

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ШУНТИРУЮЩЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ CIGS СОЛНЕЧНОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО СОЛНЕЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Р.Р.Кобулов<sup>□</sup>, Н.А. Матчанов, О.К.Атабоев, Ф.А.Акбаров*

Международный институт солнечной энергии, Ташкент, Узбекистан

<sup>□</sup>e-mail: [krr1982@bk.ru](mailto:krr1982@bk.ru)

*Аннотация.* Проведены исследования нагрузочных вольтамперных характеристик солнечного фотоэлектрического модуля, на основе тонкопленочного поликристаллического полупроводникового бинарного соединения  $Cu(In,Ga)Se_2$ , в условиях реального солнечного освещения ( $P_{rad}=780 \pm 30 \text{ Вт/м}^2$ ), в температурном интервале  $25^\circ\text{C}-50^\circ\text{C}$  и определены величины последовательного и шунтирующего сопротивления. Установлено, что с увеличением температуры величины последовательного и шунтирующего сопротивления солнечного фотоэлектрического модуля уменьшаются, что, вероятнее всего, связано с модуляцией сопротивления буферного фронтального слоя  $n\text{-CdS}$ .

*Ключевые слова:* вольтамперная характеристика, тонкопленочный солнечный фотоэлектрический модуль, поликристаллический полупроводник,  $Cu(In,Ga)Se_2$ , солнечная радиация, последовательное и шунтирующее сопротивления, буферный слой,  $CdS$ .

## SERIAL AND SHUNTABLE RESISTANCE OF CIGS SOLAR PHOTO-ELECTRIC MODULE IN THE CONDITIONS OF REAL SOLAR LIGHTING AT VARIOUS TEMPERATURES

*R.R.Kobulov<sup>□</sup>, N.A.Matchanov, O.K.Ataboev, F.A.Akbarov*

International Solar Energy Institute, Tashkent, Uzbekistan

<sup>□</sup>e-mail: [krr1982@bk.ru](mailto:krr1982@bk.ru)

*Abstract.* The current-voltage characteristics of the solar photovoltaic module, based on a thin-film polycrystalline semiconductor binary compound  $Cu(In, Ga)Se_2$ , under real solar illumination ( $P_{rad}=780 \pm 30 \text{ W/m}^2$ ), in the temperature range of  $25^\circ\text{C}-50^\circ\text{C}$ , have been studied and the values of serial and shunt resistance are determined. It has been established that with increasing temperature, the magnitudes of the series and shunting resistance of the solar photovoltaic module decrease, which is most likely due to the modulation of the resistance of the  $n\text{-CdS}$  buffer front layer.

*Key words:* current-voltage characteristics, thin film solar photovoltaic module, polycrystalline semiconductor,  $Cu (In, Ga) Se_2$ , solar radiation, serial and shunting resistance, buffer layer,  $CdS$ .

Одними из основных и важных структурных параметров солнечных фотоэлектрических модулей (СФЭМ) являются последовательное ( $R_{ser}$ ) и шунтирующее ( $R_{sh}$ ) сопро-

тивления. Значение этих сопротивлений определяют величину коэффициента полезного действия (КПД) и потери на этих сопротивлениях уменьшают выходную мощность СФЭМ.  $R_{ser}$  СФЭМ складывается из последовательно включенных р-п-переходу сопротивлений: контактных слоев р- и п- областей элемента, сопротивлений токосъемных контактов металл-полупроводник. Шунтирующее сопротивление отражает возможные поверхностные и объемные утечки тока по сопротивлению, параллельному р-п- переходу. В высокоэффективных солнечных элементах, а также СФЭМ, значения шунтирующего сопротивления имеют высокие величины, а значения последовательного сопротивления - низкие [1, 2].

Исследование нагрузочных вольт-амперных характеристик (НВАХ) СФЭМ [3-5], определение значений  $R_{ser}$  и  $R_{sh}$ , при различных температурах и мощностях солнечного излучения даст возможность установить энергетические потери, имеющие место, как в объеме, так и на контактах и приповерхностных слоях СФЭМ, и установить область температур и мощностей светового излучения для определения областей эффективной работы исследуемых СФЭМ. В данной работе были проведены исследования влияния температуры на величины  $R_{ser}$  и  $R_{sh}$  СФЭМ на основе тонкопленочного поликристаллического полупроводникового бинарного соединения меди-индия-галлия и диселенида ( $Cu(In,Ga)Se_2$  или CIGS), которое является одним из перспективных материалов для солнечной энергетики [6-9].

