

М. В. КІРІЧЕНКО, Р. В. ЗАЙЦЕВ, К. О. МІНАКОВА, Б. В. ВОРОБІЙОВ, Д. С. ШКОДА, С. Ю. ЛЕЛЮК

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АПРОБАЦІЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ІМІТАТОРА СОНЦЯ SUNBRICK

Проведено введення в експлуатацію та експериментальна апробація технічних можливостей і режимів роботи та здійснені тестові вимірювання світлових вольт-амперних характеристик сонячних елементів за допомогою сучасного вимірювального комплексу на основі імітатора сонця Sunbrick. Реалізовано автоматизоване вимірювання світлових вольт-амперних характеристик сонячних елементів компенсаційним методом за допомогою вимірювального приладу Keithley 2400. В ході апробації вимірювального комплексу на основі імітатора сонця Sunbrick протестовано можливість відтворення різних режимів роботи імітатора та перевірено можливості керування випромінюванням як за енергетикою в діапазоні від 100 до 1100 Вт/м² так і за спектральним складом. Встановлено, що просторова нерівномірність освітлення для дослідженого приладу становить менше 2 % при площі освітлення понад 400 см². Показано, що апробований вимірювальний комплекс дозволяє проводити автоматизовані дослідження сонячних елементів в режимах опромінення, що відповідають як наземним умовам опромінення так і в умовах заатмосферного сонячного випромінювання. Апробовано можливість індивідуального налаштування кожного з 36 каналів випромінюючого елемента в діапазоні від 400 до 1100 нм, що додає гнучкості в використанні імітатора сонця Sunbrick під час дослідження як сонячних елементів в цілому так і властивостей функціональних напівпровідникових матеріалів шляхом опромінення монохроматичним або змішаним освітленням. Показано, що за рахунок експресності проведення досліджень та можливості одразу візуалізувати виміряну вольт-амперну характеристику на екрані комп'ютера можна суттєво пришвидшити процес дослідження сонячних елементів. Так можна відразу проводити розподіл досліджених сонячних елементів за групами відносно їх ефективності та визначати присутність можливих дефектів або пошкоджень у їх структурі.

Ключові слова: сонячний елемент, спектр, симулятор, вольт-амперна характеристика.

M. V. KIRICHENKO, R. V. ZAITSEV, K. O. MINAKOVA, B. V. VOROBYOV, D. S. SKODA, S. Yu. LELYUK

EXPERIMENTAL APPROVAL OF THE WORKING MODES OF THE SUNBRICK SUN SIMULATOR

Commissioning and experimental testing of technical capabilities and modes of operation were carried out, and test measurements of light current-voltage characteristics of solar cells were carried out using a modern measuring complex based on the Sunbrick sun simulator. Automated measurement of the light-voltage-current characteristics of solar cells by the compensation method using the Keithley 2400 measuring device was implemented. During the approbation of the measuring complex based on the Sunbrick sun simulator, the possibility of reproducing different modes of simulator operation was tested and the ability to control radiation in terms of energy in the range from 100 to 1100 W/m² and by spectral composition. It was established that the spatial unevenness of illumination for the investigated device is less than 2% with an illumination area of more than 400 cm². It is shown that the tested measuring complex allows for automated research of solar cells in irradiation regimes corresponding to both terrestrial irradiation conditions and extraatmospheric solar radiation conditions. The possibility of individual adjustment of each of the 36 channels of the emitting element in the range from 400 to 1100 nm has been tested, which adds flexibility in the use of the Sunbrick sun simulator during the study of both solar cells as a whole and the properties of functional semiconductor materials by irradiation with monochromatic or mixed illumination. It is shown that due to the rapidity of conducting research and the ability to immediately visualize the measured current-voltage characteristic on the PC screen, it is possible to significantly speed up the process of researching solar cells. Thus, it is possible to immediately divide the investigated solar cells into groups in relation to their efficiency and determine the presence of possible defects or damage in their structure.

Keywords: solar cell, spectrum, simulator, volt-ampere characteristic.

Вступ. В даний час в результаті підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) промислових зразків монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) до 17–18 % при істотному зниженні їх вартості китайські виробники стали найбільшими експортерами фотоелектричної продукції в світі [1]. Значна частина підприємств, що займаються промисловим випуском фотоелектричних модулів, в якості вихідних фотоелектричних перетворювачів використовує приладові структури китайського виробництва. Крім того найбільший сегмент імпортованих фотоелектричних модулів займають також вироби китайських виробників. При продажу ФЕП китайські виробники крім ККД вказують і вихідні параметри: напруга холостого ходу (U_{xx}), густину струму короткого замикання ($J_{кз}$) і фактор заповнення світлової ВАХ (FF) які вимірюються при температурі 25 °С.

Підтвердження відповідності ФЕП заявленим виробником значенням ККД та вихідних параметрів є важливою технічною задачею. Для її вирішення прийнято проводити дослідження світлових вольт-амперних характеристик ФЕП. Оскільки проведення натурних вимірювань не є практичним та часто не є можливим через погодні умови зазвичай

використовують спеціальні прилади – імітатори сонячного випромінювання. Сучасні зразки таких приладів можуть агрегатуватися із вимірювальними комплексами та підключатися до комп'ютерів для того, щоб максимально автоматизувати проведення досліджень.

Слід зазначити, що правильне використання та введення в експлуатацію таких приладів є окремою науково-технічною задачею вирішення якої дозволяє організувати довгу та надійну експлуатації вимірювальних комплексів.

