

Для цитирования: Т.А. Исмаилов, Х.М. Гаджиев, А.М. Ибрагимова. Энергоэффективный термоэлектрический полупроводниковый теплоотвод для компьютерных процессоров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (3): 8-15. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-8-15

For citation: T.A. Ismailov, H.M. Gadjiev, A.M. Ibragimova. Power-effective thermoelectric semiconductor heat rejection for computer processors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 8-15. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-8-15

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

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-8-15

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕПЛОТВОД ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Т.А. Исмаилов, Х.М. Гаджиев, А.М. Ибрагимова

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматривается отвод тепла от компьютерных процессоров с целью обеспечения необходимых тепловых режимов и термостатирования тепловыделяющих компонентов на интегральных схемах. **Метод.** Применены методы моделирования теплообменных процессов при теплопереносе от нагретого интегрального кристалла в окружающую среду. **Результат.** Энергоэффективность процессоров теплоотвода возрастает при применении излучающих термоэлектрических полупроводниковых устройств за счёт того, что поглощение тепла осуществляется на одних переходах, а вместо выделения тепла на других происходит испускание фотонов ультрафиолетового диапазона с целью получения лучших энергетических характеристик для обеспечения необходимого отвода мощности от тепловыделяющих компонентов радиоэлектронных схем. Такой подход обладает большим преимуществом за счет того, что излучение обладает максимальным быстродействием при переносе энергии по сравнению с конвекцией и кондукцией, что позволяет осуществить безынерционный отвод тепла от тепловыделяющих компонентов в окружающую среду. Также такой подход позволяет повысить коэффициент полезного действия системы охлаждения и ускорить перенос тепла от нагретых участков для предотвращения теплового пробоя. **Вывод.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для охлаждения с высокой энергоэффективностью можно использовать светоизлучающие термоэлектрические полупроводниковые устройства, которые могут с малой инерционностью осуществить перенос больших объемов мощности в окружающую среду. Инновационная система охлаждения компьютерных процессоров позволяет повысить степень интеграции на несколько порядков, что приведет к увеличению производительности компьютеров и их быстродействию.

Ключевые слова: светоизлучающий, термоэлектрический, полупроводниковый, процессор, эффект Пельтье

POWER-EFFECTIVE THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR HEAT REJECTION FOR COMPUTER PROCESSORS

T.A. Ismailov, H.M. Gadjiev, A.M. Ibragimova

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The article deals with heat removal from computer processors in order to provide the necessary thermal conditions and temperature control of heat-generating components on integrated circuits. **Methods.** Methods for modeling heat exchange processes during heat transfer from a heated integral crystal to the environment are applied. **Results.** The power efficiency of heat

*rejection processors increases when using radiating thermoelectric semiconductor devices since heat is absorbed in some junctions, and instead of generating heat photons of the ultraviolet range are emitted to obtain better energy characteristics to ensure the necessary power removal from the heat-generating components of radio-electronic circuits. This approach has a significant advantage as radiation has the maximum speed when transferring energy compared to convection and conduction, which allows for non-inertial heat removal from heat-generating components to the environment. This approach also allows increasing the efficiency of the cooling system and accelerating the transfer of heat from the heated areas to prevent heat breakdown. **Conclusion.** The conducted research allows concluding that light-emitting thermoelectric semiconductor devices can be used for cooling with high power efficiency, which can transfer large amounts of power to the environment with low inertia. An innovative cooling system for computer processors allows increasing the degree of integration by several orders of magnitude, which will increase the performance of computers and their speed.*

Keywords: *light-emitting, thermoelectric, semiconductor, processor, Peltier effect*

Введение. Современный этап развития человечества привел к широкому внедрению компьютерных технологий во все области человеческой жизни. Прогресс приводит к повышению степени интеграции компьютерных процессоров и быстродействию. В результате растет уровень тепловых потерь при выполнении логических операций и необходимо паразитное тепло отводить в окружающую среду [1-6, 14-17]. Увеличение степени интеграции для повышения быстродействия компьютерных процессоров приводит к тому, что даже при незначительных тепловыделениях каждого переключающего компонента интегральная совокупность устройства придет к тому, что удельная мощность тепловыделения превышает допустимую.

