

К. т. н. Р. М. КОРКИШКО, к. ф-м. н. В. М. ВЛАСЮК, д. ф-м. н. В. П. КОСТИЛЬОВ,  
к. ф-м. н. В. В. ЧЕРНЕНКО, Б. Ф. ДВЕРНИКОВ

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

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РОБОТИ В РЕЖИМІ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАЗЕМНОГО СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Представлено результати оптимізації конструкції та удосконалення технології виготовлення кремнієвих сонячних елементів, призначених для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання, а також конструкторсько-технологічні рішення щодо розроблення та виготовлення концентраторної установки на основі лінзи Френеля, призначеної для використання у складі стендової бази Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України при проведенні фотоелектричних випробувань кремнієвих сонячних елементів в спектральних умовах АМ1.5 за концентрованих потоків наземного сонячного випромінювання із ступенем концентрації від 1X до 200X.*

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

Значне зменшення запасів сировини для традиційної енергетики спонукає країни світової спільноти, зокрема й Україну, дедалі більше уваги приділяти активному пошуку шляхів альтернативного енергозабезпечення [1–3]. Сонячні електростанції, які працюють за принципом прямого перетворення сонячної енергії в електричну, є надійними, ефективними, компактними джерелами енергії, отриманої альтернативним способом [4, 5]. Підвищення ефективності фотоперетворення сонячних елементів (СЕ) і, як наслідок, зменшення вартості отриманої від них енергії — основний і пріоритетний напрямок розвитку сонячної енергетики [6, 7]. Сонячні електростанції, побудовані з використанням моно- та мультикристалічного кремнію, забезпечують основну частину електроенергії, одержаної фотоелектричним (ФЕ) 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 напівпровідникового матеріалу, вартість якого складає близько 50% вартості готового сонячного модуля [8–11]. В таких системах СЕ працюють при рівнях енергетичної освітленості до  $10^5$ – $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, що перевищує рівень освітленості земної поверхні в 100–1000 разів (ступінь концентрації 100X–1000X), при цьому дорогі СЕ замінюються дешевими концентраторами (наприклад, пластмасовими лінзами Френеля), а це зменшує вартість одиниці отриманої енергії. Для удосконалення конструкції і технології виготовлення кремнієвих СЕ, призначених для використання в концентраторних режимах,

дослідження їхніх основних характеристик і визначення параметрів при проведенні випробувань в умовах концентрації сонячного випромінювання необхідне відповідне апаратне забезпечення.

Метою цієї роботи є розроблення рішень з оптимізації конструкції та удосконалення технології виготовлення кремнієвих сонячних елементів, призначених для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання, а також визначення фотоелектричних характеристик кремнієвих СЕ в зазначених умовах за допомогою створеної концентраторної установки на основі лінзи Френеля.

### Конструктивно-технологічні особливості установки для визначення фотоелектричних параметрів кремнієвих сонячних елементів

Розроблена та виготовлена концентраторна установка [12] використовується для проведення випробувань кремнієвих СЕ з геометричними розмірами до 25×25 мм при їх освітленні потоками наземного сонячного випромінювання зі ступенем концентрації від 1X до 200X (рівень освітленості від  $10^3$  до  $2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>). Структурна схема цієї установки, що складається з металевої основи із закріпленим на ній робочим столиком з контактною системою, активним охолодженням і електромеханічною (ЕМ) системою затінення, блоку керування системою затінення, вузла кріплення лінзи, на якому змонтована лінза Френеля, та ручної системи орієнтації у напрямку Сонця, наведена на **рис. 1**, а її зовнішній вигляд та розташування основних вузлів — на **рис. 2**.

Пластмасова лінза Френеля концентрує сонячне випромінювання на експериментальний зразок СЕ. Вузол кріплення лінзи забезпечує надійне кріплен-

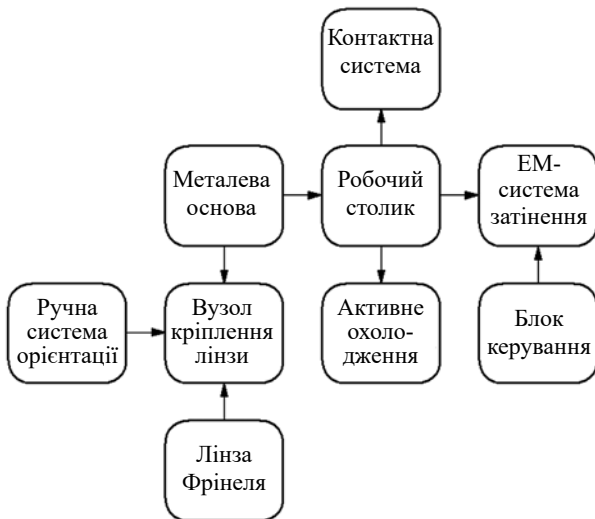


Рис. 1. Структурна схема концентраторної установки для визначення ФЕ-параметрів кремнієвих СЕ

ня лінзи на металевій основі установки, а також дозволяє легко її переміщати й, змінюючи відстань між нею і робочим столиком, змінювати ступінь концентрації сонячного випромінювання в робочій зоні установки, направляти оптичну вісь лінзи на Сонце, фіксувати лінзу під певним кутом до поверхні Землі. Орієнтування оптичної осі лінзи на Сонце в процесі випробувань здійснюється за допомогою ручної системи орієнтації.

