical properties of thin films for a solar element, based on the following main research methods: scanning probe (capacitive) and tunneling microscopy (spectroscopy); atomic force microscopy; fluoroscopy; electronic microanalysis; scanning electron microscopy; ellipsometry; spectroscopic ellipsometry; Auger electron spectroscopy; mass spectrometry of secondary ions; photoluminescence; scanning laser microscopy.

It also shows the possibility of using a number of optical, electrical, X-ray and other studies to assess the quality of films that make up the structure of a solar element, as well as their use to evaluate technological processes when manufacturing a solar element.

It is substantiated that the use of the described methods contributes to the development of reliable, efficient and cheap solar elements; however, it is obvious that no diagnostic method is able to reflect all the variety of information regarding the parameters of thin-film solar elements.

Keywords: converter, method, absorbing surface, spectrum, solar element, microscopy.

Вступ

При тривалій експлуатації сонячних панелей (батареї), відзначається значне зниження їхньої продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії й вихідної потужності [1, 2]. Так, по оцінці закордонних фахівців [3], близько 90% ринку сонячних панелей, у цей час, становлять кристалічні кремнієві сонячні панелі, які втрачають від 10% до 40% вихідної потужності, у перші два роки експлуатації.

Тому, необхідно враховувати такі зовнішні фактори, що впливають на продуктивність сонячної панелі, як нормальна деградація сонячної панелі із часом, зниження потужності за рахунок надмірного нагрівання панелей або їхнього затінення й т.п. [4]. Вплив цих і інших факторів, може мінятися залежно від сезону, географічного положення, способу монтажу, азимута й нахилу сонячної панелі [5]. Практика експлуатації сонячних батарей показує, що в реальних умовах, сонячна панель буде виробляти близько 75...85% від її пікової потужності, зазначеної виробником. Наприклад, сонячна з потужністю 100 Вт, розташована під оптимальним кутом і орієнтована на південь, буде видавати влітку в середньому 75...85 Вт, залежно від методу установки. Тому, при проектуванні сонячної електростанції й зборці сонячних батарей, необхідно враховувати реальні характеристики сонячної панелі.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Аналіз проблеми погіршення параметрів сонячної панелі (СП) показав, що це визначається, нестабільністю вихідних параметрів сонячних елементів (фотоелектричних перетворювачів), з яких збирається сонячна панель. Це може бути викликано наступними факторами [8]: низькою якістю матеріалів і їхнє виробництво; ступенем герметизації панелі і якістю захисних властивостей плівки й т.д.

До більше серйозних наслідків при експлуатації СП, призводить виникнення пошкоджувальних дефектів, (відколи, мікротріщини, макропори, локальні неоднорідності) на сприймаючій поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача (ФЕП), які приводять до підвищення внутрішнього опору [9].

Причини появи таких пошкоджувальних дефектів, на поверхні сонячних елементів (СЕ), можуть первісно розрізнятися та мати різну природу, однак вони усі істотно впливають на внутрішню структуру напівпровідникового шару ФЕП. У свою чергу, зміну в структурі напівпровідникового шару ФЕП, викликають відхилення встановлених внутрішніх параметрів (напруги холостого ходу, струму короткого замикання, внутрішнього опору) та впливають на вихідну потужність і ККД СЕ.

Тому, вивчення фізичних процесів, на поверхневому рельєфі напівпровідникового шару ФЕП, при яких відбувається пошкодження й руйнування напівпровідникової структури ФЕП, є актуальною проблемою, з якої зіштовхуються виробники й споживачі СП.

При моделюванні приймалися наступні допущення: вольт-амперні (ВАХ) та вольт-ватні характеристики (ВВХ) моделювалися без урахування часткового затінення сприймаючої поверхні ФЕП і без можливого її пошкодження. Дані допущення дають можливість застосовувати тільки класичні аналітичні вирази для моделювання характеристик ФЕП. Основною причиною відхилень ВАХ і ВВХ, є труднощі точного виміру як послідовного і шунтуючого опорів, так і активної площі сонячних елементів.

Крім того, процеси моделювання в моделях сонячного елемента, проводилося з обмеженнями та допущеннями щодо сприймаючої поверхні, які істотно впливають на точність, нелінійність і нестабільність ВАХ і ВВХ. Отже, даний підхід вносить істотні похибки в розрахунках електрофізичних величин СЕ і не дає можливості застосовувати, повною мірою, аналітичні класичні вирази для моделювання характеристик СЕ. Крім того, необхідно відзначити, що точність моделювання ВАХ і ВВХ, залежить від можливих технологічних розкидів для кожного СЕ. Тому виявлення відповідності характеристик СЕ, представлених виробником і реальними характеристиками СЕ при його експлуатації, з врахуванням різних зовнішніх і внутрішніх факторів впливу на сприймаючу поверхню СЕ, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [18] запропонована модель ФЕП, для різних режимів роботи, з урахуванням впливу тільки зовнішніх факторів. У моделі, запропоновані аналітичні співвідношення між вихідними параметрами ФЕП (струмом навантаження, вихідною напругою) і зовнішніми умовами: інтенсивністю сонячного випромінювання, температури й енергетичною освітленістю. Як недолік даної моделі необхідно відзначити, що такі модельні параметри як: зворотний струм насичення, послідовний і паралельний шунтовий опір, розраховувалися тільки на основі паспортних даних сонячного елемента. При цьому, реальні дані, які істотно залежать від стану поверхневого рельєфу напівпровідникового шару ФЕП, у моделі розглядалися з різними допущеннями й обмеженнями.

У роботі [17] розглянута модель СЕ, що враховує співвідношення між такими параметрами як: номінальна й максимальна потужність; напруга холостого ходу й

номінальна напруга; струм короткого замикання й номінальний струм. Розглянута модель дозволяє розрахувати вихідну потужність і ККД СЕ. Однак, у запропонованих аналітичних виразах моделі, уводяться обмеження та похибки про ідеально гладкі поверхні тобто без поверхневих дефектів, що може викликати погрішності й відхилення при розрахунку реальних вихідних параметрів СЕ.

