

УДК 53.088

Манілов А.І., к.ф.-м.н.

Вдосконалення математичної обробки фотоелектричного відгуку на модульоване освітлення

Інститут високих технологій, Київський
національний університет імені Тараса
Шевченка, 03680, м. Київ, просп. Глушкова 4г,
e-mail: anmanilov@univ.kiev.ua

A.I. Manilov, Ph.D.

Improved mathematical processing of photoelectric response on modulated illumination

Institute of High Technologies, Taras Shevchenko
National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova
St., 4g
e-mail: anmanilov@univ.kiev.ua

Розроблено вдосконалений метод математичної обробки фотоелектричного відгуку сонячного елемента на модульоване освітлення. Розглянуто два варіанти наближень, подібності елементів і зсуву вольт-амперної характеристики, та розширення відповідних обчислювальних схем на випадок довільного фотоелектричного модуля. Запропоновані вдосконалення дозволяють тестувати сонячні батареї з неоднаковими параметрами компонентів.

Ключові слова: сонячний елемент, фотоелектричний сигнал, тестування.

The improved mathematical processing of photoelectric signal obtained from solar cell under modulated illumination is proposed. Suggested method extends the scope of the original testing approach, which basic assumption is constant proportionality coefficient between the photoelectric response and derivative of current-voltage characteristics of the element. So, the more flexible assumption methods are proposed. The first method is based on supposition that the solar module elements have identical parameters but different responses for different values of current. The second method requires a fixed bias of current at light, but allows for differences in the components of the device. The corresponding modifications of calculation schemes for current-voltage characteristics restoration are listed. The advantages and disadvantages of used calculation approaches are discussed. It is possible to combine these methods in the algorithm, which does not require any of the previous assumptions. This combination provides a tool for research and diagnostics of semiconductor solar cells with heterogeneous parameters.

Key Words: solar cell, photoelectric signal, testing.

Статтю представив д. ф.-м. н., проф. Скришевський В.А.

1. Вступ

Дослідження сонячних елементів займає помітне місце у сучасній фізиці. На сьогоднішній день напівпровідникова промисловість виробляє кремнієві фотоелектричні модулі з коефіцієнтом корисної дії біля 18-19% для публічного використання. Найкращі показники ефективності сучасних пристроїв сягають 25% [1-2]. При цьому, ціна на сонячні батареї знизилась на 70% протягом останніх 5 років. Системи на основі напівпровідникових модулів демонструють автономність та здатність повністю забезпечити потреби споживача у енергії [3-4].

Важливим напрямком досліджень сонячних елементів є розробка засобів їх тестування. Класичними способами тестування fotocутливих пристроїв є вимірювання їх вольт-амперних характеристик (ВАХ) та реєстрація спектральних залежностей наведеного фотоелектричного сигналу [1-2]. Вони дозволяють визначити експлуатаційні показники пристроїв. Ці методи постійно вдосконалюються новими особливостями в освітленні, попередній обробці зразків та конструкції приладів [5].

Недоліком класичних способів є здатність тестування лише модуля в цілому, а не його

компонент. Сучасні сонячні батареї складаються зі зв'язаних між собою фотоелектричних елементів, кожен з яких робить свій внесок у загальну ефективність пристрою. Відповідно, постають задачі визначення характеристик окремих елементів, виявлення дефектних складових.

Одним з перспективних засобів тестування є метод діагностики сонячних елементів у модулях шляхом вимірювання електричного відгуку на модульованому освітленні [6]. Він дозволяє отримати ВАХ складових пристрою без необхідності у його руйнуванні чи створенні додаткових контактів. Такий підхід має ряд обмежень, покладених в основу обробки результатів вимірювань. Область застосування методу можна розширити за рахунок вдосконалення математичної обробки даних [7]. У статті запропоновано шляхи вирішення цієї проблеми.

2. Вихідний метод

2.1. Засади методу

Вихідний метод полягає у вимірюванні і наступній математичній обробці малого сигналу, наведеного при освітленні кожного елемента сонячної батареї модульованим світлом [6].

Зразок підключається до електричного кола, в якому реалізується гальваностатичний режим. За таких умов опромінення слабким модульованим світлом призводить до генерації змінної напруги, необхідної для того, щоб наскрізний струм залишився незмінним.

