

Устройство контроля температурных характеристик солнечного элемента

Н.И. Слипченко, В.А. Письменецкий, Н.В. Герасименко, А.Д. Шереметьев

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Ленина, 14, 40007 Харьков, Украина

(Получено 17.07.2013; опубликовано online 17.10.2013)

Разработано устройство для измерения температурных коэффициентов выходных фотоэлектрических характеристик солнечного элемента. Указанное устройство обеспечивает оперативный мониторинг и исследования температурных зависимостей выходных фотоэлектрических и выходных энергетических параметров солнечных элементов.

Ключевые слова: Температурный коэффициент, Солнечный элемент, Температура, Эффективность преобразования, Фотопреобразователь.

PACS numbers: 65.40.– b

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к солнечным элементам (СЭ), непосредственно преобразующим солнечное излучение в электрическую энергию, вызван интенсивным и постоянно расширяющимся поиском источников возобновляемой энергии, среди которых наиболее быстро развивающимся является солнечная энергетика. Такой повышенный интерес к источникам возобновляемой энергии объясняется ограниченными запасами полезных ископаемых, ухудшением экологической обстановки и постоянно возрастающим уровнем загрязнения окружающей среды продуктами сгорания, большим риском и возросшими затратами на обеспечение безопасности, связанными с использованием атомной энергии.

Поиск путей формирования качественных и стабильных по своим характеристикам СЭ представляет собой фундаментальную задачу. Важным фактором, влияющим на стабильность выходных характеристик СЭ, является температура.

Повышение температуры СЭ при облучении солнечным светом отрицательно влияет на его эффективность фотопреобразования, в результате чего падает выходная нагрузочная мощность [1]. Экспериментальные исследования характеристик монокристаллической солнечной панели KV 150/24(12) в зимних условиях [2] показали, что максимальную выходную мощность солнечные модули, состоящие из СЭ, выдают при низких температурах, ясном небе и интенсивном солнечном излучении. Однако, как известно, различные типы СЭ отличаются по зависимостям выходных фотоэлектрических характеристик от температуры [3]. Поэтому целесообразно проведение исследований температурной зависимости выходных фотоэлектрических характеристик СЭ.

Следовательно, температурные коэффициенты выходных параметров СЭ являются важными характеристиками, как отдельных элементов, так и солнечных модулей, которые необходимо оперативно и точно контролировать. Таким образом, поставленная задача разработки устройства для исследования температурных характеристик СЭ является своевременной и актуальной.

Во многих публикациях [4, 5, 6] приводятся методики и оборудование для измерения температурной

зависимости выходных характеристик СЭ. Эти методы используют температурные зависимости световых вольтамперных характеристик (ВАХ) фотопреобразователей (ФП). Но, как известно, такие измерительные установки являются очень дорогостоящими. Отметим, что при этом для оценки выходной мощности применяется соотношение:

$$P_M = I_{mp} \cdot V_{mp} = I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF.$$

Анализ показывает, что из трех множителей коэффициент заполнения (FF) имеет температурный коэффициент почти в 20 раз меньше, чем V_{OC} и в 5 раз меньше чем I_{SC} [7]. Следовательно, для получения относительно достоверной зависимости $P_M(T)$ достаточно исследовать зависимость $V_{OC}(T)$ и $I_{SC}(T)$. В этом случае реализация измерителя температурных зависимостей существенно проще и требует меньших затрат.

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Как и все полупроводниковые устройства, СЭ чувствительны к температуре. Повышение температуры уменьшает ширину запрещенной зоны полупроводника, влияя тем самым на большинство параметров полупроводникового материала. Уменьшение ширины запрещенной зоны с ростом температуры можно рассматривать, как увеличение энергии электронов в валентной зоне, поэтому теперь для перехода в свободное состояние необходимо меньше энергии. В результате уменьшения ширины запрещенной зоны ухудшаются выходные характеристики СЭ.

В СЭ параметром, наиболее зависящим от повышения температуры, является напряжение холостого хода V_{OC} .

Напряжение холостого хода V_{OC} уменьшается с повышением температуры из-за температурной зависимости тока I_0 (рис. 1). Значение I_0 для p-n перехода определяется соотношением:

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D},$$

где q – заряд электрона; D – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда; L – диффузионная длина неосновных носителей заряда; N_D – концентрация примеси (уровень легирования); n_i – концентрация собственных носителей заряда.

