

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING



УДК 620.92

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-1-6-13

Оригинальная статья /Original article

**Энергосберегающий термоэлектрический генератор для питания аппарата
охлаждения тепловыделяющих электронных компонентов**

Х.М. Гаджиев, С.М. Гаджиева, П.С. Магомедова, А.М. Курбанов

Дагестанский государственный технический университет,

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

Резюме. Цель. В статье рассматриваются энергосберегающие термоэлектрические генераторы для автономного питания аппарата охлаждения тепловыделяющих электронных компонентов. **Метод.** Применены методы моделирования теплообменных процессов при функционировании термоэлектрических генераторов на основе эффекта Зеебека. Нагретые и охлажденные зоны генератора топологически разнесены в пространстве для уменьшения паразитного кондуктивного переноса. Полупроводниковые ветви изготовлены по тонкопленочной технологии для уменьшения паразитных Джоулевых тепловыделений. Материалы спаев и электродов подобраны с учетом энергии электронов. **Результат.** Энергосбережение процессов повысилось в термоэлектрических генераторах за счет снижения паразитных Джоулевых тепловыделений, уменьшения паразитного кондуктивного переноса и дополнительного получения энергии от металлических электродов. **Вывод.** Для повышения энергосбережения термоэлектрических генераторов для автономного питания аппарата охлаждения тепловыделяющих электронных компонентов необходимо нагретые и охлажденные зоны генератора топологически разнести в пространстве на разные уровни, причем полупроводниковые ветви изготовить по тонкопленочной технологии и дополнительно охлаждать вентиляцией спаи генератора, а на нагретых спаях дополнительно рекуперировать энергию от тепловыделяющих компонентов.

Ключевые слова: энергосбережение, аппарат охлаждения, термоэлектрический генератор, эффект Зеебека

Для цитирования: Х.М. Гаджиев, С.М. Гаджиева, П.С. Магомедова, А.М. Курбанов. Энергосберегающий термоэлектрический генератор для питания аппарата охлаждения тепловыделяющих электронных компонентов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(1):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-6-13

Energy-saving thermoelectric generator for powering the cooling apparatus of heat-generating electronic components

H.M. Gadzhiev, S.M. Gadzhieva, P.S. Magomedova, A.M. Kurbanov

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The article discusses energy-saving thermoelectric generators for autonomous power supply of the cooling apparatus of heat-generating electronic components. **Method.** Methods of modeling heat exchange processes in the operation of thermoelectric generators based on the Seebeck effect are applied. The heated and cooled zones of the generator are topologically spaced to reduce parasitic conductive transport. The semiconductor branches are manufactured using thin-film technology to reduce parasitic Joule heat emissions. The materials of the junctions and electrodes are selected taking into account the energy of the electrons. **Result.** Energy saving of processes has increased in thermoelectric generators by reducing parasitic Joule heat generation, reducing parasitic conductive transfer and additional energy generation from metal

electrodes. **Conclusion.** The conducted studies allow us to conclude that in order to increase the energy saving of thermoelectric generators for autonomous power supply of the cooling apparatus of the heat-generating electronic components, it is necessary to topologically separate the heated and cooled zones of the generator into different levels in space, and to manufacture semiconductor branches using thin-film technology and additionally cool the generator junctions with ventilation, and additionally recover energy from the heat-generating components on the heated junctions.

Keywords: energy saving, cooling device, thermoelectric generator, Seebeck effect

For citation: H.M. Gadzhiev, S.M. Gadzhieva, P.S. Magomedova, A.M. Kurbanov. Energy-saving thermoelectric generator for powering the cooling apparatus of heat-generating electronic components. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(1):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-6-13

Введение. Современный уровень военно-политической обстановки в мире предъявляет новые требования к проектируемой аппаратуре военного и гражданского назначения. Как показывает опыт проведения современных гибридных войн и специальной военной операции, наибольшей актуальностью в современных условиях обладают системы противовоздушной обороны для борьбы с дронами и другими летательными аппаратами [1-10]. Опыт применения крылатых ракет, беспилотных летательных аппаратов, квадрокоптеров и других летательных аппаратов показывает, что пеленгацию перехватов этих объектов наиболее целесообразно осуществлять на дальних подступах к охраняемым объектам [11 -17].

