

УДК 621.382

И.А. Белова, М.В. Мартинович, Д.Ю. Федорова

Источник искусственного освещения, имитирующий солнечный спектр, для тестирования солнечных батарей

Разработан комбинированный источник искусственного освещения для исследования характеристик солнечных элементов. Произведен спектральный анализ различных источников излучения. На основе анализа были подобраны необходимые источники излучения, суммарный спектр которых после аппроксимации близок к спектру солнечного излучения. Выполнен расчет электрооптических характеристик. Рассчитано количество источников искусственного освещения для воспроизведения спектра солнечного излучения. Сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: солнечный спектр, имитация солнечного излучения, солнечные батареи.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-4-19-24

Актуальность солнечной энергетики постоянно растет и является уже не просто перспективой, а переходит к масштабному практическому применению, которое расширяется с каждым годом. Солнечные батареи (СБ) находят применение в космической отрасли, промышленности, бытовых нуждах и т.д. По мере расширения области применения расширяются и требования к системам управления, которые должны работать на высоком уровне и отслеживать точку максимальной мощности солнечных батарей. Для этого современные системы управления оснащаются интеллектуальными устройствами, которые позволяют с высокой точностью отбирать от солнечной батареи максимальную энергию [1, 2]. При проектировании таких систем необходимо проводить предварительные испытания солнечных батарей и исследовать, как изменяются их вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики при изменении условий окружающей среды, таких как мощность солнечного излучения (освещенность) и температура. Для построения модели солнечной батареи характеристики которой полностью совпадают с характеристиками реальной солнечной батареи необходимо провести соответствующие эксперименты. Так как проведение экспериментов проходит в лабораторных условиях, то спектр лабораторного источника освещения должен быть максимально приближен к спектру солнечного излучения [3–5].

Солнечное излучение определяется несколькими наиболее важными параметрами: солнечная постоянная и воздушная масса. Воздушная масса (Airmass или AM) – это показатель влияния атмосферы на интенсивность солнечного излучения, дошедшую до поверхности Земли. Спектральное распределение интенсивности солнечного излучения при разных значениях воздушных масс будет отличаться [6].

Средняя интенсивность излучения на Земле совпадает с интенсивностью излучения при AM = 1,5 (солнце находится под углом 45° к горизонту) [7]. При исследовании работы солнечных батарей используют AM = 1,5 т.е. максимальная мощность сол-

нечного излучения равна 1000 Вт/м^2 и солнце находится под углом 45° к горизонту.

Спектр солнечного излучения на поверхности Земли определен международным стандартом ISO 9845-1, 1992 [8]. Этот стандарт характеризует стандартное распределение спектрального излучения, которое должно использоваться для определения относительной эффективности солнечных тепловых, фотовольтаических и других систем, в которых желателен компонент прямой и полусферической освещенности. Для адекватного исследования характеристик солнечных батарей в лабораторных условиях необходимо создать такой источник искусственного освещения, который максимально точно будет воспроизводить стандартный спектр, показанный на рис. 1.

Целью данного исследования является разработка модуля источника искусственного освещения, обеспечивающего воспроизведение солнечного спектра в диапазоне длин волн в зоне поглощения солнечной батареи, и создание методики расчета для различных спектров излучения и поглощения и для разного набора искусственных осветительных приборов.

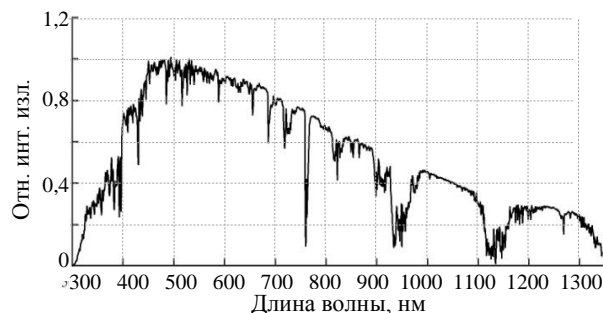


Рис. 1. Спектр солнечного излучения, установленный международным стандартом ISO 9845-1

Имитаторы солнечного излучения

Для исследования имитаторов солнечного излучения были сформированы основные требования, предъявляемые к излучателю:

- соответствие спектру естественного солнечного излучения;
- однородность падающего потока излучения;
- высокая временная стабильность параметров излучения;
- соответствие площади облучаемой поверхности размеру источника солнечного излучения.