У роботі [18], наведені результати експериментальних досліджень вихідних параметрів СП: напруги холостого ходу, струму короткого замикання, вихідної потужності з урахуванням освітленості й температури в різних кліматичних і температурних умовах. Крім цього, виконані оцінки температурних коефіцієнтів напруги холостого ходу (НХХ) і струму короткого замикання (СКЗ). Експериментально підтверджено, що СКЗ прямо залежить від освітленості, а НХХ змінюється несуттєво через логарифмічний характер залежності від параметра фотоструму. Як недолік, необхідно відзначити, що в роботі показано, що температурні коефіцієнти НХХ і СКЗ для сонячної станції істотно більше, ніж для сонячного монокристалічного елемента. Однак не досліджені причини такої розбіжності і його впливу на величину вихідної потужності.

У роботі [17], показано, що на вихідну потужність фотоелектричних модулів впливають різні фактори, такі як часткове затінення, сонячна інсоляція, температура та конфігурація фотоелектричних масивів. Ці фактори, викликають зниження ефективності та надійності вироблення електроенергії у ФЕП.

У роботі [14], проведено дослідження впливу неоднорідного часткового затінення на характеристики ФЕП. При цих умовах, фотоелектричні ВАХ ФЕП стають більше складними, з більш ніж одним піком. Тому, дуже важливо, при цих умовах, розрахувати максимально можливу потужність. Для цього в роботі використовувалось моделювання характеристик ФЕП на основі MATLAB. Як недолік, у роботі показано, що в умовах часткового затінення зменшуються струм навантаження та теплові втрати, однак не досліджені причини такого зниження від стану поверхні ФЕП.

У роботі [15], отримана імітаційна модель, що дозволяє відображати сімейство ВАХ і ВВХ сонячних модулів залежно від рівня інтенсивності сонячного випромінювання, температури, значень СКЗ, НХХ, внутрішніх опорів СЕ, діодного параметра. Як недолік необхідно відзначити, що розроблена модель, описує реальний сонячний модуль, лише з деяким ступенем наближення, з урахуванням прийнятих припущень.

Метою роботи є розгляд і аналіз методів дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для фотоелектричного перетворювача.

Виклад основного матеріалу

Розгляд і аналіз основних вимог до тонкопліткових сонячних елементів (СЕ) показав, що до них відносяться:

- наявність базового шару з більшим показником поглинання оптичного випромінювання;
- для утворення гетеропереходу необхідний відповідний широкозонний шар;
- електричне сполучення шарів повинне забезпечувати ефективний збір зарядів;
- надійні омичні контакти.

Однак виробництво тонких плівок зв'язано як з теоретичними, так і практичними труднощами.

Основні складності пов'язані з тим, що:

- границі зерен впливають на рекомбінацію, струмоперенесення, дифузію та сегрегацію;

- iснує проблема контактних явищ для структур з декількох матерiалiв через необхiднiсть електричного сполучення рiзних шарiв СЕ;

- точковi дефекти в тонкоплiвкових СЕ недостатньо вивченi.

При виготовленнi СЕ важливо оцiнити якiсть кожного з його шарiв на етапi нанесення для того, щоб реально представляти iхню кристалiчну структуру, хiмiчний склад, оптичнi та електричнi властивостi.

Для оцiнки якостi плiвок, що становлять структуру СЕ, можливе застосування цiлого ряду оптичних, електричних, рентгенiвських i iн. дослiджень. Деякi з них використовуються для оцiнки технологiчних процесiв при виготовленнi СЕ.

Очевидно, що жоден метод дiагностики не здатний вiдобразити всю рiзноманiтнiсть iнформацiї щодо параметрiв тонкоплiвкових СЕ.

Розглянемо основнi методи дослiдження та вивчення фiзичних властивостей тонких плiвок для СЕ.

Застосування описаних методiв сприяє розробцi надiйних, ефективних i дешевих СЕ.

Метод сканувальної зондової мiкроскопiї (SPM). SPM [19] - загальна назва групи методiв, у яких використовується зонд для дослiдження поверхнi та електрофiзичних параметрiв СЕ. Вид взаємодiї мiж зондом i матерiалом визначає тип SPM. Розрiзнення цих методiв досягає $\sim \text{Å}$ i залежить вiд геометрiї вiстря зонда та характеру поверхнi.

Сканувальна тунельна мiкроскопiя (STM) [20]. Принцип дiї STM заснований на фiксацiї величини струму, що протiкає в зазорi вiстря зонда - поверхнi зразка. За рахунок рiзницi електричних потенцiалiв, прикладених до поверхнi зразка та до зонду, встановлюється тунельний струм, що експоненцiйно залежить вiд вiдстанi вiстря зонду - поверхнi зразка. В якостi зондiв для STM звичайно використовується заточений металевий дрiт. Зображення поверхнi формується або поперечним скануванням i вимiром струму (картина струму), або використанням петлi зворотного зв'язку, що пiдтримує струм постійним, за рахунок пересування зонда ближче або далi вiд поверхнi (топографiчне зображення). Висока чутливiсть тунельного струму до невеликих варiацiй вiдстанi дозволяє одержувати зображення з розрiзненням порядку розмiру атома. Аналізуватися можуть тiльки метали та напiвпровiдники, оскiльки необхiдно наявнiсть струму мiж зондом i зразком.

Сканувальна тунельна спектроскопiя (STS). Дозволяє одержувати iнформацiю про електронну структуру поверхнi. Вивчення залежностi тунельного струму вiд прикладеної напруги називається $I-V$ i $d/dV-V$ характеристики - приклад STS.

