

Р. І. ПАХАЛЮК, аспірант, НТУУ «КПІ», Київ;
К. М. БОЖКО, ст. викладач., НТУУ «КПІ», Київ

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДЕФЕКТІВ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

В даній статті вперше вдалось поєднати в одному підході такі різні методи як інфрачервоні термографія та телевізійна мікроскопія для дослідження електролюмінісцентних дефектів. Основою підходу стала ідея нагрівання фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом, в процесі якого і реалізовано візуалізацію дефектів. Застосовані нами методи візуалізації дефектів кремнієвих ФЕСБ базуються на процесі їх нагрівання зворотним темновим струмом. Візуалізація електролюмінісцентних дефектів дозволяє здійснювати контроль на основі ТЗВ.

Ключові слова: дефект, термографія, електролюмінісценція, батарея, інфрачервона, візуалізація, перегрів

Вступ. Розробка нових та вдосконалення вже існуючих систем електроживлення на основі фотоелектричних сонячних батарей (ФЕСБ) неможливі без ефективних методів та засобів контролю, застосування яких має супроводжувати весь життєвий цикл системи та забезпечувати об'єктивну оцінку прийнятих технічних рішень і результатів розробки, вимірювання експлуатаційних характеристик, контроль дефектів і деградації тощо. Кремній є в наш час основним матеріалом сонячної енергетики. Відповідно до звіту [1] Інституту сонячних енергетичних систем імені Фраунгофера, Фрайберг, Німеччина, у 2012 році 85 % від загалу складала потужності на моно- та мультикристалічних кремнієвих пластинах. Контроль дефектів кремнієвих пластин дозволяє визначити стан деградації ФЕСБ, які в процесі тривалої багаторічної експлуатації поступово зменшують свій коефіцієнт корисної дії. Так, за результатами досліджень Schatz Energy Research Center, в перші десять років коефіцієнт корисної дії зменшується на 0,4 % щорічно, у другому десятиріччі ця величина вже сягала 1,4 % [2]. Досвід провідних лабораторій свідчить про важливість розробки та використання методів візуалізації дефектів сонячних елементів (СЕ), із яких побудовані ФЕСБ. Нагальною проблемою є адаптація вже існуючих в межах лабораторій методів та засобів візуалізації дефектів до умов експлуатації ФЕСБ. Основними вимогами до них є неруйнівний характер, а також достовірність та простота у використанні.

Інфрачервона термографія. Інфрачервона термографія (LT - Lock-in Thermography) є одним із основних методів візуалізації дефектів при нагріванні поверхні об'єкту дослідження. Нерівномірність температурного поля свідчить про наявність дефектів, які є джерелами додаткового локального нагрівання. Метод розроблений для різних застосувань і, зокрема, для контролю сонячних елементів [3]. Нагрівання сонячних елементів здійснюють темновим струмом, який пропускають через елемент, з'єднавши його із зовнішнім джерелом живлення. Для прямого включення типовим є режим:

- напруга від +0,5 до +0,6 В;
- щільність струму від 0 до 30 мА/см² [4].

Останні досягнення методу – це побудова за знятими термограмами поверхні сонячного елемента (в рамках ітераційної моделі) вольт-амперних характеристик локальних місць нагрівання [4], в яких зосереджені дефекти типу паразитних діодів Шоттки. За вольт-амперними характеристиками визначають такий важливий експлуатаційний параметр, як коефіцієнт прямокутності (коефіцієнт форми). Зменшення коефіцієнту форми свідчить про деградацію сонячного елемента. Зазначимо, що даний метод неможливо застосувати для контролю ФЕСБ, оскільки в них 36 або більше елементів з'єднані послідовно і неможливо задавати та вимірювати напругу на окремому елементі. Проте, на наш погляд, цей метод може бути дієвим при застосуванні імпульсного режиму нагрівання темновим струмом. Для підтвердження цієї гіпотези потрібні окремі дослідження.

При зворотному включенні сонячного елемента струм тече через його шунтовий опір. За наявності дефектів типу електричного пробоя, а також електролюмінісцентних точок (технологічних дефектів поблизу контактних шин) на поверхні також утворюються місця локального перегріву. Термограма дозволяє локалізувати місця дефектів та оцінити їх внесок в деградацію. Для зворотного включення типовим режимом є:

- напруга від -9 до -20 В;
- середня щільність потужності 0,1 Вт/см², що еквівалентно до нагрівання від Сонця за стандартом AM1.5.

Нами отримано термограму сонячного елемента на кристалічному кремнії при напрузі -20 В (рис. 1). Локальний осередок перегріву (у вигляді білої плями) має на 20 градусів вищу температуру (67,24 °С), ніж середня температура поверхні елемента (47 °С). Наявність скла над пластиною кремнію призводить до збільшення осередку перегріву, проте локалізація і оцінка його теплової потужності можливі.