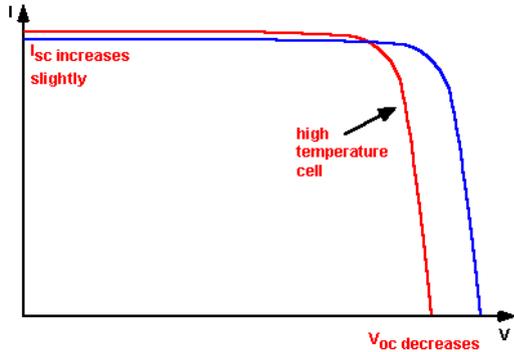


Рис. 1 – Влияние температуры на ВАХ СЭ

В приведенном уравнении большинство параметров также зависят от температуры, однако наиболее существенное влияние связано с концентрацией собственных носителей заряда n_i . Концентрация собственных носителей заряда зависит от энергии запрещенной зоны (при уменьшении ширины запрещенной зоны увеличивается концентрация собственных носителей заряда) и от энергии носителей заряда (с повышением температуры увеличивается энергия). Уравнение для концентрации собственных носителей зарядов:

$$n_i^2 = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) = BT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right)$$

где T – температура; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; m_e и m_h – эффективная масса электрона и дырки соответственно; E_{G0} – ширина запрещенной зоны линейно экстраполированная к абсолютному нулю; B – постоянная, по существу независимая от температуры.

Подставляя это уравнение в предыдущее выражение для I_0 и, полагая, что температурными зависимостями других параметров можно пренебречь, получаем:

$$I_0 = qA \frac{D}{LN_D} BT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \approx B'T^{\gamma} \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right),$$

где B' – константа, не зависящая от температуры. Константа γ используется вместо числа 3 для включения возможных температурных зависимостей других параметров материала.

Влияние I_0 на напряжение холостого хода может быть оценено подстановкой уравнения для I_0 в уравнение для V_{OC} :

$$\begin{aligned} V_{OC} &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0}\right) = \frac{kT}{q} [\ln I_{SC} - \ln I_0] = \\ &= \frac{kT}{q} \ln I_{SC} - \frac{kT}{q} \ln \left[B'T^{\gamma} \exp\left(-\frac{qV_{G0}}{kT}\right) \right] = \\ &= \frac{kT}{q} \left(\ln I_{SC} - \ln B' - \gamma \ln T + \frac{qV_{G0}}{kT} \right), \end{aligned}$$

где $E_{G0} = qV_{G0}$. При условии, что dV_{OC}/dT не зависит от dI_{SC}/dT , dV_{OC}/dT может быть найдена как:

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = \frac{V_{OC} - V_{G0}}{T} - \gamma \frac{k}{q}.$$

Данное уравнение показывает, что температурная чувствительность СЭ зависит от напряжения холостого хода. Таким образом, СЭ с более высоким напряжением меньше зависят от температуры.

Ток короткого замыкания I_{SC} немного увеличивается с повышением температуры, так как уменьшается энергия запрещенной зоны E_G и больше фотонов имеют энергию, достаточную для создания электрон-дырочных пар.

Упрощенная температурная зависимость FF для кремния определяется следующим уравнением:

$$\frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} \approx \left(\frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} - \frac{1}{T} \right).$$

Влияние температуры на максимальную выходную мощность осуществляется равенством

$$P_{M \text{ var}} = \frac{1}{P_M} \frac{dP_M}{dT} \approx \frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} + \frac{1}{I_{SC}} \frac{dI_{SC}}{dT}$$

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Устройство измерения температурных коэффициентов параметров СЭ (тока короткого замыкания I_{SC} , напряжения холостого хода V_{OC} и выходной мощности нагрузки P_M) включает две основных составляющих – измеритель выходных характеристик СЭ и приборный стол для закрепления контактов фотопреобразователя.

В состав цифрового измерителя (рис. 2) входят: измерители температуры (диапазон измерения - 55...125 °C); напряжения (диапазоны измерения напряжения холостого хода V_{OC} от 0 до 999 мВ и от 0 до 100 В, с дискретностью измерения 0.1 мВ); тока (диапазоны измерения тока короткого замыкания I_C от 0 до 999 мкА и от 0.01 до 10 А, дискретностью измерения 0.1 мкА); интерфейсный модуль; модуль стабилизации напряжения.