Робочий столик складається з масивного алюмінієвого радіатора з площею робочої поверхні 400 см<sup>2</sup>, на якому змонтована контактна система для електричного під'єднання до випробовуваних зразків СЕ, він забезпечує їх надійне кріплення і незмінне положення у ході випробувань.

В процесі проведення вимірювань в умовах концентрованого сонячного випромінювання робочий



Рис. 2. Зовнішній вигляд та розташування вузлів концентраторної установки:

1 — пластмасова лінза Френеля; 2 — металева основа для встановлення концентратора на горизонтальній поверхні; 3 — вузол кріплення лінзи Френеля до корпусу концентратора; 4 — система ручної орієнтації в напрямку Сонця; 5 — робочий столик

столик з тилової сторони охолоджується потоком повітря від вентилятора, а на його фронтальній стороні розміщується електромеханічна система, яка забезпечує затінення СЕ між випробуваннями для зменшення його нагрівання в ці проміжки часу. Керування системою затінення здійснюється за допомогою розробленого на основі плати мікроконтролера Arduino Uno блока керування, для якого було створене відповідне програмне забезпечення.

На рис. 3 наведено зовнішній вигляд робочого столика концентраторної установки із контактною системою, системою активного охолодження та ЕМ-системою затінення, а також зовнішній вигляд блока керування останньою. Розроблена концентраторна установка дає можливість проводити вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ) і визначати фотоелектричні параметри кремнієвих СЕ:

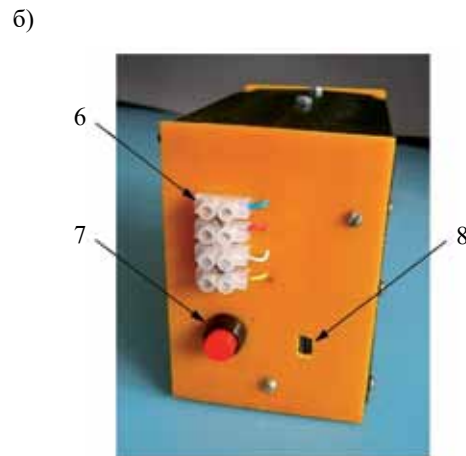
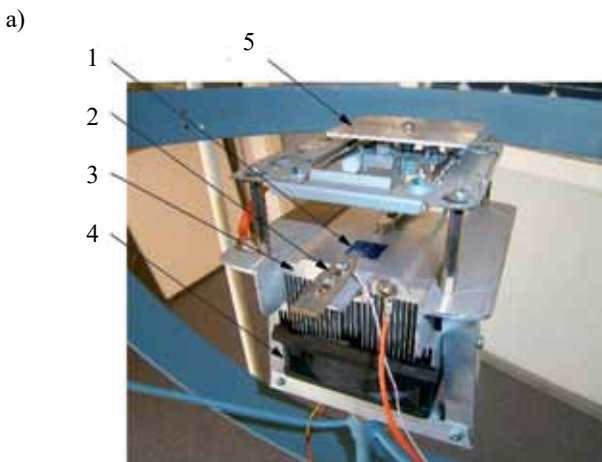


Рис. 3. Робочий столик концентраторної установки (а) та блок керування електромеханічною системою затінення (б): 1 — зразок СЕ; 2 — контактна система; 3 — алюмінієвий радіатор; 4 — вентилятор; 5 — електромеханічна система затінення; 6 — клеми для підключення системи 5; 7 — кнопка керування системою 5; 8 — роз'єм (mini USB) для програмування Arduino Uno

струм короткого замикання, напругу розімкненого кола, коефіцієнт форми ВАХ, ефективність фотоперетворення. Вимірювання світлових ВАХ і визначення з них фотоелектричних параметрів СЕ при проведенні випробувань здійснюється за допомогою мікропроцесорного вимірювача ФЕ-параметрів «ФОТОН-3», розробленого та виготовленого в нашому Інституті. Зразок СЕ встановлюється на робочому столику, на нього опускаються контакти та під'єднуються до входних клем вимірювача, відкривається захист системи затінення та проводяться вимірювання світлової ВАХ. Час безперервного освітлення поверхні зразка СЕ концентрованим сонячним випромінюванням в процесі вимірювання світлових ВАХ приладом «ФОТОН-3» не перевищує 3–5 секунд, після чого світловий потік перекидається за допомогою системи затінення.

Розроблена та виготовлена концентраторна установка має такі технічні характеристики:

площа лінзи Френеля — 0,1 м<sup>2</sup>;

фокусна відстань — не менше 300 мм;

діапазон зміни енергетичної освітленості (AM1.5) поверхні робочого столика 25×25 мм — 10<sup>3</sup>–2·10<sup>5</sup> Вт/м<sup>2</sup> (ступінь концентрації сонячного випромінювання від 1Х до 200Х);

точність наведення оптичної осі концентратора на Сонце — ±10°;

неоднорідність розподілу енергетичної освітленості по поверхні робочого столика 25×25 мм — не більше 10%.

