

Для цитирования: С.М. Гаджиева, П.А. Курбанова, У.А. Магомедова. Энергоэффективный интегральный термоэлектрический преобразователь солнечной радиации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (2): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-2-8-17

For citation: S.M. Gadzhieva, P.A. Kurbanova, U.A. Magomedova. Power-effective integral thermoelectric solar radiation converter. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (2): 8-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-2-8-17

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-2-8-17

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

С.М. Гаджиева, П.А. Курбанова, У.А. Магомедова

Дагестанский государственный технический университет,

367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматривается преобразование солнечной радиации в электричество с использованием одновременно нескольких эффектов, которые дополняют друг друга и преобразуют недостатки одного способа преобразования в достоинства другого способа. **Метод.** Применены методы моделирования теплообменных процессов при многократном переотражении светового потока на солнечном концентраторе цилиндрической формы. **Результат.** Предлагается сформировать интегральную совокупность полупроводниковых преобразователей фотонов совместно с фотоэффектом на металлических электродах с низкой работой выхода электронов и термоэлектрическим эффектом, что позволит повысить энергоэффективность всей конструкции с дополнительным многократным переотражением фотонов на концентраторе солнечных лучей в виде цилиндрической поверхности с радиально расположенными зеркальными металлическими электродами. Фотоны при попадании на энергоэффективный интегральный термоэлектрический преобразователь солнечной радиации в электроэнергию будут либо преобразованы на р-п-переходе солнечной батареи, либо участвовать в фотоэффекте на электродах, либо будут поглощены материалом конструкции, нагреют её и выработают на термогенераторе также электричество. Такой подход позволяет повысить КПД до максимально возможного значения. **Вывод.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что все попавшие фотоны на энергоэффективный интегральный термоэлектрический преобразователь солнечной радиации будут преобразованы в электричество в той или иной степени, и только незначительная часть будет рассеяна в виде тепловых потерь или переотражений наружу.

Ключевые слова: фотоэффект, солнечная батарея, термогенератор, эффект Зеебека, фотон

POWER-EFFECTIVE INTEGRAL THERMOELECTRIC SOLAR RADIATION CONVERTER

S.M. Gadzhieva, P.A. Kurbanova, U.A. Magomedova

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Aim. This article is devoted to the conversion of solar radiation into electricity using the joint effect of several methods, which complement each other by transforming the disadvantages of one method into the advantages of another method. **Methods.** Heat exchange processes occurring under multiple re-reflection of the light flux on a cylindrical solar concentrator were simulated. **Results.**

*It is proposed to form an integrated set of semiconductor photon converters together with a photoelectric effect on metal electrodes, thus producing a low electron output and a thermoelectric effect. This approach increases the energy efficiency of the entire structure with an additional multiple re-reflection of photons on the solar flux concentrator in the form of a cylindrical surface with radially arranged mirror metal electrodes. When reaching a power-effective integrated thermoelectric converter of solar radiation to electricity, photons will either be converted at the p-n junction of a solar cell, or participate in the photoelectric effect at the electrodes, or be absorbed by the construction material to produce thermoelectric power. This approach allows the efficiency of the entire system to be maximized. **Conclusion.** All the photons that hit the proposed power-effective integrated thermoelectric solar radiation converter will be converted to electricity to a certain extent, with only their small part being scattered outside in the form of heat losses or re-reflections.*

Keywords: photoelectric effect, solar battery, thermal generator, Seebeck effect, photon.

Введение. Для получения электрической энергии существует много различных способов [6, 9]. Наиболее целесообразно использовать возобновляемые источники энергии. Самый большой ресурс представляет собой Солнце.

Солнечная энергия в различной степени определяет все энергоресурсы человечества, кроме ядерной энергии. Солнечная энергия обеспечивает работой гидростанции, тепловые станции, приливные станции и так далее.

Для преобразования солнечной энергии существуют различные способы [7]. Самый простой способ – это фотоэффект. Явление фотоэффекта представляет собой поглощение фотонов валентными электронами на поверхности материалов. Фотоны могут поглощаться также и в глубине материала и не только валентными электронами. Но это явление более редкое, и рассматривать его мы не будем. После поглощения фотона электрон приобретает энергию достаточную для того, чтобы покинуть поверхность материала и отправиться в свободное путешествие. Такое явление эмиссии приводит к тому, что материал приобретает положительный заряд. Электрон, достигнув противоположного электрода, сообщает ему отрицательный заряд. Фотоэффект может с определённым коэффициентом полезного действия (КПД) преобразовать энергию солнечных фотонов в электричество. Однако все существующие системы преобразования имеют низкий КПД и могут быть использованы только как вспомогательные для основного способа добычи электричества.