Исследования CIGS СФЭМ были проведены в реальных условиях освещенности солнечным светом 8 мая 2018 г., в городе Ташкенте на экспериментальной площадке Международного института солнечной энергии. Мощность падающего солнечного освещения ( $P_{rad}$ ), на СФЭМ была  $P_{rad}=780 \pm 30$  Вт/м<sup>2</sup>. Под действием солнечного излучения температура (Т) СФЭМ возрастала от 26 °С до 50 °С, при этом температура окружающей среды была  $T=26^\circ\text{C}$ .

Исследуемый СФЭМ, любезно предоставленный компанией Manz CIGS Technology GmbH (Германия), состоял из 36 последовательно соединенных СЭ с эффективной площадью 27.8x27.8 см<sup>2</sup>. Мощность падающего солнечного излучения измерялась с помощью датчика беспроводного анализатора Solmetric SolSensor. Температура на поверхности СФЭМ измерялась с помощью инфракрасного термометра Fluke 62 MAX. НВАХ СФЭМ исследовались с помощью анализатора солнечного модуля PROVA-210 (12 А, 60 В).

На рис. 1 представлены экспериментальные результаты температурной зависимости  $R_{ser}$  CIGS СФЭМ, которые были рассчитаны из световой нагрузочной вольт-амперной характеристики для различной температуры фотомодуля.  $R_{ser}$  СФЭМ рассчитывается из линейного участка световой ВАХ вблизи точки напряжения холостого хода ( $V_{xx}$ ) [10, 11]. Из эксперимента следует, что  $R_{ser}$  уменьшается с ростом температуры по линейной зависимости и описывается соотношением:  $R_{ser}=33.993 - 0.0846 \cdot T(K)$ , здесь показаны температурные коэффициенты сопротивления. Построение удельной проводимости ( $\sigma$ ) от  $(1/T)$ , указывает, что зависимость имеет экспоненциальный характер с энергией активацией  $E_{R_{ser}}=0.085 \pm 0.05$  эВ.

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты температурной зависимости  $R_{sh}$  CIGS СФЭМ, которые были рассчитаны из световой нагрузочной

вольт-амперной характеристики.  $R_{sh}$  СФЭМ рассчитывается из линейного участка световой ВАХ вблизи точки тока короткого замыкания ( $J_{кз}$ ) [10]. Из эксперимента следует, что  $R_{sh}$  уменьшается с ростом температуры линейным образом и описывается соотношением:  $R_{sh}=16585-41.9 \cdot T(K)$ . Построение зависимости удельной проводимости от  $(1/T)$ , указывает, что зависимость имеет активационный характер с энергией активации  $E_{R_{ser}}=0.095 \pm 0.05$  эВ.

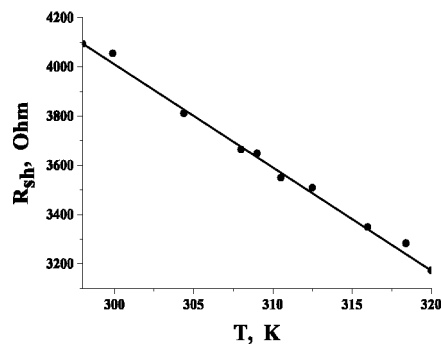
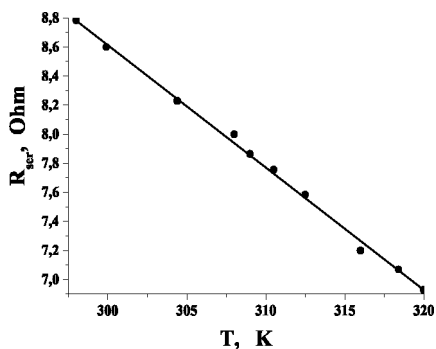


Рис. 1. Температурная зависимость  $R_{ser}$  CIGS СФЭМ. Рис. 2. Температурная зависимость  $R_{sh}$  CIGS СФЭМ.

