

УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ КОНЦЕНТРОВАНОГО СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

К. т. н. Р. М. Коркішко, д. ф-м. н. В. П. Костильов, к. ф-м. н. В. В. Черненко,
Б. Ф. Дверніков, чл.-кор., д. ф-м. н. В. М. Сорокін

Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України
Україна, м. Київ
romkin.ua@gmail.com

Представлено результати розроблення та виготовлення концентраторної установки на основі лінзи Френеля, призначеної для використання у складі стендової бази Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних ІФН імені В. Є. Лашкарьова НАНУ при проведенні фотоелектричних випробувань кремнієвих сонячних елементів в спектральних умовах АМ1.5 при концентрованих потоках наземного сонячного випромінювання зі ступенем концентрації від 1 до 200X.

Ключові слова: кремнієві сонячні елементи, концентроване сонячне випромінювання, фотоелектричні характеристики, установка.

Значне зменшення запасів сировини для традиційної енергетики спонукає країни світової спільноти, в тому числі й Україну, дедалі більше уваги приділяти активному пошуку шляхів альтернативного енергозабезпечення. Сонячні електростанції, які працюють за принципом прямого перетворення сонячної енергії в електричну, є надійними, високоефективними, компактними джерелами енергії, отриманої альтернативним способом. Підвищення ефективності фотоперетворення сонячних елементів (СЕ) і, як наслідок, зменшення вартості отриманої від них енергії — основний і пріоритетний напрямок розвитку сонячної енергетики [1]. Сонячні електростанції, побудовані з використанням монокристалічного та мультикристалічного кремнію, забезпечують основну частину електроенергії, одержаної фотоелектричним способом. Одним з ефективних методів зменшення вартості виробництва одиниці електричної енергії є використання концентраторних систем фотоелектричного перетворення енергії з більш дешевими кремнієвими СЕ малої площі, адже для їх виготовлення потрібно значно менше відносно дорогого напівпровідникового матеріалу, вартість якого складає близько 50% вартості готового сонячного модуля [2]. В таких системах СЕ працюють при рівнях енергетичної освітленості до $10^5 - 10^6$ Вт/м², що перевищує рівень освітленості земної поверхні в 100 – 1000 разів (ступінь концентрації 100X – 1000X). При цьому відбувається заміна дорогих СЕ дешевими концентраторами (наприклад, пластмасовими лінзами Френеля), що зменшує вартість одиниці отриманої енергії.

Для удосконалення технології виготовлення кремнієвих СЕ, призначених для використання в концентраторних режимах, дослідження їх основних характеристик і визначення параметрів при проведенні випробувань в умовах концентрації сонячного випромінювання необхідне відповідне апаратне забезпечення, тому важливою науково-технічною задачею є розроблення такого обладнання.

Метою цієї роботи було розроблення та виготовлення концентраторної установки на основі лінзи Френеля для вимірювання фотоелектричних характеристик кремнієвих СЕ в умовах концентрації сонячного випромінювання і визначення основних фотоелектричних параметрів СЕ.

Розроблена та виготовлена установка використовується для проведення випробувань кремнієвих СЕ розмірами до 25×25 мм при їх освітленні потоком наземного сонячного випромінювання зі ступенем концентрації від 1 до 200X (рівень освітленості від 10^3 до $2 \cdot 10^5$ Вт/м²). На рис. 1 наведено структурну схему цієї концентраторної установки та її зовнішній вигляд з основними вузлами. Установка складається з металевої основи, на якій закріплені робочий столик з контактною системою та активним охолодженням і електромеханічною системою затінення, блоку керування електромеханічною системою затінення, вузла кріплення лінзи, на якому змонтована лінза Френеля та ручної системи орієнтації у напрямку Сонця.