Атомна силова мiкроскопiя (AFM) [20]. Для одержання зображення фiксується сила взаємодiї мiж вiстряма зонда та дослiджуваною поверхнею. Радiус закруглення зонда становить порядку 10 нм i вiдповiдає за розрiзнення AFM методiв. Iснують три основних режими AFM: контактний, безконтактний i напiвконтактний (режим «обстукування»). Пiд час сканування в контактному режимi вiстря зонда сковзає (аналогiчно профiлометру) по поверхнi. При контактному режимi зонд торкається поверхнi. Взаємодiя мiж зондом i зразком вiдштовхує та регулюється керуючою програмою. При безконтактному режимi зонд перебуває в декiлькох Å над поверхнею, взаємодiя є притягуючою. У напiвконтактному режимi зонд коливається з певною частотою, «обстукує» поверхню. Калiбрування проводиться на стандартних зразках з вiдомою топографiєю.

Хоча STM метод бiльше чутливий за рахунок квадратичної залежностi величини струму, що протiкає, вiд вiдстанi вiстря-зразок, за допомогою AFM можна аналізувати майже всi типи матерiалiв, включаючи дiелектрики, органiчнi й бiологiчнi об'єкти. В AFM режимi зображення звичайно легше одержати, чим в STM.

Експериментальнi данi при стандартному AFM i STM аналізі являють собою матрицю даних про вертикальне положення z зонда в масивi позицiй (x, y) . Графiчне подання цих даних (топографiя зразка) схоже на зображення сканувальної електронної мiкроскопiї (SEM).

Перевага SPM полягає в цифровому форматі даних, що дозволяє одержувати тривимірні зображення та робити кількісні виміри, фіксуючи латеральні і вертикальні розміри структури, визначати шорсткість, що є важливими характеристиками тонких плівок, які використовуються у фотовольтаїці.

Похибка AFM і STM методів залежить від кривизни зонда та кривизни досліджуваної поверхні. Для мінімізації похибки зонд повинен мати невеликий кут розхилу конуса і радіуса закруглення вістря. Промислові зонди мають радіуси кривизни від 2 до 200 нм залежно від SPM режиму.

В останні роки розроблено понад сорок методик, заснованих здебільшого на AFM, що дозволяють досліджувати різні параметри й властивості нанорозмірних структур. Зокрема, методика латеральних сил у контактному режимі, дозволяє розрізняти елементи в композитному матеріалі із гладкою поверхнею. Це відбувається за рахунок реєстрації зміни величини скручування консолі для різних матеріалів через різні поверхневі властивості досліджуваних структур. Ділянки, де тертя зонд-зразок більше, дають більший поворот зонда і більш високий контраст зображення. Твердість визначається вдавненням зонда в поверхню. В електростатичній силовій мікроскопії [10] використовується різниця потенціалів між зондом і зразком для вивчення електричних властивостей поверхні зразка. Використовуючи зворотний зв'язок по струму для керування напругою, проводять кількісні виміри потенціалу поверхні. Такий метод називається силовою мікроскопією з використанням зонда Кельвіна (KPFM).

Сканувальна ємнісна мікроскопія (SCM) [11] заснована на вимірі ємності між зондом і поверхнею. За допомогою цього методу можна проводити кількісні виміри концентрації носіїв заряду [17]. У всіх вищевказаних режимах на результати експерименту впливає топографія зразка.

Рентгенівські методи дослідження. Дифракція рентгенівських променів на кристалі речовини є основним методом визначення його кристалічної структури та фазового складу. Сутність методу заснована на дифракції рентгенівських променів на об'єктах, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі падаючого випромінювання. Теорія дифракції рентгенівських променів ґрунтується на рівнянні Брєга, що описує умову посилення рентгенівських променів, розсіяних на атомних площинах кристала, у результаті їх інтерференції [12]. Величина дифракційного максимуму, задається кутом падіння та довжиною хвилі рентгенівського випромінювання. В якості джерела рентгенівського випромінювання звичайно використовують стандартні рентгенівські трубки.

Метод електронного мікроаналізу. Реєстрація характеристичного рентгенівського випромінювання, збудженого швидкими електронами, лежить в основі електронного мікроаналізу матеріалів [12], використовуваного для якісного та кількісного аналізу елементного складу поверхні SE.

Збуджений електронами приповерхній об'єм має розміри порядку мікрона. Електронним пучком можна сканувати по поверхні, отримуючи розподіл елементів. Метод включає використання первинного рентгенівського випромінювання або електронного пучка, який падає на зразок та вибиває електрони внутрішніх оболонок атомів, створюючи вакансії, які можуть бути заповнені із зовнішніх оболонок. Це формує певний спектр рентгенівського випромінювання для кожного з хімічних елементів зразка. Рентгенівське випромінювання, що створюється заповненням електронами вакансій з K-оболонки, називають K-випромінюванням, з L-оболонки - L-випромінюванням. Таким чином, рентгенівські дослідження з використанням стандартних вимірвальних установок і методик [15], дозволяють визначити кристалічну структуру, фазовий склад і товщину досліджуваних плівок SE.

Метод сканувальної електронної мікроскопії (SEM). SEM дозволяє досліджувати морфологію поверхні синтезованих плівок SE, розміри зерен і, при скануванні поперечного відколу, мікроструктуру різних шарів SE [17].

Для проведення SEM електронною гарматою емітується та прискорюється електронний промінь, фокусований рядом збиральних електромагнітних лінз.

При взаємодії лучу з поверхнею зразка генеруються вторинні електрони, які поглинаються в сцинтиляторі з випромінюванням фотонів. Фотони, що реєструються формують зображення. Для проведення SEM-вимірів використовуються сканувальні електронні мікроскопи, які дозволяють одержати мікрофотографії з розрізненням до сотих часток мікрона (Рис. 1).