Виконання термографічного контролю ФЕСБ потребує подачі зворотної напруги до 1000 В. З цією метою нами було

розроблено регульоване каскадне джерело живлення з вихідною потужністю 400 Вт [5]. Регулювання вихідної напруги здійснювалось вручну в діапазоні від 0 до 1000 В. За допомогою цього джерела були отримані термограми моно- та полікристалічних кремнієвих ФЕСБ (рис. 2). Наявність білої плями в центрі зображення свідчить про наявність дефекту. Градієнт температури в зоні дефекту сягає 2 град/піксель. Дефект унеможливує проведення так званого PID – тесту,

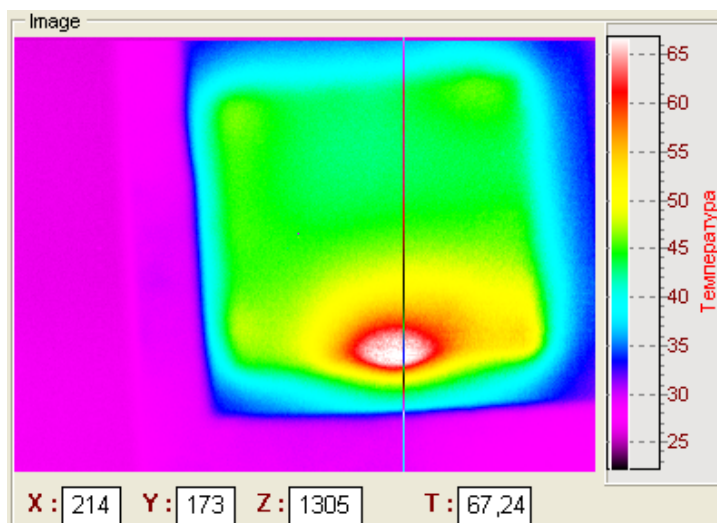


Рис. 1 – Термограма сонячного елемента з розмірами 70 x 70 мм при нагріванні зворотним темновим струмом; координати точки (X, Y) дано у пікселях, температуру T – у градусах за Цельсієм; зображення має розміри 320 x 240 пікселів

за умовами якого ФЕСБ випробують 48 годин безперервно під зворотною напругою 1000 В (PID - Potential Induced Degradation). Проведення цього тесту є частиною вихідного контролю на виробництві ФЕСБ [6]. Після проведення тесту до реалізації надходять лише ті вироби, коефіцієнт корисної дії яких зменшився на 0–15 %. Всі інші мають бути утилізовані.

На наш погляд, застосування інфрачервоної термографії при нагріванні зворотним темновим струмом може бути складовою періодичного контролю ФЕСБ в умовах експлуатації, а не тільки при виробництві.

Телевізійний метод контролю електролюмінесцентних дефектів. Електролюмінесценція (EL) дефектів (гарячих точок) кремнію є також основою методу їх візуалізації. Причиною появи цих дефектів є утворення паразитних світлодіодних структур на фосфіді алюмінію внаслідок недосконалості технології нанесення шин живлення на поверхню кремнієвої пластини.

Світіння супроводжується нагріванням поверхні темновим струмом. Ефект виникає при подачі на кремнієвий сонячний елемент зворотної напруги. Більшість результатів за цим методом було отримано на пластинах кремнію із застосуванням оптичних систем [7]. Телевізійні засоби вимірювання (ТЗВ) були застосовані нами при дослідженні електролюмінесцентних дефектів як на окремих сонячних елементах, так і на ФЕСБ [5]. ТЗВ дозволяє локалізувати дефект, визначити його розміри, форму контуру, виміряти вольт-контрастні характеристики окремих пік селів тощо. Розроблений лабораторний стенд телевізійного контролю електролюмінесцентних дефектів сонячних елементів наведений на рис. 3. При застосуванні каскадного джерела живлення 1000 В, 400 Вт за тою ж схемою побудовано стенд для телевізійного контролю ФЕСБ. Позиціонування місць контролю виконують вручну на столику із прецизійним механічним приводом по трьох координатах. Похибка координати не перевищує 5 мікрон, що в умовах експерименту відповідає роздільній здатності системи (5 мікрон/піксел).

На рис. 4 наведено також фотографію стенду. На столику закріплено монокристалічну кремнієву ФЕСБ потужністю 30 Вт.