У зв'язку з викладеним вище метою роботи було ознайомлення з будовою та проведення тестових вимірювань світлових вольт-амперних характеристик ФЕП [2, 3] за допомогою сучасного вимірювального комплексу на основі імітатора сонця Sunbrick.

Відповідно до вказаної мети були поставлені наступні задачі:

1. Ознайомитись з будовою, принципом роботи комплексу для вимірювання світлових вольт-амперних на основі імітатора сонця Sunbrick;

2. Провести апробацію вимірювального комплексу на основі імітатора сонця Sunbrick шляхом відтворення різних режимів роботи імітатора та

перевірити можливості керування спектральним складом.

3. Виміряти світлові вольт-амперні характеристики тестових зразків ФЕП.

Особливості конструкції імітатора сонця Sunbrick. Світлодіодний сонячний симулятор G2V Sunbrick (рис. 1) — це джерело безперервного випромінювання великої площі з можливістю масштабування, призначене для тестування поведінки матеріалів, процесів, пристроїв, обладнання та структурних компонентів під імітованим сонячним освітленням.

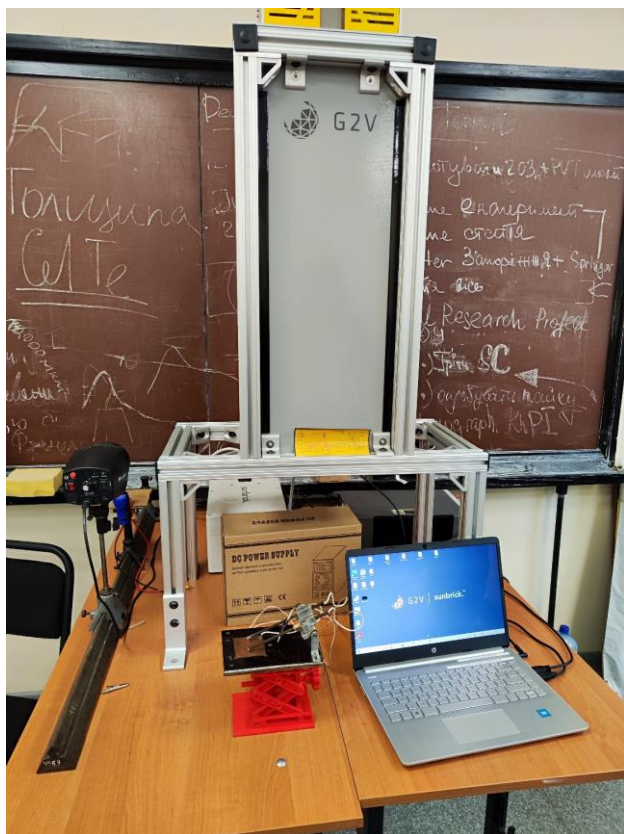


Рисунок 1 – Загальний вигляд імітатора Сонця

Завдяки каліброваній площі 20 см x 20 см із загальною площею 25 см x 25 см для окремого блоку та можливістю двовимірного розбиття, якщо це необхідно, Sunbrick розроблено для допомоги у тестуванні та характеризації матеріалів, процесів, пристроїв, обладнання. Sunbrick здатний змінювати профіль випромінювання своїх світлодіодів по 36 різних каналів на одиницю, що дозволяє безпрецедентно контролювати придатні для використання спектри з мінімальними витратами часу [4]. У поєднанні з властивими можливостями підключення до мережі та інтеграцією API Python або Labview.dll можна запрограмувати один блок або масив для виконання будь-яких умов наземного освітлення та багато іншого для майже будь-яких мислимих потреб тестування [5]. Світлодіодні сонячні симулятори G2V Sunbrick були розроблені для найвищого ступеня точності та одноманітності для використання під час тестування фотоелектричної системи, фотохімії та

тестування навколишнього середовища. Прилад перевищує вимоги класу AAA, як визначено стандартами, що регулюють моделювання сонячної енергії, зокрема JIS-C8912, IEC 60904-9 та ASTM-E927.

Стандартний Sunbrick постачається з такими характеристиками. Максимальна освітленість 1,1 сонячний еквівалент (83,5 мВт см⁻² базовий спектр від 400 нм до 1100 нм) (точна кількість мВт см⁻² залежить від моделі Sunbrick). Просторова рівномірність опромінення – клас А. Просторова нерівномірність < 2 % понад 400 см² на Sunbrick, як це показано на рисунку 2, можна масштабувати на великих площах.



Рисунок 2 – Розподіл потужності випромінювання по робочій площині

Спектральний діапазон. Видимий (400–700 нм) – модель L. Базовий (400–1100 нм) – модель LMN. Базовий УФ (350–1100 нм) – модель KLMN. Base-NIR (400–1450 нм) – модель LMNO. Спектральна відповідність - класу А, як це показано на рис. 3. Спектральна невідповідність < 5 %. Перевищує ASTM E927 у 5 разів

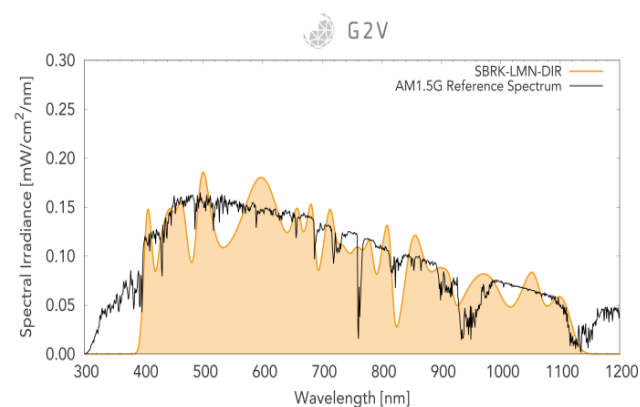


Рисунок 3 – Спектр симулятора сонця Sunbrick у порівнянні із реальним сонячним спектром AM1,5

Кожен з 36 каналів, що входить до складу спектра, можна регулювати від 0 до 100 % за допомогою повзунків (рис. 4). Спектральна діаграма поруч із повзунками окремих каналів оновиться, щоб отримати прогнозований спектр на основі поточних

налаштувань. Цей графік не є вимірюванням у реальному часі, а скоріше це передбачення очікуваної поведінки світлодіода на основі калібрування, коли Sunbrick(и) востаннє були на об'єктах G2V.