На рис. 3 представлен общий вид приборного стола для закрепления контактов ФП.

Для рабочей поверхности приборного стола используется электроизоляционный материал – гетинакс лавсановый, наиболее подходящий по своим температурным характеристикам.



Рис. 2 – Блок-схема цифрового измерителя

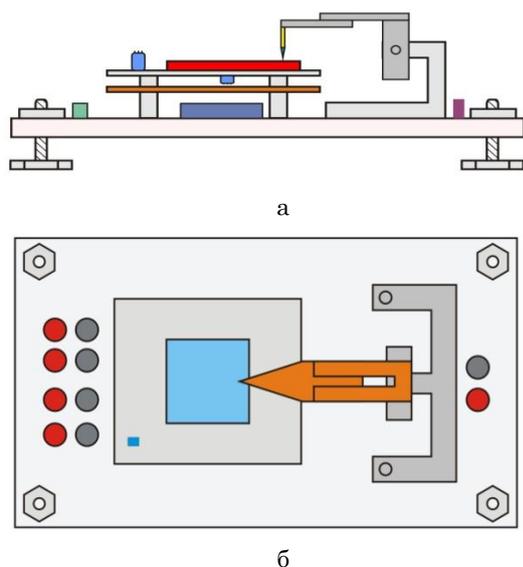


Рис. 3 – Эскиз установки измерения температурных коэффициентов СЭ (вид сбоку (а) и сверху (б)) 1 – изолирующая поверхность; 2 – регулируемые стойки; 3 – зонд; 4 – приборный столик; 5 – солнечный элемент; 6 – датчик температуры; 7 – стойки вертикального перемещения зонда; 8 – ручка перемещения

Для замыкания фронтального контакта используется перемещающийся по вертикальной оси зонд. В качестве имитатора солнечного излучения применяется галогенная лампа мощностью 500 Вт с регулируемой высотой подъема.

В качестве тыльного контакта используется алюминиевая подложка, обеспечивающая хороший тепловой и электрический контакт, а также оптимальное распределение температуры на поверхности объекта. При помощи нихромовой спирали регулируется нагрев СЭ.

К подложке прикреплены датчики температуры с помощью теплопроводящей пасты для лучшего контакта и обеспечения измерения температуры с погрешностью не более ± 0.2 °С. Все выводы присоединяются к блоку измерения характеристик СЭ для передачи и обработки полученных значений.

Перед началом измерения требуется разогрев галогенной лампы мощностью 500 Вт и установка интенсивности светового излучения, соответствующей АМ 1.5, с помощью изменения расстояния между излучателем и исследуемым ФП. При температуре СЭ 25 °С производится калибровка измерительного комплекса относительно эталонного СЭ. КПД рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{ph} \cdot S} FF,$$

где I_{sc} – ток короткого замыкания, V_{oc} – напряжение холостого хода, FF – коэффициент заполнения, P_{ph} – мощность светового потока, S – площадь СЭ.

Измерения проводятся в диапазоне температур от 25 °С до 80 °С согласно ГОСТ 28976-91. При повышении температуры фотопреобразователя на 1 °С с микроконтроллеров считываются показания, которые сводятся в базу данных на персональном ком-

пьютере, обрабатываются и сохраняются в программе. Используя таблицу данных, программа строит графики зависимостей от $I_{sc}(T)$ и $V_{oc}(T)$, а также $\eta(T)$. В итоге создается архив с данными, который сохраняется на компьютере. Рабочее поле программы приведено на рисунке 4.

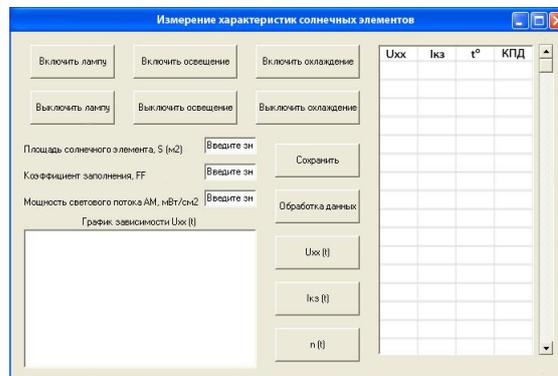


Рис. 4 – Рабочее окно программы

4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА, ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.