#### Експериментальні зразки кремнієвих СЕ

В Україні провідне місце серед вітчизняних розробників сучасних кремнієвих СЕ космічного та наземного призначення посідає ІФН НАНУ, а результати досліджень, проведених в напрямку розроблення фізичних і фізико-технологічних основ створення високоефективних кремнієвих СЕ, викладено у [13–16]. Практичним результатом зазначених комплексних досліджень стало створення високоефективних СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами космічного та наземного призначення з ефективністю фотоперетворення до 20% (AM1.5). Цей тип СЕ базується на використанні комбінованого індуковано-дифузійного способу формування роздільних бар'єрів у кремнієвих багатофазних структурах типу «діелектрик — напівпровідник» (ДН) чи «метал — діелектрик — напівпровідник» (МДН). При цьому дифузійно-польові бар'єри створюються як за допомогою дифузії мілких легувальних домішок, так і цілеспрямованим вбудовуванням заряду значної величини у шар двоокису кремнію, нанесеного на поверхню дифузійного шару (емітера). Відносно невисокий рівень легування емітерної області СЕ дифузійно-польового типу забезпечує істотно нижчий, ніж у звичайних дифузійних СЕ, рівень генераційно-рекомбінаційних втрат в цій облас-

ті, а існування в емітерній області приповерхневого польового бар'єра, створеного зарядом, вбудованим у нанесений на поверхню емітера діелектрик, дозволяє істотно зменшити швидкість поверхневої рекомбінації на межі поділу ДН та опір приповерхневого шару емітерної області.

На рис. 4 наведено базову конструкцію високоефективного СЕ дифузійно-польового типу, виготовленого на основі кремнієвої пластини *p*-типу провідності. СЕ на основі матеріалу *n*-типу має аналогічну конструкцію з відмінностями у типі провідності дифузійних фронтальної та тилової областей. СЕ підвищеної ефективності виготовлено на основі пластини кремнію *p*-типу 6 товщиною 350–380 мкм та питомим опором 9–10 Ом·см (питомий опір 2–5 Ом·см для СЕ на базі матеріалу *n*-типу), на поверхню якого нанесені діелектричний шар з вбудованим зарядом 3 і просвітлювальний шар 2. Вбудований заряд створює приповерхневий індукований *n*<sup>++</sup>-шар 4. Під'єднання до дифузійного *n*<sup>+</sup>-шару 5 здійснюється за допомогою фронтального металевого гребінчастого електрода 1 через вікна просвітлювального 2 та діелектричного 3 шарів. Тиловий контакт 8 до базового шару 6 здійснюється через дифузійну антирекомбінаційну *p*<sup>+</sup>-область 7.

На зонній діаграмі кремнієвого СЕ дифузійно-польового типу, наведеній на рис. 5, показано, що завдяки наявності вбудованого заряду в діелектричному шарі з концентрацією *N*<sub>50</sub> на фронтальній поверхні СЕ утворюється приповерхневий збагачений шар, який дозволяє зменшити швидкість поверхне-

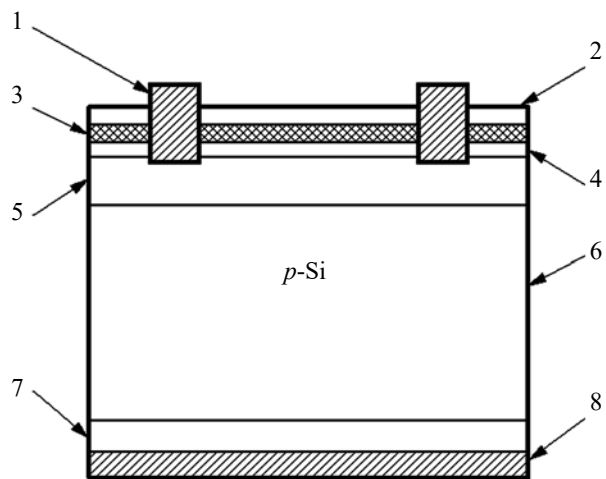


Рис. 4. Конструкція кремнієвого СЕ дифузійно-польового типу:

- 1 — фронтальний металевий гребінчастий електрод (Al);
- 2 — просвітлювальний шар Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (40–50 нм);
- 3 — заряджений діелектричний шар SiO<sub>2</sub> (30 нм);
- 4 — індукований *n*<sup>++</sup>-шар;
- 5 — дифузійний *n*<sup>+</sup>-шар;
- 6 — квалінейтральна базова область *p*-типу (350–380 нм);
- 7 — дифузійний *p*<sup>+</sup>-шар, який створює антирекомбінаційний ізотипний перехід на тилі;
- 8 — тилова металізація (Al)

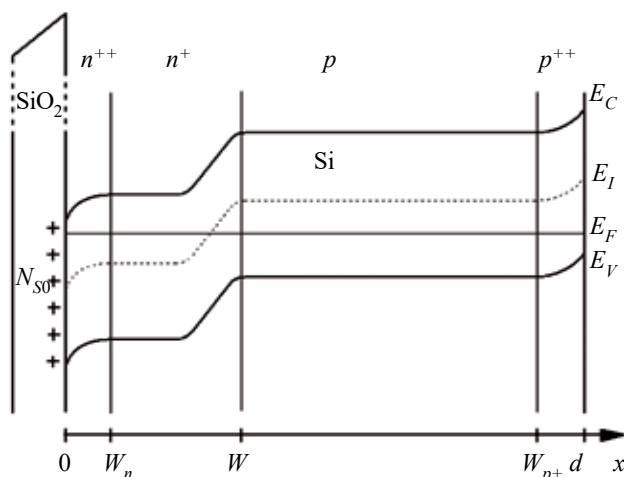


Рис. 5. Зонна діаграма кремнієвого SE комбінованого дифузійно-польового типу:

$W_n, W_{p^+}$  — товщина індукованого  $n^{++}$ - та дифузійного тилового  $p^+$ -шарів відповідно;  $(W_{p^+} - W), d$  — товщина квазінейтральної бази і SE відповідно;  $N_{s0}$  — концентрація вбудованого в діелектричний шар заряду;  $E_C, E_V$  — енергія, що відповідає краю зони провідності та валентної зони, відповідно;  $E_F$  — рівень Фермі;  $E_I$  — рівень хімічного потенціалу у власному напівпровіднику

вої рекомбінації та підвищити електропровідність емітерного шару SE.

Як було показано в роботі [17], ключові параметри, які визначають ефективність фотоперетворення кремнієвих SE в умовах концентрованого сонячного випромінювання, — це послідовний опір та температура. Основними складовими послідовного опору є опір фронтальної контактної сітки і тилового (як правило, суцільного) контакту; перехідний опір контакту «метал — напівпровідник» на фронтальній і тильовій стороні; опір розтікання фронтального сильно легovanого шару (емітера); опір базового напівпровідника.

Опір фронтальної контактної сітки можна зменшити збільшенням її відносної площі (частки від фронтальної поверхні), але при цьому збільшується також затінення освітлюваної поверхні, внаслідок чого пропорційно зменшується струм короткого замикання. Збільшення товщини контактної металізації ефективно зменшує її опір. Для зменшення перехідного опору контакту «метал — напівпровідник» необхідно підібрати метал, який утворює низькоомний контакт з кремнієм, і відповідний режим термічного відпалу для покращення контакту.

Опір розтікання фронтального сильно легovanого шару (емітера) залежить від типу домішки, рівня і профілю легування. Зі збільшенням рівня легування та глибини залягання  $p^+ - n$ -переходу опір шару зменшується, одночасно зменшується й перехідний опір контакту «метал — напівпровідник». Разом з тим, зі збільшенням рівня легування посилюється рекомбінація Оже в сильно легovanому емітері й падає фоточутливість (квантовий вихід) SE в короткохвильовій області, що призводить до зменшення струму короткого замикання, напруги розімкненого кола і, відповідно, ефективності фотоперетворення. Опір базового напівпровідника слід обирати з врахуванням результатів аналізу, викладених у [18], де було показано, що оптимальним з точки зору ефективності рівнем легування бази кремнієвого SE  $n$ -типу провідності є  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (близько  $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), тоді як для бази  $p$ -типу цей рівень суттєво нижчий:  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  (близько  $4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Водночас при високих рівнях легування бази довжина дифузії неосновних носіїв заряду в ній може бути недостатньо високою (менше товщини зразка), тому у цьому випадку потрібно надавати перевагу кремнію з меншим рівнем легування, але з високими значеннями довжини дифузії.

При оптимізації маршрутів виготовлення SE дифузійно-польового типу для роботи в режимі концентрації сонячного випромінювання також були використані результати досліджень впливу поверхневої рекомбінації на ефективність фотоперетворення кремнієвих SE, які представлені у [18–20]. Завдяки використанню комбінованих дифузійно-польових бар'єрів вдалося зменшити швидкість поверхневої рекомбінації й підвищити провідність емітерної області SE. Також експериментально було встановлено, що для концентраторних режимів роботи оптимальними є конструктивно-технологічні рішення з геометричними розмірами SE не більше  $5 \times 5 \text{ мм}$ , оскільки у випадку SE більшої площі значно посилюється вплив послідовного опору. Разом із тим, при вирішенні завдання створення концентраторного сонячного модуля нами було запропоновано конструктивне рішення набирати необхідну потужність з SE  $5 \times 5 \text{ мм}$ , з'єднуючи їх паралельно або послідовно. При цьому у разі послідовного з'єднання SE вплив послідовного опору зменшується через збільшення вихідної напруги, а не струму. Крім того, для зменшення послідовного опору контактної металізації було оптимізовано топологію фронтальної сітки, а також значно, до  $3 \text{ мкм}$ , збільшено її товщину та товщину тилового електрода SE.

### Моделювання процесів фотоелектричного перетворення енергії в кремнієвих сонячних елементах при концентрованому сонячному випромінюванні

Для теоретичного моделювання залежностей основних фотоелектричних параметрів досліджуваних SE від ступеню концентрації нами використано так звану дводіодну (двоекспоненційну) модель [21, с. 210]

$$J = J_L - J_{01} \left( \exp \frac{q(V - JR_s)}{A_1 kT} - 1 \right) - J_{02} \left( \exp \frac{q(V - JR_s)}{A_2 kT} - 1 \right) - \frac{V + JR_s}{R_{sh}}, \quad (1)$$



де  $J_L$  — густина фотоструму;  
 $J_{01}$  — густина дифузійного струму насичення;  
 $J_{02}$  — густина рекомбінаційного струму насичення;  
 $q$  — елементарний електричний заряд;  
 $R_s, R_{sh}$  — послідовний і шунтувальний опори;  
 $A_1, A_2$  — чинники неідеальності  $p$ - $n$ -переходу;  
 $k$  — постійна Больцмана;  
 $T$  — термодинамічна температура;  
 $V$  — напруга зміщення.