Создать источник, который мог бы полностью удовлетворять вышеуказанным пунктам, на практике не предоставляется возможным. Именно поэтому практическое исследование имитаторов солнечного излучения обычно проходит по трем направлениям:

- использование коэффициентов коррекции, которые учитывают разницу между солнечным и суммарным спектрами излучения;
- применение фильтров, оптимизированных под используемый световой прибор;
- использование в имитаторе нескольких источников света, которые излучают только в относительно узком диапазоне длин волн с определенной интенсивностью.

Одним из примеров такого исследования является статья [9], в которой рассмотрено десять современных имитаторов солнечного излучения как отечественного, так и зарубежного производства. Из них восемь – серийного промышленного производства и два – единичных лабораторных образца, разработанных в научных центрах и исследовательских институтах. Целью исследования являлось комплексное представление о качестве имитации солнечного излучения рассматриваемых имитаторов, а также сравнительный анализ по некоторым параметрам. В процессе своего исследования авторы произвели анализ всех имитаторов по ключевым параметрам: источник излучения, спектральное соответствие солнечному излучению, неоднородность уровней плотностей падающего потока излучения, временная нестабильность, площадь облучаемой поверхности. Выявив плюсы и минусы каждого имитатора, определили оптимальные параметры и конструктивные особенности, которые представлялись наиболее эффективными.

Авторами были сделаны выводы о преимуществах и недостатках каждого из имитаторов. В восьми из десяти имитаторов в качестве источника использованы ксеноновые лампы, преимуществом которых является мощный световой поток с минимальным нагревом.

Еще одно практическое исследование, цель которого заключалась в воспроизведении спектра естественного солнечного излучения, проводилось в лаборатории Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева [10]. В качестве имитатора солнечного света использовали комбинации из пяти и семи типов светодиодов. Решая задачу, направленную на получение установленного спектра излучения на основе светодиодов, авторы построили математическую модель в программной среде MatLab, в которой за исходные данные были приняты спектры излучения всех компонентов люминесцентной смеси

или спектры нескольких однотонных светодиодов. При моделировании процесса излучения проводилось исследование процедуры повышения цветопередачи для источника, спектральное распределение интенсивности которого соответствует спектру солнечного излучения. Выполнив расчеты среднеквадратичной ошибки аппроксимации спектра, В.В. Афонин и О.Ю. Коваленко произвели модельный эксперимент, в котором число светодиодов каждого типа задавалось от 0 до 400. Рабочий программный алгоритм напоминал метод покоординатного спуска, где в качестве значения каждой координаты использовалось число светодиодов определенного типа. На каждой итерации цикла производилось вычисление среднеквадратичной ошибки. Результатом моделирования являлось значение спектральной мощности излучения, мощность излучения светодиода, а также относительная погрешность. Анализируя спектр, который был получен в ходе исследования (рис. 2), можно отметить тот факт, что авторам не удалось добиться максимально приближенного спектра естественного солнечного излучения. У полученного спектра существуют провалы в области синего излучения и нехватка излучения в УФ- и ИК-зоне.

Оценка источников искусственного освещения и их спектрального распределения выявила основные преимущества и недостатки каждого источника. Можно сделать вывод, что галогенные лампы и светодиоды имеют хорошие оптические характеристики для использования при имитации солнечного излучения.