Метод спектроскопічної еліпсометрії. Розглянемо застосування видимого світла для вивчення тонких плівок SE. За допомогою інтерферометрії та рефлектометрії вимірюються малі товщини прозорих тіл по їх кольорам [17].

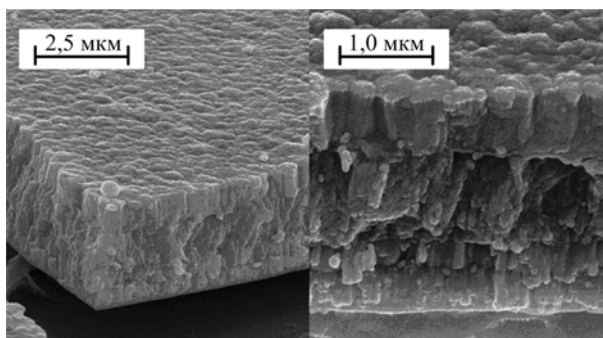


Рис. 1 – SEM-зображення структури поверхні сонячного елемента

Метод виміру товщини тонких плівок із застосуванням поляризованого світла (дві взаємно перпендикулярні p - і s -поляризації), відомий як еліпсометрія. Метод еліпсометрії використовується для виміру комплексного відношення відбиття p - і s -поляризованих променів. У цьому полягає головна відмінність від рефлектометрії, у якій вимірюється відношення інтенсивності відбитого променя до інтенсивності падаючого променя. Цей принцип закладений у фундаментальному рівнянні еліпсометрії. Винайдення фотомножних трубок, лазерів, волоконної оптики й швидкодіючих комп'ютерів значно поліпшило повторюваність, гнучкість і швидкість еліпсометричних досліджень. Метод еліпсометрії дозволяє створювати велике різноманіття конфігурацій досліду, що підходять для різного застосування. Методи еліпсометрії з фіксованою довжиною хвилі широко застосовуються в мікроелектронній промисловості. З розвитком мікроелектроніки й програмного забезпечення багатоканальні спектроскопічні еліпсометри.

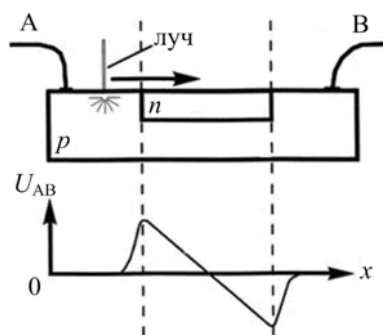


Рис. 2 – Сигнал планарного p - n -переходу

Метод еліпсометрії використовується для виміру комплексного відношення відбиття p - і s -поляризованих променів. У цьому полягає головна відмінність від рефлектометрії, у

якій виміряється відношення інтенсивності відбитого променя до інтенсивності падаючого променя. Цей принцип закладений у фундаментальному рівнянні еліпсометрії.

Метод сканувальної лазерної мікроскопії (LBIC). Якість СЕ істотно залежить від просторової однорідності матеріалу шарів. Наявність неоднорідностей (складу твердого розчину, концентрації носіїв, щільності дефектів і т.д.) приводить до розкиду характеристик і низькому виходу придатних СЕ. Тому просторово-розв'язні методики виміру параметрів напівпровідників необхідні для створення вискоефективних СЕ. Робота сканувального лазерного мікроскопа заснована на появі фото ЕРС при локальному засвіченню просторово-неоднорідного шару напівпровідника [15].

Якщо енергія фотонів перевищує E_g напівпровідника, у плямі засвічення відбувається генерація електрино-діркових пар.

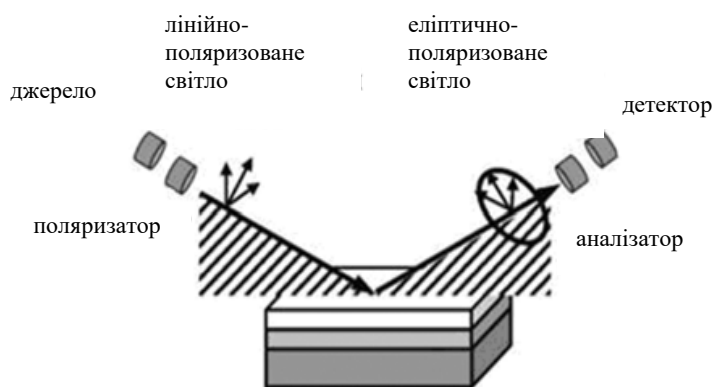


Рис. 3 – Типова еліпсометрична конфігурація, застосовувана для аналізу багатошарових тонкоплівкових структур

Нерівноважні дірки та електрони будуть дифундувати від області засвічення. Тоді на відстані, меншій дифузійної довжини носіїв від області засвічення, існує певна область, що характеризується наявністю убудованого електричного поля. Тоді електрони й дірки просторово розділяються. Перерозподіл заряду викликає порушення радіальної симетрії розподілу нерівноважних носіїв у зразку та, відповідно, перерозподіл заряду за всім зразком. У загальному випадку різниця потенціалів між двома довільними точками на зразку буде відмінна від нуля та визначається напрямком вектора убудованого електричного поля щодо осі, що проходить через точки, у яких виконується вимір, і величиною заряду.

Поводження сигналу, який вимірюється між нерухливими контактами при русі луча через область, що характеризується убудованим електричним полем, пояснимо на прикладі одновимірної моделі планарного р-п-переходу (Рис. 2) [16].

