Uzbek Journal of Physics

Vol.22(№2) 2020 PP.99-106

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЕВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В УСЛОВИЯХ ТАШКЕНТА

Н.А. Матчанов, О.К. Атабоев*, Р.Р. Кабулов

Международный институт солнечной энергии, 100084, Ташкент, ул. Ч. Айтматова, 2Б, Узбекистан; *omonboy12@mail.ru

(Получена 09.10.2019)

(19−40)°C ҳарорат оралиғи ва табиий қуёш ёритилганлигида (P_{rad} = 870±5 Вт/м^2) поликристалл кремний асосидаги фотоэлектрик модулининг ёруғликдаги юклама вольтампер характеристикалари тадқиқ қилинди. Ҳарорат ортиши билан фотогенерацияланган ток қийматининг ортиши аниқланиб, бу эса асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақти ортиши ҳисобидан диффузия узунлигининг ортиши билан тушунтирилади. Ҳарорат ортиши билан салт юриш кучланиши катталигининг камайиши, тескари тўйиниш токининг экспоненциал равишда ортиши ҳамда яримўтказгич тақиқланган соҳа кенглигининг камайиши билан тушунтирилади. Вольтампер характеристикасининг тўлдириш коэффициенти ҳарорат ортиши билан FF = (79.5–0.0845)t (%) қонунияти бўйича камайиши ва тескари ҳарорат коэффициенти k =–0.108%/°C га тенг бўлиши аниқланди. Бу салт юриш кучланиши қийматининг камайиши билан тушунтирилади. Тадқиқ қилинаётган ҳарорат оралиғида қуёш фотоэлектрик модулининг фойдали иш коэффициентининг қиймати 17.6% дан 16.93% гача камаяди ва тескари ҳарорат коэффициенти –0.19%/°C га эга.

Проведены исследования световых нагрузочных вольтамперных характеристик фотоэлектрического модуля на основе поликристаллического кремния в условиях реального солнечного освещения (P_{rad} = 870±5 Вт/м^2) в температурном диапазоне t = (19−40)°C. Обнаружено, что величина фотогенерированного тока растет линейно с увеличением температуры, что объясняется возрастанием диффузионной длины неосновных носителей заряда за счет увеличения времени жизни неосновных носителей. Уменьшение величины напряжения холостого хода с повышением температуры объясняется экспоненциальным ростом величины обратного тока насыщения и сужением ширины запрещенной зоны полупроводника. Установлено, что коэффициент заполнения вольтамперной характеристики уменьшается линейно с ростом температуры по закону FF = (79.5–0.0845)t (%) и имеет отрицательный температурный коэффициент k = –0.108%/°C, что связано с уменьшением значений напряжения холостого хода. В исследованном диапазоне температур коэффициент полезного действия солнечного фотоэлектрического модуля уменьшается от 17.6% до 16.93% и имеет отрицательный температурный коэффициент –0.19%/°C.

The light load current-voltage characteristics of solar photovoltaic module based on polycrystalline silicon have been studied at the temperature range of t=(19−40)°C under conditions of natural solar illumination (P_{rad}=870±5 W/m^2). It is found that the value of photogenerated current increases linearly with temperature, which is explained by an increase in diffusion length of minority carriers, due to an increase in lifetime of minority carriers. The decrease in the value of open-circuit voltage with increasing temperature, is explained by exponential increase in reverse saturation current and narrowing in band gap of semiconductor. It has been found that the fill factor (FF) of current-voltage characteristics decreases linearly with increasing temperature according to the law FF= (79.5–0.0845)t (%) and has a negative temperature coefficient k = –0.108%/°C, which is associated with a decrease in open-circuit voltage. In the studied temperature range, the efficiency of solar photovoltaic module decreases from 17.6% to 16.93% and has a negative temperature coefficient of –0.19%/°C.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время солнечная энергетика является одним из основных и перспективных видов возобновляемой энергетики. Учёные различных стран прилагают большие усилия для развития отрасли возобновляемой энергетики, интенсивно ведут работы по получению дешевых, доступных и высокоэффективных солнечных элементов на основе традиционных кристаллических кремниевых [1] и тонкопленочных структур [2, 3]. Широкое применение солнечных модулей для производства электроэнергии позволит снизить потребление невозобновляемых углеводородных ресурсов и уменьшить нагрузку на экологию за счет использования экологически чистой, дешевой и доступной энергии [4].