Постановка задачи. Известны соотношения между скоростью приобретаемой электроном и энергией фотонов [8, 10, 11]. Чем выше частота фотона, тем большей энергией он обладает. Соответственно при поглощении такого фотона электроном, электрон отрывается и переходит в свободное перемещение. Скорость электрона тем выше, чем выше частота поглощенного фотона.

$$E = h\nu,$$

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

где: E – энергия фотона;
 h – постоянная Планка;
 ν – частота фотона;
 A – работа выхода;
 $\frac{mv^2}{2}$ – кинетическая энергия.

На рис. 1 изображена схема поглощения фотонов валентными электронами на поверхности материала и в глубине. Фотоны встречаются с электроном, который находится в свободном перемещении, и сообщают ему энергию для отрыва от поверхности. Электроны, не принадлежащие конкретному атому, также могут поглотить фотон и отправиться в свободное путеше-

ствии. Валентные электроны также могут поглотить фотон и также отправиться в путешествие. Однако КПД такого преобразования находится в пределах 1 % и поэтому не может быть использован как основной источник преобразования энергии.

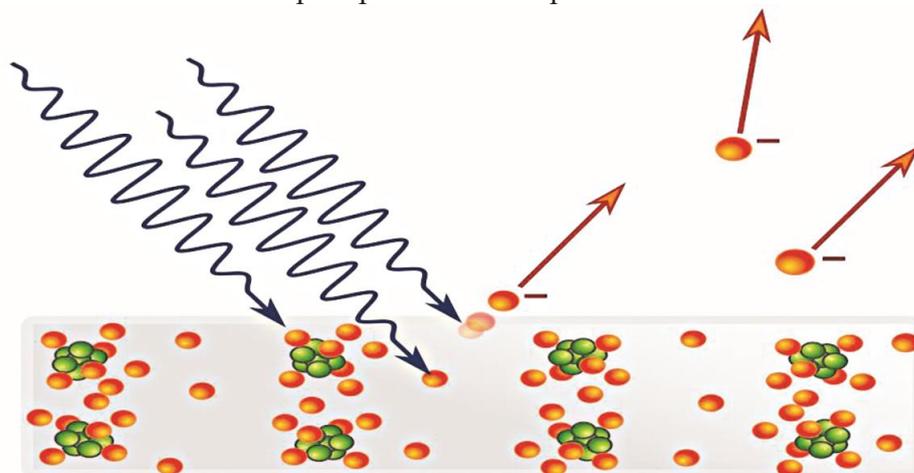


Рис. 1. Схема фотоэффекта
Fig. 1. Scheme of the photo effect

На рис. 2 изображена солнечная батарея, состоящая из р-п-переходов полупроводниковых материалов [12-15]. Такая батарея может быть гибкой или же твердой [16].

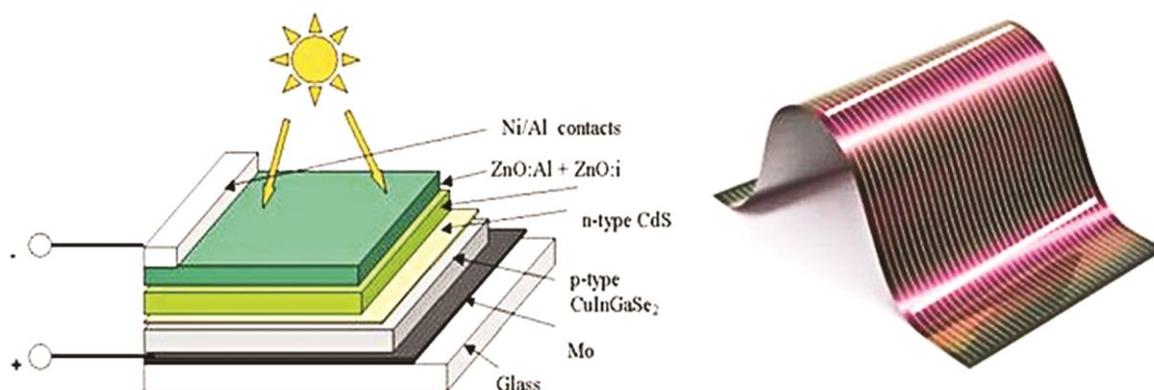


Рис. 2. Полупроводниковые солнечные батареи
Fig. 2. Semiconductor solar cells

Структура ее изображена на рис. 3. Отдельные слои формируют, в основном, р и n зоны. N зона имеет избыточное количество электронов, р зона имеет избыточное количество дырок - вакансий для электронов. Р-п-переход не обладает основными носителями, поэтому при генерации поглощения фотонов электродами образуются пары электрон-дырка, но в зоне р электрон будет уничтожен избыточными дырками, а в зоне n дырка будет уничтожена избыточными электронами.