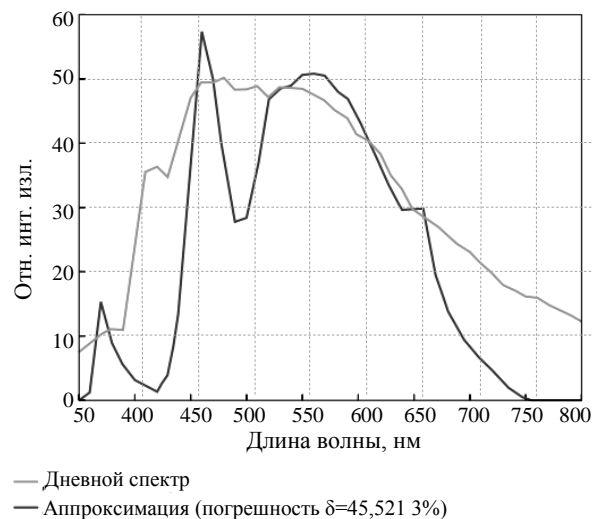


Рис. 2. Результат аппроксимации спектра солнечного излучения

Методика расчета

Исследований по воспроизведению спектра солнечного излучения и получению точных значений параметров и характеристик СБ, которые бы соответствовали ее реальной работе, проводилось довольно много, но практических результатов, которые можно воспроизвести в любой лаборатории, практически нет.

Авторами была сформулирована методика расчета стенда для исследования характеристик солнечных батарей, которая состоит из следующих пунктов:

1. Выбор источников искусственного освещения, отталкиваясь от их спектрального распределения интенсивности излучения.
2. Расчет основных электрооптических характеристик для каждого источника. Иными словами, на данном этапе необходимо определить силу света, телесный угол, световой поток и светоотдачу, зная которые, можно произвести расчет мощности излучения каждого источника.
3. Расчет количества источников излучения, используемых в качестве имитатора солнечного излучения.
4. Определение суммарной мощности излучения имитатора солнечного излучения, зная количество источников и их мощность излучения.
5. На основании полученной общей (полной) мощности излучения, производится расчет плотности мощности выделяемого излучения ($Вт/дм^2$).
6. Определение количества имитаторов, которые будут обеспечивать необходимую мощность излучения.

Реализация

1. Выбор источников.

В ходе выполнения работы были исследованы источники искусственного освещения и проанализированы их спектральные распределения.

Проанализированы спектры источников света: галогенной лампы, белого светодиода теплого свечения, голубого светодиода ($\lambda \sim 505$ нм), ИК-светодиодов: $\lambda \sim 880$; ~ 940 ; ~ 1050 нм.

Анализ спектральных распределений различных источников искусственного освещения помог определить их наиболее удачную комбинацию, аппроксимация которых дает спектр, близкий к спектру солнечного излучения, без значительных провалов, с небольшим набором источников. Данный спектр показан на рис. 3.

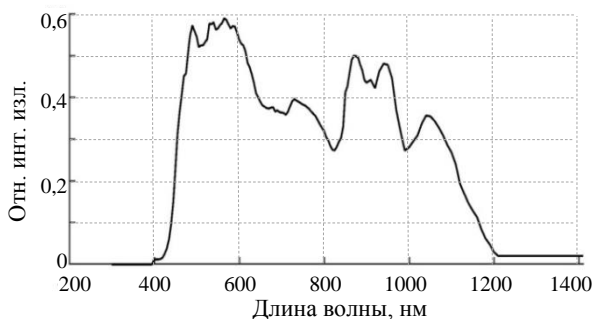


Рис. 3. Аппроксимация искусственных источников освещения без корректировки

Полученная комбинация источников искусственного освещения включает в себя 6 источников: галогенная лампа, голубой и белый (теплый) светодиоды, а также 3 инфракрасных светодиода с длинами волн $\lambda_1 \sim 880$, $\lambda_2 \sim 940$, $\lambda_3 \sim 1050$ нм.

Диапазон поглощения солнечных модулей всех типов расположен в длинах волн 300–1200 нм [11, 12]. В работе [13] И.М. Несмелова и Н.И. Астафьев подробно описывают оптические свойства монокристаллического кремния и особенности его спектрального поглощения. Спектр поглощения кремниевой солнечной батареи показан на рис. 4.

Следовательно, провалы в левой части спектра не требуют исключения в связи с тем, что спектр поглощения кремниевой солнечной батареи расположен в диапазоне $\lambda \sim 380\text{--}1200$ нм.