В настоящее время фотоэлектрические модули (ФЭМ) преобразуют лишь 15–21% падающей солнечной энергии в электрическую энергию, а остальная часть энергии теряется за счет отражения от поверхности и, поглощаясь, превращается в тепло. Эта часть энергии приводит к повышению температуры фотоэлектрического модуля и влияет на выходные параметры ФЭМ [5].

Известно, что эффективность ФЭМ сильно зависит от метрологических условий, таких как температура окружающей среды (t) [6], радиация солнечного излучения (P) [7], скорость ветра (v) [8] и т.д. Фактически производимая мощность ФЭМ в натурных условиях отличается от номинальной мощности (STC, standard test condition); стандартные условия тестирования: t=25°C, P=1000 Вт/м^2, AM 1.5, v=0) [9-11]. Чрезмерный нагрев ФЭМ под воздействием солнечного излучения может привести к уменьшению выходной мощности и эффективности преобразования ФЭМ. Из сказанного выше следует, что изучение температурной зависимости выходных параметров ФЭМ является важным при нахождении решений проблем, возникающих при использовании ФЭМ в реальных климатических условиях.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изучения влияния температуры окружающей среды на выходные параметры фотоэлектрического модуля были исследованы световые нагрузочные вольтамперные характеристики фотоэлектрического (HBAX) модуля на основе поликристаллического кремния, изготовленного японской компанией KYOCERA, при различных температурах и мощности солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2. Исследования были проведены в течение весеннего периода в реальных условиях освещенности солнечным светом на территории Международного института солнечной энергии в г. Ташкенте. Во время проведения эксперимента температура фотоэлектрического модуля изменялась в диапазоне 19–40°C при температуре окружающей среды 19±2°C. Скорость ветра составляла 1−1.5 м/с, угол наклона фотоэлектрического модуля к горизонту 30°.

Эффективная площадь исследуемого фотоэлектрического модуля (ФЭМ) равна 1.46 м^2. Модуль состоит из 60 последовательно соединенных солнечных элементов с площадью элемента 15.6×15.6 см^2.

Световые нагрузочные вольтамперные характеристики исследовали с помощью сертифицированного анализатора солнечного модуля PROVA-210 PVAnalyzer (12 А, 60 В). Мощность падающего солнечного излучения измеряли с помощью фотоэлектрического анализатора солнечного излучения SolSensor,

Solmetric PVA (США). Температуру ФЭМ определяли с использованием тепловизора Fluke 190-104 S (США).

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выяснения влияния температуры окружающей среды на выходные параметры ФЭМ на основе поликристаллического кремния были измерены ВАХ при мощности падающего солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2 в температурном диапазоне 19–40°C. На основе измеренной ВАХ были построены температурные зависимости тока короткого замыкания (I_{sc}) (рис. 1) и напряжения холостого хода (U_{oc}) (рис. 2).

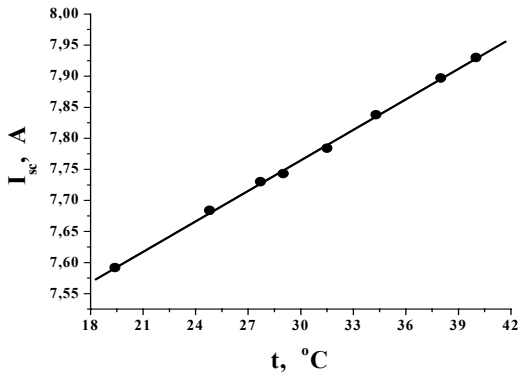


Рис. 1. Температурная зависимость тока короткого замыкания (I_{sc}) ФЭМ на основе поликристаллического кремния при мощности падающего солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2.

