

УДК 621.383.51

Влияние спектра излучения на характеристические кривые солнечной батареи

Светлана Леонидовна Тимченко, Ольга Юрьевна Дементьева,
Николай Антонович Задорожный

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; e-mail: svtimchenko@yandex.ru

В работе исследовалось влияние спектра имитаторов солнечного излучения на характеристические кривые солнечной батареи. Экспериментально определен спектральный состав источников излучения. Используя спектральные кривые излучателей, проведен оценочный расчет количества фотонов в характерных спектральных диапазонах излучателей. Рассчитаны коэффициент полезного действия СБ и коэффициент формы (коэффициент заполнения вольтамперной характеристики). Обнаружено, что на электрические характеристики СБ влияет спектральный состав источников света. КПД солнечной батареи при использовании в качестве источников излучения лампы накаливания в среднем составил – 3,51%, галогеновой лампы – 3,0%, энергосберегающей лампы – 5,8%, светодиодной лампы – 8,76%.

Ключевые слова: солнечный элемент, излучение, спектр, интенсивность, сопротивление, мощность.

Солнечная батарея (СБ) является эффективным фотоэлектрическим преобразователем солнечной энергии. В отличие от ядерных и радиоизотопных источников энергии СБ представляет собой экологически безопасный источник энергии, работающий достаточно долгое время без расхода дополнительных материалов.

Практически важной особенностью солнечных элементов является возможность их эксплуатации в режиме короткого замыкания. В качестве элементной базы для СБ используют полупроводники. Солнечная батарея представляет собой несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов), преобразующих непосредственно солнечную энергию в постоянный электрический ток. Каждый из солнечных элементов предназначен для поддержания определенной силы тока при заданном напряжении. В полупроводниковом солнечном элементе (СОЭ) электродвижущая сила (эдс) возникает за счет взаимодействия электрического поля в области контакта – *p-n*- перехода с образованными светом свободными носителями – электронами и дырками, которые имеют избыток потенциальной энергии [1, 2]. Таким образом, избыточная потенциальная энергия носителей преобразуется в электрическую энергию.

В настоящей работе проведено исследование характеристических кривых СБ при использовании различных источников световой энергии – имитаторов солнечного света.

Экспериментальная часть

В качестве имитаторов солнечного излучения использовались лампы накаливания, галогеновая, энергосберегающая и светодиодная. Исследование влияние состава спектра излучения имитаторов солнечного излучения на характеристические кривые солнечной батареи включало: экспериментальное определение состава спектра излучателей и измерение вольтамперных характеристик СБ.

Состав спектра излучателей был определен с помощью спектрофотометра СPECTRPHOTOMETR U21830. Объект исследования – СБ, состояла из четырех секций последовательно включенных солнечных элементов (СОЭ). Материал СОЭ – поликристаллический кремний, который прошел процесс легирования, и в дальнейшем был использован, для создания *p-n*-перехода.

Световой поток источника измерялся с помощью термоэлектрической батареи (Thermopile, moltype 08479.00 PNYWE) [3]. Напряжение, вырабатываемое термоэлектрической батареей U_T , пропорционально интенсивности потока излучения.

Плотность потока излучения (интенсивность излучения) рассчитывалась по формуле:

$$J = \frac{U_T}{\alpha S_T}, \quad (1)$$

где U_T – напряжение, измеряемое мультиметром, подключенным к выходу термоэлектрической батареи; α – коэффициент чувствительности термоэлектрической батареи, $\alpha = 0,067$ В/Вт; S_T – площадь измерительной поверхности термоэлектрической батареи, $S_T = 4,9 \cdot 10^{-4}$ м².

Поток энергии излучения, падающий на СБ:

$$\Phi_{СБ} = J \cdot S_c. \quad (2)$$

Общая площадь СБ составляла – $S_c = 50 \cdot 10^{-4}$ м².

Результаты эксперимента

1. Влияние величины светового потока на ВАХ и другие характеристики СБ

Были проведены серии экспериментов по исследованию вольтамперных характеристик (ВАХ) и других характеристик СБ при облучении поверхности СБ различными источниками света – имитаторами солнечного света.

В таблице 1 представлены характеристики СБ, измеренные при разных значениях потока излучения, созданного лампой накаливания.

На рис. 1 представлены типичные ВАХ СБ и зависимость ее электрической мощности от напряжения при освещении поверхности СБ излучением от лампы накаливания при потоке энергии излучения на поверхность СБ – $\Phi_{СБ} = 1,84$ Вт.