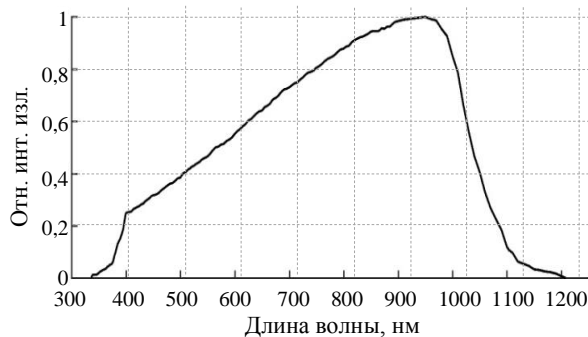


Рис. 4. Спектр поглощения кремниевой СБ

Учитывать спектральную чувствительность солнечных элементов нужно для того, чтобы получить эквивалентные мощности излучения.

2. Расчет основных электрооптических характеристик.

Для расчета мощности излучения необходимо знать световой поток Φ (лм) [14, 15]. Если в техническом паспорте источника он не указан, то его можно рассчитать, зная силу света I (кд) и телесный угол Ω (ср), по формуле

$$dK = I \cdot d\Omega. \tag{1}$$

Чаще всего в документации на источники искусственного освещения указывается угол обзора Θ (градус), который по формуле легко можно перевести в телесный:

$$d\Phi = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\Theta}{2}\right). \tag{2}$$

Мощность излучения находится через определенный интеграл (от начального интервала длины волны к конечному), взятый от светового потока, умноженного на спектральную полосу пропускания $\Delta\lambda$:

$$P_{изл} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot d\lambda. \tag{3}$$

Световая отдача источников света определяется отношением полного светового потока к его потребляемой мощности

$$K_\lambda = \frac{\Phi(\lambda)}{P_{потр}}. \tag{4}$$

КПД источников искусственного освещения рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{P_{изл}}{P_{потр}} \cdot 100\%. \tag{5}$$

Результаты приведены в табл. 1. Обратим внимание, что выбранные источники освещения имеют высокий КПД.

Таблица 1

Мощности излучения различных источников			
n	Источник искусственного излучения	Мощность излучения, Вт	КПД, %
1	Галогенная лампа	44,044	82
2	Голубой светодиод	0,095	79,2
3	Белый светодиод	0,084	70
4	ИК1-светодиод	0,05	65,2
5	ИК2-светодиод	0,072	90
6	ИК3-светодиод	0,05	71,4

3. Расчет количества источников.

Расчет количества источников искусственного излучения производится для того, чтобы оптимизировать спектр излучения разработанной комбинации из оптических элементов.

Для расчета количественного соотношения разных типов источников минимизируем выражение (6), характеризующее квадрат отклонения спектра имитатора от спектра солнечного излучения:

$$\sum_{m=0}^{M-1} \left[\left(\sum_{n=1}^N F_n(\lambda_m) P_{\text{изл.л}} B_n \right) - F_S(\lambda_m) \right]^2, \quad (6)$$

где n – номер типа источника имитатора; N – количество типов источника имитатора ($N = 6$); m – номер точки на оси длин волн светового спектра; M – количество точек на оси длин волн светового спектра ($M = 20$); F_n – спектральная плотность n -го типа источника имитатора; F_S – спектральная плотность солнечного излучения; λ_m – точка на оси длин волн светового спектра, эти точки равномерно распределены на оси длин волн между λ_{\min} и λ_{\max} , так что

$$\lambda_m = \lambda_{\min} + m(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / (M-1). \quad (7)$$

$P_{\text{изл.л}}$ – мощность светового излучения одного n -го источника в направлении фотопанели; B_n – оптимизируемые относительные коэффициенты, характеризующие влияние количества однотипных источников.

Возьмём производные выражения (6) по B_n и приравняем их нулю:

$$2 \sum_{m=0}^{M-1} \left[\left\{ \left(\sum_{n=1}^N F_n(\lambda_m) P_{\text{изл.л}} B_n \right) - F_S(\lambda_m) \right\} \cdot F_n(\lambda_m) P_{\text{изл.л}} \right] = 0. \quad (8)$$

Приняв во внимание, что первый источник – галогеновая лампа – имеет подавляющую величину мощности излучения относительно других источников, рассчитаем количество этих источников (D_n), приходящихся на один галогеновый,

$$D_n = \frac{B_n}{B_1}, n = 1 \dots N \quad (9)$$

и выберем ближайшие целые значения D_n .