Модульоване світло малої інтенсивності фокусується на окремому n -му елементі модуля. Відповідно, фотоелектричний сигнал δv від освітленого елемента виділяється на частоті модуляції. Цей фотоелектричний сигнал є пропорційним похідній ВАХ на елементі:

$$\delta v(l, n) = K \cdot (dV/dI)_n \quad (1)$$

Відгук реєструється для кожного елемента при різних значеннях струму. Коефіцієнт пропорційності K розраховується з

експериментальних значень фотоелектричного сигналу та похідної загальної ВАХ модуля на основі адитивності характеристик елементів. Відновлення ВАХ n -го елемента здійснюється інтегруванням похідної:

$$V_n(I) = \int_0^I \frac{\delta v(i, n)}{K} di + V_{xx} \quad (2)$$

де V_{xx} – постійна інтегрування, яка дорівнює нулю для темнових ВАХ і напрузі холостого ходу при постійному освітленні.

Тобто, одержання темної ВАХ елемента виконується у два етапи: (а) модульоване освітлення елемента із вимірюванням електричного відгуку, пропорційного похідній від ВАХ, (б) обчислення коефіцієнтів пропорційності та відновлення ВАХ інтегруванням.

2.2. Обмеження методу

Розрахунки вихідного методу базуються на припущенні, що коефіцієнт пропорційності K між значенням фотоелектричного відгуку елемента та похідною його ВАХ є постійним. Але у загальному випадку, цей коефіцієнт, визначаючий зсув ВАХ при освітленні, залежить від струму I , на якому проводять вимірювання, а також від елемента n , що тестується. Тобто, справедливості подальших розрахунків у методі базується на переході:

$$K(I, n) = K = const \quad (3)$$

Що ж робити, якщо таке спрощення не працює? Задача є досить складною для розрахунку. Для полегшення завдання можна виділити 2 варіанти вдосконалення методу, які припускають незалежність K від однієї зі змінних. Це спрощує розрахунки щодо загального випадку, але в той же час розширює область застосовності вихідного методу.

3. Запропонований метод

3.1. Наближення подібності елементів

Перше наближення базується на ідентичності параметрів елементів сонячного

модуля. В той же час допускається нерівномірний зсув ВАХ по осі струму. У цьому випадку коефіцієнт пропорційності має вигляд:

$$K(I, n) = K(I) \quad (4)$$

Відповідно, фотоелектричний відгук n -го елемента при значенні струму I буде визначатися за формулою:

$$\delta v(I, n) = K(I) \cdot (dV/dI)_n \quad (5)$$

З адитивності ВАХ елементів модуля, $K(I)$ може бути обчислений зі значень фотоелектричного відгуку елементів та похідної повної ВАХ пристрою:

$$K(I) = \sum_n \delta v(I, n) / (dV/dI)_{\text{модуля}} \quad (6)$$

Отримавши набір коефіцієнтів на різних струмах, можна розрахувати ВАХ елемента за формулою (2). Тобто при цьому наближенні залишається вихідний математичний апарат, але коефіцієнти розраховуються при різних струмах із врахуванням залежності $K(I)$ при інтегруванні.

3.2. Наближення зсуву ВАХ

Другий варіант наближення полягає у здатності ВАХ пристрою зсуватися на фіксовану величину по осі струмів при освітленні. Це наближення застосовується у вихідному методі. Вдосконалимо цей підхід дозволом елементам сонячного модуля мати відмінні один від одного параметри. В такому випадку коефіцієнт пропорційності K не залежить від сили струму, проте має своє значення для кожного елемента:

$$K(I, n) = K(n) \quad (7)$$

Тоді фотоелектричний відгук задається співвідношенням:

$$\delta v(I, n) = K(n) \cdot (dV/dI)_n \quad (8)$$

Склавши ВАХ всіх елементів модуля отримаємо рівняння:

$$(dV/dI)_{\text{модуля}} = \sum_n \delta v(I, n) / K(n) \quad (9)$$

Невідомими в цьому рівнянні виступають

коефіцієнти $K(n)$. Відповідно, кількість невідомих дорівнює кількості елементів модуля. Набір рівнянь виду (9) можна отримати, вимірюючи фотоелектричний відгук при різних струмах.

Нехай у модулі N елементів, а виміри проводяться при M значеннях струму. Тоді результатом буде система M рівнянь із N невідомими, розв'язання якої дасть значення всіх $K(n)$. Для розв'язності системи необхідно, щоб $M \geq N$. Узгодити кількість робочих точок на ВАХ із кількістю елементів у модулі досить просто. Відновлення ВАХ кожного елемента здійснюється за допомогою формули (2).