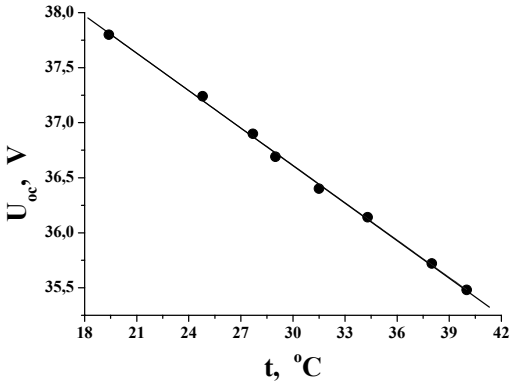


Рис. 2. Температурная зависимость напряжения холостого хода (U_{oc}) ФЭМ на основе поликристаллического кремния при мощности падающего солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2.

Из рис. 1 видно, что с повышением температуры ФЭМ значение тока короткого замыкания (I_{sc}), согласно теории фотовольтаического эффекта, растет линейно по закону I_{sc} = (7.27+0.0164)t (А) [12] и имеет температурный коэффициент 0.216%/°C. Физическим смыслом температурного коэффициента тока короткого замыкания ФЭМ является относительное приращение значения фототока при изменении температуры на 1°C. Увеличение значения тока короткого замыкания объясняется следующем образом.

Значение фотогенерированного тока ФЭМ под действием светового освещения прямо пропорционально скорости генерации неравновесных носителей заряда и диффузионной длине неравновесных носителей заряда. В свою очередь, скорость генерации носителей заряда в объеме полупроводника зависит от мощности падающего солнечного излучения [13, 14]:

$$I_{ph} = qSG(L_n + L_p), \qquad (1)$$

где G – скорость генерации носителей заряда ($G \sim \Delta n/\tau$), L_n и L_p – длина диффузии электронов и дырок, S – эффективная площадь солнечного элемента.

При увеличении температуры ФЭМ диффузионные длины неосновных носителей заряда возрастают в результате увеличения времени жизни неосновных

носителей заряда, что связано с уменьшением концентрации рекомбинационных центров [12, 15]. Увеличение диффузионной длины неосновных носителей заряда приводит к возрастанию значения тока короткого замыкания. Также с увеличением температуры ФЭМ сужается ширина запрещенной зоны полупроводника, происходит смещение края поглощения и увеличивается количество электронно-дырочных пар, генерируемых в фотоактивной области квантами электромагнитного излучения в данном спектральном участке [16]. Рост величин (G, $L_{\perp}n$, $L_{\perp}p$) в уравнении (1) приводит к возрастанию величины тока короткого замыкания.

Из рис. 2 видно, что значение напряжения холостого хода (V_{oc}), согласно теории [12], уменьшается линейно по закону V_{oc} = (40–0.113)t (В) и имеет отрицательный температурный коэффициент β = –0.31%/°С.

Согласно работам [17-19], связь между напряжением холостого хода (V_{oc}) и током короткого замыкания (I_{sc}) записывается следующим образом:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right), \tag{2}$$

где n – фактор неидеальности диода, I_0 – обратный ток насыщения.

В соответствии с уравнением (2) напряжение холостого хода прямо пропорционально току короткого замыкания, и его значение должно расти с увеличением температуры, так как значение тока короткого замыкания растет с температурой. Но на практике наблюдается обратный процесс.

В знаменателе уравнения (2) стоит физическая величина, называемая обратным током насыщения (I_0), которая растет экспоненциально с увеличением температуры и имеет следующей вид [20]:

$$I_0 = qSN_V N_C \left(\frac{L_n}{N_A \tau_n} + \frac{L_p}{N_D \tau_p}\right) \exp(-E_g / kT) \approx I_0^* \exp(-E_g / kT). \tag{3}$$

Из уравнения (3) видно, что обратный ток насыщения сильно зависит от температуры и ширины запрещенной зоны полупроводника, и увеличивается экспоненциально с ростом температуры и уменьшением ширины запрещенной зоны. В свою очередь, ширина запрещенной зоны полупроводника зависит от температуры и описывается выражением [21-24]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \tag{4}$$

где $E_g(T)$ – ширина запрещенной зоны полупроводника при определенной T, $E_g(0)$ – значение E_g при температуре абсолютного нуля, α и β – постоянные величины для полупроводника.

За счет экспоненциальной зависимости обратного тока насыщения от температуры и ширины запрещенной зоны полупроводника, значение обратного тока насыщения растет быстрее по отношению к значению тока короткого замыкания, поэтому значение напряжения холостого хода уменьшается линейно. Температурная зависимость напряжения холостого хода используется для оценки эффективной высоты барьера в фотоэлектрических приборах [12, 13].