Нехай є однорідна п-область в однорідному матеріалі р-типа. При засвіченні зразка ліворуч від п- області електрони, що дійшли до границі переходу, зтягаються його полем усередину п-області. Дірки зустрічають на своєму шляху потенційний бар'єр. Просторово-розділені заряди викличуть появу різниці потенціалів між контактами А і В. У міру наближення до границі переходу кількість носіїв заряду, що дійшли до границі, буде рости й досягне максимуму, коли промінь перебуває на границі р-п-переходу. При засвіченню точно по центру п-області просторовий розподіл електронів і дірок, розділених лівою та правою границями переходу, симетричний, заряди взаємно компенсують один одного і сигнал LBIC дорівнює нулю. У міру наближення до правої границі сигнал починає рости по модулю, але із протилежним знаком. Таким чином, при скануванні променем через планарний р-п-перехід LBIC реєструє двополярий сигнал, нуль якого збігається із центром симетрії переходу. Цей приклад демонструє принцип роботи LBIC.

Метод фотолюмінесценція (PL). PL - швидкий, неруйнуючий метод характеристики електронних властивостей напівпровідників [19], що дозволяє швидко оцінити параметри матеріалу, ідентифікувати домішки й дефекти. Спектроскопія фотолюмінесцентного збудження (PLE) забезпечує інформацію про спектр поглинання в зразках, де неможливі виміри спектрів пропущення [14]. Вичерпні огляди по фотолюмінесценції в напівпровідниках з акцентом на експериментальні результати представлені в [16].

Основні компоненти PL-системи:

- джерело оптичного збудження, звичайне монохроматичне джерело;
- оптична система фокусування збудливого випромінювання на поверхню зразка та заведення PL- випромінювання в спектрометр;
- спектрометр або монохроматор;
- детектор PL-випромінювання (фотоелектронний помножувач, фотодіод або матриця фотодіодів);
- система керування експериментом, збору даних та їх аналізу.

У фотолюмінесценції з розрізненням часу (TRPL) вимірюється інтенсивність (PL), як функція часу. При цьому використовується лазерний імпульс для збудження електронів у напівпровіднику. Інтенсивність (PL) - випромінювання реєструється швидкодіючим детектором, а також може бути виміряна безпосередньо, як функція часу за допомогою фотодіода. Однак щоб одержати більш високе співвідношення сигнал/шум і менший час розрізнення, використовується лічильник одиничних фотонів. За допомогою аналізу PL-випромінювання як функції температури, концентрації вільних носіїв, рівня інжекції, розмірів зразка й т.д., можливо оцінити якість матеріалу й роль різних механізмів рекомбінації в роботі СЕ [15, 16,].

Метод мас-спектрометрії вторинних іонів (SIMS). SIMS - високочутливий метод аналізу поверхні й біля поверхневих ділянок твердих тіл. Цей метод використовується в напівпровідниковій промисловості для вивчення розподілу легуючих домішок і забруднень у мікроелектронних матеріалах і приладах. Основний принцип методу полягає в тому, що багатопшарові структури аналізують, розсіюючи їх фокусуванням первинним іонним променем. В емітованих цим процесом вторинних іонів аналізується співвідношення маса/заряд за допомогою мас-спектрометра. На противагу методам спектроскопії маси, які використовуються для загального аналізу, і вимагають розчинення зразка, SIMS дозволяє досліджувати шаруваті структури, включаючи електронні прилади. Особливості, що роблять SIMS привабливим як аналітичний інструмент (чутливість, розрізнення по глибині й т.д.), приводять також до «артефактів», що утрудняють інтерпретацію даних (бокові неоднорідності, топографія поверхні, варіації виходу іонів). Незважаючи на ці труднощі, SIMS часто є єдиним аналітичним інструментом, здатним зондувати малі елементні концентрації в шарах тонких плівок. SIMS дозволяє вивчати всі елементи періодичної таблиці, так само, як і ізотопи. Він чутливий у широкому діапазоні концентрацій - більше восьми порядків величини. Якщо потрібні кількісні результати, то необхідно використати строго погоджені стандарти для кожного досліджуваного сполучення елемент/матриця. Завдяки великому динамічному діапазону SIMS-дані звичайно зображуються на логарифмічній осі. Дані можуть бути представлені як мас-спектрограма або як профіль глибини. Найбільш загальний метод одержання даних аналізу тонких плівок - динамічний SIMS-профіль глибини, у якому мас-спектри досліджують як функцію часу розпилення. Вимірюючи глибину отриманої іонним променем заглибу (кратера) профілометром, можна перетворити час розпилення в глибину.

Метод електронної оже-спектроскопії - ґрунтується на вимірі енергії та інтенсивності струму оже-електронів, емітованих із твердого тіла при оже-ефекті. Якщо в атомі під дією електронного бомбардування або іншим способом створена вакансія на внутрішній

електронній оболонці, збуджений атом через деякий час вертається в основний стан, випускаючи характеристичне електромагнітне випромінювання або здійснює безвипромінювальний оже-перехід. Вакансію на внутрішньому рівні може заповнити електрон, що перебуває на одному із зовнішніх рівнів. У випадку оже-ефекту перехід атома в нормальний стан супроводжується передачею енергії одному з електронів зовнішнього рівня. Цей електрон вилітає з атома з певної, характерною для даного атома кінетичною енергією. По енергетичному спектру оже-електронів можна однозначно визначити елементний склад [17].

В оже-спектроскопії піку оже-електронів привласнюються номери, наприклад, $Si_1 - 92$ eВ; $Si_2 - 1619$ eВ. Для всіх елементів, крім водню та гелію, на яких оже-перехід неможливий, складений атлас спектрів оже-електронів. Якщо атом перебуває у зв'язаному стані, енергія оже-електронів трохи відрізняється від вільного стану або з'являються нові піки. По змінах спектра можна судити про хімічні зв'язки елементів, однак у цей час атлас спектрів є лише для деяких з'єднань.