Таблица 1

Поток энергии излучения на СБ, $\Phi_{СБ}$, Вт	R_{opt} , Ом	U_{xx} , В	$I_{KЭ}$, мА	P_{max} , мВт	КПД, %	Плотность тока, $J_{KЭ}$, А/м ²	Коэф. заполнения ВАХ
1,84	42,63	2,18	44	63,9	3,47	8,8	0,67
1,43	56,9	2,14	33,3	50,9	3,51	6,66	0,70
1,12	61,81	2,1	26	40	3,56	0,52	0,73

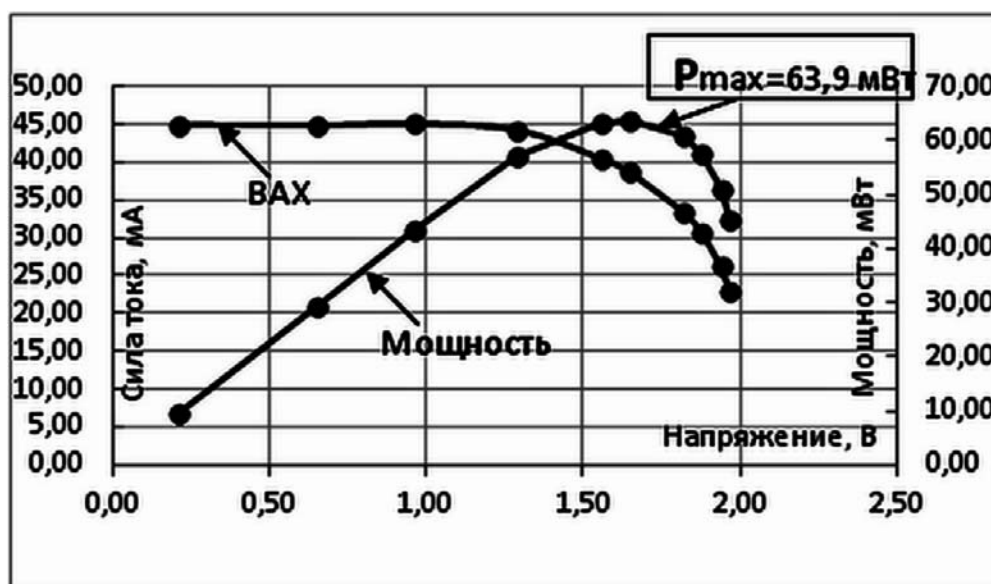


Рисунок 1. ВАХ СБ и зависимость ее электрической мощности от напряжения.

На рис. 2 показана зависимость оптимального нагрузочного сопротивления, при котором СБ вырабатывает максимальную мощность, от потока энергии излучения источника, созданного лампой накаливания. Сопротивление нагрузки практически совпадает с сопротивлением СОЭ. Напряжение, ток на нагрузке и через $p-n$ -переход – практически одинаковые. Понижение R_{opt} с уменьшением потока излучения, можно объяснить тем, что при уменьшении светового потока уменьшается количество фотоэлектронов и, как следствие, уменьшается проводимость $p-n$ -перехода.

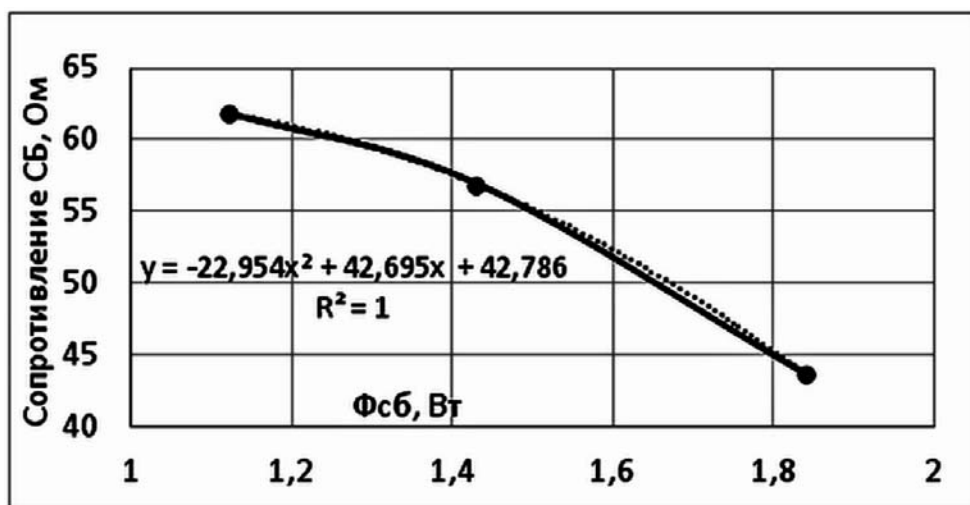


Рисунок 2. Зависимость оптимального нагрузочного сопротивления СБ от потока энергии излучения на СБ.