При выполнении логических операций на компьютерном процессоре возникают ситуации, при которых возможно резкое пиковое увеличение тепловыделений для отдельных компонентов. За счет высокой инерционности процессов кондуктивного теплопереноса излишнее тепло будет накапливаться в районе тепловыделения, что приведет к повышению температуры. В результате может наступить тепловой пробой [11-13, 18-20].

Дополнительную проблему составляют возникающие тепловые сопротивления при переносе тепла от интегрального кристалла через подложку и корпус процессора на систему охлаждения. Существующие системы охлаждения компьютерных процессоров используют воздушное охлаждение при не больших мощностях и водяное охлаждение при больших мощностях тепловыделения компьютерных процессоров.

Для интенсификации процессов теплопереноса целесообразно использовать термоэлектрическое устройство, позволяющее в режиме теплового насоса увеличить теплоперенос от нагретой зоны в окружающую среду. Однако такой подход недостаточен для дальнейшего роста производительности компьютерных процессоров. Увеличение степени интеграции и быстродействия увеличивает на порядки уровень тепловыделений. Главным препятствием для дальнейшего развития современных компьютерных процессоров является инерционность тепловых процессов по кондуктивному переносу и конвективному теплообмену.

Самый эффективный способ теплопереноса по быстродействию и мощности является излучение [7-11]. Процесс излучения основывается на нагреве поверхности и превращении избыточной тепловой энергии в электронные переходы с изменением энергетических состояний с испусканием фотонов соответствующей мощности. Главным препятствием для применения высокоэффективного переноса энергии в виде излучения является необходимость доведения до высоких температур поверхностей, излучающих фотоны. Чем выше температура поверхности, тем большую частоту имеют фотоны и, соответственно, большую мощность.

Постановка задачи. С появлением полупроводниковых компонентов появился еще один способ излучения, основанный на работе р-п-перехода. При переходе электронов из полупроводника n-типа через р-п-переход в полупроводник р-типа электрон может быть рекомбинирован с вакантной дыркой, и избыток энергии может быть излучен виде фотона. Чем больше перепад энергии между полупроводниковыми зонами, тем более мощный получается фотон и

выше его частота. Светодиоды могут испускать фотоны: инфракрасные, красные, оранжевые, жёлтые, зелёные, голубые, синие, фиолетовые и ультрафиолетовые. Выгодным качеством светодиодов является их маленькое сопротивление, что обуславливает малый уровень Джоулевых паразитных тепловыделений.

Если разместить светодиоды последовательно, то на всех полупроводниковых переходах будет происходить излучение, а на всех электродах с противоположной стороны электроны будут поглощать энергию за счёт того, что они будут переходить из полупроводника с меньшей энергетической величиной в полупроводник с большей энергетической величиной.

Таким образом, полупроводниковое устройство, испускающее излучение, способно отводить тепло с малой инерционностью и большой мощностью. Уровень паразитных тепловыделений будет незначительным за счёт того, что р-п-переход имеет малое сопротивление. Дополнительным преимуществом является возможность рекуперировать часть излученной энергии опять в электричество на солнечных полупроводниковых батареях.

Полупроводниковые светодиоды позволяют при невысокой температуре излучающей поверхности получить мощное излучение в широком диапазоне частот. Это делает возможным применить такое устройство для охлаждения нагретого компьютерного процессора. Причём можно интегрировать это устройство в компьютерный кристалл. Обычно компьютерные процессоры охлаждаются при помощи электрических вентиляторов и медных теплопроводов (рис. 1) [11-13, 21].