Зато в зоне запирающего слоя р-п-перехода, где нет никаких носителей, неравновесная концентрация электронов и дырок приведет к тому, что они будут дрейфовать каждый в свою зону и создавать разность потенциалов, которая может быть использована как источник электричества.

КПД такой батареи в лабораторных условиях может достигать свыше 40%, тогда как обычные бытовые солнечные батареи могут достичь КПД 20%.

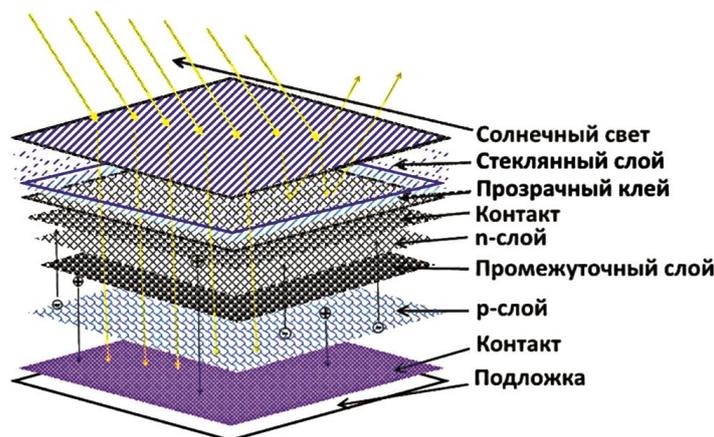


Рис. 3. Структура полупроводниковой солнечной батареи
 Fig. 3. Structure of a semiconductor solar battery

Солнечная батарея представляет N_s последовательно интегрально соединенных и N_p параллельно соединенных фотоэлементов [3, 4, 17-19]. При этом величина тока короткого замыкания батареи:

$$I_{SCM} = N_p \cdot I_{SC},$$

а величина напряжение холостого хода солнечной батареи:

$$V_{OCM} = N_s \cdot V_{OC}.$$

Причем размер последовательного сопротивления составляет:

$$R_{SM} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_S.$$

Характеристики вольтамперные определяются формулой:

$$I^M = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \cdot \left(e^{\frac{q}{nkt} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_S}{N_p} \right)} - 1 \right),$$

где: I_s – величина обратного тока насыщения;

k – постоянная Больцмана;

T – рабочая температура при уровне солнечной радиации 600 Вт/м²;

q – заряд электрона.

На рис. 4 приведена вольт-амперная характеристика солнечной батареи при различных уровнях освещенности. Это вызвано тем, что неподвижная солнечная батарея освещается солнцем утром, в обед и вечером по-разному.

Разный угол освещения приводит к тому, что интенсивность освещения также будет меняться [20]. Поэтому целесообразно разместить ее таким образом, чтобы солнечные лучи в обеденное время падали на неё перпендикулярно. Но тогда утром и вечером интенсивность освещения будет хуже.

Помимо приведенных способов существует также способ преобразования солнечной энергии при помощи полупроводникового термоэлектрического генератора [10].

Такой генератор (рис.5) формирует электричество при возникновении разности температур на горячем и холодном спае.

Чем выше перепад температур, тем больше электричества вырабатывает такой генератор. КПД его тоже незначительную величину имеет, но, тем не менее, как дополнительное устройство оно может быть задействовано.

Все приведённые эффекты и, в том числе, эффекта Зеебека имеют свои достоинства и недостатки [20]. Поэтому целесообразно разработать такое устройство преобразования, в котором сочетались бы достоинства и недостатки всех этих эффектов [1, 2].

