УДК 621.383.51

**ТЕЛЕВІЗІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРОЛЮМІНІСЦЕНТНИХ
ДЕФЕКТІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ПРИ ВИКОНАННІ PID – ТЕСТУ****Н. М. ЗАЩЕПКІНА**, доктор технічних наук, професор**О. П. ЯНЕНКО**, доктор технічних наук, професор**К. М. БОЖКО**, кандидат технічних наук, старший викладач**І. В. МОРОЗОВА**, аспірантка**О. А. ПРИЩЕПА**, студентка*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»**E-mail: nanic1604@gmail.com, op291@meta.ua, bozhkonew@ukr.net,**izoom@ukr.net, leeeena@ukr.net*<https://doi.org/10.31548/dopovidi2018.06.028>

Анотація. У роботі представлено результати дослідження дефектів кремнієвих фотоелектричних сонячних батарей, яким притаманний електролюмінесцентний ефект у видимому діапазоні випромінювання у разі подачі до батареї зворотної напруги. В експериментах задіяний спеціально розроблений лабораторний стенд телевізійних вимірювань, який можна також використовувати під час випробуваннях сонячних батарей на тривалу дію високої зворотної

напруги (PID – тест). У результаті отримані вольт-яскравісні характеристики окремих дефектів та складено мапу видимих електролюмінесцентних дефектів серійної сонячної батареї потужності 30 Вт на основі монокристалічного кремнію. Результати роботи можуть бути використані у виробництві фотоелектричних сонячних батарей.

Ключові слова: PID-тест, фотоелектрична сонячна батарея, електролюмінесцентний дефект

Вступ. Усі технологічні ланцюжки виробництва фотоелектричних сонячних батарей (ФЕСБ) супроводжують відповідні контрольні заходи. При вихідному контролі ФЕСБ випробують на деградацію під дією високої зворотної напруги 1000-1500 В. Даний тест отримав назву “Power Induced Degradation Test” або PID – тест [1]. Тривалість тесту складає 168 або 336 годин. За результатами тесту

після вимірювання коефіцієнту корисної дії (ККД) батареям присвоюють категорії А, В, С або відбраковують відповідно до визначеного коефіцієнту корисної дії (ККД).

Останнім часом PID-тест супроводжують інфрачервоним термографічним вимірюванням теплового поля з метою визначення дефектних зон, а також пошуком електролюмінесцентних дефектів у

Защепкіна Н. М., Яненко О. П., Божко К. М., Морозова І. В., Прищеп О. А.

інфрачервоному діапазоні випромінювання [2].

Нами запропоновано застосувати телевізійну інформаційно-вимірвальну систему (ТІВС) для пошуку видимих електролюмінісцентних дефектів, які збуджуються на поверхні ФЕСБ під дією високої зворотної напруги (такої, як і під час виконання РІД-тесту).

Огляд попередніх досліджень.

Дефекти різної природи, кількості і величини притаманні всім без винятку сонячним елементам і можуть суттєво впливати на експлуатаційні параметри і характеристики ФЕСБ. У наш час ґрунтовно досліджено дефекти із притаманною їм передпробійною світимістю на окремих сонячних елементах. Ці роботи беруть початок із середини минулого сторіччя і тривають досі. Огляд початкового періоду цих досліджень можна знайти у монографіях [3-4].

Сучасні дослідження електролюмінісцентних дефектів кремнієвих сонячних елементів зосереджені майже повністю на випромінюванні у ближньому інфрачервоному спектрі із довжиною хвилі 1,15 мкм, що відповідає ширині забороненої зони кремнію [5-10].

Менш досліджено мікро-дефекти із тунельною природою випромінювальної рекомбінації носіїв у видимому світловому діапазоні [11].

Особливостями даних експериментів є:

- дослідження окремих підготовлених фрагментів кремнієвих пластин на проміжному етапі виготовлення сонячних елементів;

- використання комплексу різних методів дослідження зразків, зокрема електронної мікроскопії;

- реєстрація видимих електролюмінісцентних дефектів відбувалась із застосуванням цифрового фотоапарату в режимі тривалої (до 30 хвилин) витримки.