Эти требования подразумевают размещение средств противовоздушной обороны на территориях, где отсутствует надежное энергопитание. Применение автономных источников питания в течение длительного времени предполагает использование возобновляемых ресурсов. Наибольшей надежностью обладает источник питания в виде солнечной радиации [18]. Существуют различные способы преобразователя солнечной радиации в электричество [14-17].

Наиболее распространенным способом является использование полупроводниковых солнечных батарей [1-8]. Так же используются преобразователи на основе фотоэффекта, которые применяют металлические поверхности с низкой работой выхода электрона [9]. Все большее распространение получают термогенераторы на основе эффекта Зеебека [1-6]. Однако им присущи недостатки в виде маленького КПД [10-12].

В то же время, применение термогенератора позволяет повысить энергосбережение при интегральном использовании совместно с аппаратом охлаждения радиолокационной системой типа цифровой активной фазированной антенной решетки за счет рекуперации части тепловой энергии от мощных тепловыделяющих компонентов электронных схем [19, 20]. Разработка энергосберегающих термоэлектрических генераторов для автономного питания аппарата охлаждения тепловыделяющих электронных компонентов позволяет повысить энергоэффективность процессов в термоэлектрических генераторах за счет снижения паразитных Джоулевых тепловыделений, уменьшения паразитного кондуктивного переноса и дополнительного получения энергии от металлических электродов.

Постановка задачи. Для повышения энергосбережения термоэлектрического генератора необходимо применить методы моделирования теплообменных процессов при функционировании термоэлектрических генераторов на основе эффекта Зеебека [15]. Нагретые и охлажденные зоны генератора топологически надо разнести в пространстве для уменьшения паразитного кондуктивного переноса.

Полупроводниковые ветви надо изготовить по тонкопленочной технологии для уменьшения паразитных Джоулевых тепловыделений. Материалы спаев и электродов подбирать с учетом энергии электронов. Необходимо интегрально использовать термогенератор совместно с аппаратом охлаждения за счет рекуперации части тепловой энергии от мощных тепловыделяющих компонентов электронных схем [13].

Методы исследования. Если конструктивно изменить термогенератор и топологически пространственно в разных местах установить нагретую и охлаждаемую зону, то можно повысить энергосбережение термогенератора за счет уменьшения паразитного кондуктивного теплопереноса. Изготовление полупроводниковых ветвей в виде тонких пленок позволит уменьшить Джоулевые потери [11]. Методика уменьшения высоты полупроводниковых ветвей оправдана за счет уменьшения сопротивления протекания тока. Но эта же методика при снижении высоты ветвей теоретически увеличит паразитный кондуктивный перенос, однако, за счет размещения в разных местах металлических электродов зон нагрева и охлаждения этот фактор будет нейтрализован. Методика рекуперации энергии от тепловыделяющих компонентов электронных схем также повысит энергоэффективность источника питания [8].

Обсуждение результатов. В результате проведенных исследований очевидно, что применение термоэлектрического генератора совместно с аппаратом охлаждения позволит рекуперировать паразитные тепловыделения электронных мощных полупроводниковых компонентов радиолокационной системы и повысить энергоэффективность в целом. Для того, чтобы термоэлектрический генератор работал с большей эффективностью и уменьшить уровень паразитного кондуктивного теплопереноса необходимо в различных уровнях в различных плоскостях разместить p и n полупроводниковые ветви (рис.1).