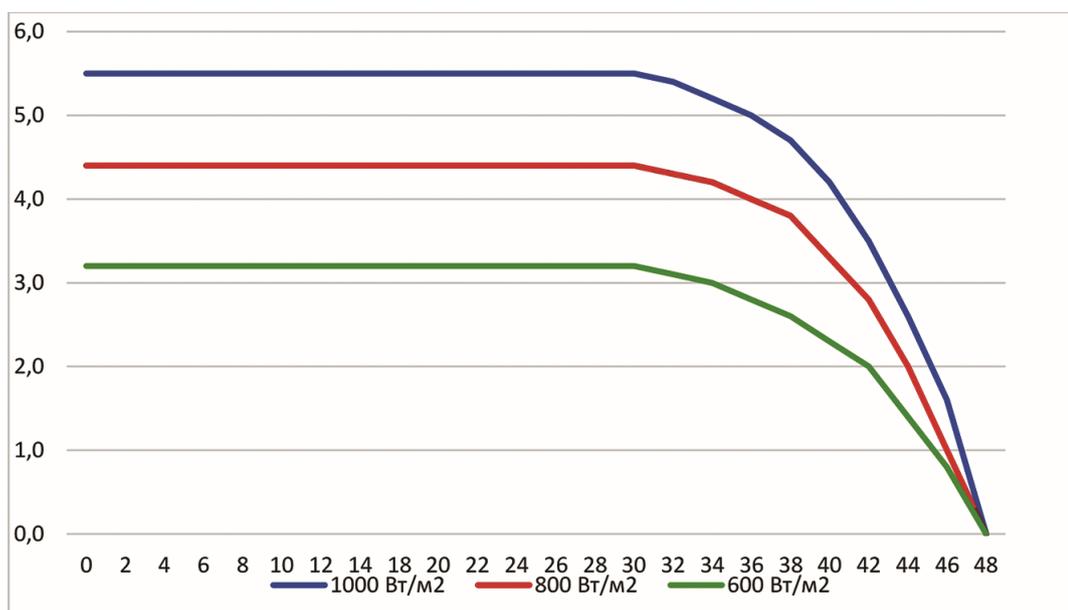


Рис. 4. ВАХ солнечной батареи при различных уровнях освещенности
Fig. 4. Current-voltage characteristic of a solar battery at different levels of illumination Температура рабочей поверхности солнечного термогенератора:

$$T_{СТГ} = T_{н\ СТГ} + 0,81(T_{в} - T_{н\ в}) - 0,06 \cdot HUM - 0,01 Press - 0,24 SPD + 0,06(SR_{СТГ} - SR_{н}),$$

где: $T_{н\ СТГ}$ – начальная температура солнечного термогенератора;

$T_{в}$ – температура воздуха;

$T_{н\ в}$ – начальная температура воздуха;

HUM – влажность воздуха, %;

Press – давление воздуха, мм.рт.ст.;

SPD – скорость ветра, м/с;

$SR_{СТГ}$ - реальная солнечная радиация на поверхности солнечного термогенератора;

$SR_{н}$ – начальная суммарная солнечная радиация (обычно 1000 Вт/м^2).



Рис. 5. Солнечный полупроводниковый термогенератор
Fig. 5. Solar semiconductor thermogenerato

Методы исследования. На рис.6 приведена схема преобразователя солнечной энергии в электричество.

Она представляет из себя цилиндрическую конструкцию, состоящую из радиально расположенных p-n-переходов с зеркальными металлическими электродами.