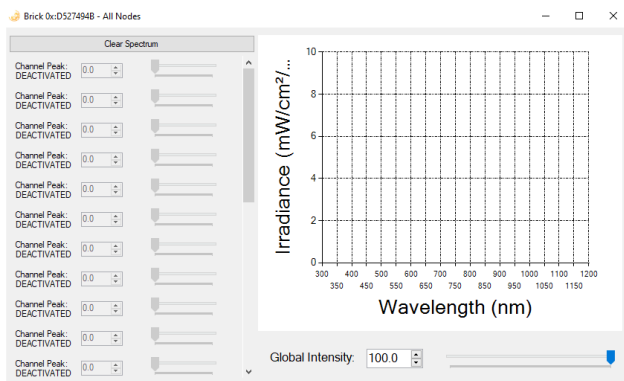


Рисунок 4 – Панель індивідуального контролю спектральних каналів

Робоча відстань 50 см розроблена так, щоб вона була на одній лінії з нижнім краєм дзеркал, і саме тут було проведено калібрування пристрою та характеристику. Будь-яке відхилення від цієї робочої відстані призведе до виходу за межі оптимальної специфікації класу AAA.

Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик компенсаційним методом. Головною відмінністю методу вимірювання ВАХ реалізованого в дипломній роботі була заміна вимірювальної схеми подібної до описаної в [6–8], на сучасний прилад - аналізатор параметрів Source-Measurement Units Keithley Series 2400 (рис. 5), що був підключений до комп'ютера.

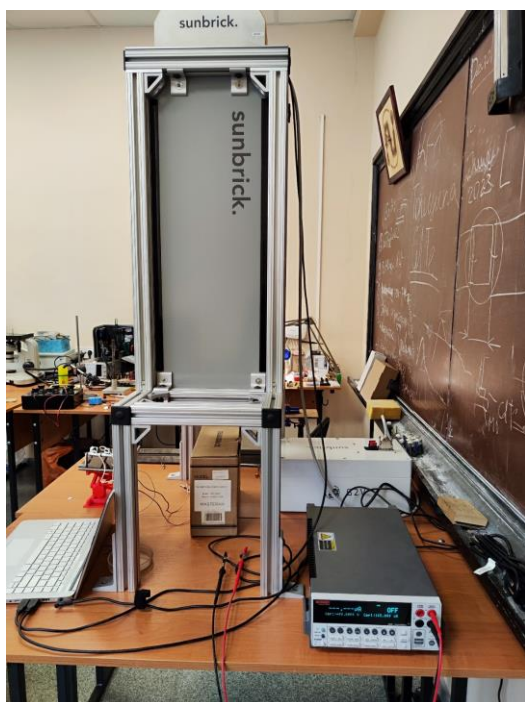


Рисунок 5 – Вимірювальний комплекс із підключеним приладом Keithley Series 2400

Дана модернізація забезпечила проведення вимірювань у автоматичному режимі, що значно пришвидшило проведення експерименту та збільшило точність результату.

Головною особливістю приладу Keithley Series 2400 є його здатність навіть при підключенні за 2-зондовою схемою реалізовувати процес вимірювання ВАХ компенсаційним методом [9], тобто він одночасно працює як джерело струму/напруги так і як вимірювач напруги та струму.

Для керування приладом в процесі вимірювань він був підключений до ноутбуку через спеціалізований GPIB інтерфейс та безпосередньо керування здійснювалось за допомогою програмного забезпечення KickStart2.0 інтерфейс якого наведений на рис. 6.

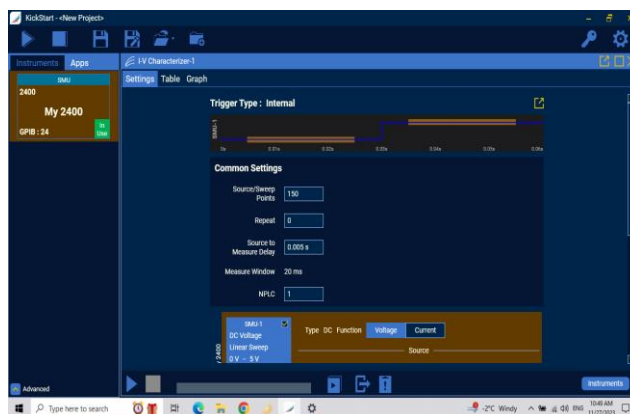


Рисунок 6 – Інтерфейс програмного забезпечення KickStart2.0

Використання подібної програми дозволяє задавати кількість вимірюваних точок ВАХ, крок та межі вимірювання та зберігати результати відразу у файл MS Excel.

Враховуючи малий розмір тестових зразків та намагання уникнути будь-яких пошкоджень струмознімального електроду в ході досліджень було модернізовано наявний на кафедрі контактний пристрій.