Результаты приведены в табл. 2.

Для такого набора источников построен суммарный спектр. Этот спектр приведен на рис. 5.

Алгебраическая разница между превышением световой мощности солнечного и суммарного спек-

тров должна компенсироваться недостаточей на других участках спектра. На рис. 6 приведена разница между полученным спектром и солнечным, умноженная на спектр поглощения СБ. Максимальная ошибка составила 0,323.

Таблица 2

Количество источников		
n	Источник искусственного излучения	Количество, шт
1	Галогенная лампа	1
2	Голубой светодиод	10
3	Белый светодиод	150
4	ИК1-светодиод	322
5	ИК2-светодиод	328
6	ИК3-светодиод	693

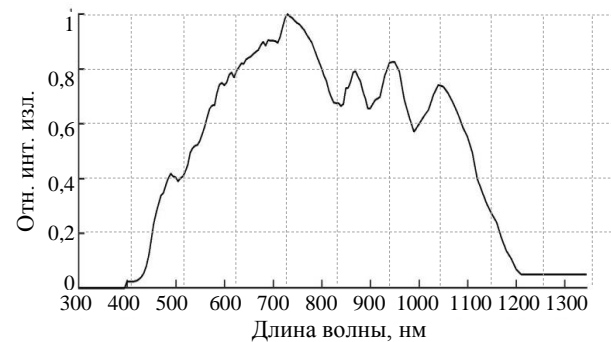


Рис. 5. Оптимизированный спектр

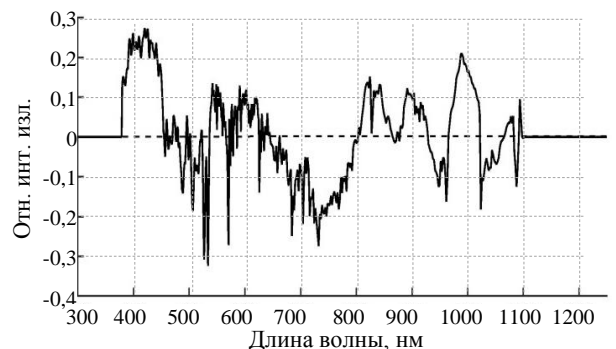


Рис. 6. Разница между полученным спектром и солнечным

4. Определение суммарной мощности излучения.

Общая мощность излучения разработанной концепции источников искусственного освещения, составила $P_{\text{изл.сум.}} = 132$ Вт.

5. Расчет плотности мощности выделяемого излучения.

В ходе исследования основной упор был направлен не только на имитацию спектра солнечного излучения в лабораторных условиях, но и на получение мощности излучения, равной 10 Вт/дм². Представленная комбинация световых элементов может быть компактно размещена на площади $1,32$ дм², таким образом обеспечивая требуемую плотность излучения с поверхности мощностью $13,2$ Вт/дм², т.е. поставленная задача была выполнена.

Результаты оценки стоимости разработанного имитатора солнечного излучения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Стоимость источников искусственного освещения				
<i>n</i>	Источник	Количество, шт.	Цена за один элемент, руб.	Общая стоимость, руб.
1	Галогенная лампа	1	44	44
2	Голубой светодиод	10	6	60
3	Белый светодиод	150	49	7350
4	ИК1-светодиод	322	16	5152
5	ИК2-светодиод	328	11	3608
	ИК3-светодиод	693	95	65835
Итого:				82049

6. Определение количества имитаторов.

Так как $P_{\text{изл. сум}} = 132$ Вт, оценим количество модулей на требуемую площадь источника излучения.

$$N_{\text{мод}} = \frac{1000}{132} \cdot S, \quad (10)$$

где S – площадь источника излучения в м².

Выводы и заключения

Создана и описана методика расчета источника искусственного освещения для различных спектров излучения и для разного набора искусственных осветительных приборов и (в общем случае) для произвольного спектра поглощения солнечной батареи, с высокой точностью воспроизводящего спектр солнечного излучения, установленный международным стандартом ISO 9845-1, в диапазоне длин волн в зоне поглощения солнечной батареи. Проведен расчет по этой методике и разработан модуль источника искусственного освещения (имитатор), обеспечивающий воспроизведение солнечного спектра.