Для проведения исследований использован СЭ типа НІТ (heterojunction with intrinsic thin layer) - гетеропереход с тонким слоем a -Si:H собственной проводимости (рисунок 5), обладающий высокой эффективностью преобразования [3]. Это стало возможным благодаря введению нелегированного тонкого слоя a -Si:H с обеих сторон c -Si пластины для пассивации дефектов на ее поверхности, что уменьшает рекомбинацию неосновных носителей заряда и соответственно повышает эффективность преобразования СЭ. Наибольшая эффективность преобразования для НІТ СЭ составляет 23,9 % [8].

Испытуемый СЭ был установлен на алюминиевую подложку. Температура измеряется при помощи датчиков, один из которых установлен на алюминиевую подложку, а другой контактирует с СЭ с тыльной стороны. Выводы датчиков присоединены к управляющему блоку для передачи контрольного сигнала и значения температуры на индикатор. Облученность в рабочей плоскости имитатора отрегулирована так, чтобы ток короткого замыкания эталонного СЭ при температуре (25 ± 5) °С соответствовал его градуированному значению. Измерение тока короткого замыкания I_{sc} и напряжения холостого хода V_{oc} испытуемого СЭ проводится в установленном тепловом режиме при температуре, близкой к минимальной заданного температурного диапазона (25 °С). Измерения проводились при температуре выше температуры воздуха, поэтому возможность конденсации влаги на активных поверхностях испытуемого и эталонного элементов можно было не учитывать. В процессе исследования температура испытуемого СЭ повышалась на 5 °С и повторялись измерения I_{sc} и V_{oc} в диапазоне от 25 °С до 80 °С.

Для анализа экспериментальных температурных зависимостей выходных параметров V_{oc} и I_{sc} используем известное уравнение ВАХ СЭ:

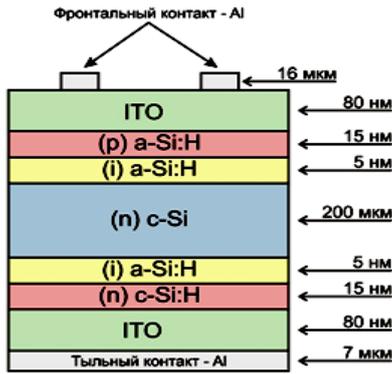


Рис. 5 – Структура НИТ СЭ

$$V = \frac{AkT}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} - 1}{I_0} + 1 \right)$$

и производная dV/dT , которая, как известно [9], имеет вид:

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V}{T} - \frac{AkT}{eI_0} \cdot \frac{dI_0}{dT} + \frac{AkT}{e} \cdot \frac{1}{I_{ph} - 1} \frac{d(I_{ph} - 1)}{dT}$$

Входящий в третье слагаемое фототок I_{ph} слабо зависит от температуры, так как $I_{ph} = eK_c g_0 S \eta$, где K_c – интегральный коэффициент сбора; η – квантовый выход; S – площадь СЭ; g_0 – число фотонов, поглощаемых за единицу времени.

Коэффициент сбора K_c зависит от диффузионной длины неосновных носителей заряда L .

$$K_c = f(L) \quad L = \sqrt{D\tau}$$

где D – коэффициент диффузии; τ – время жизни.

При этом $D \sim \sqrt{T}$, а τ слабо зависит от температуры.

С учетом известной зависимости тока насыщения I_0 от температуры второе слагаемое, при условии $A = 1$, имеет вид:

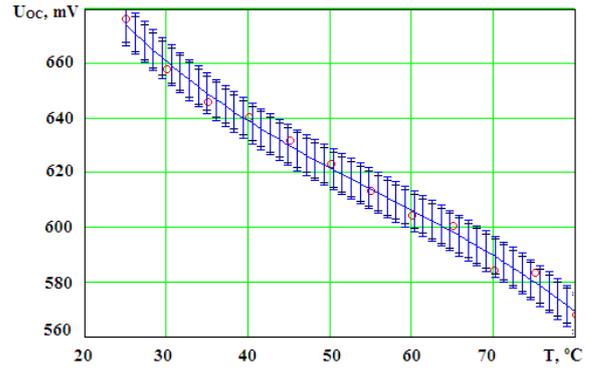
$$-\frac{AkT}{eI_0} \cdot \frac{dI_0}{dT} = -\frac{kT}{e} \cdot \frac{E_g}{kT^2} = -\frac{E_g}{eT}$$