Модернізація полягала в заміні попередньо встановлених струмознімальних голок на значно більш короткі та вигнуті у просторі, що дозволило запобігти затіненню зразків такої малої площі елементами контактної пристрою та при цьому забезпечити ефективний та нетравмуючий контакт до сонячних елементів [10, 11].

Загальний вигляд модернізованого контактної пристрою показано на рис. 7.

Для забезпечення точного позиціонування зразка відносно робочої площини симулятора сонця контактний пристрій закріплювався на спеціально розробленому підйомному механізмі, виготовленому методом 3D друку, який являє собою гвинтовий підйомник, що дозволяє плавно регулювати положення сонячного елемента у контактній пристрої відносно робочої площини симулятора для забезпечення його оптимального положення. Загальний вигляд

підйомного механізму із встановленим на ним контактним пристроєм показано на рис. 8.

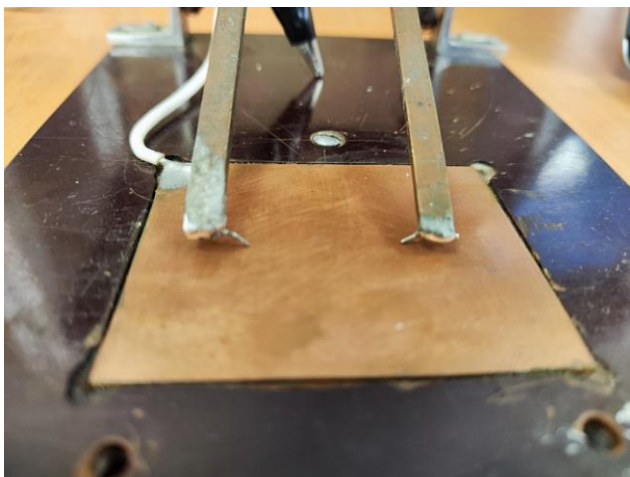


Рисунок 7 – Загальний вигляд модернізованого контактної пристрою



Рисунок 8 – Підйомний механізм виготовлений для точного позионування контактної пристрою в процесі вимірювань

Тестові зразки ФЕП. В якості тестових зразків за допомогою яких проводилась апробація імітатора сонця були використані дві серії високоефективних сонячних елементів із площею поверхні 10×10 мм, що були вироблені компанією Spectrolab та мали триперехідну конструкцію на основі арсеніду галію. Загальний вигляд тестових зразків показано на рис. 9.

Більш детально тестовий зразок та його характерні розміри показані на рис. 10.

Основні конструктивні особливості тестових ФЕП – СЗМІ⁺ покращена технологія CPV третього покоління.

Типовий ККД 39,2 % при потужності опромінювання 50 Вт/см².

Рекомендована робоча температура <math>< 110 \text{ }^\circ\text{C}</math>.

Тестові ФЕП виготовлені за епітаксальною технологією з потрійним переходом на германієвій підкладці – GaInP (1,88 eV) / GaInAs (1,41 eV) / Ge (0,67 eV).

Металізація:

- Срібна металізація на передній шині та гребінчастому електроді (необов'язкове золотисте покриття).

- Срібна металізація із золотом 500Å на задній поверхні.

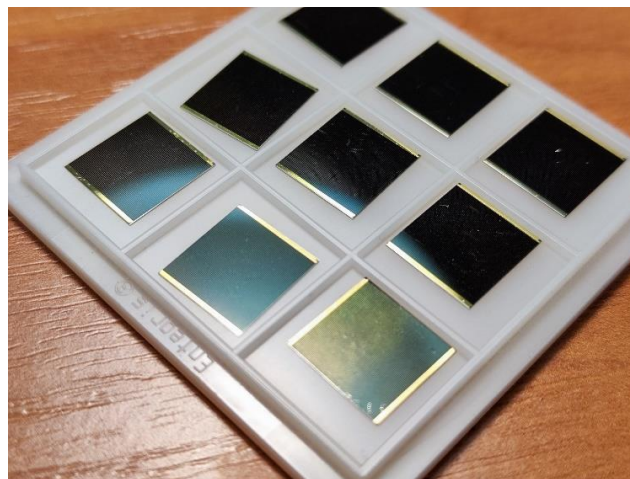


Рисунок 9 – Загальний вигляд тестових зразків ФЕП

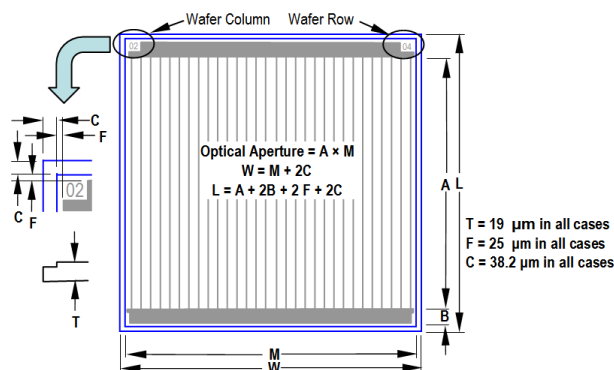
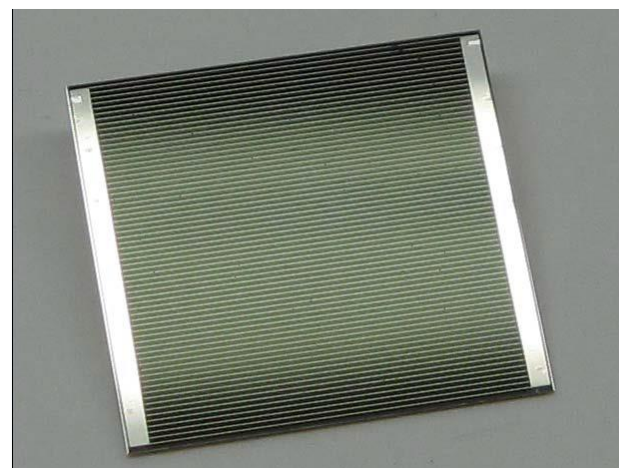