Порушення атомів проводиться первинним гострофокусованим електронним пучком з енергією електронів $0,1 \div 10$ кеВ. Діаметр пучка $0,1 \div 10$ мкм визначає локальність аналізу в площині об'єкта. Використання електронів для порушення атомів, дозволяє додатково реалізувати режими сканувального електронного мікроскопа (SEM), що практично завжди робиться в сучасних оже-спектрометрах. Зображення об'єкта у вторинних, відбитих або поглинених електронах виводиться на екран дисплея, що дозволяє визначати місце аналізу з розрізненням SEM (10 нм). Локальність по глибині визначається глибиною виходу оже-електронів і становить $0,3 \div 3,0$ нм залежно від енергії оже-електронів, що перебуває в межах 20-2500 eВ. Низька енергія аналізованих електронів і висока чутливість до поверхневих забруднень вимагає проведення вимірів у надвисокому вакуумі порядку 10^{-10} мм рт. ст. Оже-спектри реєструються дисперсійними енергоаналізаторами в режимах $N(E)$ - розподілу вторинних електронів по енергіях і $d(E)/d$ - диференційованих спектрів. Розподіл елементів по глибині (Рис. 4) одержують шляхом іонного розпилення досліджуваної плівки з періодичною реєстрацією оже-електронів.

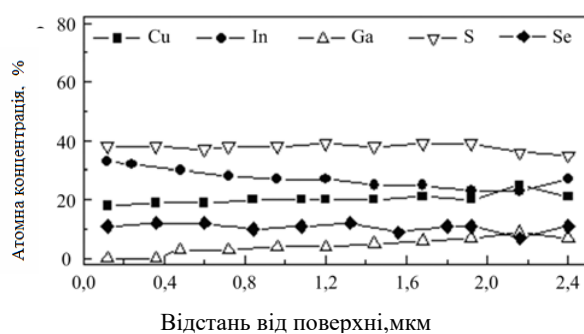


Рис. 4 – Розподіл по товщині плівки компонентів твердого розчину $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$

Для оцінки контактного опору між напівпровідником і металевим контактом використовується спеціальна величина, називана специфічним контактним опором ρ_c , величина якого визначається (рис. 5) відповідно до співвідношення (1)

$$\rho_c = R_s \cdot L_T, \quad (1)$$

де L_T – довжина переносу (трансферна довжина) – відстань від контакту, на якому величина напруги послабляється в e раз.

Тоді (R_S), можна визначити 4-зондовим методом, (U) і (I) визначаються експериментально (Рис. 5).

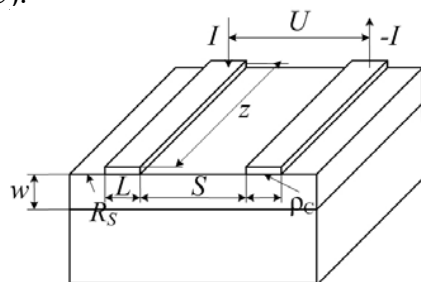


Рис. 5 – Схема вимірювання специфічного контактного опору

Вимір питомого й поверхневого опору 4-зондовим методом. Для визначення питомого (ρ) і поверхневого (R_S) опору отриманих плівок зручно використати 4-зондовий метод виміру, не потребує створення омичного контакту до досліджуваного зразка. Основна умова - плоска поверхня зразка, лінійні розміри якої перевершують лінійні розміри системи зондів [20] (Рис. 6).

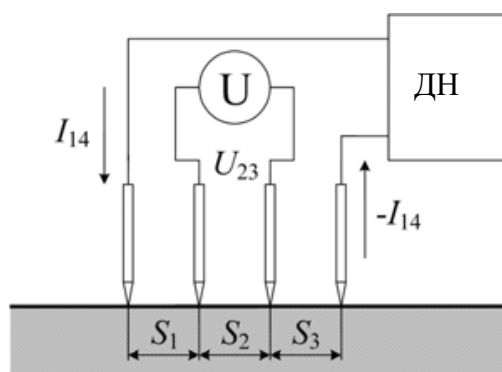


Рис. 6 – Електрична схема вимірювання питомого та поверхневого опору 4-зондовим методом: ДН - джерело постійної напруги; U - вольтметр

Для усунення недоліків розглянутих методів дослідження напівпровідникових структур, запропоновано, як перспективний метод дослідження структурних властивостей поверхні рельєфу напівпровідникової кулі СЕ, використати обчислювальний метод фрактальної геометрії [22], що дозволить враховувати фрактальні властивості структури напівпровідникової кулі та тим самим розрахувати реальні величини вихідної потужності та ККД, підвищити від 3 до 5% стабільність та точність ВАХ та ВВХ ФЕП. Структурна геометрична (фізична) модель сприймаючої поверхні сонячного ФЕП, показана на Рис.7.

Для розрахунку площі реальної сприймаючої поверхні рельєфу сонячного елемента, запропоновано використати вираз (2):

$$S_{REAL} = S_G - (\Delta S_{MT} + \Delta S_{MP} + \Delta S_{MMT} + \Delta S_{LN}) \quad (2)$$

де S_{REAL} - реальна площа сприймаючої поверхні ФЕП з пошкоджуючими дефектами; S_G - геометрична площа топологічної поверхні ФЕП; ΔS_{MT} - геометричне збільшення локальної

площі макротріщини; ΔS_{MMT} - геометричне збільшення локальної площі мікротріщини; ΔS_{MP} - геометричне збільшення локальної площі мікропори; ΔS_{LN} - геометричне збільшення локальної площі неоднорідності.