Тогда

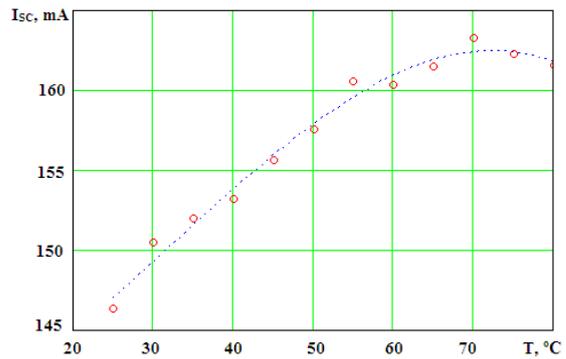
$$\frac{dV}{dT} = \frac{V}{T} - \frac{E_g}{eT} = -\frac{E_g - eV}{eT}$$

Поскольку всегда $E_g > eV$, температурный коэффициент напряжения будет отрицательным, и с ростом температуры выходное напряжение ФП уменьшается. С помощью экспериментально полученных температурных зависимостей I_{sc} и V_{oc} (рис. 6) для НИТ СЭ были вычислены температурные коэффициенты для этих параметров.

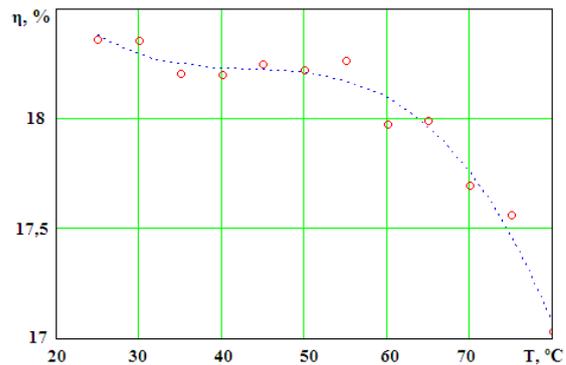
Для температурных зависимостей параметров СЭ были разработаны математические модели на основе регрессионного анализа и рассчитаны доверительные интервалы по критерию Стьюдента. На рис. 6 точками представлены экспериментальные данные, а пунктирной линией результаты аппроксимации по следующим регрессионным моделям:



а



б



в

Рис. 6 – Температурные зависимости а) напряжения холостого хода, б) тока короткого замыкания и в) КПД

$$V_{oc} = 7,826 \cdot 10^{-2} - 6,068T + 8,117 \cdot 10^{-2}T^2 - 4,844 \cdot 10^{-4}T^3$$

$$I_{sc} = 1,383 \cdot 10^2 + 1,905 \cdot 10^{-1}T + 8,603 \cdot 10^{-3}T^2 - 9,151 \cdot 10^{-5}T^3$$

$$\eta = 2,001 \cdot 10^{-1} - 1,218 \cdot 10^{-1}T + 2,802 \cdot 10^{-3}T^2 - 2,174 \cdot 10^{-5}T^3$$

Доверительные интервалы по критерию Стьюдента для регрессии 3-го порядка составили: $V_{oc}(T) - 0,23 \%$ (рис. 6а); $I_{sc}(T) - 0,39 \%$; $\eta(T) - 0,4 \%$

Как видно из рис. 6 при увеличении температуры СЭ от 25 °C до 80 °C ($\Delta T = 55$ °C) напряжение холостого хода уменьшается от 677 до 568 мВ (рис. 6а), а КПД падает с 18,36 % до 17,03 % (рис. 6в). При этом разница температуры воздуха и СЭ изменялась от 0 °C до 55 °C. По результатам проведенного эксперимента

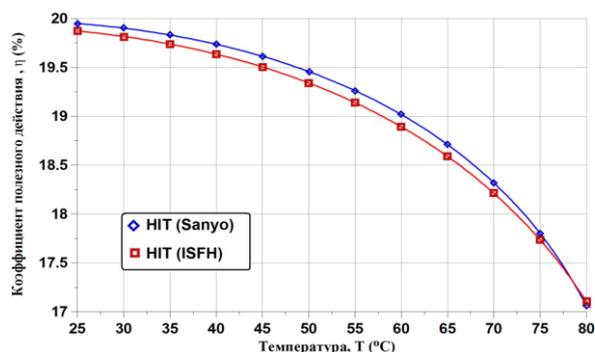


Рис. 7 – Графики зависимости КПД от температуры для разных типов ФП

было определено, что температурные коэффициенты напряжения холостого хода $\Delta V_{oc}/\Delta T = -1,97$ мВ/°С; тока короткого замыкания $\Delta I_{sc}/\Delta T = 0,28$ мА/°С и КПД $\Delta \eta/\Delta T = -0,024$ %/°С.