У результаті була з'ясована природа випромінювання. Так, випромінювання відбувається у тонкому (кілька сотень нанометрів) кільці, яке утворює мікро-краплина алюмінію, що потрапляє на поверхню тонкого шару (до 1 мкм) кремнію з електронною провідністю і наскрізь дифундує до основного масиву кремнію з дірковою провідністю. Унаслідок цього утворюється мікро-дефект у вигляді тунельної світло-діодної структури видимого діапазону. Проте, умови експериментів [11]. не дозволили виміряти параметри і характеристики джерел випромінювання, зокрема, вольт-яскравісну характеристику.

Об'єкт дослідження та обладнання. Об'єктом дослідження обрано серійну сонячну батарею на основі монокристалічного кремнію з номінальною напругою 12 В і потужністю 30 Вт. Для збудження

Защепкіна Н. М., Яненко О. П., Божко К. М., Морозова І. В., Прищепя О. А.

електролюмінісцентних дефектів до сонячної батареї необхідно подати високу зворотну напругу. Джерело високої напруги має зовнішнє регулювання у вигляді лінійного автотрансформатору (ЛАТР), що дозволяє змінювати його вихідну

напругу від 500 до 1000 В. Лабораторний стенд (Рис.1) має у своєму складі ТІВС на основі персонального комп'ютера (ПК), адаптера і телевізійної камери. Стенд має необхідні кріплення та систему позиціонування.

Рис. 1. Лабораторний стенд для телевізійних досліджень електролюмінісцентних дефектів ФЕСБ

Зовнішній вигляд стенду під час виконання телевізійних вимірювань наведено на рисунку 2.

Рис. 2 – Зовнішній вигляд стану на основі ТІВС: 1 – ФЕСБ 30 Вт; 2 – оптична лава із мікрометричними гвинтами; 3 – стійка кріплення телевізійної камери; 4 – об'єктив у світлозахисному екрані; 5 – телевізійна камера NOVUS; 6 – джерело живлення 1000 В; 7 – ЛАТР; 8 – ПК; 9 – вікно програми OwlEye із результатом вимірювання яскравості

Встановлена на ПК Windows-орієнтована програма OwlEye дозволяє позиціонувати курсор на певний піксел зображення і отримати значення його яскравості після

заданої кількості повторів (від 1 до 32).

На рисунку 3 наведено вікно програми OwlEye із вимірюванням яскравості окремого пікселя.

Рис. 3 – Вимірювання яскравості в зоні перехрестя провідних доріжок ФЕСБ при зворотній напрузі 945 В: піксел (позначений круглим маркером) з координатами $X=127$, $Y=150$ має яскравість 194,33 умовні одиниці

Введення до складу стенду джерела живлення 1000 В дозволило відтворити умови проведення PID-тесту ФЕСБ. В той же час, застосування ТІВС із об'єктивом, який забезпечує збільшення до 90 крат, дозволило ідентифікувати електролюмінесцентні мікродефекти із розмірами від 5 до 30 мкм. Мікрометричні гвинти на оптичній лаві дозволяють точно позиціонувати досліджувану ділянку ФЕСБ з метою наступних вимірювань. Яскравість вимірюють у відносних одиницях. Водночас використовують лінійну частину вихідної характеристики телевізійної камери. Вибір аналогової камери забезпечив зменшення похибки вимірювання, оскільки сигнал обробляли програмою OwlEye, в якій вбудовані покращені алгоритми аналого-цифрового перетворення і

фільтрування сигналу. Слід зазначити, що чутливість ТІВС вища за чутливість людського ока. Тому телевізійні вимірювання мають більший динамічний діапазон, ніж візуальне спостереження електролюмінесцентних дефектів.

Отримані результати дослідження. За результатами досліджень електролюмінесцентних дефектів ФЕСБ телевізійним методом були отримані мапи дефектів і визначено критерій для контролю якості. Встановлено, що кількість дефектів 1-2 на квадратний дюйм поверхні ФЕСБ є тою межею, за якою починається їх негативний вплив на ККД батареї. Таким чином, щільність дефектів на площі ФЕСБ є одним із основних критеріїв якості ФЕСБ. За результатами досліджень складено мапу дефектів ФЕСБ (Рис. 4).