Из рис. 3 видно, что с увеличением температуры ФЭМ, значение коэффициента заполнения вольтамперной характеристики (ВАХ) уменьшается линейно по закону FF=(79.5–0.0845)t (%), температурный коэффициент

γ=–0.108%/°C имеет отрицательное значение. Уменьшение значения *FF* связано, вероятнее всего, с уменьшением шунтирующего сопротивления (R_{sh}), которое включено параллельно *p-n*-переходу, состоит из паразитных сопротивлений, приводящих к утечке тока, минуя внешнюю нагрузку, и уменьшает максимальную выходную мощность фотоэлектрического модуля, т.е. уменьшается *FF* [25].

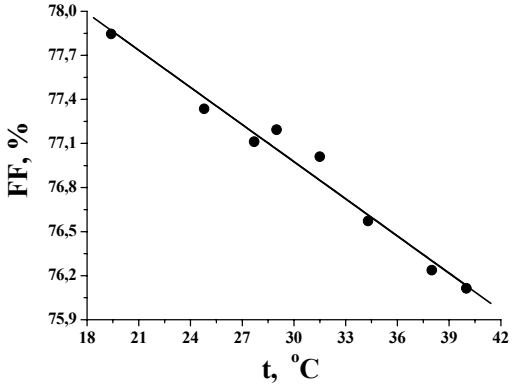


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента заполнения вольтамперной характеристики ФЭМ на основе поликристаллического кремния при мощности падающего солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2.

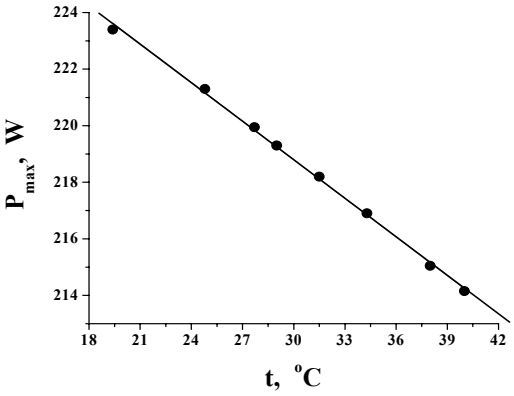


Рис. 4. Температурная зависимость максимальной выходной мощности ФЭМ на основе поликристаллического кремния при мощности падающего солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2.

Согласно [12, 14, 15], коэффициент заполнения ВАХ вычисляется на основе экспериментальных данных

$$FF = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{oc}}, \tag{5}$$

где I_m и U_m – ток и напряжение в точке максимальной мощности нагрузочной ВАХ.

Коэффициент заполнения ВАХ указывает, насколько реальная ВАХ солнечного элемента отличается от идеальной, которая представляет собой прямоугольную ступеньку с напряжениям U_{oc} и током I_{sc}.

На рис. 4 приведена температурная зависимость максимальной выходной мощности ($P_{\max}$) ФЭМ на основе поликристаллического кремния при мощности падающего солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2 в диапазоне температур 19–40°C. Из рис. 4 видно, что с увеличением температуры ФЭМ, значения максимальной выходной мощности уменьшаются линейно по закону $P_{\max}$ = (235.45–0.455)*t*, отрицательный температурный коэффициент равен *k* = –0.203%/°C. Согласно [24, 26], температурный коэффициент максимальной выходной мощности солнечного элемента на основе кристаллического кремния составляет (0.35–0.45)%/°C и зависит от мощности падающего солнечного излучения, который растет с увеличением мощности падающего солнечного излучения.

Значения максимальной выходной мощности ФЭМ определяются на основе экспериментальных данных следующим выражением:

$$P_m = I_m U_m = I_{sc} U_{oc} FF\ . \tag{6}$$

Согласно уравнению (6), основной физической величиной, влияющуй на максимальную выходную мощность ФЭМ, является напряжение холостого хода, которое с повышением температуры ФЭМ уменьшается высокими темпами, и поэтому наблюдается уменьшение P_m с температурой.