Полученный спектр излучения значительно лучше приближен к спектру естественного солнечного излучения по сравнению с имитатором, рассмотренным в статье [10], но имеет в своем составе 1 504 источника, что более чем в два раза больше, чем в [10], где использовано 655 источников.

В отличие от имитаторов, исследуемых в статье [9], разработанный имитатор не требует дополнительных конструктивных элементов, таких как зеркала и отражатели.

Предложенная методика может быть использована в том числе для перспективных солнечных панелей, отличающихся от современных устройств по спектру поглощения (например, в ультрафиолетовой зоне), а также при появлении новых, более эффективных (по КПД, излучаемой мощности, форме спектра излучения, по конструктивным особенностям) источников света.

Литература

1. Maximum power point tracking methods for the solar batter / I.A. Belova, M.V. Martinovich, V.A. Skolota, I.V. ZaeV // International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. – 2018. – P. 445–451.

2. Application of photovoltaic cells with an intelligent control system for railway transport / I.A. Belova, M.V. Martinovich, V.A. Skolota // 13th International Scientific-Technical

Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – 2016. – Vol. 03. – P. 64–68.

3. Гришанов В.Н. Классификация и рациональное проектирование солнечных имитаторов // Компьютерная оптика. – М.: МЦНТИ, 1995. – Вып. 14-15, ч. 2. – С. 46–52.

4. Имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космического аппарата / Р.О. Аслания, Д.И. Анисимов, И.А. Марченко, В.И. Пантелеев // Сибирский журнал науки и технологии. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 323–327.

5. Ларионов В.Р. Измерительные комплексы для исследований солнечных фотоэлектрических преобразователей каскадного типа и концентраторных модулей на их основе // Журнал технической физики. Физико-техн. ин-т им. А.Ф. Иоффе. – 2015. – Т. 85, № 6. – С. 104–110.

6. Мейтин М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы. Пусть всегда будет Солнце // Электроника-НТБ. – 2000. – № 6. – С. 40–47.

7. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Н.К. Калинин, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 317 с.

8. ISO 9845-1:1992, ISO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/01/77/17723.html>, свободный (дата обращения: 12.12.2019).

9. Колинчук А.В. Имитаторы солнечного излучения для испытаний фотоэлектрических батарей космического назначения // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 73–79.

10. Моделирование спектра солнечного излучения с помощью светодиодов / В.А. Афонин, О.Ю. Коваленко, Е.Д. Гусева, Ю.А. Пильщикова // Фотоника. – 2016. – Вып. 2. – С. 72–77.

11. Поглощательная способность полупроводников, используемых в производстве солнечных панелей / Л.А. Косяченко, Е.В. Грушко // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Вып. 4. – С. 482–486.

12. Зависимость коэффициента поглощения кристаллического германия в ИК области спектра от удельного сопротивления / И.М. Несмелова, Н.И. Астафьев, Е.А. Несмелов // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 1. – С. 88–92.

13. Оптические свойства монокристаллического кремния в области спектра 3–5 мкм / И.М. Несмелова, Н.И. Астафьев, Н.А. Кулакова // Оптический журнал. – 2012. – Т. 79, № 3. – С. 87–90.

14. Гончаров А.Д. Универсальный метод расчета коэффициента использования светового потока осветительных приборов / А.Д. Гончаров, В.И. Туев // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 55–60.

15. Якушенков Ю.Г. Теория и расчёт оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 2014. – 568 с.

Белова Ирина Анатольевна

Ассистент каф. электроники и электротехники (ЭЭ) Новосибирского гос. технического университета (НГТУ) Карла Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-923-258-44-93
Эл. почта: ira.belowa@gmail.com

Мартинович Мирослав Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭЭ НГТУ Карла Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-892-98-48
Эл. почта: martinovich_m@mail.ru

Федорова Дарья Юрьевна

Магистр каф. ЭЭ НГТУ

Карла Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073

Тел.: +7-913-208-24-89

Эл. почта: careglazaia@mail.ru

Belova I.A., Martinovich M.V., Fedorova D.Y.