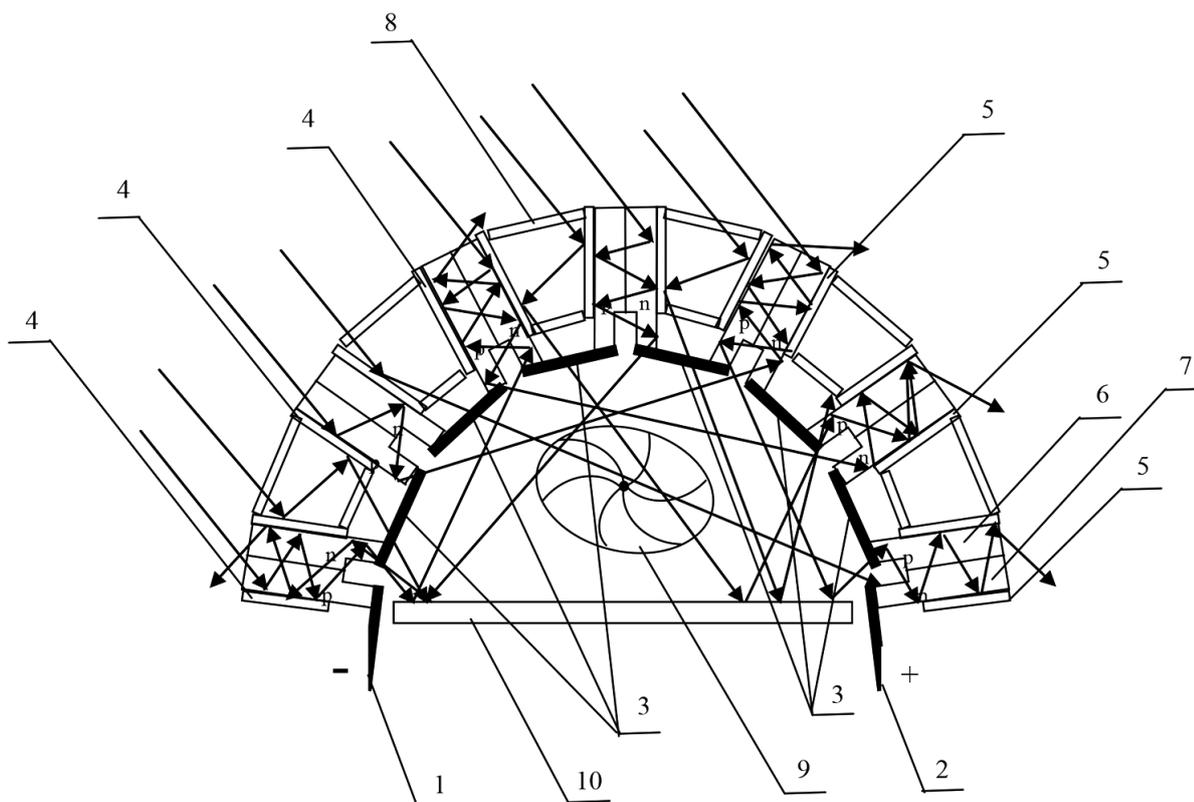


Рис. 6. Энергоэффективный интегральный термоэлектрический преобразователь солнечной радиации

Fig. 6. Energy-efficient integral thermoelectric solar radiation converter

Между собой эти электроды разделены пустотелыми камерами, из которых откачан воздух. Позицией 1 обозначен отрицательный электрод на схеме, позицией 2 - положительный электрод. Все компоненты соединены последовательно.

Позицией 3 обозначены электроды, соединяющие между собой отдельные p-n-переходы.

Позицией 4 обозначены электроды, соединяющие вторые части этих p-n-переходов между собой.

Такой подход позволяет сформировать несколько разных структур, причем материал у них хоть и металлический, но разный.

На зоне n материал делается из металла с работой выхода незначительной, а на зоне p - с высокой работой выхода.

Это делается для того, чтобы один и тот же p-n-переход при облучении солнечным светом вырабатывал электричество, как внутри самого p-n-перехода непосредственно, так и как фотоэффект на электродах. То есть фотоны либо, проходя через p-n-переход, преобразуются в электричество, либо, достигая электродов, выбивают там электроны как обычный фотоэффект и тоже вырабатывают электрический ток.

Форма преобразователя устроена таким образом, что ему не нужно двигаться в течение дня за перемещением солнца. Утренние лучи попадают с одной стороны в это устройство и после многократного отражения от зеркальных электродов попадают во внутреннюю камеру и далее на противоположную сторону, которая находится в тени относительно утреннего солнца,

но, тем не менее, фотоны пройдут сквозь эти р-п-переходы, также преобразуясь в электроэнергию. В обеденное время центральные р-п-переходы получают максимальную порцию фотонов и распределяют их на утренние и закатные р-п-переходы. На закате будут задействованы прямыми лучами эти р-п-переходы, и те фотоны, которые пройдут сквозь них во внутреннюю камеру, попадут на те р-п-переходы, которые направлены в сторону утреннего солнца.

Это позволяет не вращать конструкцию, следуя за солнцем. В тоже время угол, под которым входят фотоны в одни р-п-переходы, может быть острым, а выходят под тупым углом и, наоборот. Это позволит унифицировать количество переотражений внутри такого концентратора солнечных лучей.

Аналогичная ситуация происходит и в электродах в пустых камерах. Один электрод там получается с низкой работой выхода, другой – с высокой. Электрод с низкой работой выхода при освещении фотонами эмиссирует электроны, и они попадают на другой электрод. Возникает дополнительная разность потенциалов.

Внутренняя камера обдувается вентилятором, что понижает температуру внутри, и спай 3 будут иметь низкую температуру.

Внешняя часть электродов будет иметь высокую температуру, и поэтому термогенератор, сформированный таким образом, будет вырабатывать также электричество.

Предложенная конструкция (рис.6) обладает важными преимуществами по сравнению с обычными преобразователями. Дело в том, что то, что являлось недостатком для солнечной батареи, является достоинством для фотоэффекта. То, что является достоинством для солнечной батареи и термогенератора, то является недостатком для фотоэффекта. А то, что было недостатком для термогенератора, является достоинством для фотоэффекта и солнечных батарей, дополняя свои достоинства их недостатками.

Обсуждение результатов. Фотоны при попадании на энергоэффективный интегральный термоэлектрический преобразователь солнечной радиации в электроэнергию будут либо преобразованы на р-п-переходе солнечной батареи, либо участвовать в фотоэффекте на электродах, либо будут поглощены материалом конструкции, нагреют её и выработают на термогенераторе также электричество.