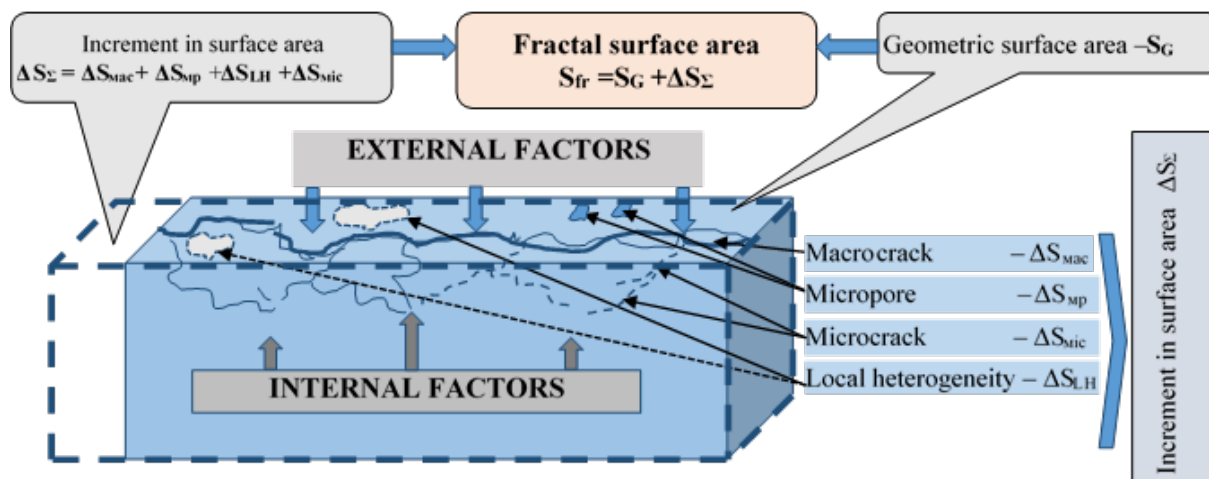


Рис. 7 – Структурна геометрична модель сприймаючої поверхні сонячного ФЕП

Висновки

Розглянуті та проаналізовані основні вимоги до моделей тонкоплівкових сонячних елементів, для поліпшення стабільності та точності ВАХ і ВВХ фотоелектричних перетворювачів. Показано, що існуючі моделі СЕ, дозволяють розрахувати вихідну потужність і ККД, на основі врахування співвідношення між такими параметрами як: номінальної та максимальної потужності; напругою холостого ходу та номінальною напругою; струмом короткого замикання та номінальним струмом.

Виявлено, що в аналітичних вирази моделей СЕ, уводяться обмеження та допущення про ідеально гладкі поверхні, тобто без поверхневих дефектів, що може викликати похибки та відхилення при розрахунку реальних вихідних параметрів СЕ. Показано, що точкові дефекти в структурі тонкоплівкових сонячних елементах, впливають на показники поглинання оптичного випромінювання через зміну реальної площі сприймаючої поверхні рельєфу напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача.

Визначено, що при виготовленні сонячних елементів, важливо оцінити якість кожного з його шарів на етапі нанесення для того, щоб реально представляти їх кристалічну структуру, хімічний склад, оптичні та електричні властивості. Відзначено, що при тривалій експлуатації сонячних панелей та сонячних батарей, відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії та вихідної потужності.

Проведено дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для сонячного елемента, на основі наступних методів дослідження: сканувальна зондова_(ємнісна) та тунельна мікроскопія (спектроскопія); атомна силова мікроскопія; рентгеноскопія; електронний мікроаналіз; сканувальна електронна мікроскопія; еліпсометрія; спектроскопічна еліпсометрія; електронна оже-спектроскопія; мас-спектрометрія вторинних іонів; фотолюмінісценція; сканувальна лазерна мікроскопія, однак показано, що жоден метод діагностики, не здатний відтворити вплив структурно-фазового стану структури напівпровідникового шару на параметри СЕ, при наявності пошкоджувальних дефектів на сприймаючій поверхні фотоелектричного перетворювача.

Запропоновано, як перспективний метод дослідження структурних властивостей напівпровідникового шару, використати обчислювальний метод фрактальної геометрії, що дозволить враховувати фрактальні властивості структури напівпровідникового шару та тим самим розрахувати реальні величини вихідної потужності та ККД СЕ.

Список використаних джерел:

1. Nguyen X. H. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink / X. H. Nguyen, M. P. Nguyen // *Environmental Systems Research*. – 2015. – Vol. 4 (24). – P. 7–22.
2. Method for short-term photovoltaic generation power prediction base on weather patterns / Z. Wang, L. He, X. Cheng, J. He // *IEEE China International Conference on Electricity Distribution*. – 2014. – P. 213–215.
3. Novel sevel parameter model for photovoltaic modules / A. Adel, H. Elbaset, M. Ali, S. Abd-El // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2014. – Vol. 130. – P. 442–455.
4. De Giorgi M. Photovoltaic power forecasting using statistical methods: impact of weather data / M. De Giorgi, P. Congedo, M. Malvoni // *IET Science, Measurement & Technology*. – 2014. – Vol. 8 (3). – P. 90–97.
5. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters / P. Budanov [et al.] // *Eastern-Eruopian Journal of Enterprise Thechnologies*. – 2018. – № 5/5 (95). – P. 20–28.
6. A New Generation of Standard Solar Models / N. Vinyoles [et al.] // *The Astrophysical Journal*. – 2017. – Vol. 835, № 2. – P. 1–16.
7. Cotfas D. T. Methods to determine the DC parameters of solar cells: A critical review / D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, S. Kaplanis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 28. – P. 588–596.
8. Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells / Y. Li [et. al.] // *Solar Energy*. – 2013. – Vol. 90. – P. 51–57.
9. Laudani A. High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms / A. Laudani, F. Riganti Fulginei, A. Salvini // *Solar Energy*. – 2014. – Vol. 103. – P. 316–326.
10. Lineykin S. An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel / S. Lineykin, M. Averbukh, A. Kuperman // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 30. – P. 282–289.
11. Cubas J. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior / J. Cubas, S. Pindado, M. Victoria // *Power Sources*. – 2014. – Vol. 247. – P. 467–474.
12. A new method for determining the characteristics of solar cells / L. Peng [et al.] // *Power Sources*. – 2013. – Vol. 227. – P. 131–136.
13. Cubas J. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function / J. Cubas, S. Pindado, C. Manuel // *Energies*. – 2014. – Vol. 7. – P. 4098–4115.
14. Patil Sahebrao N. Design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using Simulink model / N. Patil Sahebrao, R. C. Prasad // *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 2, iss. 1. – P. 37–40.
15. Cucchiela F. A profitability assessment of small-scale photovoltaic systems in an electricity market without subsidies / F. Cucchiela, I. D'Adamo, M. Gastaldi // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – № 129. – P. 62–74.
16. Villala M. G. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays / M. G. Villala, J. R. Gazoli, E. R. Filho // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2009. – Vol. 24, iss. 5. – P. 1198–1208.
17. Stanly L. S. Grid connected solar photovoltaic system with Shunt Active Filtering capability under transient load conditions / L. S. Stanly, R. Divya, M. G. // *IEEE International Conference on Advancements in Power and Energy*. – 2015. – P. 345–350.
18. Levshov A. V. Mathematical modeling of photovoltaic solar cells / A. V. Levshov, A. Yu. Fedorov, A. V. Molodichenko // *Science practices of DonNTU. Series: "Electrical engineering and energy"*. – 2011. – № 11 (186). – P. 246–249.
19. A new strategy for improved spectral performance in solar power plants / A.G. Imenes [et al.] // *Solar Energy*. – 2006. – Vol. 80, № 10. – P. 1263–1269.
20. Roedem B. Thin-film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs / B. Roedem // *Refocus*. – 2006. – Vol. 7, № 4. – P. 34–39.
21. Mints P. PV – the story so far how is the PV industry progressing in its bid to be considered mainstream? / P. Mints // *Refocus*. – 2006. – Vol. 7, № 6. – P. 34–36.
22. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory / P. Budanov [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 3, № 8. – P. 75–80.