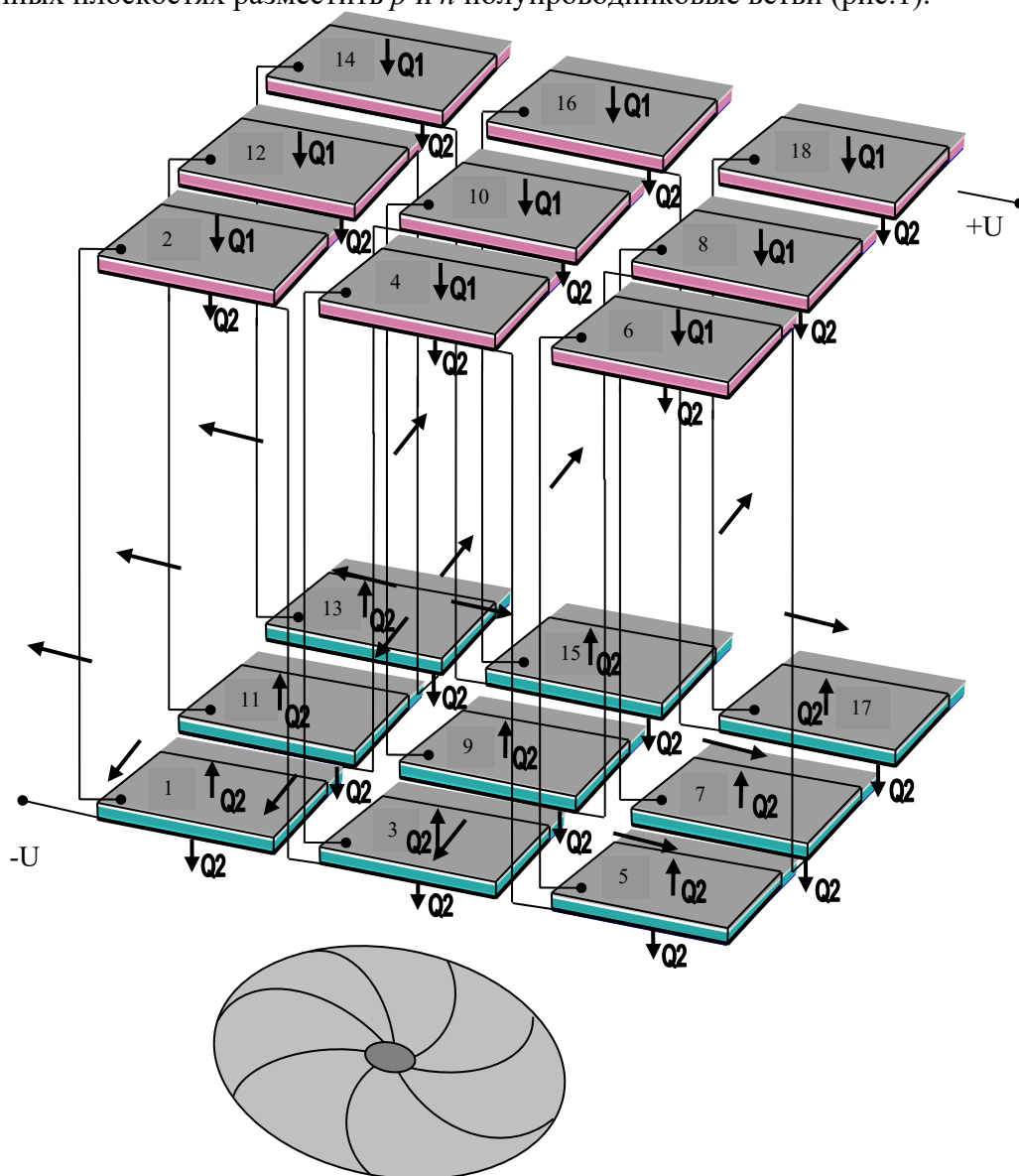


Рис.1. Энергоэффективный термоэлектрический генератор
 Fig.1. Energy efficient thermoelectric generator

Это делает возможным уменьшение кондуктивного переноса за счёт того, что металлические спаи и электроды, которые соединяют полупроводниковые ветви, будут иметь большую длину, и материал этих полупроводниковых ветвей будет так стыковаться с материалом этих электродов, что там будут возникать термоэлектрические явления, соответствующие увеличению тепловыделения или поглощению тепла.