Зазначимо, що при концентрованому випромінюванні  $J_L = KJ_{sc}$ , де  $K$  — ступінь концентрації сонячного випромінювання,  $J_{sc}$  — густина струму короткого замикання СЕ при  $K=1$  (1000 Вт/м<sup>2</sup>).

Залежність величини напруги розімкненого кола  $V_{oc}$  від ступеня концентрації  $K$  визначалася з виразу (1), якщо покласти в ньому  $J=0$ , тобто величина напруги розімкненого кола  $V_{oc}$  знаходилася із розв'язку трансцендентного рівняння

$$J_L - J_{01} \left( \exp \frac{qV}{A_1 kT} - 1 \right) - J_{02} \left( \exp \frac{qV}{A_2 kT} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} = 0. \quad (2)$$

Помноживши (1) на прикладену напругу  $V$ , отримуємо потужність  $P$ , а з умови максимуму  $dP/dV=0$  знаходимо величину напруги в точці відбору максимальної потужності  $V_m$ . Підставивши  $V_m$  у рівняння (1), отримуємо густина струму в точці відбору максимальної потужності  $J_m$ . Це дозволяє розрахувати коефіцієнт форми ВАХ  $FF$  та ефективність фотоперетворення  $\eta$  СЕ одиничної площі при концентрованому сонячному випромінюванні із урахуванням втрат на послідовному опорі:

$$FF = \frac{J_m V_m}{K J_{sc} V_{oc}} \left( 1 - \frac{J_m R_s}{V_m} \right); \quad (3)$$

$$\eta = \frac{J_m V_m}{K P_s} \left( 1 - \frac{J_m R_s}{V_m} \right), \quad (4)$$

де  $P_s$  — густина потужності падаючого сонячного випромінювання (в наземних умовах  $P_s = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>).

### Визначення фотоелектричних параметрів кремнієвих СЕ

Для тестування концентраторної установки було проведено дослідження фотоелектричних характеристик кремнієвих СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами при концентрованому сонячному випромінюванні в умовах натурального Сонця. Ступінь концентрації змінювався від 1X до 100X. З виміряних світлових ВАХ визначено їхні фотоелектричні параметри. Для досліджень вибиралися зразки СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами оптимізованої конструкції, призначені для

роботи в умовах концентрованого сонячного випромінювання. Такі СЕ мають структуру  $p^{++}-p^+-n-n^+$ , вони виготовлені на основі кремнію  $n$ -типу марки КБЕ-2 з питомим опором 2–3 Ом·см, мають мінімізований, близький до 0,035 Ом·см<sup>2</sup>, питомий послідовний опір і геометричні розміри 5×5 мм.

Результати експериментальних і теоретичних (з використанням формул (1)–(4)) досліджень залежності фотоелектричних параметрів від ступеня концентрації  $K$  сонячного випромінювання наведено на рис. 6, 7. Під час проведення експериментальних досліджень зразків кремнієвих СЕ в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання фіксувалася їхня робоча температура  $T_{exp}$ . Отримані значення  $T_{exp}$  надалі були використані для перерахунку експериментальних залежностей напруги розімкненого кола  $V_{oc}$  та ефективності фотоперетворення  $\eta$  в такі ж залежності при  $T=25^\circ\text{C}$ .

Слід зазначити, що виготовлені за доопрацюванням для умов концентрованого сонячного випромінювання технологічним маршрутом досліджувані зразки СЕ в умовах АМ1.5 характеризувалися дещо меншими значеннями основних фотоенергетичних параметрів: струму короткого замикання, напруги розімкненого кола та ефективності фотоперетворення порівняно зі зразками, виготовленими за технологічним маршрутом до його доопрацювання. Зокрема, було отримано  $\eta$  величиною в межах 15,5–16% (АМ1.5). Таке погіршення викликане певним зменшенням відносної фотоактивної площі та збільшенням рівня легування емітера (збільшення рекомбінаційних втрат внаслідок рекомбінації Оже). Зменшення розмірів СЕ до 5×5 мм також призвело до зменшення напруги розімкненого кола, оскільки збільшився негативний вплив периферії на рекомбінаційні процеси в СЕ.

З представлених даних видно, що у всьому діапазоні зміни рівня освітленості ( $K=0,6X-100X$ ) зразки кремнієвих СЕ дифузійно-польового типу характеризуються лінійною залежністю  $I_{sc}(K)$  (рис. 6, а). Залежність  $V_{oc}(K)$ , наведена на рисунку 6, б в напівлогарифмічному масштабі, до ступенів концентрації 50X–60X має лінійний характер (тобто  $V_{oc}$  від ступеня концентрації залежить логарифмічно), а потім стабілізується і далі починає спадати. Причиною зменшення  $V_{oc}$  є вплив нагрівання зразка концентрованим сонячним випромінюванням і, меншою мірою, збільшенням рекомбінаційних втрат внаслідок рекомбінації Оже через домішкові центри з залученням екситонів.