2. Влияние спектра источника излучения на ВАХ и другие характеристики СБ

В силу зонного строения полупроводника, а также свойств материала по отношению к составляющим оптического спектра, для оптимальной работы каждого СОЭ необходимо излучение определенного спектрального состава. С помощью спектрофотометра SPECTROPHOTOMETR U21830 был снят спектр излучения лампы накаливания (рис. 3).

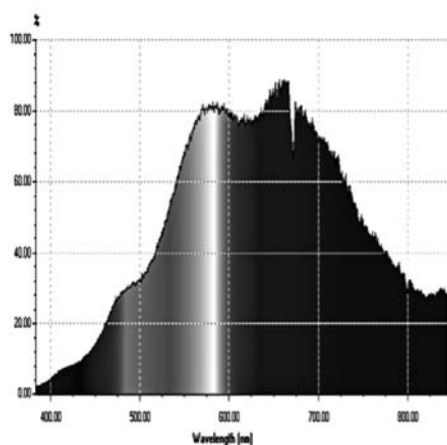


Рисунок 3. Спектр излучения лампы накаливания.

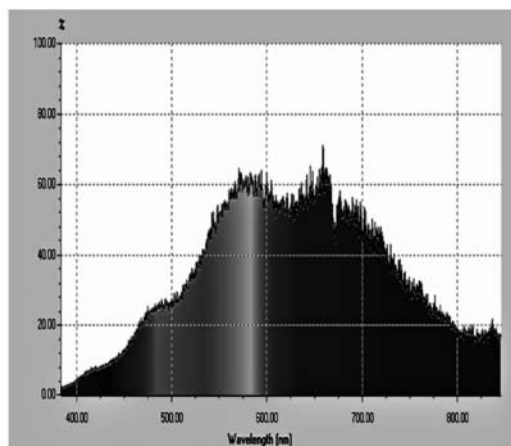


Рисунок 4. Спектр излучения галогеновой лампы.

В спектре лампы накаливания (рис. 3) преобладают фотоны с длиной волны > 600 нм.

Поглощение таких фотонов обеспечивает, нагрев поверхности СБ, что приводит к снижению КПД.

В среднем значение КПД СБ при освещении световым излучением от лампы накаливания составил 3,51%.

При потоке излучения галогеновой лампы на поверхность СБ равном 230 мВт, максимальная электрическая мощность СБ составила 6,7 мВт, а КПД в среднем равен 3%.

Спектр излучения галогеновой лампы представлен на рис. 4.

Спектры галогеновой лампы и лампы накаливания (рис. 3 и 4) являются близкими по спектральному составу излучения, то есть распределение фотонов по энергиям в излучении этих источников является примерно одинаковым.

Также в качестве источника, имитирующего солнечное излучение, была использована энергосберегающая лампа. При потоке излучения от энергосберегающей лампы, падающем на поверхность СБ равном 80 мВт, максимальная электрическая мощность, вырабатываемая СБ – 4,62 мВт, а среднее значение КПД – 5,8%.

Спектр излучения энергосберегающей лампы представлен на рис. 5. Видно, что спектр является более дискретным по сравнению с лампой накаливания и галогеновой лампой. В спектре излучения доминируют фотоны с длиной волны, характерной для синего, зеленого цветов.

При облучении поверхности СБ излучением от светодиодной лампы при потоке излучения равном 52 мВт, максимальная электрическая мощность СБ – 4,54 мВт, КПД в среднем составил 8,76%.

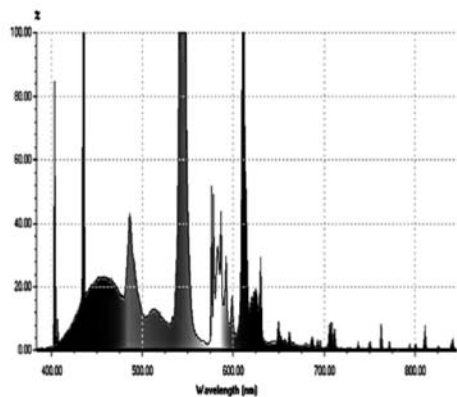


Рисунок 5. Спектр излучения энергосберегающей лампы.