Рис. 4 – Фрагмент мапи із трьох вертикально розташованих одтин над одним сегментів кремнієвої ФЕСБ потужністю 30 Вт з виявленими електролюмінісцентними дефектами: дефекти показано червоними прямокутниками; більшість дефектів розташовано біля контактних шин, один дефект розташований окремо в центрі верхнього сонячного елементу

Як було зазначено вище, використання у дослідженнях ТІВС дозволило отримати вольт-яскравісні і ампер-яскравісні характеристики дефектів. Особливістю цих характеристик є те, що яскравість окремого пікселу тут залежить від повної напруги, прикладеної до ФЕСБ, або повного струму. Сама 12-вольтова ФЕСБ побудована із 36 послідовно з'єднаних кремнієвих сонячних елементів. Для більш ретельного аналізу необхідно визначити падіння напруги на кожному із сонячних елементів. Це завдання можна вирішити, якщо відомі значення шунтового опору

сонячних елементів. Дане завдання виходить за рамки статті, проте можемо зауважити, що нами розроблена і апробована технологія неконтактного вимірювання шунтового опору окремих сонячних елементів за допомогою сигналів від плоских антен, розташованих над поверхнею ФЕСБ. Ці дослідження довели, що досліджувана ФЕСБ потужністю 30 ВТ є високоякісним приладом і має приблизно однаковий шунтовий опір усіх сонячних елементів з відхиленням від середнього значення не більше 15%.

На рисунку 5 наведено вольт-яскравісну і ампер-яскравісну

характеристики

ФЕСБ.

електролюмінісцентного дефекту

Рис. 5 – Вольт-яскравісна (ліворуч) та ампер-яскравісна (праворуч) характеристики електролюмінісцентного дефекту ФЕСБ

Аналіз отриманих результатів.

Вимірювання яскравості електролюмінісцентних дефектів відбувалось у межах лінійної частини вихідної характеристики телевізійної камери і ТІВС у цілому. Тому насичення характеристик має причину в насиченні концентрації носіїв, які рекомбінують у дефектних осередках. Динамічний діапазон світіння дефекту за напругою має величину 2,5 (від 400 до 1000 В). Такий великий діапазон напруг, за яких спостерігають електролюмінесценцію, дозволяє зробити висновок, що світіння спричиняють дефекти типу тунельних світло-діодних структур, які вперше були комплексно досліджені в [11]. На користь подібного припущення свідчить ще розмір об'єкту – до 20 мкм, а також

колір світіння, який був біло-холодний.

Інший тип дефектів пов'язаний із передпробійною електролюмінесценцією, яка характеризується більшими розмірами об'єкту світіння (100 мкм і більше), жовто-гарячим кольором і меншим динамічним діапазоном напруги (до 1,5). Зазначимо, що передпробійна електролюмінесценція призводить до теплового пробою і руйнування сонячного елемента і виходу із ладу всієї ФЕСБ.

Математична залежність яскравості L від напруги U за електролюмінесценції звичайних кристалофосфорів [12] має вигляд:

$$L = ke^{-b/\sqrt{U}}, \quad (1)$$

де k та b – коефіцієнти пропорційності.

Защепкіна Н. М., Яненко О. П., Божко К. М., Морозова І. В., Прищеп О. А.

Обчислення результатів відповідно до вольт-яскравісної характеристики (рис. 5) надає такі значення констант формули (1):

$$k = 320\,000 \text{ ум. од.}; b = 252 \text{ В}^{0.5}.$$

Отримана теоретична залежність (Рис. 6) погано корелює із експериментальними даними (Рис. 5), зокрема вона не має ланки насичення.

Рис. 6 – Модель світіння кристалофосфору

Таким чином, модель електролюмінісценції мікродефектів кремнієвих сонячних елементів і ФЕСБ має бути створена на основі фактів і на підґрунті фізики напівпровідників, зокрема теорії світлодіодів. Формула (1) має бути уточнена введенням коефіцієнту, який буде відповідати за ефект насичення вольт-яскравісної характеристики.

Висновки. У роботі вирішене питання якісного контролю електролюмінісцентних дефектів видимого діапазону випромінювання, який зручно проводити в умовах виконання обов'язкового вихідного випробування сонячних батарей –

PID-тесту. Критерієм якості тут запропоновано вважати кількість дефектів на одиницю площі батареї.