Як можна бачити з рис. 6, 7, СЕ дифузійно-польового типу оптимізованої конструкції на основі кремнію ефективно працюють в діапазоні концентрацій натурального сонячного випромінювання  $K=1X-100X$ , при цьому залежність ефективності фотоперетворення (рис. 7, б) і напруги розімкнено-

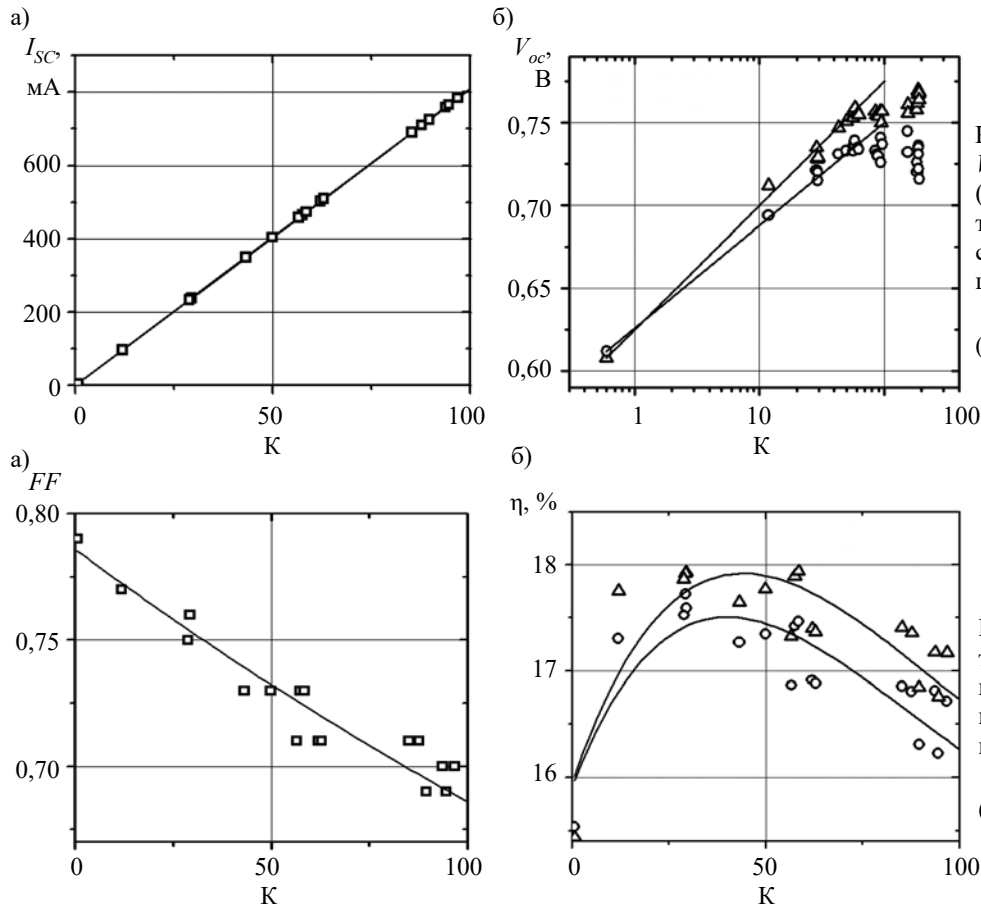


Рис. 6. Залежності  $I_{sc}$  (а) та  $V_{oc}$  при  $25^{\circ}\text{C}$  та  $V_{oc}$  при  $T_{exp}$  (б) СЕ дифузійно-польового типу оптимізованої конструкції від ступеня концентрації сонячного випромінювання (точки — експериментальні дані, лінії — теоретичні)

Рис. 7. Залежності  $FF$  (а) та  $\eta$  (б) СЕ дифузійно-польового типу оптимізованої конструкції від ступеня концентрації сонячного випромінювання (точки — експериментальні дані, лінії — теоретичні)

го кола (рис. 6, б) мають вигляд кривої з максимумом при  $K \approx 25X$  для  $V_{jc}(K)$  і в межах  $K=35X-45X$  для  $\eta(K)$ . Спостерігається збільшення  $V_{oc}$  до значень  $0,750\text{ V}$ , а ефективності фотоперетворення до  $17,8\%$  при  $K \approx 45X$ . Обмеження величини  $V_{oc}$  і подальший її спад пов'язано з впливом нагрівання зразка (рис. 6, б). Значення ефективності фотоперетворення СЕ при  $K=100X$  складає  $17,2\%$ , що перевищує початкові (при  $K=1X$ ) —  $15,6\%$ .

**Висновки**

Розроблена та виготовлена концентраторна установка на основі лінзи Френеля, що забезпечує необхідний ступінь концентрації та температурний режим в процесі проведення вимірювань, дозволила провести дослідження фотоелектричних характеристик експериментальних зразків кремнієвих СЕ дифузійно-польового типу оптимізованих для роботи при концентрованих потоках наземного сонячного випромінювання.