3.3. Загальний випадок

Розглянемо загальний випадок, коли коефіцієнт пропорційності $K(I, n)$ залежить від струму і має різне значення для кожного елемента модуля. Відповідно, фотоелектричний відгук n -го елемента матиме вигляд:

$$\delta v(I, n) = K(I, n) \cdot (dV/dI)_n \quad (10)$$

У цьому випадку формули (6) і (9) не дозволяють визначити коефіцієнти пропорційності для повної ВАХ елемента. Але існує можливість застосування розглянутих наближень для ділянки ВАХ.

Для цього необхідне виконання наступної умови: кількість значень сили струму, при яких проводились вимірювання, має значно перевищувати кількість елементів у модулі: $M \gg N$. Тоді можна розбити ВАХ на ділянки, кількість точок на кожній з яких рівна N : (I_1, I_2, \dots, I_N) , $(I_{N+1}, I_{N+2}, \dots, I_{2N})$, ..., $(I_{M-N}, I_{M-N+1}, \dots, I_M)$. Введемо на кожній ділянці наближення зсуву ВАХ (7). В такому випадку коефіцієнти пропорційності на ділянках можуть бути обчислені з систем рівнянь (9). Це дасть можливість відновити їх ВАХ.

Поєднавши ВАХ всіх ділянок можна отримати загальну характеристику кожного елемента модуля. Звуження ділянок і відповідне зростання кількості точок вимірювань сприятиме більшій точності методу.

4. Висновки

Запропоновані способи вдосконалення математичної обробки фотоелектричного сигналу дозволяють розширити область застосування методу тестування сонячних батарей за допомогою модульованого освітлення.

Перший спосіб заснований на припущенні, що елементи сонячного модуля мають ідентичні параметри, але різні відгуки для різних значень струму. Другий спосіб

вимагає фіксованого зсуву струму при освітленні, але допускає неоднаковість компонентів пристрою.

Поєднання запропонованих методів дає інструмент для дослідження і діагностики напівпровідникових сонячних батарей з неоднорідним розподілом параметрів.

Список використаних джерел

1. *Fraas L.* Solar cells and their applications / L. Fraas, L. Partain. - John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2010. - 627 p.
2. *El Chaar L.* Review of photovoltaic technologies / L. El Chaar, L.A. Lamont, N. El Zein // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* - 2011. - **15**. - P. 2165-2175.
3. *Krauter S.C.W.* Development of an integrated solar home system / S.C.W. Krauter // *Solar Energy Materials & Solar Cells.* - 2004. - **82**. - P. 119-130.
4. *Wissem Z.* Modeling and technical-economic optimization of an autonomous photovoltaic system / Z. Wissem, K. Gueorgui, K. Hédi // *Energy.* - 2012. - **37**. - P. 263-272.
5. *Agroui K.* Indoor and outdoor characterizations of photovoltaic module based on multicrystalline solar cells / K. Agroui // *Energy Procedia.* - 2012. - **18**. - P. 857-866.
6. *Litvinenko S.V.* Nondestructive diagnostics of solar cells in modules and batteries by means of modulated optical beam-induced photovoltaic signal / S.V. Litvinenko // *Solar Energy Materials & Solar Cells.* - 2003. - **77**. - P. 369-376.
7. *Manilov A.I.* Improved method of diagnostics for multi-component structures / A.I. Manilov // *International Conference "Functional Materials", 29 September - 5 October 2013, Gaspra, Ukraine: abstracts.* - Gaspra. - 2013. - P. 482.

References

1. FRAAS, L., PARTAIN, L. (2010) *Solar cells and their applications.* John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey.
2. EL CHAAR, L., LAMONT, L.A., EL ZEIN, N. (2011) Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 15. p. 2165-2175.
3. KRAUTER, S.C.W. (2004) Development of an integrated solar home system. *Solar Energy Materials & Solar Cells.* 82. p. 119-130.
4. WISSEM, Z., GUEORGUI, K., HÉDI, K. (2012) Modeling and technical-economic optimization of an autonomous photovoltaic system. *Energy.* 37. p. 263-272.
5. AGROUI, K. (2012) Indoor and outdoor characterizations of photovoltaic module based on multicrystalline solar cells. *Energy Procedia.* 18. p. 857-866.
6. LITVINENKO, S.V. (2003) Nondestructive diagnostics of solar cells in modules and batteries by means of modulated optical beam-induced photovoltaic signal. *Solar Energy Materials & Solar Cells.* 77. p. 369-376.
7. MANILOV, A.I. (2013) Improved method of diagnostics for multi-component structures. In *International Conference "Functional Materials", Sunday 29th September to Saturday 05th October 2013.* Gaspra. p. 482.

Надійшла до редколегії 15.06.15