Лабораторний стенд на основі ТІВС і високовольного джерела живлення, який був спеціально розроблений для даних досліджень, дозволив, окрім складання мап дефектів ФЕСБ, також виміряти вольт-яскравісну характеристику окремого дефекту. Відзначимо, що даний метод має бути доповнений методом неконтактного вимірювання шунтового опору сонячних елементів ФЕСБ для точного визначення падіння зворотної напруги на кожному з елементів. Встановлено, що класична теорія випромінювання

Защепкіна Н. М., Яненко О. П., Божко К. М., Морозова І. В., Прищепа О. А.

кристаллофосфорів не відповідає експериментальній залежності яскравості від напруги, оскільки не пояснює ефекту насичення. Модель вольт-яскравісної характеристики дефекту потребує вдосконалення.

Список використаних джерел.

1. Peter Hacke Testing modules for potential-induced degradation— a status update of IEC 62804 *National Renewable Energy Laboratory (NREL) PV Module Reliability Workshop February 25-26, 2014 Golden, Colorado* URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61517.pdf>

2. Wei Luo, Yong Sheng Khoo,*a Peter Hacke,c Volker Naumann,d Dominik Lausch,Steven P. Harvey,c Jai Prakash Singh,a Jing Chai,a Yan Wang,a Armin G. Aberleaeand Seeram Ramakrishna Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review /, *Energy & Environmental Science* 2017, 10 P.43-68. DOI: 10.1039/c6ee02271e

3. Henisch Н.К. Electroluminescence. NY.: Pergamon Press, 1962. 454 p.

4. Pankove J.I. Optical Processes in Semiconductors. Englewood Cliffs, New Jersey.: Prentice-Hall., 1971. 422 p

5. Жигунов Д.М., Ильин А.С., Форш П.А и др. Люминесценция солнечных элементов с гетеропереходом a-Si:H/c-Si *Письма в ЖЭТФ* 2017, т. 43, вып.10. С. 95–101. DOI: 10.21883/PJTF.2017.10.44626.16626

6. Giesecke J., Schubert M.C., Schindler F., Warta W. Harmonically modulated luminescence: Bridging gaps

Наступним етапом досліджень, на нашу думку, може бути визначення потужності дефектів і пошук зв'язку між сумарною потужністю дефектів та ККД сонячної батареї.

in carrier lifetime metrology across the PV processing chain. *Journal of Photovoltaics*. 2015, №1. P. 313–319.

7. Haunschild J., Glatthaar M., Kasemann M. and others Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence. *Phys. Stat. Sol. RRL* 2009, № 3. P. 227–229.

8. Breitenstein O. Khanna A., Augarten Y. and others Quantitative evaluation of electroluminescence images of solar cells. *Phys. Stat. Sol. RRL*, 2010, № 4. P. 7–9.

9. Wang Y., Haipeng Z, Dengyan S. Research to the typical defects of crystalline silicon photovoltaic cells based on EL images. *International Journal of Energy Sciens (IJES)*, 2013, Vol. 3, Is 3 P. 200–204.

10. Вербицкий В.П., Панайотти И.Е., Никитин С.Е., Бобыль А.В. и др. Электролюминесцентные исследования эффективности солнечных элементов /*Письма в ЖЭТФ*, 2017, т. 43, вып.17 С. 3–11 DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44940.16479

11. Попов В.М., Клименко А.С., Поканевич А.П., Шустов Ю.М., Гаврилюк И.И., Панин А.И. Локальные свойства электрически активных дефектов в солнечных батареях на основе кремния. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2010, №4. С. 43–48.

12. Верещагин И.К. Электролюминесценция кристаллов, М.: Наука, 1974. 280 с.