Рис. 1. Охлаждение компьютерного процессора электрическим вентилятором и медными теплопроводами

Fig. 1. Cooling the computer processor with an electric fan and copper heat conductors

Политическая нестабильность в мире приводит к ужесточению санкций в отношениях между государствами и требует проведения политики импортозамещения. Отечественная промышленность создала два типа мощных компьютерных процессоров. Это процессоры Байкал (рис. 2) и Эльбрус (рис. 3).

Эти процессоры обладают высоким быстродействием и производительностью. Соответственно для их охлаждения потребуется энергоэффективная мощная система. Применение излучающей полупроводниковой системы охлаждения повысит уровень отводимого тепла.



Рис. 2. Процессор Байкал

Fig. 2. Processor Baikal

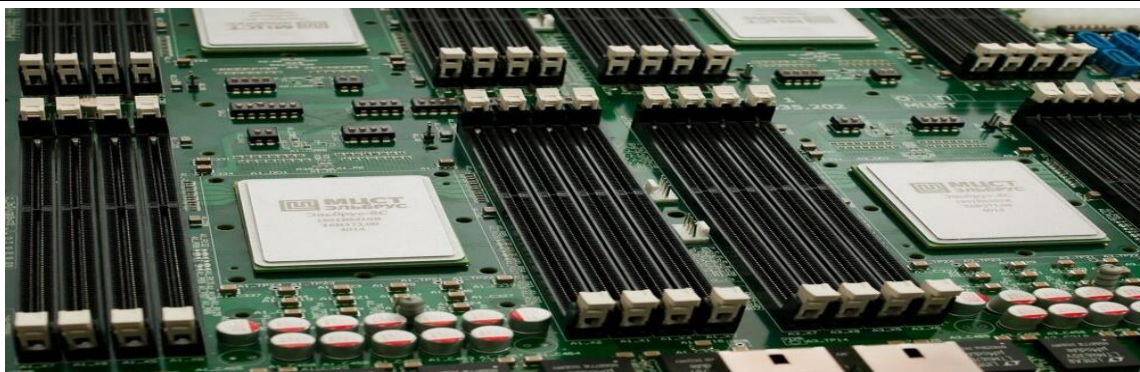


Рис.3. Процессор Эльбрус
Fig. 3. Elbrus processor

Мощность излучения светодиодной матрицы, состоящей из последовательно соединенных диодов, можно определить по формуле (1) как произведение постоянной планка на частоту фотонов и их количество. Количество фотонов определяется из величины тока за единицу времени, делённое на заряд электрона, так как каждый электрон после рекомбинации дает не более одного фотона.

Методы исследования. Подставляя формулу (2) в формулу (1) можно получить формулу (3). При подаче напряжения питания на полупроводниковый охладитель необходимо рассчитать баланс мощностей, приведённый в формуле (4). После преобразования и сокращения будет получена формула (5).

$$P_U = h\nu m \quad (1)$$

$$m = \frac{Jt}{e} \quad (2)$$

$$P_U = \frac{h\nu Jt}{e} \quad (3)$$

$$P = UJ = J^2 R t - J \Pi t - \frac{h\nu Jt}{e} \quad (4)$$

$$U = JRt - \Pi t - \frac{h\nu t}{e} = t \left(JR - \Pi - \frac{h\nu}{e} \right), \quad (5)$$

где P_U - мощность излучения фотонов,
 h - постоянная Планка,
 ν - частота излучения фотонов,
 m - количество излученных фотонов,
 J - величина тока в амперах,
 t - время в секундах,
 e - заряд электрона,
 U - напряжение питания,
 R - сопротивление р-п перехода,
 Π - коэффициент Пельтье.

На рис. 4 приведён график оптимальных характеристик работы термоэлектрического устройства по охлаждению компьютерных процессоров. По графику видно, что уменьшение сопротивления р-п перехода приводит к тому, что оптимальный ток возрастает по величине. Таким образом, применение светодиодов позволяет существенно увеличить оптимальный ток и увеличить степень охлаждения. При этом будет возрастать уровень излучения, и большая часть энергии может быть возвращена для питания системы охлаждения.