Рисунок 10 – Детальне зображення особливостей конструкції тестових зразків ФЕП

Експериментальна апробація. В ході апробації вимірювального комплексу було перевірено можливість імітатора працювати в режимах зі зменшеною та збільшеною потужністю. На рис. 11

показано робочу площину імітатора під час роботи в режимах 0,3 AM1,5, 0,5 AM1,5 та 1,1 AM1,5 [12].

Важливим етапом апробації імітатора сонця було дослідження температурної стабільності випромінюючого елемента під час тривалої роботи. Оскільки джерелом світла у приладі виступають світлодіоди які як відомо вкрай чутливі до дотримання відповідної робочої температури. Для цього були проведені дослідження, що включали в себе роботу імітатора на різних величинах потужності протягом 30 хв які підтвердили здатність системи охолодження підтримувати температуру випромінюючого елемента на рівні не вище 30 °С.

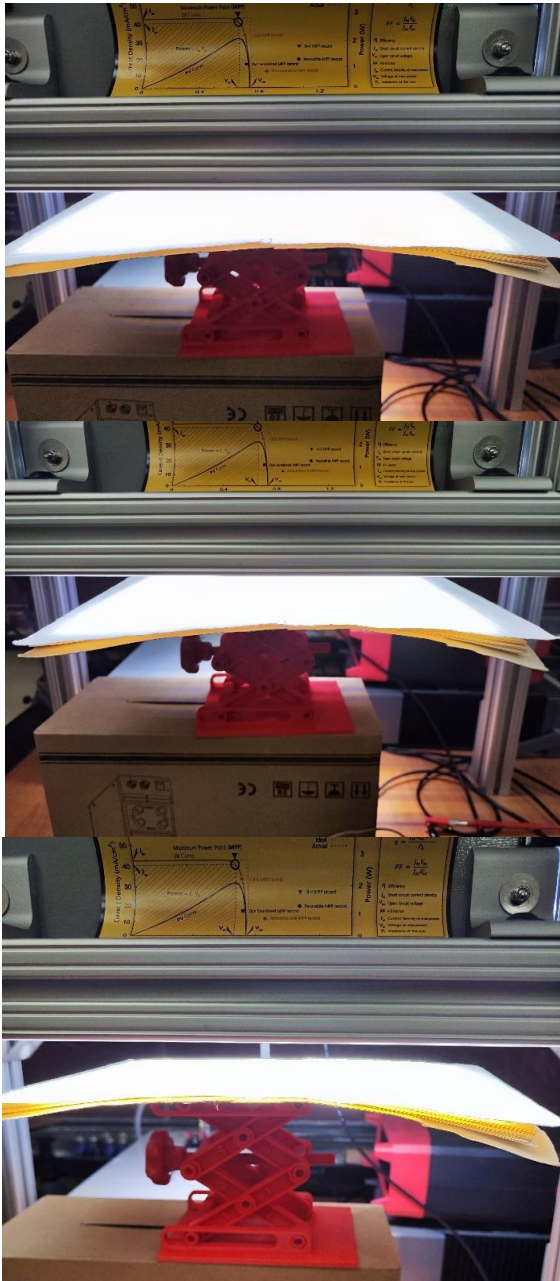


Рисунок 11 – Робоча площина імітатора під час роботи в режимі 0,3 AM1,5, 0,5 AM1,5 та 1,1 AM1,5

Із документації виробника відомо, що імітатор сонця Sunbrick має можливість індивідуального

налаштування кожного з 36 каналів випромінюючого елемента, що додає гнучкості в його використання під час дослідження як ФЕП в цілому так і властивостей функціональних напівпровідникових матеріалів шляхом опромінення монохроматичним або змішаним освітленням.

На рис. 12 показано скріншот програми керування в режимі індивідуального керування спектральним складом випромінювання.

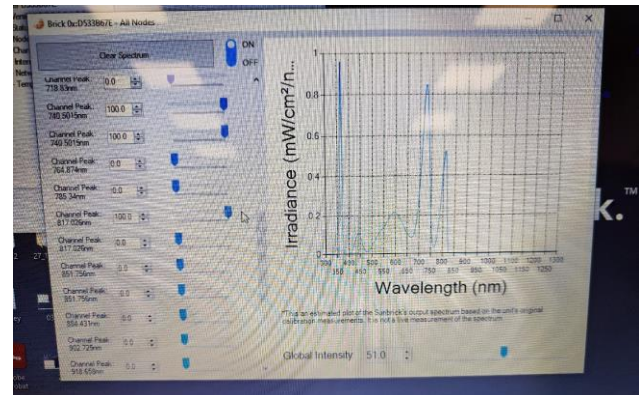


Рисунок 12 – Вікно програми керування в режимі індивідуального керування спектральним складом випромінювання

На рис. 13 та 14 показано робочу площину імітатора при роботі в протестованих режимах випромінювання монохроматичного та змішаного випромінювання.