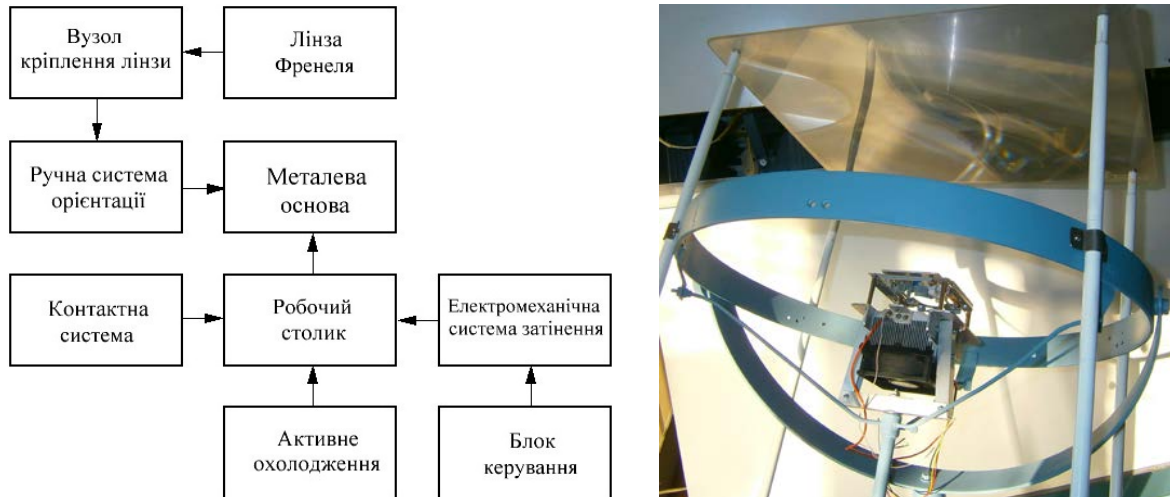


Рис. 1. Структурна схема та зовнішній вигляд концентраторної установки

Пластмасова лінза Френеля концентрує сонячне випромінювання на експериментальний зразок СЕ. Вузол кріплення лінзи забезпечує надійне кріплення лінзи на металевій основі установки та дозволяє легко її переміщати, змінюючи відстань між нею і робочим столиком, і тим самим змінювати ступінь концентрації сонячного випромінювання в робочій зоні установки; направляти оптичну вісь лінзи на Сонце; фіксувати лінзу під певним кутом до поверхні Землі. Орієнтація оптичної осі лінзи на Сонце в процесі випробувань здійснюється за допомогою ручної системи орієнтації. Робочий столик, який слугує для розміщення випробовуваних зразків кремнієвих СЕ та забезпечує їх надійне кріплення і незмінне положення в процесі випробувань, складається з масивного алюмінієвого радіатора з площею робочої поверхні 400 см², на якому змонтована контактна система для електричного під'єднання до СЕ. В процесі проведення вимірювань в умовах концентрованого сонячного випромінювання робочий столик з тилової сторони охолоджується за допомогою вентилятора, а з його фронтальної сторони розміщено електромеханічну систему затінення, яка забезпечує затінення СЕ між вимірюваннями для зменшення його нагрівання в проміжках між випробуваннями. Керування системою затінення здійснюється за допомогою розробленого на основі плати мікроконтролера Arduino Uno блока керування, для якого було створене відповідне програмне забезпечення.

На рис. 2 приведені зовнішній вигляд робочого столика концентраторної установки із контактною системою, системою активного охолодження і електромеханічною системою затінення (а) та зовнішній вигляд блока керування електромеханічною системою затінення (б). Розроблена концентраторна установка дає можливість провести вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ) і визначити фотоелектричні параметри кремнієвих СЕ: струм короткого замикання; напругу розімкненого кола; коефіцієнт форми ВАХ, ефективність фотоперетворення. Вимірювання світлових ВАХ і визначення з них фотоелектричних параметрів випробовуваних СЕ здійснюється за допомогою мікропроцесорного вимірювача фотоелектричних параметрів «ФОТОН-3», розробленого та виготовленого в ІФН. Для проведення випробувань, зразок СЕ встановлюється на робочому столику, на нього опускаються контакти. Далі зразок СЕ під'єднується до входних клем вимірювача. Після цього необхідно підготувати прилад «ФОТОН-3» для проведення вимірювань, відкрити захист електромеханічної системи затінення та провести вимірювання світлової ВАХ СЕ згідно з рекомендаціями щодо експлуатації вимірювача. Час неперервного освітлення поверхні зразка СЕ концентрованим сонячним випромінюванням в процесі вимірювання світлових ВАХ приладом «ФОТОН-3» не перевищує 3 – 5 с, після чого світловий потік перекривається за допомогою захисту електромеханічної системи затінення.

Розроблена та виготовлена в цій роботі концентраторна установка має такі технічні характеристики: площа лінзи Френеля 0,1 м², фокусна відстань не менше 300 мм, діапазон зміни енергетичної освітленості (AM1.5) поверхні робочого столика розміром 25×25 мм 10³ – 2·10⁵ Вт/м² (ступінь концентрації від 1 до 200X), точність наведення оптичної осі концентратора на Сонце ±10°, неоднорідність розподілу енергетичної освітленості по поверхні робочого столика 25×25 мм не більше 10%.