При рівномірному розподілі дефектів по поверхні сонячного елемента нагрівання є також рівномірним і воно не веде до значної деградації ФЕСБ. Вкрай шкідливим є локальне скупчення дефектів, яке призводить до значного перепаду температури між зоною дефекту та неушкодженою частиною сонячного елемента. Слід зауважити, що наявність у ФЕСБ принаймні одного дефектного елемента зменшує загальний коефіцієнт корисної дії. Струм тече послідовно по всіх

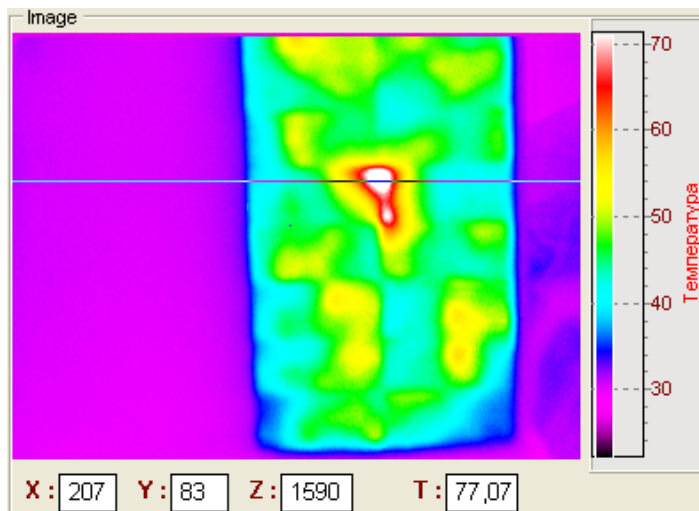


Рис. 2 – Термограма ФЕСБ із полікристалічного кремнію потужністю 60 Вт; зворотна напруга -290 В, темновий струм -450 мА, напругу подано до половини батареї (18 елементів); середня температура поверхні 47°C, температура в зоні перегріву – до 77°C

елементах батареї, із зростанням температури його величина спадає приблизно на 4% на кожні 10 градусів. Напруга при цьому майже не змінюється. Отже вихідна потужність і коефіцієнт корисної дії ФЕСБ буде зменшуватись так само, як у найбільш дефектного елемента. Дефекти, як правило, розташовані на відстані 2-20 міліметрів один від одного, іноді вони утворюють пари (рис. 5).

На нашу думку, важливим є також візуальний контроль люмінесцентних точок ФЕСБ, який можна виконувати неозброєним оком в умовах часткового затемнення приміщення. Пропонуємо за результатами контролю скласти карту дефектів (рис. 6), яка має бути у складі паспорту при реалізації ФЕСБ.

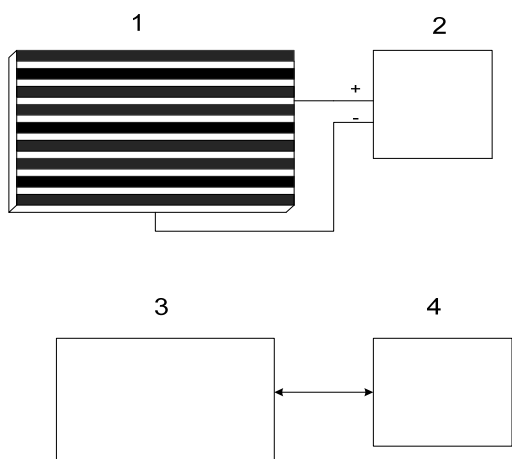


Рис. 3 – Стенд телевізійного контролю електролюмінесцентних дефектів; 1 – сонячний елемент або ФЕСБ, 2 – джерело живлення, 3 – телевізійна камера, 4 – персональний комп'ютер



Рис. 4 – Зовнішній вигляд стенду телевізійного контролю



Рис. 5 – Електролюмінесцентні дефекти сонячного елемента на кристалічному кремнії, збільшення у 50 раз, відстань між дефектами 200 мкм

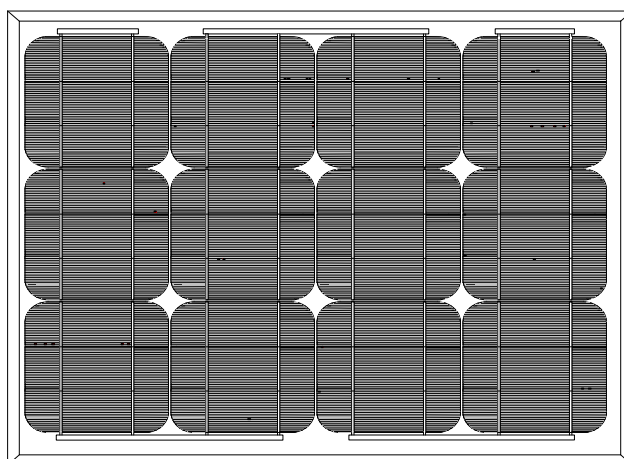


Рис. 6 – Карта дефектів монокристалічної кремнієвої ФЕСБ потужністю 30 Вт, складена за результатами візуального контролю; зворотна напруга 700 В