Температурный коэффициент выходной максимальной мощности состоит из суммы температурных коэффициентов тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и коэффициента заполнений вольтамперной характеристики [27-29]:

$$\frac{1}{P_m}\frac{dP_m}{dT} = \frac{1}{I_{sc}}\frac{dI_{sc}}{dT} + \frac{1}{V_{oc}}\frac{dV_{oc}}{dT} + \frac{1}{FF}\frac{dFF}{dT}. \quad (7)$$

Если определенные из эксперимента температурные коэффициенты тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и коэффициент заполнений ВАХ вставим в уравнение (7), можно найти температурный коэффициент максимальной выходной мощности, который соответствует экспериментальным данным, определенным из рис. 4.

На рис. 5 приведена зависимость эффективности преобразования ФЭМ от температуры. Эффективность преобразования ФЭМ равна отношению максимальной выходной мощности к мощности падающего светового излучения P_{rad}.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{I_m U_m}{P_{rad}} = \frac{I_{sc} U_{oc} FF}{P_{rad}}. \quad (8)$$

Хотя основными параметрами, от которых зависит эффективность солнечных элементов, являются I_{ph}, I_0, n и R_{ser}, чаще приводят значения I_{sc}, U_{oc} и FF. Последние удобны, поскольку дают наглядное представление об основных параметрах солнечных элементов, и их легко измерить на практике.

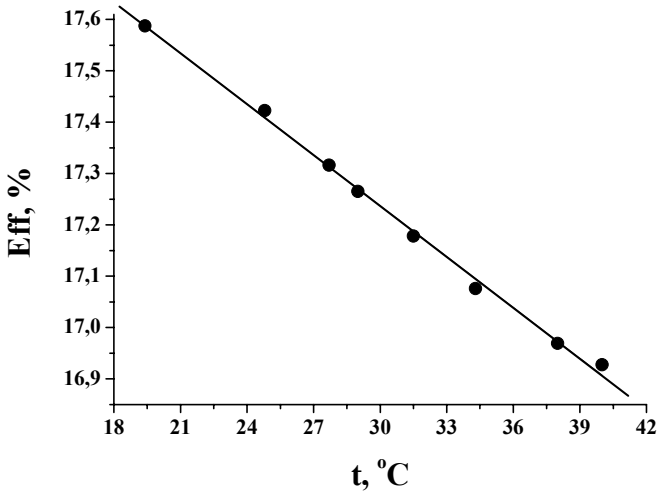


Рис. 5. Температурная зависимость эффективности ФЭМ на основе поликристаллического кремния при мощности падающего солнечного излучения P_{rad} = 870±5 Вт/м^2.

Из рис. 5 видно, что эффективность ФЭМ с повышением температуры уменьшается линейно с одним наклоном. Уменьшение значения эффективности

преобразования ФЭМ с ростом температуры связано, вероятнее всего, с уменьшением значения коэффициента заполнения ВАХ (*FF*) и напряжения холостого хода (U_{oc}) с температурой.

Температурная зависимость эффективности преобразования (η_c) солнечного элемента описывается выражением [4, 30]

$$\eta_c = \eta_0 \left[1 - \beta_0 (T_c - T_0)\right], \quad (9)$$

где η_c – эффективность СЭ при T_c, η_0 – эффективность СЭ при T_0, т.е. при комнатной температуре.