Такой подход позволяет повысить КПД до максимально возможного значения. В нижеприведенных формулах приведены соотношения, позволяющие рассчитать расход мощности от количества переотражений:

$$\begin{aligned}
 P_{pn1} &= P_{C1}\eta \\
 P_{C2} &= P_{C1} - P_{pn1} = P_{C1} - P_{C1}\eta = P_{C1}(1 - \eta) \\
 P_{pn2} &= P_{C2}\eta = P_{C1}(1 - \eta)\eta \\
 P_{C3} &= P_{C2} - P_{pn2} = P_{C1}(1 - \eta) - P_{C1}(1 - \eta)\eta = P_{C1}(1 - \eta)(1 - \eta) = P_{C1}(1 - \eta)^2 \\
 P_{Ci} &= P_{C1}(1 - \eta)^{i-1},
 \end{aligned}$$

где: P_{Ci} – мощность фотонов при переотражениях;

P_{pni} – мощность, вырабатываемая на р-п-переходе при переотражениях;

η – КПД преобразования фотонов на р-п-переходе.

Изначально солнечный поток P_{C1} в соответствии с КПД солнечной батареи преобразуется и уменьшается. Теперь этот ослабленный поток повторно после переотражения проходит р-п-переход и фотоэффект. Он опять в соответствии с КПД будет ослаблен, и так повторяется каждый раз.

После каждого переотражения происходит ослабление этого потока, уменьшение количества фотонов до тех пор, пока они полностью не преобразуются на солнечной батарее или на фотоэффекте, или на термогенераторе.

В конечном итоге от фотонного потока ничего не останется, что будет означать, что КПД такого устройства будет близок к 100%.

Вывод. Все попавшие фотоны на энергоэффективный интегральный термоэлектрический преобразователь солнечной радиации будут преобразованы в электричество в той или иной степени, и только незначительная часть будет рассеяна в виде тепловых потерь или преотражений наружу.

Приведённая конструкция позволяет реализовать высокоэффективный модуль по преобразованию солнечной радиации в электричество и может быть использована как автономно, так и в составе более сложных устройств.

Библиографический список:

1. Патент РФ № 2335825. Термоэлектрическое устройство с высоким градиентом температур / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. // 10.10.2008.
2. Патент РФ № 2575614. Термоэлектрический генератор с высоким градиентом температур между спаями / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Челушкин Д.А. // Б.И. № 5, 2016.
3. Патент РФ № 2615041. Концентратор лучей для солнечной батареи с веерным расположением зеркальных отражающих электродов / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Давыдова К.М., Акимова С.К., Исаилова З.А. // 03.04.2017.
4. Патент РФ № 2616741. Шарообразная солнечная батарея с многократным преломлением и отражением лучей в концентраторе / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Давыдова К.М., Акимова С.К., Исаилова З.А. // 18.04.2017.
5. Патент Солнечный теплогенератор. <https://findpatent.ru/patent/172/1726923.html>
6. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. // СПб.: Политехника, 2005. 533 с.
7. Конструирование и принцип действия оксидных солнечных ячеек / А. В. Рыженков, Т. Н. Патрушева, А. В. Попов, Н. В. Маглинец // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2010. С. 256-261.
8. Краснок А.Е., Максимов И. С., Денисюк А. И., Белов П. А, Мирошниченко А. Е., Симовский К. Р., Кившарь Ю. С. Оптические нано-антенны // Успехи физических наук. -2013. - Т.183, №6. - С.561–589. - doi:10.3367/UFNr.0183.201306a.0561.
9. Парашук, Д. Ю. Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии: препринт / Д. Ю. Парашук; МГУ. - М.: УНЦ ДО НИИЯФ МГУ, 2009. 20 с.
10. Патрушева, Т. Н. Фотоактивные оксидные пленки и гетероструктуры / Т. Н. Патрушева, Т. Н. Шелованова // Журнал СФУ. Техника и технология. - 2009. - Т. 2, № 2. - С. 151-159.
11. Сибатов, Р. Т. Дробно-дифференциальная теория аномальной кинетики носителей заряда в неупорядоченных полупроводниковых и диэлектрических системах: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / Р. Т. Сибатов. - Ульяновск, 2012.
12. Фролкова Н.О. Обобщенная модель солнечного элемента в среде Matlab Simulink / Н.О.Фролкова, О.А.Фролков // Материалы XI Международной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения» СКМП-2010. С.70-72.
13. Bloomberg New Energy Finance Tier 1 module maker list, Q2 2016.
14. David Szondy. Stanford researchers develop self-cooling solar cells. (англ.). gizmag.com (25 July 2014). Дата обращения 6 июня 2016.
15. Jamri, M.S. Modeling and control of a photovoltaic energy system using the state-space averaging technique / M.S.Jamri, T.C.Wei // American Journal of Applied Science.- 2010.-№7.- p.682-691.
16. Frolkov O.A. // 13 International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. ICEEE-2010. p. 152.
17. Ramabadran R. Effect of Shading on Series and Parallel Connected Solar PV Modules / R. Ramabadran, B. Mathur // Modern applied science. 2010. Vol.3. No.10.pp.32-41.
18. Single-wire dye-sensitized solar cells wrapped by carbon nanotube film electrodes / S. Zhang, C. Ji, Z. Bian et al. // Nano Lett. 2011. Vol. 11.pp. 3383-3387.
19. Synopsys' Sentaurus TCAD Used to Simulate Solar Cell Performance Characteristics at NREL: Электронный ресурс. (<http://synopsys.mediaroom.com/index.php?s=43&item=737>). Проверено 28.11.2010.
20. Znajdek, K. Review of simulation models suitability for characterization of actual Si PV cells / K.Znajdek // XII International PhD Workshop OWD 2010. pp.423-425.