Artificial light source simulating the solar spectrum for testing solar panels

This work is devoted to the development of a combined source of artificial lighting to study the characteristics of solar cells. Spectral analysis of various radiation sources is performed. Based on the analysis, the necessary radiation sources are selected, which total spectrum, after approximation, is close to the spectrum of solar radiation. The calculation of electro-optical characteristics is carried out. The number of artificial lighting sources needed to reproduce the spectrum of solar radiation is calculated. The corresponding conclusions are made.

Keywords: solar spectrum, imitation of solar radiation, solar panels.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-4-19-24

References

1. Belova I.A., Martinovich M.V., Skolota V.A., Zaev I.V. Maximum power point tracking methods for the solar battery. *International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices*, 2018, pp. 445–451.

2. Belova I.A., Martinovich M.V., Skolota V.A. Application of photovoltaic cells with an intelligent control system for railway transport. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering*, 2016, vol. 03, pp. 64–68.

3. Grishanov V.N. [Classification and rational design of solar simulators]. *Computer optics*, 1995, pp. 46–52 (in Russ.).

4. Aslanyan R.O., Anisimov D.I., Marchenko I.A., Pan-telev V.I. [Simulators of solar radiation for thermal vacuum tests of a spacecraft]. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 323–327 (in Russ.).

5. Larionov V.R. [Measuring complexes for research of cascade-type solar photovoltaic converters and concentrator modules based on them]. *Journal of Technical Physics, Physico-Technical Institute named after A.F. Ioffe*, 2015, vol. 85, no.6, pp. 104–110 (in Russ.).

6. Meitin M. [Photovoltaics: materials, technologies, prospects. May there always be sun]. *Electronics-NTB*, 2000, no. 6, pp. 40–47 (in Russ.).

7. Vissarionov V.I., Malinin N.K., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A. [Solar energy]. Textbook for universities. Moscow: Publishing House MEI, 2008, 317 c. (in Russ.).

8. ISO 9845-1:1992, ISO. [Online]. Available at: <http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/01/77/17723.html>, free (Accessed: December 12, 2019).

9. Kolinchuk A.V. [Solar simulators for testing space photovoltaic batteries]. *Aerospace Engineering and Technology*, 2015, no. 3, pp. 73–79 (in Russ.).

10. Afonin V.A., Kovalenko O.Yu., Guseva E.D., Pil'shchikova Yu.A. [Modeling the solar spectrum using LEDs]. *Photonics*, 2016, no. 2, pp. 72–77 (in Russ.).

11. Kosyachenko L.A., Grushko E.V. [Absorption capacity of semiconductors used in the manufacture of solar panels]. *Semiconductor Physics and Technology*, 2012, vol. 4, pp. 482–486 (in Russ.).

12. Nesmelova I.M., Astafiev N.I., Nesmelov E.A. [The dependence of the absorption coefficient of crystalline germanium in the IR spectral region of the resistivity]. *Optical Magazine*, 2007, vol. 74, no. 1, pp. 88–92 (in Russ.).

13. Nesmelova I.M., Astafiev N.I., Kulakova N.A. [Optical properties of monocrystalline silicon in the spectral range 3–5 μm]. *Optical Magazine*, 2012, vol. 79, no. 3, pp. 87–90. (in Russ.).

14. Goncharov A.D. [A universal method for calculating the coefficient of using the light flux of lighting devices]. *TUSUR reports*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 55–60 (in Russ.).

15. Yakushenkov Yu.G. [Theory and calculation of optoelectronic devices]. M.: Logos, 2014, 568 p. (in Russ.).

Irina A. Belova

Assistant to the Department Electronics and Electrical Engineering (EE) Novosibirsk State Technical University (NSTU)

20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073

Phone: +7-923-258-44-93

Email: ira.belowa@gmail.com

Miroslav V. Martinovich

Candidate of Science in Engineering,

Associate Professor EE NSTU

20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073

Phone: +7-913-892-98-48

Email: martinovich_m@mail.ru

Daria Y. Fedorova

Master student, Department of EE NSTU

20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073

Phone: +7-913-208-24-89

Email: careglazaia@mail.ru