

УДК 621.362.1

Излучающее термоэлектрическое устройство с рекуперацией энергии

Д-р техн. наук Т. А. ИСМАИЛОВ, канд. техн. наук Х. М. ГАДЖИЕВ
kafedra.toe@mail.ru

Дагестанский государственный технический университет
367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля, 70

Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения, в котором используются светодиодные излучатели. Снизить энергопотребление системы охлаждения можно, добавив устройство для рекуперации излучения обратно в электроэнергию в виде солнечной батареи. Для повышения КПД целесообразно изменить конструкцию солнечных батарей выполнив их в виде прозрачных тонких пленок в многослойной структуре и размещения отдельных квадратных модулей в виде уголкового отражателей, а также использования явления фотоэффекта.

Ключевые слова: светодиодные излучатели, энергопотребление, солнечная батарея, многослойная структура, уголковые отражатели, фотоэффект.

Radiating thermoelectric device with power recuperation

D. Sc. T. A. ISMAILOV, Ph. D. H. M. GADZHIEV
kafedra.toe@mail.ru

Dagestan state technical university 367015,
Mahachkala, pr. I. Shamilja, 70

Proposed here is the way to remove heat from heat-emitting electronic components in the form of radiation by means of LED emitters. It is possible to reduce power consumption of a system by adding the device recuperating radiation back into electricity, such as a solar panel. The efficiency of the design will be further improved if solar panels are redesigned in the form of thin transparent films within a multilayer structure, separate rectangular modules are arranged as corner reflectors, and photoelectric effect is applied.

Keywords: LED emitters, power consumption, solar panel, multilayer structure, corner reflectors, photoelectric effect.

Известен способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения [1], в котором используются светодиодные излучатели, предназначенные для преобразования тепловой энергии, поступившей с холодных спаев термомодуля в виде электрического тока в энергию излучения, отводящего тепло от охлаждаемого устройства в окружающую среду.

Для снижения энергопотребления системы охлаждения целесообразно добавить устройство для рекуперации излучения обратно в электроэнергию. Возможны различные варианты: использование солнечных батарей, явлений фотоэффекта или термогенераторов с предварительным преобразованием излучения в тепло.

Когда монохроматическое излучение с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны, падает на полупроводник вблизи $p-n$ -перехода, в нем образуются

новые пары электрон-дырка. Это приводит к возникновению дополнительной разности потенциалов, что, в свою очередь, вызывает эффект прямого смещения и увеличения тока основных носителей.

Если внешняя цепь разомкнута, то устанавливается динамическое равновесие первичного светового тока избыточных неосновных носителей $I_{св}$, созданных квантами света, и тока, обратного ему по направлению, обусловленного накоплением пространственных зарядов. Результирующая разность потенциалов представляет собой фото-ЭДС. При подключении внешней нагрузки происходит ответвление тока во внешнюю цепь. Суммарный ток, по-прежнему, будет равен световому. Поскольку направление фото-ЭДС и контактной разности потенциалов противоположно, ток I_n во внешней цепи будет равен:

$$I_n = I_{св} - I_{нас} (e^{U_{\phi}/kT} - 1), \quad (1)$$

где $I_{нас}$ — ток неосновных носителей, проходящих через неосвещенный $p-n$ -переход, равный току насыщения; U_{ϕ} — напряжение на зажимах фотоэлемента при включении нагрузки во внешнюю цепь.

Это уравнение представляет собой вольт-амперную характеристику (ВАХ) фотоэлектрического преобразования солнечного излучения (ФЭП). Значение U_{ϕ} вычисляется по формуле

$$U_{\phi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{св} - I_n}{I_{нас}} + 1 \right) \quad (2)$$

Для разомкнутой цепи $I_n = 0$, тогда ЭДС фотоэлемента

$$E_{\phi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{св} - I_n}{I_{нас}} + 1 \right) \quad (3)$$

Максимальное значение eE_{ϕ} не может быть больше $\Delta \epsilon_0$. Значение генерируемого светом тока короткого замыкания $I_{к.з} = I_{св}$ определяется формулой

$$I_{св} = I_{к.з} = e \int_{\Delta \epsilon_0 = h\nu}^{\infty} Q_T(h\nu) \cdot N_{\phi}(h\nu) d(h\nu) \quad (4)$$

где $Q_T(h\nu)$ — коэффициент собирания неосновных носителей (или абсолютная спектральная чувствительность элемента), который показывает, какая часть носителей, генерированных при поглощении фотонов с энергией $h\nu$, дает вклад в $I_{к.з}$; $N_\phi(h\nu)$ — плотность потока фотонов с энергией $h\nu$, падающих на ФЭП.