References:

1. Patent RF № 2335825. Termoelektricheskoye ustroystvo s vysokim gradiyentom temperatur / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Gadzhiyeva S.M. // 10.10.2008. [RF patent No. 2335825. Thermoelectric device with a high temperature gradient / Ismailov TA, Gadzhiev H.M., Gadzhieva S.M. // 10.10.2008. (In Russ)]
2. Patent RF № 2575614. Termoelektricheskoy generator s vysokim gradiyentom temperatur mezhdru spayami / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. // B.I. № 5 , 2016 [RF patent No. 2575614. Thermoelectric generator with a high temperature gradient between junctions / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. // B.I. No. 5, 2016. (In Russ)]
3. Patent RF № 2615041. Kонтсентратор luchey dlya solnechnoy batarei s veyernym raspolozheniyem zerkal'-nykh otrazhayushchikh elektrodov / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Davydova K.M., Akimova S.K., Isamilova Z.A. // 03.04.2017. [RF patent No. 2615041. A beam concentrator for a solar battery with a fan-shaped arrangement of mirror reflecting electrodes / Ismailov TA, Gadzhiev Kh.M., Davydova KM, Akimova SK, Isamilova Z.A. // 03.04.2017. (In Russ)]
4. Patent RF № 2616741. Sharoobraznaya solnechnaya batareya s mnogokratnym prelomleniyem i otrazheniyem luchey v kontsentratore / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Davydova K.M., Akimova S.K., Isamilova Z.A. // 18.04.2017. [RF patent No. 2616741. Spherical solar cell with multiple refraction and reflection of rays in a concentrator / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Davydova K.M., Akimova S.K., Isamilova Z.A. // 04/18/2017. (In Russ)]
5. Patent Solnechnyy teplogenerator. <https://findpatent.ru/patent/172/1726923.html> [Patent Solar Heat Generator <https://findpatent.ru/patent/172/1726923.html> (In Russ)]
6. Ismailov T.A. Termoelektricheskoye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivatory teploperedachi. // SPb.: Politehnika, 2005. 533 s. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. // St. Petersburg: Polytechnic, 2005.533 s. 8. Design and principle of operation of oxide solar cells / A. V. Ryzhenkov, T. N. Patrusheva, A. V. Popov, N. V. Maglinets // Modern problems of radio electronics: coll. scientific tr / Sib. Feder. un-t - Krasnoyarsk, 2010 pp. 256-261. (In Russ)]
7. Konstruirovaniye i printsip deystviya oksidnykh solnechnykh yacheyek/ A. V. Ryzhenkov, T. N. Patrusheva, A. V. Popov, N. V. Maglinets // Sovremennyye problemy radioelektroniki: sb. nauch. tr. / Sib. feder. un-t. Krasnoyarsk, 2010. S. 256-261. [Design and principle of operation of oxide solar cells / A. V. Ryzhenkov, T. N. Patrusheva, A. V. Popov, N. V. Maglinets // Modern problems of radio electronics: coll. scientific tr / Sib. Feder. un-t - Krasnoyarsk, 2010. pp. 256-261. (In Russ)]
8. Krasnok A.Ye., Maksimov I. S., Denisyuk A. I., Belov P. A, Miroshnichenko A. Ye., Simovskiy K. R., Kivshar' YU. S. Opticheskiye nano-antenny // Uspekhi fizicheskikh nauk. -2013. - T.183, №6. - S.561-589. - doi:10.3367/UFNr.0183.201306a.0561. [Krasnok AE, Maksimov IS, Denisyuk AI, Belov PA, Miroshnichenko AE, Simovsky KR, Kivshar Yu S. Optical nano-antennas // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2013. Vol.183, No. 6. pp. 561-589. doi: 10.3367 / UFNr.0183.201306a.0561. (In Russ)]
9. Parashchuk, D. YU. Sovremennyye fotoelektricheskoye i fotokhimicheskoye metody preobrazovaniya solnechnoy energii: preprint / D. YU. Parashchuk; MGU. - M.: UNTS DO NIIFYAF MGU, 2009. 20 s. [Parashchuk D. Yu. Modern photovoltaic and photochemical methods for converting solar energy: preprint / D. Yu. Parashchuk; Moscow State University. - M.: UC DO NIIFYAF Moscow State University, 2009 . 20 p. (In Russ)]
10. Patrusheva, T. H. Fotoaktivnyye oksidnyye plenki i geterostruktury / T. N. Patrusheva, T. N. Shelovano-va // Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologiya. - 2009. - T. 2, № 2. - S. 151-159. [Patrusheva T. H. Photoactive oxide films and heterostructures / T. N. Patrusheva, T. N. Shelovanova // Journal of Siberian Federal University. Technique and technology. 2009. Vol. 2, No. 2. pp. 151-159. (In Russ)]
11. Sibatov P. T. Drobno-differentsial'naya teoriya anomal'noy kinetiki nositeley zaryada v neuporyado-chennykh poluprovodnikovykh i dielektricheskikh sistemakh: dis. d-ra fiz.-mat. nauk: 01.04.07 / R. T. Sibatov. - Ulyanovsk, 2012. [Sibatov P. T. Fractional differential theory of anomalous kinetics of charge carriers in disordered semiconductor and dielectric systems: dis. Dr. Phys.-Math. Sciences: 01.04.07 / R.T. Sibatov. Ulyanovsk, 2012. (In Russ)]
12. Frolkova N.O. Obobshchennaya model' solnechnogo elementa v srede Matlab Simulink / N.O.Frolkova, O.A.Frolkov // Materialy XI Mezhdunarodnoy konferentsii «Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya» SKMP-2010.- S.70-72. [Frolkova N.O. A generalized model of a solar cell in the environment of Matlab Simulink / N.O. Frolkova, O.A. Frolkov // Materials of the XI International Conference "Computer Mathematics Systems and Their Applications" SKMP-2010.pp.70-72. (In Russ)]
13. Bloomberg New Energy Finance Tier 1 module maker list, Q2 2016.
14. David Szondy. Stanford researchers develop self-cooling solar cells. (eng.). gizmag.com (July 25, 2014). Date of treatment June 6, 2016
15. Jamri, M.S. Modeling and control of a photovoltaic energy system using the state-space averaging technique / M.S. Jamri, T.C. Wei // American Journal of Applied Science. 2010. No. 7.pp.682-691.
16. Frolkov O.A. // 13 International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Composites. ICEEE-2010. p. 152.
17. Ramabadran, R. Effect of Shading on Series and Parallel Connected Solar PV Modules / R. Ramabadran, B. Mathur // Modern applied science. 2010. Vol. 3. No.10. pp.32-41.