Из уравнения (9) видно, что с увеличением температуры СЭ растет разница $T_c - T_0$, в результате уменьшается эффективность СЭ. Из экспериментов следует, что реально η_c ФЭМ описывается соотношением η_c (*Eff)* = (18.24–0.033)t и имеет отрицательный температурный коэффициент –0.19%/°C.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенных экспериментальных исследований влияния температуры на нагрузочные ВАХ ФЭМ на основе поликристаллического кремния в условиях освещенности P_{rad} = 870±5 Вт/м^2 и в температурном диапазоне 19–40°C установлено, что величина тока короткого замыкания растет линейно и описывается соотношением I_{sc} = (7.27+0.0164)t (A), имеет температурный коэффициент 0.216%/°C, напряжение холостого хода уменьшается согласно соотношению V_{oc} = (40–0.113)t (В) и имеет отрицательный температурный коэффициент β = –0.31%/°C. Величина максимальной выходной мощности ФЭМ с повышением температуры уменьшается линейно и выражается соотношением P_{max} = (235.45–0.455) t, с отрицательным температурным коэффициентом k=–0.203%/°C. Уменьшение максимальной выходной мощности ФЭМ связано с уменьшением напряжения холостого хода, у которого температурный коэффициент отрицательный и намного больше других параметров ФЭМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, E. Maruyama, Solar Energy Materials & Solar cells **95**, 18 (2011).
2. J. Ramanujam, U.P. Singh, Energy & Environmental Science **10**, 1306 (2017).
3. Г.Ф. Новиков, М.В. Гапанович, Успехи физических наук **187** (2), 173 (2017).
4. R.W. Miles, G. Zoppi, I. Forbes. Mater. Today **10**(11), 20 (2007).
5. S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S.P. Nehra, M.S. Dhaka, Energy Reports **1**, 104 (2015).
6. M. Rajvikram, S. Leoponraj, S. Ramkumar, H. Akshaya, A. Dheeraj, Solar Energy **188**, 327 (2019).
7. P. Löper, D. Pysch, A. Richter, et al., Energy Procedia **27**, 135 (2012).
8. R.R. Kobulov, N.A. Matchanov, and B.R. Umarov, Apply Solar Energy **53** (4), 297 (2017).
9. C. Schwingshackl, M. Petitta, J.E. Wagner, et al., Energy Procedia **40**, 77 (2013); R.M. Smith, D.C. Jordan, and S.R. Kurtz. World Renewable Energy Forum, Photovoltaic Power Systems (Denver, Colorado, 13-17 May, 2012).
10. IEC 61853-1:2011, Photovoltaic (PV) Module Performance Testing and Energy Rating. Part 1: Irradiance and Temperature Performance Measurements and Power Rating (International Electrotechnical Commission, 26.01.2011).
11. Р.Р. Кабулов, Н.А. Матчанов, Б.Р. Умаров, Гелиотехника № 1, 24 (2017).

12. А. Фаренбрух, Р. Бьюб. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. Под ред. М.М. Колтун (Москва, Энергоатомиздат, 1987).
13. V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev. Photoelectric Converters for Solar Radiation. Ed. Zh.I. Alferov (Leningrad, Nauka, 1989).
14. M.A. Green. Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982).
15. S.M. Sze and K.Ng. Kwok. Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed. (Hoboken, New Jersey: John Willey and Sons, 2007).
16. M.Ya. Bakirov, Semiconductors **31** (5), 520 (1997).
17. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd ed. Edited by Antonio Luque and Steven Hegedus (England, John Wiley & Sons, 2011).
18. E.L. Meyer, International Journal of Photoenergy **7**, 1 (2017).
19. O.K. Ataboev, R.R. Kobulov, N.A. Matchanov, S.R. Egamov, Applied Solar Energy **55** (3), 131 (2019).
20. S.M. Sze. Physics of Semiconductor Devices (New York, John Wiley and Sons, 1981).
21. P. Singh, N.M. Ravindra, Solar Energy Materials & Solar Cells **91**, 36 (2012).
22. W. Cai, F. Chao, T. JinLong, L. DeXiong, H. SiFu, X. ZhiGang, Science China Physics, Mechanics and Astronomy **55**(2), 235 (2012).
23. K.K. Nair, J. Jose, A. Ravindran, IJEDR **4** (3), 536 (2016).
24. D.T. Cotfas, P.A. Cotfas, O.M. Machidon, International Journal of Photoenergy. Article ID 5945602, 1 (2018).
25. D.E. Carlson, G. Lin, and G. Ganguly. Record of the Twenty-Eight IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Anchorage, USA, 15-22 September, 2000).
26. E.E. Van Dyk, B.J. Scott, E.L. Meyer, A.W.R. Leitch, South African Journal of Science **96**, 198 (2000).
27. Gh. Farivar, B. Asaei, IEEE Transactions on Energy Conversation **26** (4), 1118 (2011).
28. H. Wang, X. Cheng, H. Yang, W. He, Zh. Chen, L. Xu, D. Song, Solar Energy **188**, 258 (2019).
29. O. Dupre, R. Vaillon, M.A. Green, Solar Energy Materials and Solar Cells **140**, 92 (2015).
30. S. Dubey, J.N. Sarvaiya, Bh. Seshadri, Energy Procedia **33**, 311 (2013).