На форму ВАХ существенное влияние оказывает сопротивление элемента: при его увеличении форма ВАХ становится более плоской, коэффициент заполнения и мощность уменьшаются. По ВАХ можно определить значения напряжения U_m и тока I_m , соответствующие режиму максимальной мощности:

$$\left(1 + \frac{U_m}{kT}\right) e^{\frac{eU_m}{kT}} = e^{\frac{eE_\phi}{kT}}; \quad (5)$$

$$I_m = I_{св} - I_{нас} \left[E^{\frac{eU_m}{kT}} - 1 \right] = I_{св} \left(1 + \frac{I_{нас}}{I_{св}} \right) \frac{eU_m}{kT + eU_m}. \quad (6)$$

Для максимальной мощности имеет вид:

$$N_m = I_m U_m = I_{св} U_m \left(1 + \frac{I_{нас}}{I_{св}} \right) \frac{eU_m}{kT + eU_m} \approx \frac{eI_{св} U_m^2}{kT + eU_m}; \quad (7)$$

$$I_{св} \approx 35 \frac{\text{МА}}{\text{см}^2} \text{ и } I_{нас} = 10^{-8} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}, \text{ т. е. } \frac{I_{нас}}{I_{св}} < 10^{-4}.$$

Максимальный КПД, т. е. КПД при согласованной нагрузке, представляется выражением

$$\eta_{\max} = \frac{I_m U_m}{N_{\text{подв}}} = \frac{eI_{св} U_m^2}{(kT + eU_m) N_{\text{подв}}} = k \frac{I_{св} E}{N_{\text{подв}}}, \quad (8)$$

где k — коэффициент заполнения, который определяет степень приближения ВАХ к прямоугольной форме. При $I_{св}/I_{нас} > 10^4$, $k \geq 0,72$, т. е. $\eta_{\max} \geq 0,72(I_{св} E/N_{\text{подв}})$.

При поступлении на ФЭП, имеющего температуру T_2 , энергии в узком спектральном интервале от пороговой частоты ν_{\min} до $\nu_{\min} + \left(\frac{kT_2}{h}\right)$ из общего излучения

абсолютно черного тела, нагретого до температуры T_1 , его предельный КПД будет равен КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (9)$$

С учетом джоулевых потерь, в самом ФЭП максимальный КПД имеет следующий вид:

$$\eta_0 = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \cdot \left[1 - \frac{\ln \left[\frac{\Delta \epsilon_0}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) + 1 \right]}{\frac{\Delta \epsilon_0}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)} \right]. \quad (10)$$

Термоэлектрическое устройство с использованием солнечных батарей позволяет провести рекуперацию за счет того, что фотоны солнечной батареи генерируют пары носителей, приводящие, в конечном итоге, к возникновению разности потенциалов со средним КПД — преобразованием в пределах 18%. Для повышения КПД целесообразно изменить конструкцию солнечных батарей, выполнив их в виде прозрачных тонких пленок в многослойной структуре. В этом случае фотоны, пролетевшие сквозь первый слой солнечной батареи, могут провзаимодействовать

в других слоях. Таким образом, при сохранении невысокого КПД каждого слоя интегральный КПД многослойной солнечной батареи будет существенно увеличен и большая часть излучения успешно рекуперует (рис. 1).