После проведения эксперимента было выполнено сравнение температурных коэффициентов эффективности преобразования различных НИТ СЭ (рис. 7).

В результате сравнения определено, что при работе в диапазоне температур от 25°С до 80°С НИТ СЭ, полученный в ISFH (Германия) (синие квадраты) имеет практически такой же температурный коэффициент эффективности преобразования, как и НИТ, полученный фирмой Sanyo [10] (черные кружки).

5. ВЫВОДЫ

Из проведенных экспериментов и расчетов видно, что температурный коэффициент для напряжения холостого хода отрицательный и, следовательно, рост температуры ведет к падению V_{oc} и, соответственно, к уменьшению КПД и снижению мощности.

Результаты, полученные с помощью прибора для измерения температурных коэффициентов выходных фотоэлектрических параметров СЭ, находятся в хорошем соответствии с данными предыдущих исследователей [11]. Следовательно, прибор для измерения температурных коэффициентов выходных фотоэлектрических параметров СЭ соответствует требованиям ГОСТ 28976-91 и может применяться для дальнейших исследований.

Control Device for Temperature Characteristics of a Solar Cell

N.I. Slipchenko, V.A. Pismenetskiy, N.V. Gerasimenko, A.D. Sheremet'ev

Kharkov National University of RadioElectronics, Lenin Avenue 14, 40007 Kharkov, Ukraine

The device for measuring of the temperature coefficients of the photovoltaic characteristics of a solar cell is developed. This device provides a real-time monitoring and study of the energy and photovoltaic parameters of a solar cells and its temperature dependence.

Keywords: Temperature coefficient, Solar cell, Temperature conversion efficiency, Photoconverter.

Пристрій контролю температурних характеристик сонячного елемента

М.І. Сліпченко, В.О. Письменецький, М.В. Герасименко, О.Д. Шереметьєв

Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Леніна, 14, 40007 Харків, Україна

Розроблено пристрій для вимірювання температурних коефіцієнтів вихідних фотоелектричних характеристик сонячного елемента. Вказаний пристрій забезпечує оперативний моніторинг та дослідження температурних залежностей вихідних фотоелектричних і вихідних енергетичних параметрів сонячних елементів.

Ключові слова: Температурний коефіцієнт, Сонячний елемент, Температура, Ефективність перетворення, Фотоперетворювач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- David Meneses-Rodriguez, Paul P. Horley, Jesus Gonzalez-Hernandez, Yuri V. Vorobiev, Peter N. Gorley, *Sol. Energ.* **78**, 243 (2005).
- Н.И. Сліпченко, В.А. Письменецький, А.В. Фролов, Н.В. Герасименко, А.А. Кирилук, А.Н. Дзюба, И.В. Звершховский, *Вестник ХПИ* **24**, 86 (2011).
- E. Skoplaki, J.A. Palyvos, *Sol. Energ.* **83**, 614 (2009).
- Takeshi Yanagisawa, Takeshi Kojima, Tadamasu Kouyanagi, Kiyoshi Takahisa, Kuniomi Nakamura, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **69**, 287 (2001).
- V Jafari Fesharaki, Majid Dehghani, J. Jafari Fesharaki, *Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation (ETEC Tehran)*, 1 (Tehran, Iran: 2011).
- David L. King, Jay A. Kroatochvil, William E. Boyson, *25th IEEE PVSC* (Anaheim, California: 1997).
- A.Q. Malik, Lim Chee Ming, Tan Kha Sheng, M. Blundell, *AJSTD* **26**, 61 (2010).
- T. Kinoshita, D. Fujishima, A. Yano, A. Ogane, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, N. Tokuoka, H. Kanno, H. Sakata, M. Taguchi, E. Maruyama, *26th EUPVSC Proceedings*, 871 (2011).
- А.М. Васильев, А.П. Ландсман, *Полупроводниковые фотопреобразователи* (Москва: Сов. Радио: 1971).
- T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, E. Maruyama, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **95**, 18 (2011).
- M. Rahmouni, A. Datta, P. Chatterjee, J. Damon-Lacoste, et. al., *J. Appl. Phys.* **107**, 054521 (2010).