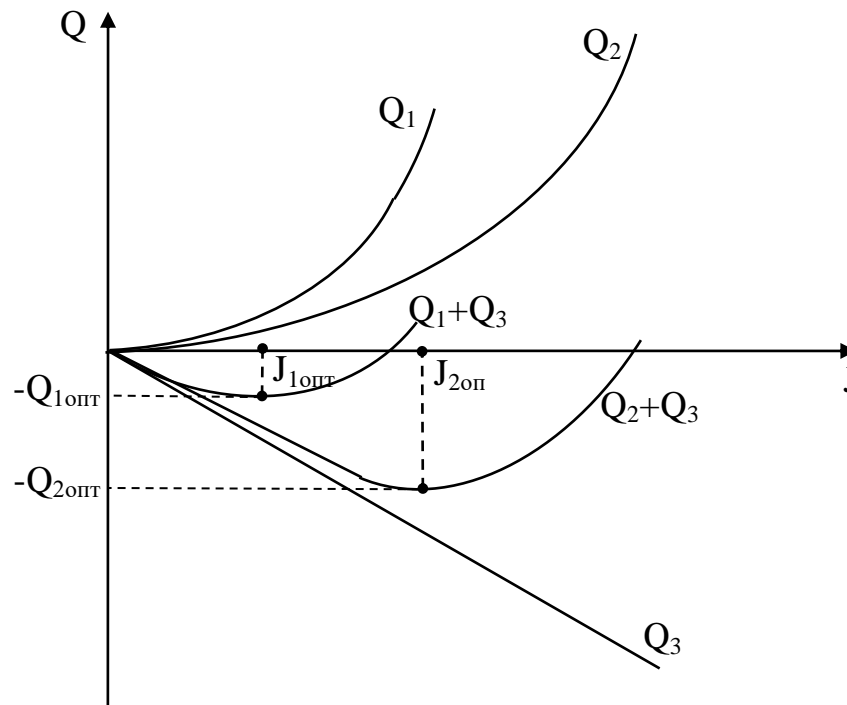


Рис.4. Зависимость количества теплоты Джоуля (Q_1 и Q_2) и Пельтье (Q_3), поступающей на холодный спай от тока (J),

Fig.4. Dependence of the amount of heat Joule (Q_1 and Q_2) and Peltier (Q_3) supplied to the cold junction on the current (J),

где: Q – теплота, приходящая на холодный спай термоэлемента, Q is the heat arriving at the cold junction of the thermoelement,

Q_1 – кривая теплоты Джоуля обычного термоэлектрического полупроводникового устройства, is the Joule heat curve of a conventional thermoelectric semiconductor device,

Q_2 – кривая теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства, Joule heat curve of a radiating thermoelectric semiconductor device,

Q_3 – кривая теплоты Пельтье, Peltier heat curve,

$-Q_{1opt}$ – оптимальное количество теплоты для обычного термоэлектрического полупроводникового устройства при оптимальном токе питания, the optimal amount of heat for a conventional thermoelectric semiconductor device at an optimal supply current,

$-Q_{2opt}$ – оптимальное количество теплоты для излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства при оптимальном токе питания, the optimal amount of heat for a radiating thermoelectric semiconductor device at an optimal supply current,

Q_1+Q_3 – сумма теплоты Джоуля обычного термоэлектрического полупроводникового устройства и теплоты Пельтье, is the sum of the Joule heat of a conventional thermoelectric semiconductor device and the Peltier heat,

Q_2+Q_3 – сумма теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства и теплоты Пельтье, is the sum of the Joule heat of the radiating thermoelectric semiconductor device and the Peltier heat,

J – ток питания, supply current,

J_{1opt} – оптимальный ток питания обычного термоэлектрического полупроводникового устройства, J_{1opt} the optimal supply current for a conventional thermoelectric semiconductor device,

J_{2opt} – оптимальный ток питания излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства, is the optimal supply current for the emitting thermoelectric semiconductor device.