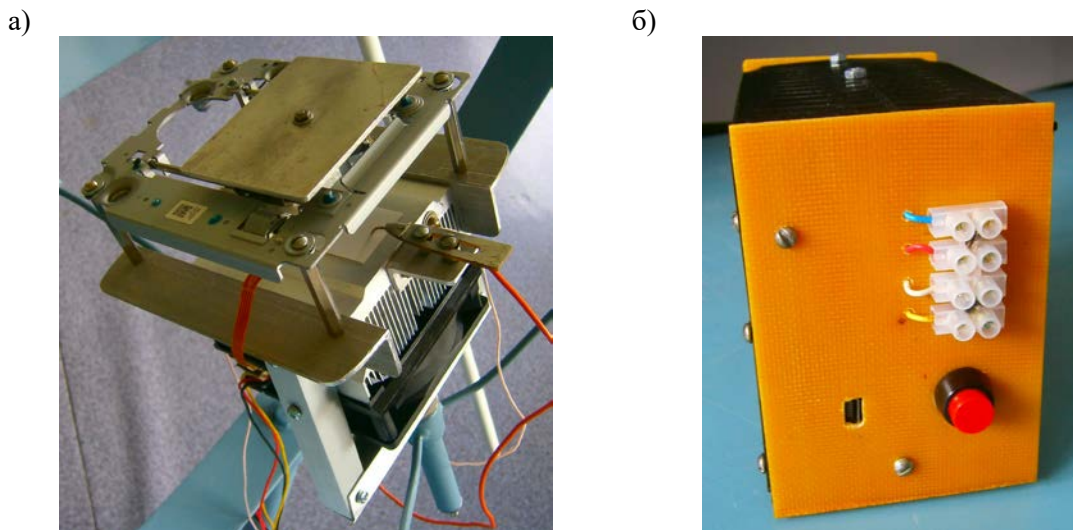


Рис. 2. Робочий столик для дослідження зразків кремнієвих СЕ (а) та блок керування електромеханічною системою затінення (б)

Для перевірки роботи концентраторної установки на ній було проведено дослідження фотоелектричних характеристик кремнієвих СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами при концентрованому сонячному випромінюванні (ступінь концентрації від 1 до 100X) в умовах натурного Сонця. З виміряних світлових ВАХ визначено їхні фотоелектричні параметри — струм короткого замикання, напругу розімкненого кола, коефіцієнт заповнення ВАХ та ефективність фотоперетворення. Отримані значення збігаються з результатами моделювання. Такі СЕ мають структуру $p^{++}-p^{+}-n-n^{+}$, виготовлені на основі кремнію n -типу марки КБЕ-2 з питомим опором 2 – 3 Ом·см, мають мінімізований питомий послідовний опір близько 0,035 Ом·см², геометричні розміри 5×5 мм.

Таким чином, підтверджено, що створена установка придатна для проведення фотоелектричних випробувань СЕ при потоках наземного сонячного випромінювання із ступенем концентрації від 1 до 200X. Проведено вимірювання світлових ВАХ кремнієвих СЕ при концентрованому сонячному випромінюванні в діапазоні до 100X та визначено їх фотоелектричні параметри. Встановлено, що в процесі вимірювань ці СЕ нагріваються до температури, яка не перевищує 80°C, що свідчить про достатньо ефективний тепловідвід при проведенні випробувань. Надалі планується провести випробування зазначених вище зразків кремнієвих СЕ при концентрованому до рівня 200X натурному сонячному випромінюванні та визначити їх фотоелектричні параметри.

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2022.01/0037).

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Green M. A., Dunlop E. D., Yoshita M. Solar cell efficiency tables (Version 63). *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2023, 32, pp. 3–13. <https://doi.org/10.1002/pip.3750>
2. Костильов В. П., Коркішко Р. М., Мелак В. Г. та ін. Кремнієві фотоперетворювачі сонячної енергії з дифузійно-польовими бар'єрами для роботи в концентраторних установках. *Збірник наукових праць IX Міжнародної наукової конференції «Функціональна база наноелектроніки»*, Україна, Харків – Одеса, 2017, с. 124–127.

R. M. Korkishko, V. P. Kostylyov, V. V. Chernenko, B. F. Dvernikov, V. M. Sorokin

Equipment for determining of photovoltaic parameters of silicon solar cells under concentrated solar irradiation

The paper presents the results of the development and manufacture of a concentrator equipment based on a Fresnel lens. The equipment is intended for use as part of the Center for testing photoconverters and photoelectric batteries at the V. Lashkaroyv Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine during photovoltaic tests of silicon solar cells in AM1.5 spectral conditions with concentrated terrestrial solar irradiation with a degree of concentration from 1 to 200X.

Keywords: silicon solar cells, concentrated solar irradiation, photovoltaic characteristics, equipment.