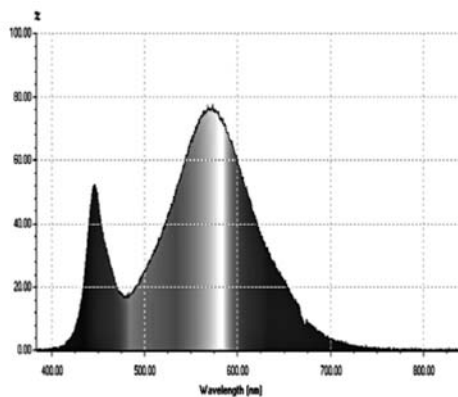


Рисунок 6. Спектр излучения светодиодной лампы.

Спектр излучения светодиодной лампы показан на рис. 6. В спектре излучения преобладают фотоны с длиной волны в диапазоне $425 < \lambda < 475$ Нм и $500 < \lambda < 600$ Нм.

Обсуждение результатов эксперимента

Анализ результатов эксперимента указывает на существенное влияние спектра излучения имитаторов солнечного излучения на характеристические кривые СБ. С учетом погрешности измерения, КПД СБ имеет максимальное значение при преобразовании излучения от светодиодной лампы.

Основные результаты эксперимента по всем источникам излучения, которые использовались в данной работе, представлены в таблице 2.

Был проведен расчет коэффициента заполнения вольтамперной характеристики или коэффициента формы, который характеризует качество солнечных элементов и определяется выражением [1, 2]:

$$\xi = \frac{U_m I_m}{U_{xx} I_{кз}} = \frac{P_{\max}}{U_{xx} I_{кз}}. \quad (3)$$

Здесь P_{\max} – максимальная мощность СБ, U_{xx} – напряжение холостого хода, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания.

Коэффициент заполнения ВАХ показывает насколько реальная ВАХ СОЭ отличается от идеальной, которая по форме имеет вид ступеньки со сторонами тока короткого замыкания – $I_{кз}$ и напряжения холостого хода – U_{xx} .

Таблица 2

Вид источника излучения	Поток энергии излучения на СБ, $\Phi_{СБ}$, Вт	U_{xx} , В	$I_{кз}$, мА	$R_{омт}$, Ом	Коэффициент заполнения ВАХ	КПД, %
Лампа накаливания	1,84	2,18	44	43,63	0,67	3,47
Галогеновая лампа	0,23	2,00	5,93	322,37	0,57	3,0
Энергосберегающая лампа	0,08	2,00	4,42	354,57	0,52	5,8
Светодиодная лампа	0,05	2,00	5,38	279,40	0,42	8,76

Последующий анализ спектральных кривых (рис. 3–6) излучателей показал различие в количестве фотонов, принадлежащих к одному и тому же спектральному интервалу. Из рис. 3, 4 видно, что спектры галогеновой лампы и лампы накаливания практически совпадают по спектральному составу и являются непрерывными. Максимум интенсивности приходится на диапазон длин волн фотонов $550 < \lambda \approx 700$ Нм с преимущественным вкладом фотонов с $\lambda > 600$ Нм.

Независимые измерения интенсивности излучения галогеновой лампы с использованием термоэлектрической батареи и интерференционных светофильтров показали, что её интенсивность монотонно возрастает для длин волн от 366 нм до 578 нм. Это соответствует спектрофотометрическим данным на рис. 4.

Спектр энергосберегающей лампы (рис. 5) указывает на преобладание фотонов синего ($400 \leq \lambda \leq 480$ Нм) и зеленого цветов ($525 \leq \lambda \leq 560$ Нм). Количество фотонов желтого ($575 \leq \lambda \leq 600$ Нм) и красного ($600 \leq \lambda \leq 630$ Нм) цветов практически совпадают.

В спектре светодиодной лампы (рис. 6) преобладают фотоны синего ($425 \leq \lambda \leq 475$ Нм) и зеленого ($500 \leq \lambda \leq 575$ Нм) цвета.

Расчет распределения фотонов в спектре источников света

Учитывая, что существенное влияние на электрические характеристики СБ оказывают не только физические свойства материала СОЭ [2], но и спектральный состав излучателей, был проведен расчет примерного количества фотонов, присутствующих в спектре излучателей и определено их относительное число в различных спектральных интервалах (рис. 7).