На рис. 1 изображена структура энергоэффективного термоэлектрического генератора. Для того, чтобы уменьшить Джоулевые потери целесообразно выполнить полупроводниковые ветви в виде тонких плёнок. В этом случае сопротивление протекающему току будет минимальное, и тепловыделения будут незначительными. Однако, обратным эффектом будет то, что перепад температур на такой тонкой плёнке будет незначительным и паразитный перенос будет очень большим. Но, если сделать так, что с одной стороны полупроводникового электрода будет выделяться тепло, а с другой стороны поглощаться, то это приведёт к тому, что можно разнести уровни выделения тепла и поглощения тепла. В этом случае паразитный перенос будет устранён полностью. Кроме того, возникает дополнительный эффект от того, что у нас электроды будут вытянуты на большое расстояние, то их можно обдувать вентилятором совместно с той зоной, где нам необходимо отводить тепло. Если на обычном термогенераторе только один спай обдувался или охлаждался, то на предлагаемом термогенераторе у нас будет охлаждаться сам спай с одной стороны, этот же спай с другой стороны и вертикальные электроды с обеих сторон. В этом случае поверхность отвода тепла возрастает в несколько порядков, и эффективность термогенератора также будет повышена.

Изготовление в обычных термогенераторах холодных и горячих спаев из одного материала не позволяет получить значительного эффекта. Так как, если изготовить их из разных материалов, то можно так подобрать материалы, что при переходе из полупроводника p типа в металл, будет происходить эффект Зеебека или не будет. И, тем самым, можно так подобрать с одной стороны материал полупроводника и электрода, чтобы там эффективно происходило поглощение тепла, а с другой стороны эффективно, наоборот, выделялось тепло. Это позволяет учесть свойства электродов и повысить энергоэффективность термогенератора в целом.

Металлические спаи полупроводников и электродов нужно подбирать таким образом, что разность температур между ними будет давать максимальный эффект Зеебека, так как электроны в металле имеют энергию, отличающуюся от аналогичной энергии в полупроводнике. Рациональный выбор таких металлических спаев с учётом контактных явлений позволяет получить большую величину тока Зеебека в обоих случаях.

Для того, чтобы уменьшить Джоулевые потери целесообразно выполнить полупроводниковые ветви в виде тонких плёнок. В этом случае сопротивление протекающему току будет минимальное, и тепловыделения будут незначительными. Однако, обратным эффектом будет то, что перепад температур на такой тонкой плёнке будет незначительным и паразитный перенос будет очень большим. Но, если сделать так, что с одной стороны полупроводникового электрода будет выделяться тепло, а с другой стороны поглощаться, то это приведёт к тому, что у нас можно разнести уровни выделения тепла и поглощения тепла. В этом случае паразитный перенос будет устранён полностью. Кроме того, возникает дополнительный эффект от того, что у нас электроды будут вытянуты на большое расстояние, то их можно обдувать вентилятором совместно с той зоной, где нам необходимо отводить тепло. Если на обычном термогенераторе только один спай обдувался или охлаждался, то на предлагаемом термогенераторе у нас будет охлаждаться сам спай с одной стороны, этот же спай с другой стороны и вертикальные электроды с обеих сторон. В этом случае поверхность отвода тепла возрастает в несколько порядков, и эффективность термогенератора также будет повышена.

Изготовление в обычных термогенераторах холодных и горячих спаев из одного материала не позволяет получить значительного эффекта. Так как, если изготовить их из разных материалов, то можно так подобрать материалы, что при переходе из полупроводника p

типа в металл, будет происходить эффект Зеебека или не будет. И, тем самым, можно так подобрать с одной стороны материал полупроводника и электрода, чтобы там эффективно происходило поглощение тепла, а с другой стороны эффективно, наоборот, выделялось тепло. Это позволяет учесть свойства электродов и повысить энергоэффективность термогенератора в целом. На рис. 2 представлен аппарат охлаждения с термоэлектрическими многослойными металлическими спаями [9].