Результати вимірювання світлових ВАХ кремнієвих СЕ дифузійно-польового типу при концентрованому сонячному випромінюванні в діапазоні від  $1X$  до  $100X$  добре узгоджуються з результатами теоретичного моделювання. Завдяки мінімізації питомого послідовного опору ( $\approx 0,035\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) зразки таких СЕ мають високі значення експлуатаційних параметрів в діапазоні концентрації натурального сонячного ви-

промінювання  $K=1X-100X$ , а максимального підвищення ефективності фотоперетворення на рівні  $17,8\%$  вдається досягти при концентрації наземного сонячного випромінювання  $K \approx 45X$ , що на  $14,1\%$  перевищує початкову ефективність при  $K=1X$ .

**ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА**

1. Ahmed S., Ali A., D'Angola A. A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations. *Sustainability*, 2024, vol. 16, p. 1749. <https://doi.org/10.3390/su16051749>
2. Casalicchio V., Manzolini G., Prina M. G., Moser D. From investment optimization to fair benefit distribution in renewable energy community modeling. *Appl. Energy*, 2022, vol. 310, p. 118447. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118447>
3. Stančín H., Mikulčić H., Wang X., Duić N. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 128, p. 109927. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927>
4. Hasan M. M., Hossain S., Mofijur M. et al. Harnessing solar power: a review of photovoltaic innovations, solar thermal systems, and the dawn of energy storage solutions. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 6456. <https://doi.org/10.3390/en16186456>
5. Chang N. L., Ho-Baillie A. W. Y., Vak D. et al. Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2018, vol. 174, pp. 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.08.038>
6. Green M. A., Dunlop E. D., Yoshita M. Solar cell efficiency tables (Version 63). *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2023, 32, p. 3–13. <https://doi.org/10.1002/pip.3750>

7. Ballif C., Haug F.-J., Boccard M. et al. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7, pp. 597–616. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00510-4>
8. 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.
9. Rodat S., Thonig R. Status of Concentrated Solar Power Plants Installed Worldwide: Past and Present Data. *Clean Technol.*, 2024, vol. 6, pp. 365–378. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6010018>
10. Yamada N, Hirai D. Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, vol. 24, iss. 6, pp. 846–854. <https://doi.org/10.1002/pip.2765>
11. Han X, Lv Y. Design and dynamic performance of a concentrated photovoltaic system with vapor chambers cooling. *Appl Therm Eng.*, 2022, vol. 201, p. 117824. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117824>
12. Коркішко Р. М., Костильов В. П., Черненко В. В. та ін. Установа для визначення фотоелектричних параметрів кремнієвих сонячних елементів в умовах концентрованого сонячного випромінювання. *Труди 25-ї МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, Одеса, 2024, с. 67–69.
13. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Key parameters of textured silicon solar cells 26.6% photoconversion efficiency. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 175–184. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.02.175>
14. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Simulation and characterization of planar high-efficiency back contact silicon solar cells. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no 3, pp. 319–327. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.03.319>
15. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Optimization of textured silicon solar cells. *47<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Canada, Calgary, 2020, pp. 0719–0723. <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300877>
16. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Characterization and optimization of highly efficient silicon-based textured solar cells: theory and experiment. *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, USA, FL, Fort Lauderdale, 2021, pp. 544–550. <https://doi.org/10.1109/PVSC43889.2021.9518764>
17. Костильов В. П., Коркішко Р. М., Мелак В. Г., Дверніков Б. Ф. Особливості технології виготовлення кремнієвих фотоперетворювачів сонячної енергії з дифузійно-польовими бар'єрами для роботи при концентрованому випромінненні. *Тези доповідей МНПК «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (МНІТФ-2016)*, Україна, Кременчук, 2016, С. 51–52.
18. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Gerasymenko M. V. et al. Analysis of the silicon solar cells efficiency. Type of doping and level optimization. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 67–74. <https://doi.org/10.15407/spqeo19.01.067>
19. Mackel H., Varner K. On the determination of the emitter saturation current density from lifetime measurements of silicon devices. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 850–866. <https://doi.org/10.1002/pip.2167>
20. Richter A., Benick J., Feldmann F. et al. n-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation. *Sol. Energy Mater Sol Cells.*, 2017, vol. 173, pp. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.042>
21. Fahrenbruch A. L., Bube R. H. *Fundamentals of solar cells: Photovoltaic solar energy conversion*. Academic Press, New York, 1983, 559 p.

Дата надходження рукопису  
до редакції 05.05 2024 р.

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.03  
UDC 621.383.51

R. M. KORKISHKO, V. M. VLASIUK, V. P. KOSTYLYOV,  
V. V. CHERNENKO, B. F. DVERNIKOV

Ukraine, Kyiv,  
V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine  
E-mail: romkin.ua@gmail.com

## OPTIMIZATION OF SILICON SOLAR CELL DESIGN FOR USE UNDER CONCENTRATED SOLAR IRRADIATION

*The task of reducing the cost of a unit of photoelectric-generated electricity is still relevant today. One of the most effective ways to do that is to use concentrator photovoltaic energy conversion systems with cheaper, small-area silicon solar cells (SC), because they require significantly less semiconductor material to make. In this study, the authors develop solutions to optimize the design and improve the manufacturing technology of silicon SCs of the combined diffusion-field type. Such SCs are used to concentrate solar irradiation. The authors propose design and technological solutions for the development and manufacture of a concentrator unit based on the Fresnel lens, which is designed to measure the photoelectric characteristics of SCs when concentrating solar irradiation. Next, the photoelectric characteristics of the combined diffusion-field type SCs were investigated under concentrated solar irradiation in natural sun conditions. The degree of concentration varied from 1X to 100X. Measuring the light I–V characteristics allowed determining photoelectric parameters of the cells — short-circuit current, open-circuit voltage, fill factor and photoconversion efficiency. The obtained experimental results are in good agreement with the results of theoretical modeling. It is shown that due to the minimization of the specific series resistance, the samples of such SCs have high values of operational parameters in the range of natural solar irradiation concentration  $K=1X-100X$ .*