В расчете были использованы данные о распределения потока энергии излучения по длинам волн для используемых в эксперименте световых источников (рис. 3–6), а также значения потока энергии излучения источников, измеренные независимо с помощью термоэлектрической батареи (табл. 2).

Пусть Φ_i – поток энергии излучения в спектральном интервале $[\lambda_i; \lambda_i + \Delta\lambda]$, падающего на СБ. Данный поток энергии излучения Φ_i пропорционален площади узкой полоски S_i под графиком распределения фотонов по длинам волн световых источников (рис. 3–6) в интервале $[\lambda_i; \lambda_i + \Delta\lambda]$. Полный интегральный поток энергии излучения, падающий на СБ:

$$\Phi = \sum \Phi_i, \quad (4)$$

Тогда поток излучения Φ_i в выбранном спектральном интервале определяется как:

$$\Phi_i = \Phi \frac{S_i}{\sum S_i}. \quad (5)$$

С другой стороны,

$$\Phi_i = N_i \frac{hc}{\lambda_i}, \quad (6)$$

где N_i – число фотонов в выбранном спектральном интервале $[\lambda_i; \lambda_i + \Delta\lambda]$, $\frac{hc}{\lambda_i}$ – энергия фотона.

С учетом (5) и (6) количество фотонов в спектральном интервале $[\lambda_i; \lambda_i + \Delta\lambda]$ можно оценить по формуле:

$$N_i = \left[\Phi \frac{S_i}{\sum S_j} \right] \cdot \frac{\lambda_i}{hc}. \quad (7)$$

Результирующее число фотонов – $N = \sum N_i$.

При расчете задавали $\Delta\lambda = 12,5 \text{ нм}$.

Результаты расчета общего числа фотонов N падающих на СБ с энергиями, соответствующими длине волны λ в интервале от 400 нм до 800 нм для всех четырех световых источников представлены в таблице 3.

Также был рассчитан квантовый выход СБ – Q_N :

$$Q_N = \frac{I_{кз}}{q \cdot N}. \quad (8)$$

Здесь q – заряд электрона.

Таблица 3

Вид источника излучения	Поток энергии излучения на СБ, $\Phi_{СБ}$, Вт	Общее число фотонов в световом потоке, N	$I_{кз}$, мА	Q_N	КПД, %
Лампа накаливания	1,84	5,80E+18	44	0,05	3,47
Галогеновая лампа	0,23	7,80E+17	5,93	0,05	3,0
Энергосберегающая лампа	0,08	2,42E+17	4,42	0,11	5,8
Светодиодная лампа	0,05	3,93E+17	5,38	0,09	8,76

Значения квантового выхода Q_N (табл. 3) рассчитано, как отношение числа носителей, генерированных солнечным элементом, к общему числу фотонов N , падающих на солнечный элемент. Значение Q_N меньше ожидаемого. Возможно это

связано с завышенными показаниями потока энергии излучения на СБ $\Phi_{\text{СБ}}$ из-за нагрева термоэлектрической батареи при её освещении.

Расчет показал, что квантовый выход у галогеновой лампы и лампы накаливания примерно в два раза меньше, чем у диодной и энергосберегающей ламп. Это также коррелирует с их малым значением КПД, он в два-три раза меньше, чем у диодной и энергосберегающей ламп.