Обсуждение результатов. В результате проведенных исследований становится очевидным, что применение светоизлучающих термоэлектрических полупроводниковых устройств для охлаждения позволяет повысить мощности, отводимые энергии от тепловыделяющих компонентов компьютерных процессоров, и увеличить скорость охлаждения.

При этом точность термостатирования возрастает за счет увеличения быстродействия реакции системы охлаждения на возможные режимы термостатирования, в том числе нестационарные процессы.

Чем выше частота излучения фотонов, тем большую мощность они могут отвести. Чем меньше сопротивление р-n переходов светодиодов, тем больше ток для оптимального значения охлаждения. Применение инновационной системы охлаждения позволит увеличить степень интеграции компьютерных процессоров и ускорить выполняемые ими операции. Для отечественных типов процессоров применение светоизлучающих устройств позволит реализовать энергоэффективные режимы работы.

Вывод. Перенос тепла от компьютерных процессоров в виде излучения обладает большими преимуществами по сравнению с конвекцией и кондукцией. Часть излучения может быть рекуперирована для повышения энергоэффективности работы термоэлектрического полупроводникового охладителя в целом. Применение светотранзисторов при проектировании отечественных компьютерных процессоров позволит уменьшить тепловые выделения и реализовать криоэлектронные режимы работы вплоть до возникновения сверхпроводящих режимов. Надежность работы компьютерных процессоров будет значительно увеличена как при стационарных режимах, так и при нестационарных режимах работы.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 386с.
2. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. 149 с.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. 165 с.
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. Москва: «Академия», 2012. 136 с.
6. Патент РФ №2156424. Термоэлектрический полупроводниковый теплообменник / Исмаилов Т.А., Магомедов К.А., Гаджиева С.М., Мурадова М.М., опубл. 20.09.2000.
7. Патент РФ на изобретение №2507613. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 20.02.2014.
8. 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., опубл. 01.06.2009.
9. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Опубл. 10.07.2013.
10. Патент РФ на изобретение №2507632. Светотранзистор с высоким быстродействием / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Юсуфов Ш.А., опубл. 20.02.2014.
11. Патент РФ, №2360380. Устройство для термостатирования компьютерного процессора / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., опубл. 27.06.2009.
12. Патент РФ №2208830. Терморегулирующее устройство для обеспечения минимальных тепловых напряжений в режимах включения и выключения ЭВМ / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., опубл. 20.07.2003.
13. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Применение многокаскадных термоэлектрических модулей для охлаждения процессора компьютера/ Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2004. Т. 47 №7. С.25-29.
14. Bloomberg New Energy Finance Tier 1 module maker list, Q2 2016.
15. David Szondy. Stanford researchers develop self-cooling solar cells. (англ.). gizmag.com (25 July 2014). Дата обращения 6 июня 2016.
16. 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. pp.682-691.
17. Frolkov O.A. // 13 International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. ICEEE-2010. pp. 152.
18. 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.