**Keywords:** silicon solar cells, concentrated solar irradiation, photoelectric parameters, equipment.

## REFERENCES

1. Ahmed S., Ali A., D'Angola A. A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations. *Sustainability*, 2024, vol. 16, p. 1749. <https://doi.org/10.3390/su16051749>
2. Casalichio V., Manzolini G., Prina M. G., Moser D. From investment optimization to fair benefit distribution in renewable energy community modeling. *Appl. Energy*, 2022, vol. 310, p. 118447. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118447>
3. Stančin H., Mikulčić H., Wang X., Duić N. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 128, p. 109927. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927>
4. Hasan M. M., Hossain S., Mofijur M. et al. Harnessing solar power: a review of photovoltaic innovations, solar thermal systems, and the dawn of energy storage solutions. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 6456. <https://doi.org/10.3390/en16186456>
5. Chang N. L., Ho-Baillie A. W. Y., Vak D. et al. Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2018, vol. 174, pp. 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.08.038>
6. Green M. A., Dunlop E. D., Yoshita M. Solar cell efficiency tables (Version 63). *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2023, 32, p. 3–13. <https://doi.org/10.1002/pip.3750>
7. Ballif C., Haug F.-J., Boccard M. et al. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7, pp. 597–616. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00510-4>
8. Kostylyov V. P., Korkishko R. M., Melakh V. G. et al. [Silicon solar cells with diffusion-field barriers for use in concentrator plants]. *Proc. of IX International Scientific Conference «Fundamental Basic of Nanoelectronics» Collection of Scientific Paper*, Ukraine, Kharkiv—Odesa, 2017, pp. 124–127. (Ukr)
9. Rodat S., Thonig R. Status of Concentrated Solar Power Plants Installed Worldwide: Past and Present Data. *Clean Technol.*, 2024, vol. 6, pp. 365–378. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6010018>
10. Yamada N., Hirai D. Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, vol. 24, iss. 6, pp. 846–854. <https://doi.org/10.1002/pip.2765>
11. Han X., Lv Y. Design and dynamic performance of a concentrated photovoltaic system with vapor chambers cooling. *Appl Therm Eng.*, 2022, vol. 201, p. 117824. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117824>
12. Korkishko R.M., Kostylyov V.P., Chernenko V.V. et al. [Equipment for determining of photovoltaic parameters of silicon solar cells under concentrated solar irradiation]. *Proc. of 25th ISPC «Modern information and electronic technologies»*, Ukraine, Odesa, 2024, pp. 67–69. (Ukr).
13. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Key parameters of textured silicon solar cells 26.6% photoconversion efficiency. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 175–184. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.02.175>
14. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Simulation and characterization of planar high-efficiency back contact silicon solar cells. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no 3, pp. 319–327. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.03.319>
15. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Optimization of textured silicon solar cells. *47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Canada, Calgary, 2020, pp. 0719–0723. <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300877>
16. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Characterization and optimization of highly efficient silicon-based textured solar cells: theory and experiment. *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, USA, FL, Fort Lauderdale, 2021, pp. 544–550. <https://doi.org/10.1109/PVSC43889.2021.9518764>
17. Kostylyov V. P., Korkishko R. M., Melakh V. G., Dvernikov B.F. [Features of the technology for manufacturing silicon solar cells with diffusion-field barriers for use in concentrated radiation]. *Proc. of International conference «Semiconductor materials, information technology and photovoltaics»*, Ukraine, Kremenchuk, 2016, pp. 51–52. (Ukr).
18. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Gerasymenko M. V. et al. Analysis of the silicon solar cells efficiency. Type of doping and level optimization. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 67–74. <https://doi.org/10.15407/spqeo19.01.067>
19. Mackel H., Varner K. On the determination of the emitter saturation current density from lifetime measurements of silicon devices. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 850–866. <https://doi.org/10.1002/pip.2167>
20. Richter A., Benick J., Feldmann F. et al. *n*-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation. *Sol. Energy Mater Sol Cells.*, 2017, vol. 173, pp. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.042>
21. Fahrenbruch A. L., Bube R. H. *Fundamentals of solar cells: Photovoltaic solar energy conversion*. Academic Press, New York, 1983, 559 p.

**Опис статті для цитування:**

Коркішко Р. М., Власюк В. М., Костильов В. П., Черненко В. В., Дверніков Б. Ф. Оптимізація конструкції кремнієвих сонячних елементів для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 3–10. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2024.1-2.03>

**Cite the article as:**

Korkishko R. M., Vlasiuk V. M., Kostylyov V. P., Chernenko V. V., Dvernikov B. F. Optimization of silicon solar cell design for use under concentrated solar irradiation. *Technology and design in electronic equipment*, 2024, no. 1–2, pp. 3–10. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2024.1-2.03>