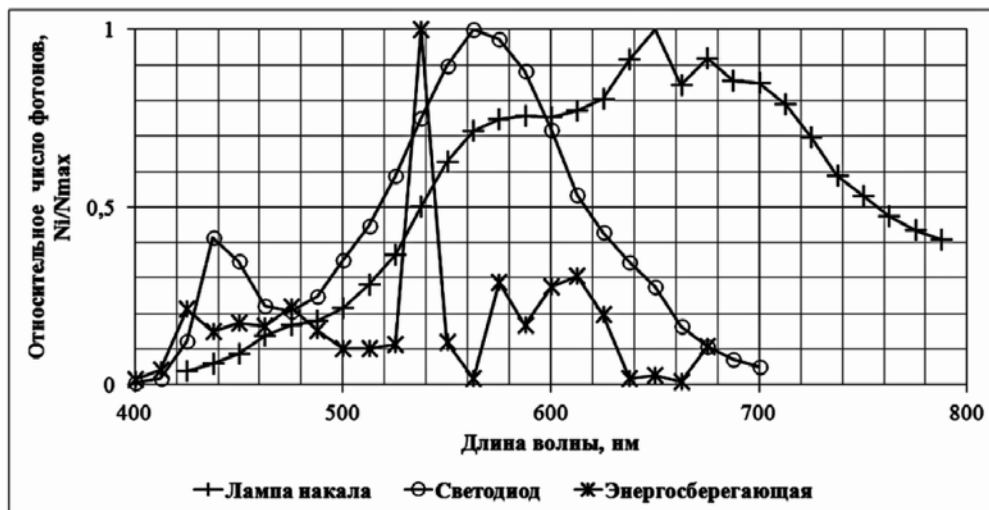


Рисунок 7. Распределение фотонов по спектральным интервалам в излучении различных световых источников.

На рис. 7 показано распределение по спектральным интервалам относительного числа падающих на СБ фотонов для различных световых источников. В световом потоке светодиодной лампы преобладают фотоны с меньшей длиной волны, чем в потоке излучения от лампы накаливания (рис. 7). Основная доля фотонов, излучаемых светодиодной лампой, а это примерно 52% фотонов, имеют длины волн от 540 нм до 600 нм. Для сравнения в световом потоке лампы накаливания содержится 70% фотонов с длиной волны от 575 нм до 712 нм.

Анализ распределения фотонов по спектральным интервалам энергосберегающей лампы показал, что в световом потоке данного вида лампы примерно 30% фотонов сосредоточены в очень узком спектральном интервале шириной $\Delta\lambda = 20$ нм, в диапазоне от 540 до 560 нм. Остальные фотоны почти равномерно распределены в оставшейся части видимого спектра в интервалах длин волн от 400 нм до 540 нм и от 560 нм до 700 нм.

Таким образом, поток излучения исследуемых световых источников содержит преобладающее число фотонов в разных спектральных интервалах, что, несомненно, влияет на эффективность преобразования световой энергии и в итоге на КПД СБ.

Учитывая, что электрическая мощность, вырабатываемая СОЭ зависит от температуры самого элемента, то, следовательно, уменьшение КПД СБ при использовании лампы накаливания может быть связано с ее нагревом [1, 2]. И наоборот при использовании светодиодной лампы, как показывает ее спектр, нагрев поверхности СБ был минимален.

Заключение

Исследованиями показано влияние состава спектра имитаторов солнечного излучения на электрическую мощность, вырабатываемую солнечной батареей. Существенное влияние на характеристики СБ оказывает не столько мощность источника, сколько спектральный состав излучения. Определяющим фактором является наличие достаточного количества фотонов длины волны, меньшей по значению красной границы внутреннего фотоэффекта. При этом как коротковолновые фотоны, так и фотоны с граничным значением длины волны должны давать максимальный квантовый выход фотоэффекта.

Литература

1. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л.: Наука, 1989.
2. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
3. TESS Expert PHYWE, Laboratory Experiments Physics School University, PHYWE Sistem Gmb & Co, 2012.

The Influence on Radiation Spectrum Characteristic Curves of the Solar Battery

S.L. Timchenko, O. J. Dementieva, N. A. Zadorozhnyi

Moscow State Technical University named N.E. Bauman
2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: svtimchenko@yandex.ru

Received

PACS 88.40.jj

The influence of the spectrum of solar radiation simulators on the characteristic curve of solar cell was investigated. The spectrum of the radiation sources was determined experimentally. Estimating of the photons number in the characteristic spectral ranges of radiators was carried out due to the use of spectral curves of radiators. The efficiency of the solar cell and form factor (duty ratio voltage-current characteristic) were calculated. It was found that the electrical characteristics of the solar battery affects spectrum of the light sources. In general, it was found that the efficiency of the solar cell when used as radiation sources incandescent bulbs on average – 3,51%, halogen lamps – 3,0%, energy-saving lamps – 5,8%, LED lamp – 8,76%.

Keywords: solar cell, the radiation spectrum, intensity, resistance, capacity.

References

1. *V.M. Andreev, V.A. Griliches, V.D. Rumiantzev.* A photoelectric conversion of concentrated solar radiation. – L.: Science, 1989. – 310 p. [in Russian].
2. *V.P. Afanasiev.* Thin-film solar cells based on silicon. – Spb. – 2011. – 168 p. [in Russian].
3. TESS Expert PHYWE, Laboratory Experiments Physics School University, PHYWE Sistem Gmb & Co – 2012.