Таким образом показано, что величины  $R_{ser}$  и  $R_{sh}$  СФЭМ на основе тонкопленочного поликристаллического бинарного соединения CIGS, уменьшаются с ростом температуры и имеют активационный характер с энергиями:  $E_{R_{ser}}=0.085 \pm 0.05$  эВ и  $E_{R_{sh}}=0.095 \pm 0.05$  эВ. Установлено, что значения энергии активации  $E_{R_{ser}}$  и  $E_{R_{sh}}$  по величине фактически одинаковы, и, по-видимому, связаны с энергией активации буферного фронтального слоя n-CdS в структуре CIGS [9]. Оптимизация структурных параметров по  $R_{ser}$  и  $R_{sh}$  CIGS СФЭМ, т.е., дальнейшее уменьшение  $R_{ser}$  и увеличение значения  $R_{sh}$ , делает его не зависимым, или, в крайнем случае, слабо зависимым от температуры, что даёт возможность для дальнейшего улучшения выходных параметров СФЭМ.

### Литература

1. K. Mertens. Photovoltaics: Fundamentals, Technology and practice. 2014. p. 297).
2. А. Фаренбрух, Р. Бьюб. Солнечные элементы, теория и эксперимент. (Под ред. д.т.н., проф. М.М. Колтуна, Москва, Энергоатомиздат, 1987.
3. R.R. Kabulov, M.A. Makhmudov, M.U. Khajiev, O.K. Ataboev, Applied Solar Energy. 52, N 1, 61 (2016).
4. R.R. Kobulov, N.A. Matchanov, B.R. Umarov. Apply Solar Energy. 53, 4, 297 (2017).
5. Н.А. Матчанов, А.А. Мирзабаев, Б.Р. Умаров, М.А. Маликов, А.У. Камолиддинов, К.А. Бобожонов, Гелиотехника 4, 20 (2016).
6. R. Jeayakumar, U.P. Singh, Ener. Envir. Sci. 10, 1306 (2017).
7. Г.Ф. Новиков, М.В. Гапанович, Успехи физических наук 187, 2, 173 (2017).
8. R.W. Miles, G. Zoppi, I. Forbes, Mater Today. 10, 20 (2007).
9. R.R. Kobulov, N.A. Matchanov, O.K. Ataboev, Applied Solar Energy 54, 2, 91 (2018).
10. М.М. Колтун. Оптика и метрология солнечных элементов (Москва, Наука, 1985).

*The text of the article is translated by Editorial of journal of “Semiconductor Physics and Microelectronics”. For more information contact: [ispm\\_uz@mail.ru](mailto:ispm_uz@mail.ru)*

One of the main and important structural parameters of solar photovoltaic modules (SPVM) are series ( $R_{ser}$ ) and shunt ( $R_{sh}$ ) resistances. The value of these resistances determines the value of the coefficient of performance (COP) and losses at these resistances reduce the output power of the SPVM.  $R_{ser}$  SPVM consists of series-connected p-n junction resistances: contact layers of p- and n- regions of an element, resistance of current-collecting metal-semiconductor contacts. Shunt resistance reflects possible surface and volume current leakage in resistance parallel to the p-n junction. In highly efficient solar cells, as well as SPVM, the values of shunt resistance are high, and the values of series resistance are low [1, 2].

The study of the load current-voltage characteristics (LCVC) of the SPVM [3-5], the determination of the values of  $R_{ser}$  and  $R_{sh}$  at different temperatures and powers of solar radiation will make it possible to establish the energy losses that occur both in the volume and on the contacts and near-surface layers of the SPVM, and to establish the temperature and power range of light radiation to determine the areas of effective operation of the studied SPVM. In this work, we studied the effect of temperature on the values of  $R_{ser}$  and  $R_{sh}$  of SPVM based on a thin-film polycrystalline semiconductor binary compound copper-indium-gallium and dyslenide (Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> or CIGS), which is one of the promising materials for solar power engineering [6-9].