References:

1. Nguyen, XH & Nguyen, MP 2015, 'Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink', *Environmental Systems Research*, vol. 4 (24), pp. 7-22.
2. Wang, Z, He, L, Cheng, X & He, J 2014, 'Method for short-term photovoltaic generation power prediction base on weather patterns', *IEEE China International Conference on Electricity Distribution*, pp. 213-215.
3. Adel, A, Elbaset, H, Ali, M & Abd-El, S 2014, 'Novel sevel parameter model for photovoltaic modules', *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 130, pp. 442-455.
4. De Giorgi, M, Congedo, P & Malvoni, M 2014, 'Photovoltaic power forecasting using statistical methods: impact of weather data', *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 8 (3), pp. 90-97.
5. Budanov, P, Brovko, K, Cherniuk, A, Pantielieieva, I, Oliynyk, Yu, Shmatko, N & Vasyuchenko, P 2018, 'Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters', *Eastern-Eruopian Journal of Enterprise Thechnologies*, no. 5/5 (95), pp. 20-28.
6. Vinyoles, N, Serenelli, AM, Francesco, LV, Basu, S, Bergström, J, Gonzalez-Garcia, MC, Maltoni, M, Peña-Garay, C & Song, N 2017, 'A New Generation of Standard Solar Models', *The Astrophysical Journal*, vol. 835, no. 2, pp. 1-16.
7. Cotfas, DT, Cotfas, PA & Kaplanis, S 2013, 'Methods to determine the DC parameters of solar cells: A critical review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 588-596.
8. Li, Y, Huang, W, Huang, H, Hewitt, C, Chen, Y, Fang, G & Carroll, DL 2013, 'Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells', *Solar Energy*, vol. 90, pp. 51-57.
9. Laudani, A, Riganti Fulginei, F & Salvini, A 2014, 'High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms', *Solar Energy*, vol. 103, pp. 316-326.
10. Lineykin, S, Averbukh, M & Kuperman, A 2014, 'An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 282-289.
11. Cubas, J, Pindado, S & Victoria, M 2014, 'On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior', *Power Sources*, vol. 247, pp. 467-474.
12. Peng, L, Sun, Y, Meng, Z, Wang, Y & Xu, Y 2013, 'A new method for determining the characteristics of solar cells', *Power Sources*, vol. 227, pp. 131-136.
13. Cubas, J, Pindado, S & Manuel, C 2014, 'Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function', *Energies*, vol. 7, pp. 4098-4115.
14. Patil Sahebrao, N & Prasad, RC 2014, 'Design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using Simulink model', *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, iss. 1, pp. 37-40.
15. Cucchiola, F, D'Adamo, I & Gastaldi, M 2016, 'A profitability assessment of small-scale photovoltaic systems in an electricity market without subsidies', *Energy Conversion and Management*, no. 129, pp. 62-74.
16. Villala, MG, Gazoli, JR & Filho, ER 2009, 'Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, iss. 5, pp. 1198-1208.
17. Stanly, LS, Divya, R & Nair, MG 2015, 'Grid connected solar photovoltaic system with Shunt Active Filtering capability under transient load conditions', *IEEE International Conference on Advancements in Power and Energy*, pp. 345-350.
18. Levshov, AV, Fedorov, AYU & Molodichenko, AV 2011, 'Mathematical modeling of photovoltaic solar cells', *Science practices of Donetsk National Technical University, series electrical engineering and energy*, no. 11 (186), pp. 246-249.
19. Imenes, AG et al. 2006, 'A new strategy for improved spectral performance in solar power plants', *Solar Energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1263-1269.
20. Roedem, B 2006, 'Thin-film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs', *Refocus*, vol. 7, no. 4, pp. 34-39.
21. Mints, P 2006, 'PV – the story so far how is the PV industry progressing in its bid to be considered mainstream?', *Refocus*, vol. 7, no. 6, pp. 34-36.
22. Budanov, P, Kyrsov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 8, pp. 75-80.

Стаття надійшла до редакції 05 листопада 2022 року