На рис. 15 показано скріншот екрану ноутбуку із графічним інтерфейсом програми керування вимірювальним комплексом під час проведення досліджень.

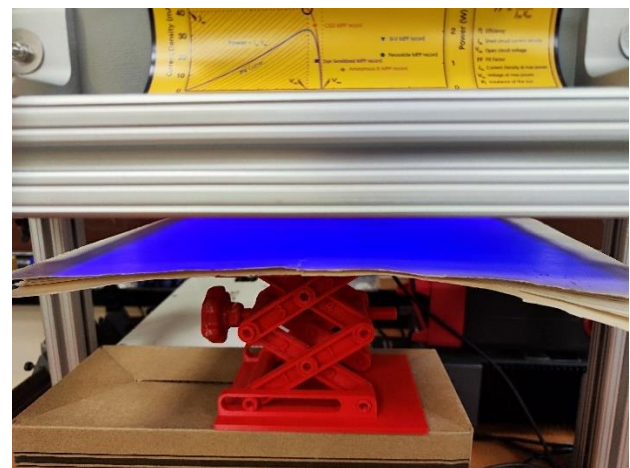


Рисунок 13 – Робоча площина імітатора при роботі в протестованих режимах випромінювання монохроматичного та змішаного випромінювання

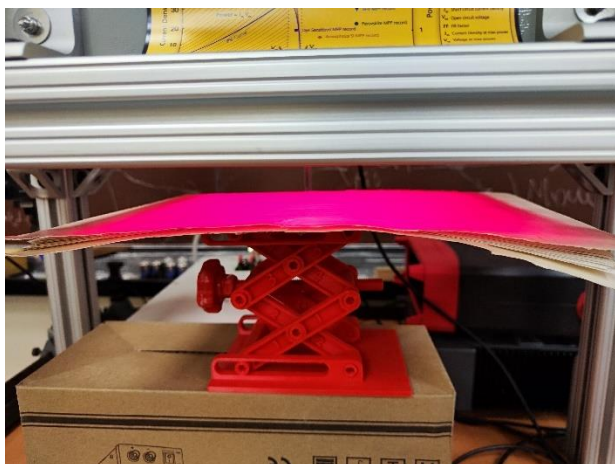


Рисунок 14 – Робоча площина імітатора при роботі в протестованих режимах випромінювання монохроматичного та змішаного випромінювання

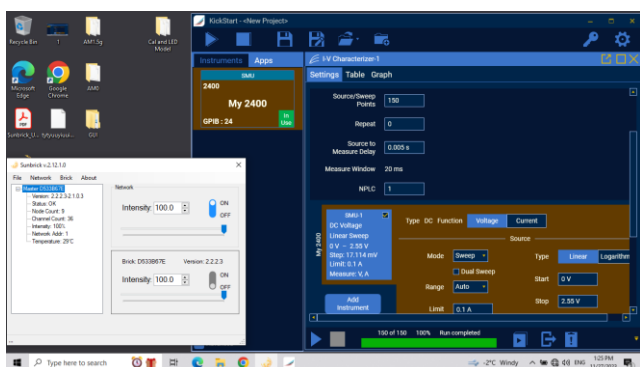


Рисунок 15 – Графічний інтерфейс програм керування вимірювальним комплексом під час проведення досліджень

В ході проведення досліджень було виявлено, що за виглядом вольт-амперної характеристики тестові зразки ФЕП можна було розділити на 2 групи. Більша частина належала до групи 1 та характеризувалася близькою до квадратної формою ВАХ і, відповідно мали дуже високі значення фактора заповнення та ККД. Типові зразки ВАХ для ФЕП групи 1 наведено на рис. 16 та 17.

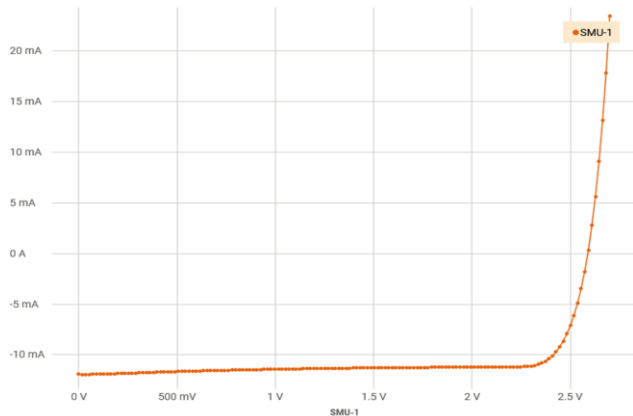


Рисунок 16 – Вольт-амперні характеристики, характерні для досліджуваних ФЕП групи 1

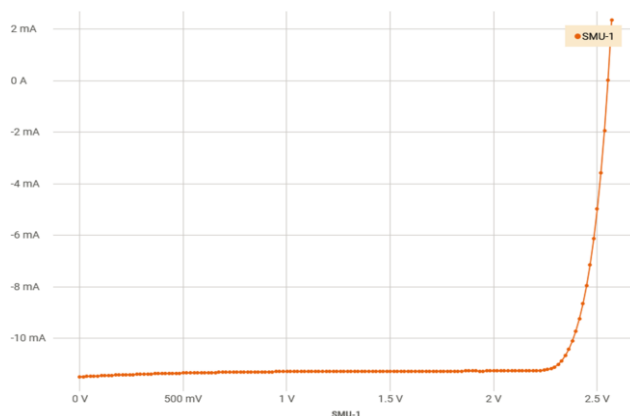


Рисунок 17 – Вольт-амперні характеристики, характерні для досліджуваних ФЕП групи 1

До групи 2 можна віднести зразки, що мали неідеальну форму ВАХ [13], зумовлену скоріше за все наявністю надлишкового послідовного опору, як це можна побачити з рис. 18 та 19.