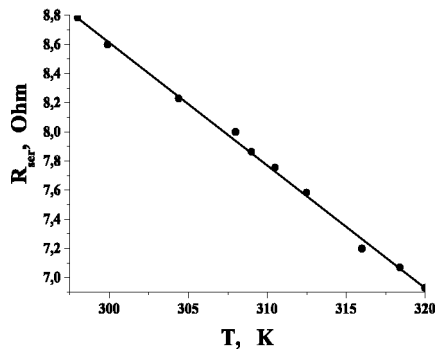
CIGS SPVM studies were carried out in real conditions of sunlight exposure on May 8, 2018, in the city of Tashkent at the experimental site of the International Institute of Solar Energy. The power of the incident solar illumination (Rad) at the SPEM was  $Rad = 780 \pm 30 \text{ W / m}^2$ . Under the influence of solar radiation, the temperature (T) of the SPVM increased from 26 ° C to 50 ° C, while the ambient temperature was  $T = 26 \text{ ° C}$ .

The studied SPVM, kindly provided by Manz CIGS Technology GmbH (Germany), consisted of 36 series-connected solar cells with an effective area of 27.8x27.8 cm<sup>2</sup>. The power of the incident solar radiation was measured using a sensor of the Solmetric SolSensor wireless analyzer. The temperature at the surface of the SPVM was measured using a Fluke 62 MAX infrared thermometer. NVAH SPVM were studied using a PROVA-210 solar module analyzer (12 A, 60 V).

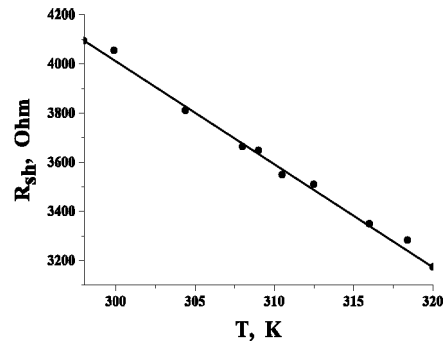
In fig. Figure 1 presents the experimental results of the temperature dependence of the  $R_{ser}$  CIGS CFEM, which were calculated from the light load current-voltage characteristics for different temperatures of the photomodule.  $R_{ser}$  SPEM is calculated from the linear portion of the light I – V characteristic near the point of open circuit voltage ( $V_{xx}$ ) [10, 11]. It follows from the experiment that  $R_{ser}$  decreases linearly with increasing temperature and is described by the relation:  $R_{ser} = 33.993 - 0.0846 * T \text{ (K)}$ , temperature resistance coefficients are shown here. The construction of the specific conductivity ( $\sigma$ ) as a function of ( $1 / T$ ) indicates that the dependence is exponential with an activation energy of  $E_{R_{ser}} = 0.085 \pm 0.05 \text{ eV}$ .

In fig. 2 shows the experimental results of the temperature dependence of  $R_{sh}$  CIGS CFEM, which were calculated from the light load current-voltage characteristics.  $R_{sh}$  SPVM is calculated from the linear portion of the light current – voltage characteristic near the point of short circuit current ( $J_{shc}$ ) [10]. It follows from the experiment that  $R_{sh}$  decreases linearly with increasing temperature and is described by the relation:  $R_{sh} = 16585 - 41.9 * T \text{ (K)}$ . The

construction of the dependence of the specific conductivity on  $(1/T)$  indicates that the dependence has an activation character with an activation energy of  $E_{R_{ser}} = 0.095 \pm 0.05$  eV.



**Fig. 1.** Temperature dependence of  $R_{ser}$   
CIGS SPVM.



**Fig. 2.** Temperature dependence of  $R_{sh}$   
CIGS SPVM.

Thus, it was shown that the values of  $R_{ser}$  and  $R_{sh}$ , SPVM based on the thin-film polycrystalline binary compound CIGS, decrease with increasing temperature and have an activation character with energies:  $E_{R_{ser}} = 0.085 \pm 0.05$  eV and  $E_{R_{sh}} = 0.095 \pm 0.05$  eV. It was found that the activation energies  $E_{R_{ser}}$  and  $E_{R_{sh}}$  are practically identical in magnitude, and are apparently related to the activation energy of the buffer frontal layer of n-CdS in the CIGS structure [9]. Optimization of structural parameters by  $R_{ser}$  and  $R_{sh}$  CIGS SPVM, i.e., a further decrease in  $R_{ser}$  and an increase in  $R_{sh}$ , makes it independent, or, in extreme cases, weakly dependent on temperature, which makes it possible to further improve the output parameters of the SPVM.