References

1. Peter Hacke (February 25-26, 2014) Testing modules for potential-induced degradation– a status update of IEC 62804 National Renewable Energy Laboratory (NREL) PV Module Reliability Workshop Golden, Colorado. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61517.pdf>
2. Wei Luo, Yong Sheng Khoo,*a Peter Hacke,c Volker Naumann,d Dominik Lausch, Steven P. Harvey,c Jai Prakash Singh,a Jing Chai,a Yan Wang,a Armin G. (2017) Aberle and Seeram Ramakrishna. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical. Energy & Environmental Science, 10, P.43-68. DOI: 10.1039/c6ee02271e
3. Henisch H.K. (1969) Electroluminescence. NY.: Pergamon Press. 454 p.
4. Pankove J.I. (1971) Optical Processes in Semiconductors. Englewood Cliffs, New Jersey.: Prentice-Hall. 422 p.
5. Zhigunov D.M., Ilyin A.S., Forsh P.A. and others. (2017) Luminescence of solar cells with a heterojunction a-Si:H/c-Si [Luminescence of solar cells with a heterojunction a-Si:H/c-Si] P. 95 – 101. DOI: 10.21883/PJTF.2017.10.44626.16626
6. Giesecke J., Schubert M.C., Schindler F., Warta W. (2015) Harmonically modulated luminescence: Bridging gaps in carrier lifetime metrology across the PV processing chain. IEEE Journal of Photovoltaics. №1. , P. 313 – 319.
7. Haunschild J., Glatthaar M., Kasemann M. and others (2009) Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence. Phys. Stat. Sol. RRL. № 3. P. 227 – 229.
8. Breitenstein O., Khanna A., Augarten Y. and others (2010) Quantitative evaluation of electroluminescence images of solar cells. Phys. Stat. Sol. RRL. № 4. P. 7 – 9.
9. Wang Y., Haipeng Z., Dengyan S. (2013). Research to the typical defects of crystalline silicon photovoltaic cells based on EL images. International Journal of Energy Sciences (IJES), Vol. 3, Is 3. P. 200 – 204.
10. Verbitsky V.P., Panayotti I.E., Nikitin S.E., Bobyl A.V and others (2017) Elektroluminescentnye issledovaniya effektivnosti solnechnykh elementov [Electroluminescent studies of the effectiveness of solar cells] P.3 – 11. DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44940.16479
11. Popov V.M., Klimenko A.S., Pokanovich A.P., Shustov Yu.M., Gavriluk I.I., Panin A.I. (2010) Lokal'nye svoystva elektricheskikh aktivnykh defektov v solnechnykh batareyakh na osnove kremniya. [Local properties of electrically active defects in silicon-based solar cells] Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature, №4, P.43– 48.
12. Vereshchagin I.K. (1974) Elektroluminescentiya kristallov [Electroluminescence of crystals] Moscow: Nauka. 280 p.

Защепкина Н. М., Яненко О. П., Божко К. М., Морозова И. В., Прищеп О. А.

TELEVISION CONTROL OF ELECTROLUMINESCENT DEFECTS OF SOLAR PANELS WHEN PERFORMING THE PID TEST

**N.M. Zashchepkina, O.P. Yanenko,
K.M. Bozhko, I.V. Morozova,
O.A. Pryschepa**

Abstract. *The paper presents the results of the study of defects in silicon photovoltaic solar cells, which has an electroluminescent effect in the visible radiation range when applied to the battery of the reverse voltage. The experiments involve a specially designed laboratory test bench for television measurements, which can also be used when testing solar panels for a long acting high voltage (PID) test. As a result, the volt-brightness characteristics of individual defects were obtained and a map of visible electroluminescent defects of a serial solar cell with a power of 30 W on the basis of monocrystalline silicon was prepared. The results of the work can be used in the production of photovoltaic solar cells.*

Keywords: *PID-test, photovoltaic solar cell, electroluminescent defect*

ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫ Х ДЕФЕКТОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ PID – ТЕСТА

**Н. Н. Зарепкина, А. П. Яненко,
К. М. Божко, И. В. Морозова,
Е. А. Прищеп**

Аннотация. *В работе представлены результаты исследования дефектов кремниевых фотоэлектрических солнечных батарей, которым присущ электролюминесцентный эффект в*

видимом диапазоне излучения при подаче к батарее обратного напряжения. В экспериментах задействован специально разработанный лабораторный стенд телевизионных измерений, который можно использовать при испытаниях солнечных батарей на длительное действие высокого обратного напряжения (PID - тест). В результате получены вольт-яркостные характеристики отдельных дефектов и составлена карта видимых электролюминесцентных дефектов серийной солнечной батареи мощностью 30 Вт на основе монокристаллического кремния. Результаты работы могут быть использованы в производстве фотоэлектрических солнечных батарей.

Ключевые слова: *PID-тест, фотоэлектрическая солнечная батарея, электролюминесцентный дефект*