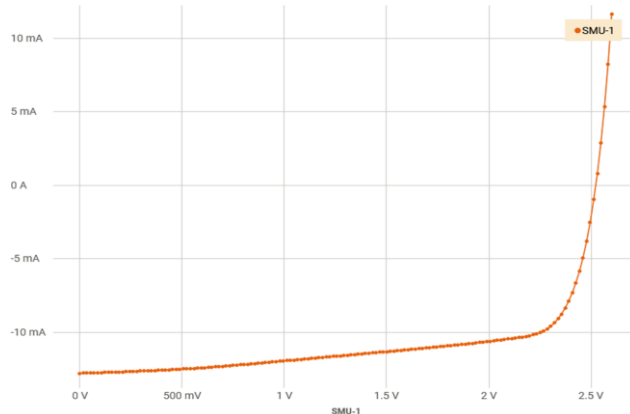


Рисунок 18 – Вольт-амперні характеристики, характерні для досліджуваних ФЕП групи 2

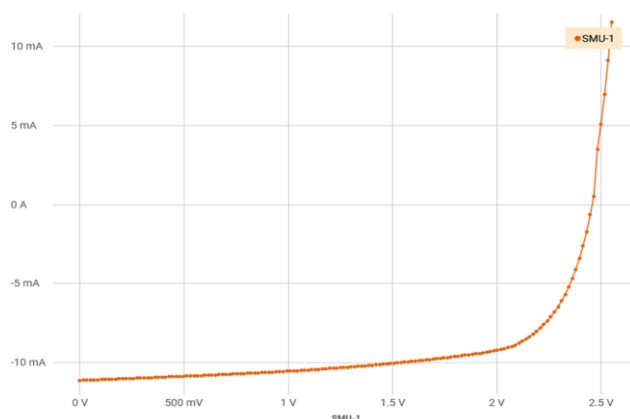


Рисунок 19 – Вольт-амперні характеристики, характерні для досліджуваних ФЕП групи 2

Таким чином за рахунок експресності проведення досліджень та можливості одразу візуалізувати вимірюну ВАХ на екрані комп'ютера можна суттєво

пришвидшити процес дослідження ФЕП. Так можна відразу проводити розподіл досліджених ФЕП за групами відносно їх ефективності та визначати присутність можливих дефектів або пошкоджень у їх структурі.

Висновки. За результатами виконання роботи проведено ознайомлення з будовою, принципом роботи комплексу для вимірювання світлових вольт-амперних на основі імітатора сонця Sunbrick.

Проведено апробацію вимірювального комплексу на основі імітатора сонця Sunbrick шляхом відтворення різних режимів роботи імітатора та перевірено можливості керування спектральним складом.

Виміряно світлові вольт-амперні характеристики тестових зразків ФЕП. В ході апробації вимірювального комплексу було підтверджено можливість імітатора працювати в режимах зі зменшеною та збільшеною потужністю, зокрема в режимах 0,3 АМ1,5, 0,5 АМ1,5 та 1,1 АМ1,5. Експериментально встановлено, що апробований імітатор сонця може стабільно працювати в режимах 0,3 АМ1,5, 0,5 АМ1,5 та 1,1 АМ1,5 протягом не менш ніж 30 хв без зростання температури випромінюючого блоку вище 30 °С.

Апробовано можливість індивідуального налаштування кожного з 36 каналів випромінюючого елемента, що додає гнучкості в використанні імітатора сонця Sunbrick під час дослідження як ФЕП в цілому так і властивостей функціональних напівпровідникових матеріалів шляхом опромінення монохроматичним або змішаним освітленням.

Показано, що за рахунок експресності проведення досліджень та можливості одразу візуалізувати вимірювання ВАХ на екрані комп'ютера можна суттєво пришвидшити процес дослідження ФЕП. Так можна відразу проводити розподіл досліджених ФЕП за групами відносно їх ефективності та визначати присутність можливих дефектів або пошкоджень у їх структурі.

Подяка. Хочемо висловити щире вдячність компанії G2V Optics (Канада) за їхню великодушну підтримку та благодійний внесок у дослідження авторів. Обладнання LED Solar Simulator SunBrick та комплект програмного забезпечення, надані компанією, виявилися важливим інструментом для експериментів та високоточних вимірювань. Ця технологія визначає новий стандарт у галузі імітування сонячного випромінювання, і автори вдячні за можливість використовувати її у своїй роботі.

Надане обладнання не тільки полегшило дослідження, а й розширило можливості лабораторії «Оптики та фотоники» НТУ «ХПІ». Впевнені, що результати отриманих даних стануть важливим внеском у розвиток науки та допоможуть у розумінні ключових аспектів в області розробки високоефективних сонячних елементів. Ще раз велика подяка G2V Optics за їхню високоякісну продукцію та партнерство.