Дополнительное повышение эффективности возможно за счет изменения конструкции солнечной батареи и размещения отдельных квадратных модулей в виде угловых отражателей. В этом случае каждый элемент углового отражателя будет взаимодействовать с одним прямым лучом и двумя отраженными (рис. 2). Это позволит втрое повысить эффективность солнечной батареи при работе с отраженными лучами. Также целесообразно использовать явление фотоэффекта, которое позволяет рекуперировать часть излучаемой энергии в электроэнергию за счет поглощения фотонов электронами металлической решетки и приобретения энергии, превышающими работу выхода. На рис. 3 показана конструкция многослойного устройства, в котором металлические сетки выполнены для положительного электрода из металла с низкой работой выхода для электронов (например, цезия) и для отрицательного электрода из любого металла, не способного к фотоэффекту. Возможны различные комбинации рекуперировующих устройств, повышающие эффективность работы и улучшающие эксплуатационные характеристики излучающих ТЭУ для охлаждения тепловыделяющих электронных компонентов.

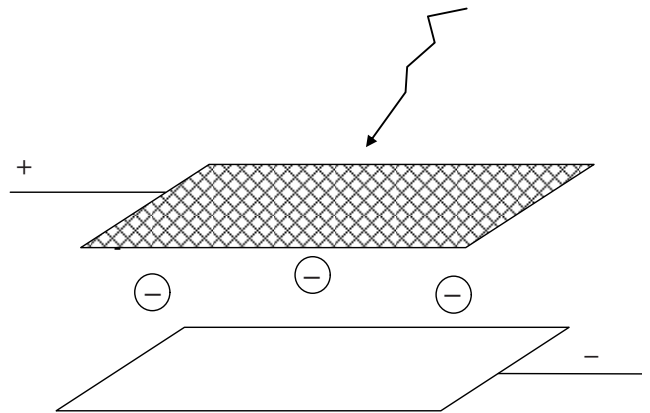


Рис. 1. Фотоэффект на металлических поверхностях

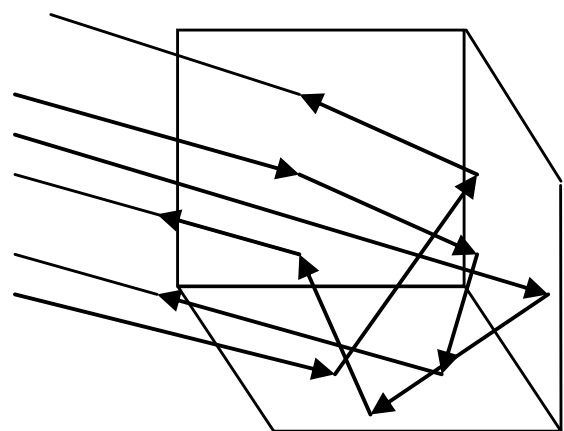


Рис. 2. Угловой отражатель

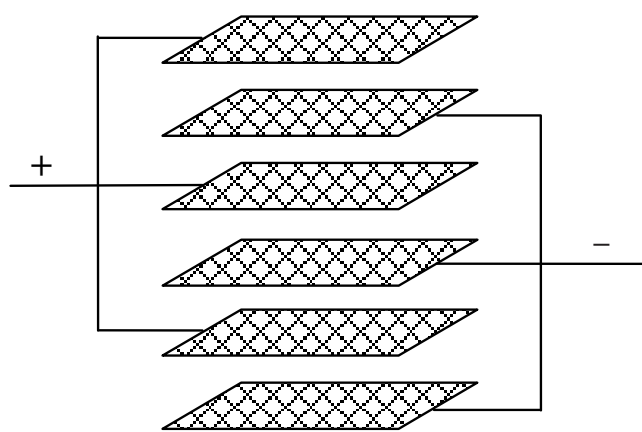


Рис. 3. Конструкция многослойного устройства с металлическими сетками

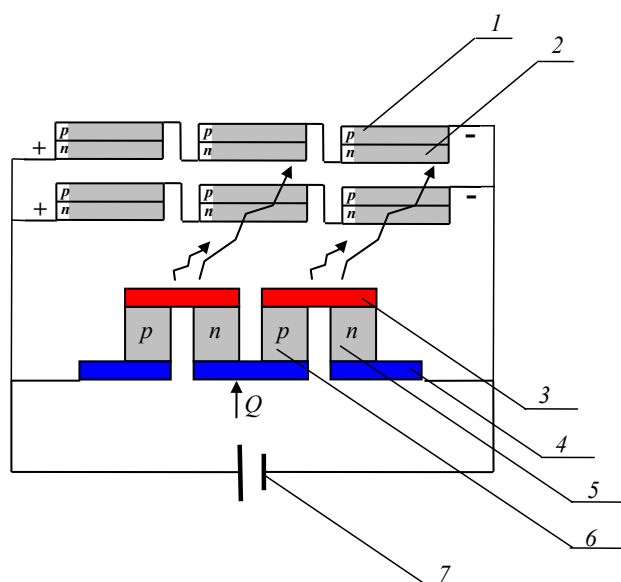


Рис. 4. Конструкция излучающего ТЭУ с рекуперацией энергии

Вариант конструкции устройства показан на рис. 4. Устройство состоит из термомодуля, в котором в качестве полупроводниковых ветвей p -типа 6 и n -типа 5 выбраны такие материалы, что протекающий ток на одном из спаев 3 будет формировать излучение, а не нагрев, как в обычном термомодуле. В другом спае 4 будет происходить поглощение тепловой энергии, в соответствии с эффектом Пельтье, и солнечной батареи (p -слой — 1, n -слой — 2), обеспечивающей преобразование энергии излучения в электрическую энергию. Питание термомодуля осуществляется постоянным током от источника 7.

В качестве материалов для изготовления ветвей p -типа и n -типа термомодуля используют те же материалы, из которых изготавливают светодиоды, а именно фосфид галлия GaP, нитрид галлия GaN, карбид кремния SiC и др.

Солнечная батарея разбита на параллельно-последовательные секции таким образом, чтобы напряжение питания системы охлаждения было тождественным напряжению солнечной батареи. Для этого элементарные компоненты солнечной батареи соединяются последовательно до тех пор, пока их интегральное напряжение