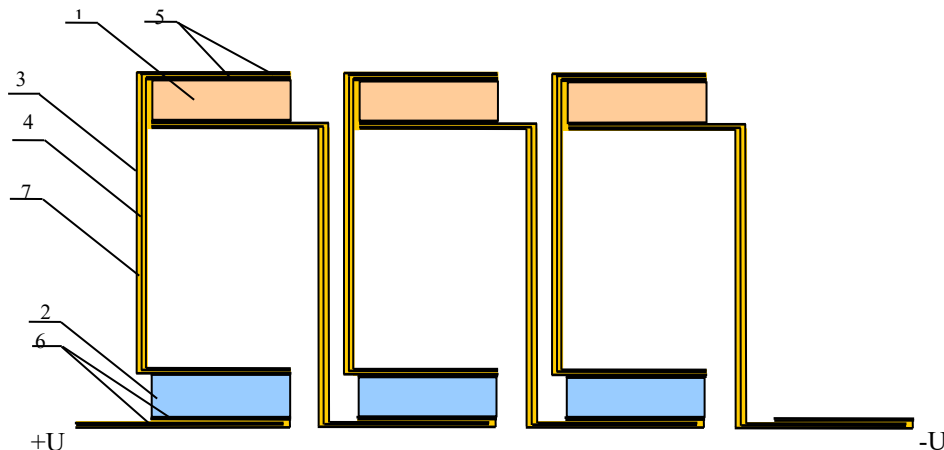


Рис. 2. Аппарат охлаждения с термоэлектрическими многослойными металлическими спаями

Fig. 2. Cooling apparatus with thermoelectric multilayer metal junctions

Аппарат для охлаждения мощных полупроводниковых тепловыделяющих компонентов представляет собой структуру многослойных электрических электродов и спаев с полупроводниковыми ветвями разного типа, размещенными топологически в разных зонах. Полупроводники p типа обозначены на рис. 2 цифрой 1. Полупроводники n типа обозначены на рис. 2 цифрой 2. Биметаллические электроды составлены из металлов 3 и 4 с различными термоэлектрическими свойствами для формирования при протекании тока охлаждающего эффекта Пельтье. Тоже относится и к спаям 5 и 6. Диэлектрик 7 предназначен для электрической изоляции электродов 3, 4 и спаев 5, 6. Для определения температуры холодного спая аппарата охлаждения необходимо найти полное сопротивление R биметаллического термоэлемента:

$$R = \frac{l_1}{S_1 \sigma_1} + \frac{l_2}{S_2 \sigma_2}, \quad (1)$$

где: l – длина;

S – площадь поперечного сечения;

σ – электропроводность у биметаллических ветвей термоэлемента.

Для нахождения K (общей теплопроводности) для двух ветвей термоэлемента:

$$K = \frac{S_1 k_1}{l_1} + \frac{S_2 k_2}{l_2}, \quad (2)$$

где: k – удельная теплопроводность.

Для холодного спая аппарата охлаждения степень отвода тепла за счет эффекта Пельтье будет соответствовать $\pi_{21}I$. Как справедливо будет по формуле Томсона степень отвода тепла равна $\alpha_{21}\left(T_M - \frac{\Delta T}{2}\right)I$, (α_{21} – дифференциальная термоэлектродвижущая сила, T_M – соответствует средней абсолютной температуре). Количество поглощаемого холодным спаем тепла равно:

$$Q = \alpha_{21} \left(T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T. \quad (3)$$

Мощность W , потребляемая термоэлементом аппарата охлаждения, равна:

$$W = \alpha_{21} \Delta T \cdot I + I^2 R. \quad (4)$$

Холодильный коэффициент аппарата охлаждения:

$$\varphi = \frac{\alpha_{21} \left(T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha_{21} \Delta T I + I^2 R}. \quad (5)$$

φ принимает максимальное значение, при условии достижения элементами размеров, соответствующих следующему значению:

$$\frac{l_1 S_2}{l_2 S_1} = \left(\frac{\sigma_1 k_1}{\sigma_2 k_2} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

При этом

$$KR = \left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2 \quad (7)$$

А также

$$\varphi = \frac{\alpha_{21} \left(T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) (IR) - \frac{1}{2} (IR)^2 - \Delta T \left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2}{\alpha_{21} \Delta T (IR) + (IR)^2}. \quad (8)$$

После дифференцирования φ по IR получим оптимальный ток аппарата охлаждения, соответствующий разности температур:

$$(IR)_{\text{опт}} = \frac{\alpha_{21} \Delta T}{\sqrt{1 + ZT_M} - 1}, \quad (9)$$

откуда:

$$Z = \frac{\alpha_{21}^2}{\left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2}. \quad (10)$$