Висновки. Застосовані нами методи візуалізації дефектів кремнієвих ФЕСБ базуються на процесі їх нагрівання зворотним темновим струмом. Візуалізація електролюмінесцентних дефектів дозволяє здійснювати контроль на основі ТЗВ. Обробка зображень комп'ютерною програмою дозволяє на основі відомих

алгоритмів з точністю до одного пікселя визначати границю дефекту, а також вимірювати вольт-яскравісні та інші характеристики. Інфрачервона термографія надає інтегральну характеристику ФЕСБ у вигляді температурного поля її поверхні. Локалізація дефектів тут не є такою високою, як при застосуванні ТЗВ, проте швидкість і надійність контролю надають переваги при виконанні поточного контролю в умовах експлуатації. На наш погляд, контроль на основі методів візуалізації дефектів має супроводжувати весь життєвий шлях ФЕСБ – від виробництва до моменту виведення із експлуатації. Розвиток цих методів полягає у їх комплексному застосуванні, створенні мобільних засобів спеціально для умов експлуатації, побудові досконалих математичних моделей та комп'ютерних програм на їх основі.

Список літератури 1. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE [Electronic resource] / Photovoltaics Report. Freiburg, 2012. – Available at: www.ise.fraunhofer.de 2. Chamberlin, C. E. Comparison of PV module performance before and after 11 and 20 years of field exposure [Electronic resource] / C. E. Chamberlin, M. A. Rocheleau, M. W. Marshall, A. M. Reis, N. T. Coleman, P. A. Lehman // 37th IEEE PV Specialists Conference, Seattle, WA, 2011. – Available at: www.schatzlab.org/docs/2011_IEEE_full-paper-Chamberlin-v3.pdf 3. Breitenstein, O. Lock-in Thermography. Basic and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials [Text] / O. Breitenstein, W. Warta, M. Lagenkamp – New York : Springer Heidelberg Dordrecht London, 2010. – P. 256. 4. Breitenstein, O. Nondestructive local analysis of current-voltage characteristics of solar cells by lock-in thermography [Text] / O. Breitenstein // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2011. – № 95. – pp. 2933-2936. 5. Порев, В. А. Исследование люминесцирующих дефектов солнечных панелей [Текст] / В. А. Порев, Р. И. Пахалюк, К. М. Божко // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – 2014. – №1. – С.11-14. 6. Naumann, V. Micro Structural Root Cause Analysis of Potential Induced Degradation in c-Si Solar Cells [Text] / V. Naumann, C. Hagendorf, S. Grosser, M. Werne // Energy Procedia, . – 2012. – № 27. – pp 1–6. 7. Попов, В. М. Локальные свойства электрически активных дефектов в солнечных батареях на основе кремния [Текст] / В. М. Попов, А. С. Клименко, А. П. Поканевич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 4. – С. 43–48.

Bibliography (transliterated): 1. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Photovoltaics Report. Freiburg, 2012. Available at: www.ise.fraunhofer.de 2. Chamberlin, C. E., Rocheleau, M. A., Marshall, M. W., Reis, A. M., Coleman, N. T., Lehman, P. A. (2011). Comparison of PV module performance before and after 11 and 20 years of field exposure. 37th IEEE PV Specialists Conference, Seattle, WA, 2011. Available at: www.schatzlab.org/docs/2011_IEEE_full-paper-Chamberlin-v3.pdf. 3. Breitenstein, O., Warta, W., Lagenkamp M. (2010). Lock-in Thermography. Basic and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials. New York : Springer Heidelberg Dordrecht London, 256. 4. Breitenstein, O. (2011). Nondestructive local analysis of current-voltage characteristics of solar cells by lock-in thermography. Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, 2933-2936. 5. Porev, V. A., Pakhalyuk, R. I., Bozhko, K. M. (2014). Research of luminescent defects solar panels. Proceedings of the Academy of Engineering Sciences. A.M. Prokhorov, 1, 11-14. 6. Naumann, V., Hagendorf, C., Grosser, S., Werne, M. (2012). Micro Structural Root Cause Analysis of Potential Induced Degradation in c-Si Solar Cells. Energy Procedia, 27, 1–6. 7. Popov, V. M., Klimenko, A. S., Pokanovich, A. P. (2010). Local properties of electrically active defects in solar cells based on silicon. *Technology and design in electronic equipment*, 4, 43-48.

Надійшла (received) 25.07.2014