18. Single-wire dye-sensitized solar cells wrapped by carbon nanotube film electrodes / S. Zhang, C. Ji, Z. Bian et al. // Nano Lett. 2011. Vol. 11. P. 3383-3387.

19. Synopsys' Sentaurus TCAD Used to Simulate Solar Cell Performance Characteristics at NREL: Electronic resource. (<http://synopsys.mediaroom.com/index.php?s=43&item=737>). Retrieved November 28, 2010.

20. Znajdek, K. Review of simulation models suitability for characterization of actual Si PV cells / K. Znajdek // XII International PhD Workshop OWD 2010.pp. 423-425.

Сведения об авторах:

Гаджиева Солтанат Магомедовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: gadzhieva_soltanat@mail.ru

Курбанова Патимат Арсланалиевна, аспирантка, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Магомедова Умуханум Арсланалиевна, студентка факультета радиоэлектроники, телекоммуникаций и мультимедийных технологий, e-mail: umma.dag@gmail.com

Information about authors:

Soltanat M. Gadzhieva, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: gadzhieva_soltanat@mail.ru

Patimat A. Kurbanova, Graduate Student, Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Umukhanum A. Magomedova, Student of the Faculty of Radio Electronics, Telecommunications and Multimedia Technologies, e-mail: umma.dag@gmail.com

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.04.2020.

Принята в печать 28.04.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.04.2020.

Accepted for publication 28.04.2020.