не совпадет с напряжением питания системы охлаждения. Затем, формируются аналогично следующие секции, которые объединяются уже параллельно, увеличивая ток солнечной батареи. При таком подходе отпадает необходимость в согласующих устройствах между солнечной батареей и системой охлаждения.

Нагрев солнечной батареи позволяет выработать дополнительную электроэнергию в случае установки на нее термогенератора. Конструкция термогенератора также представляет собой параллельно-последовательное соединение элементарных секций термоэлементов с целью получения одинаковых напряжений на термогенераторе и системе охлаждения.

Применение представленного устройства в системах охлаждения позволит обеспечить более эффективное энергопотребление.

Список литературы

1. Патент РФ на изобретение №2405230. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения/Исмаилов Т. А., Гаджиев Х. М., Гаджиева С. М., Нежведилов Т. Д., Челушкина Т. А. Оpubл. 27.11.2010, БИ №33
2. Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Казумов Р. Ш. Экспериментальные исследования термоэлектрических теплообменных аппаратов проточного типа с тепловыми мостиками // Вестник Международной академии холода. 2010. №4. С. 5–7.
3. Исмаилов Т. А., Гаджиев Х. М., Нежведилов Т. Д. Многослойное излучающее термоэлектрическое устройство // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2013. Т. 1. С. 90–93.
4. Исмаилов Т. А., Гаджиев Х. М., Гаджиева С. М. Тонкопленочные термоэлектрические устройства с отводом тепла в виде излучения для охлаждения микросистемной техники // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. №3. С. 120–124.
5. Шер Э. М. Термоэлектрические преобразователи электрических и оптических сигналов — новый класс термоэлектрических устройств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. №6 (78). С. 3–10.

References

1. Patent RF na izobretenie №2405230. Sposob otvoda tepla ot teplovydeljajushhijh jelektronnyh komponentov v vide izluchenija/Ismailov T. A., Gadzhiev H. M., Gadzhieva S. M., Nezhvedilov T. D., Chelushkina T. A. Opubl. 27.11.2010, BI №33
2. Ismailov T. A., Evdulov O. V., Kazumov R. Sh. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2010. No 4. pp. 5–7.
3. Ismailov T. A., Gadzhiev H. M., Nezhvedilov T. D. *Izvestija vysshijh uchebnyh zavedenij Rossii. Radiojelektronika*. 2013. T. 1. pp. 90–93.
4. Ismailov T. A., Gadzhiev H. M., Gadzhieva S. M. *Nauchnoe priborostroenie*. 2013. Vol. 23. No 3. pp. 120–124.
5. Sher Je. M. *Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj apparature*. 2008. №6 (78). S. 3–10.