Список літератури

- Garg H. P., Agarwal R. K. Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells. *Energy Conversion and Management*. 1995. Vol. 36, no. 2. P. 87–99. DOI: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)00046-3](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)00046-3).
- Zondag H. A., de Vries D. W., van Helden W. G. J., van Zolingen R. J. C., van Steenhoven A. A. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*. 2003. Vol. 74, no. 3. P. 253–269. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(03\)00121-x](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(03)00121-x).
- Paudel N. R., Wieland K. A., Compaan A. D. Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012. Vol. 105. P. 109–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.05.035>.
- Zaitsev R. V., Kirichenko M. V., Khrypunov G. S. et al Operating temperature effect on the thin film solar cell efficiency. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2019. Vol. 11, no. 4. P. 04029–1–04029–5. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(4\).04029](https://doi.org/10.21272/jnep.11(4).04029).
- Virtuani A., Pavanello D., Friesen G. Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (25th EU PVSEC) and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-5)*, Valencia, Spain, 6–10 September 2010. P. 4248–4252. DOI: <https://doi.org/10.4229/25thEUPVSEC2010-4AV.3.83>.
- Perraki V., Tsolkas G. Temperature dependence on the photovoltaic properties of selected thin-film modules. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2013. Vol. 2, no. 4. P. 140. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20130204.12>.
- Singh P., Ravindra N. M. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012. Vol. 101. P. 36–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019>.
- Hädrieh M., Heisler C., Reislöhner U., Kraft C., Metzner H. Back contact formation in thin cadmium telluride solar cells. *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519, no. 21. P. 7156–7159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.144>.
- Han J., Spanheimer C., Haindl G. et al Optimized chemical bath deposited CdS layers for the improvement of CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95, no. 3. P. 816–820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.027>.
- Krishnakumar V., Barati A., Schimper H.-J., Klein A., Jaegermann W. A possible way to reduce absorber layer thickness in thin film CdTe solar cells. *Thin Solid Films*. 2013. Vol. 535. P. 233–236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.11.085>.
- Zaitsev R. V. Modeling of an advanced heat exchange unit with microchannels for a combined photoenergy system. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. No. 3. P. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.3.08>.
- Salavei A., Rimmaudo I., Piccinelli F., Zabierowski P., Romeo A. Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2013. Vol. 112. P. 190–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.01.019>.
- Sites J., Pan J. Strategies to increase CdTe solar-cell voltage. *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515, no. 15. P. 6099–6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.147>.

References

- H. P. Garg and R. K. Agarwal, “Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells”, *Energy Conversion and Management*, vol. 36, no. 2, pp. 87–99, Feb. 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)00046-3](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)00046-3)
- H. A. Zondag, D. W. de Vries, W. G. J. van Helden, R. J. C. van Zolingen, and A. A. van Steenhoven, “The yield of different combined PV-thermal collector designs”, *Solar Energy*, vol. 74, no. 3, pp. 253–269, Mar. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(03\)00121-x](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(03)00121-x)
- N. R. Paudel, K. A. Wieland, and A. D. Compaan, “Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 105, pp. 109–112, Oct. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.05.035>
- R. V. Zaitsev et al., “Operating temperature effect on the thin film solar cell efficiency”, *Journal of Nano- And Electronic Physics*,

- vol. 11, no. 4, 2019, Art. no. 04029, doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(4\).04029](https://doi.org/10.21272/jnep.11(4).04029)
5. A. Virtuani, D. Pavanello, and G. Friesen, "Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies", in *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (25th EU PVSEC) and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-5)*, Valencia, Spain, Sep. 6–10, 2010, pp. 4248–4252, doi: <https://doi.org/10.4229/25thEUPVSEC2010-4AV.3.83>
 6. V. Perraki and G. Tsolkas, "Temperature dependence on the photovoltaic properties of selected thin-film modules", *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, p. 140, 2013, doi: <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20130204.12>
 7. P. Singh and N. M. Ravindra, "Temperature dependence of solar cell performance—an analysis", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 101, pp. 36–45, Jun. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019>
 8. H. Hädrich, C. Heisler, U. Reislöhner, C. Kraft, and H. Metzner, "Back contact formation in thin cadmium telluride solar cells", *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 21, pp. 7156–7159, Aug. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.144>
 9. J. Han et al., "Optimized chemical bath deposited CdS layers for the improvement of CdTe solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 3, pp. 816–820, Mar. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.027>
 10. V. Krishnakumar, A. Barati, H.-J. Schimper, A. Klein, and W. Jaegermann, "A possible way to reduce absorber layer thickness in thin film CdTe solar cells", *Thin Solid Films*, vol. 535, pp. 233–236, May 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.11.085>
 11. R. V. Zaitsev, "Modeling of an advanced heat exchange unit with microchannels for a combined photoenergy system", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 57–62, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.3.08>
 12. A. Salavei, I. Rimmaudo, F. Piccinelli, P. Zabierowski, and A. Romeo, "Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 112, pp. 190–195, May 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.01.019>
 13. J. Sites and J. Pan, "Strategies to increase CdTe solar-cell voltage", *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 15, pp. 6099–6102, May 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.147>

Надійшла (received) 15.12.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Кіриченко Михайло Валерійович (Mykhailo Kirichenko) – кандидат технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4847-506X>; e-mail: mykhailo.kirichenko@khp.edu.ua.

Зайцев Роман Валентинович (Roman Zaitsev) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-8452>; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна (Kseniia Minakova) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-1082>; e-mail: ksenii.minakova@khp.edu.ua.

Воробйов Богдан Віталійович (Bohdan Vorobiev) – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0264-354X>; e-mail: bohdan.vorobiov@khp.edu.ua.

Шкода Дмитро Сергійович (Dmytro Shkoda) – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5025-1946>; e-mail: dmytro.shkoda@infiz.khp.edu.ua.

Лелюк Станіслав Юрійович (Stanislav Leliuk) – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4897-1585>; e-mail: stanislav.leliuk@infiz.khp.edu.ua.