19. 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.
20. 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.
21. 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. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. T.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003. 386p.
2. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivatory teploperedachi. - SPb.: Politehnika, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. - SPb.: Polytechnic, 2005. (In Russ)]
3. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv. Makhachkala: IPTS DGTU, 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Thermal stabilization of microelectronic equipment using semiconductor thermoelectric devices. - Makhachkala: IPC DSTU, 2013. 149 p. (In Russ)]
4. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Okhlazhdeniye radioelektronnykh sistem: uchebnoye posobiye. Makhachkala: IPTS DGTU, 2012. 165 s. [Ismailov T.A., Hajiyev H.M. Cooling of radio electronic systems: a tutorial. Makhachkala: IPC DSTU, 2012. 165 p. (In Russ)]
5. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Termoelektricheskoye okhlazhdeniye teplovydelyayushchikh komponentov mikroelektronnoy tekhniki. Moskva: «Akademiya», 2012. 136 [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Thermoelectric cooling of heat-generating components of microelectronic technology. Moscow: "Academy", 2012. 136 p. (In Russ)]
6. Patent RF №2156424. Termoelektricheskiy poluprovodnikovyy teploobmennik / Ismailov T.A., Magomedov K.A., Gadzhiev S.M., Muradova M.M., opubl. 20.09.2000. [RF patent No. 2156424. Thermoelectric semiconductor heat exchanger / Ismailov T.A., Magomedov K.A., Gadzhiev S.M., Muradova M.M., publ. 09/20/2000. (In Russ)]
7. Patent RF na izobreteniyе №2507613. Kaskadnoye svetoizluchayushcheye termoelektricheskoye ustroystvo / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for invention №2507613. Cascade light-emitting thermoelectric device / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov TD, Chelushkina T.A., publ. 02/20/2014. (In Russ)]
8. Patent RF na izobreteniyе №2405230. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektronnykh komponentov v vide izlucheniya / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., opubl. 01.06.2009. [RF patent for invention №2405230. Method of heat removal from heat-generating electronic components in the form of radiation / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov TD, Chelushkina T.A., publ. 01.06.2009. (In Russ)]
9. Patent RF №2487436. Svetotranzistor/ Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Opubl. 10.07.2013. [RF patent №2487436. Svetotransistor / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Publ. 10.07.2013. (In Russ)]
10. Patent RF na izobreteniyе №2507632. Svetotranzistor s vysokim bystrodeystviyem / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov SH.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for invention №2507632. Light transistor with high speed / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A., publ. 02/20/2014. (In Russ)]
11. Patent RF, №2360380. Ustroystvo dlya termostatirovaniya komp'yuternogo protsessora / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., opubl. 27.06.2009. [RF patent, No. 2360380. A device for thermostating a computer processor / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., publ. 27.06.2009. (In Russ)]
12. Patent RF №2208830. Termoreguliruyushcheye ustroystvo dlya obespecheniya minimal'nykh teplovykh napryazheniy v rezhimakh vklyucheniya i vyklyucheniya EVM / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D., opubl. 20.07.2003. [RF patent №2208830. Thermoregulating device for ensuring minimum thermal stresses in the modes of switching on and off the computer / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov TD, publ. 20.07.2003. (In Russ)]
13. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D. Primeneniye mnogokaskadnykh termoelektricheskikh moduley dlya okhlazhdeniya protsessora komp'yutera/ Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. - 2004. T. 47 №7. C.25-29. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. The use of multistage thermoelectric modules for cooling the computer processor/Bulletin of higher educational institutions. Instrumentation. 2004. Vol. 47 No. 7. pp. 25-29. (In Russ)]
14. Bloomberg New Energy Finance Tier 1 module maker list, Q2 2016.

15. David Szondy. Stanford researchers develop self-cooling solar cells. (English). gizmag.com (25 July 2014). Date of treatment June 6, 2016.
16. 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.
17. Frolkov O.A. // 13 International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. ICEEE-2010. p. 152.
18. 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.
19. 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.
20. 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 28.11.2010.
21. Znajdek, K. Review of simulation models suitability for characterization of actual Si PV cells / K. Znajdek // XII International PhD Workshop OWD 201, pp. 423-425.

Сведения об авторах:

Исмаилов Тагир Абдурашидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники, заслуженный деятель науки РФ, Президент ДГТУ; e-mail: dstu@dstu.ru

Гаджиев Хаджимурат Магомедович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Ибрагимова Асият Магомедовна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: ibrasya@mail.ru

Information about the authors:

Tagir A. Ismailov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical Engineering. Honored Worker of Science of the Russian Federation, President DSTU; e-mail: dstu@dstu.ru

Hadzhimurat M. Gadzhiev, Cand.Sci (Technical), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Asiyat M. Ibragimova, Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: ibrasya@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.08.2020.

Принята в печать 10.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.08.2020.

Accepted for publication 10.09.2020.