После подстановки IR из уравнения (6) в (7), получим максимальную характеристику эффективности аппарата охлаждения, которая будет выражаться как:

$$\varphi_{\text{макс}} = \frac{T_M (\sqrt{1 + ZT_M} - 1)}{\Delta T (\sqrt{1 + ZT_M} + 1)} - \frac{1}{2}. \quad (11)$$

В том случае, когда Z стремится к бесконечности получим φ из (11), которая приближается к $(T_M - \Delta T/2)/\Delta T$. Соотношение (11) позволяет определить максимальную разность температур аппарата охлаждения. Отсюда следует:

$$\Delta T_{\text{макс}} = 2T_M \frac{\sqrt{1 + ZT_M} - 1}{\sqrt{1 + ZT_M} + 1}. \quad (12)$$

$$Q_u = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I - \frac{1}{2} I^2 l \left(\frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (x_1 s_1 + x_2 s_2) \quad (13)$$

Оптимальные условия получить можно в результате экспериментов, комбинируя различные полупроводниковые материалы и различные металлы.

Также можно применять биметаллические конструкции электродов аппарата охлаждения, когда переход с p полупроводником будет с помощью одного металла осуществлен, а с n полупроводником с помощью другого материала. Также можно осуществить соединение полупроводников между собой в виде плоских пластин. В этом случае обдувать эти плоские пластины и отводить тепло также можно с большей эффективностью.

Вывод. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для повышения энергосбережения термоэлектрических генераторов для автономного питания аппаратов охлаждения

необходимо нагретые и охлажденные зоны генератора топологически разнести в пространстве на разные уровни, причем полупроводниковые ветви изготовить по тонкопленочной технологии и дополнительно охлаждать вентиляцией спаи генератора, а на нагретых спаях дополнительно рекуперировать энергию от тепловыделяющих компонентов электронных схем.

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 № 2417356. Способ оптимизации режимов работы термоэлектрической батареи с учетом геометрических и электротеплофизических параметров при импульсном питании / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. // Б.И. № 12, 2011.
3. Патент РФ №2449417. Способ охлаждения полупроводниковых тепловыделяющих электронных компонентов через биметаллические термоэлектрические электроды / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. // Б.И. № 12, 2012.
4. Патент РФ № 2565523. Устройство охлаждения на основе нанопленочных термомодулей/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. // Б.И. № 29, 2015.
5. 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.
6. Патент РФ № 2595911. Термоэлектрический тепловой насос с нанопленочными полупроводниковыми ветвями / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Челушкин Д.А. // Бюл. №24, 2016.
7. Патент РФ № 2575618. Термоэлектрическое устройство с тонкопленочными полупроводниковыми ветвями и увеличенной поверхностью теплоотвода / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Челушкин Д.А. // Бюл. №5, 2016.
8. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 386с.
9. Гаджиев Х.М., Исмаилов Т.А. Полупроводниковые термоэлектрические энергоэффективные устройства / Санкт-Петербург: Лань, 2020. 124 с.
10. Гаджиев Х.М., Ахмедов М.Э., Гаджиева С.М., Курбанова П.А. Термоэлектрические процессы в экономичном светотранзисторе / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: ФГБОУ ВПО ДГТУ, 2019. Т.46. №3. С.8-19.
11. Гаджиев Х.М., Курбанов И.М., Гаджиев Д.С. Декомпрессионный полупроводниковый термоэлектрический опреснитель / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: ФГБОУ ВПО ДГТУ, 2019. Т.46. №4. С.8-18.
12. Исмаилов Т.А., Гаджиева С.М. Термоэлектрические полупроводниковые интенсификаторы теплопередачи // Изв. Вузов, Приборостроение. Спб. 1994. Т.37. № 11-12. С.74-75.
13. Исмаилов Т.А., Гаджиева С.М. Экспериментальные исследования полупроводниковых термоэлектрических интенсификаторов теплопередачи контактного типа // Изв. Вузов, Приборостроение. СПб. 1995. Т.38. №3-4. С.51-53.
14. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. Термоэлектрические полупроводниковые системы теплоотвода и охлаждающие устройства // Холодильное дело. М. 1997. №4. С.32-33.
15. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Применение полупроводниковых термоэлектрических модулей для формирования топологии температурных полей с целью термотренировки тканей человеческого организма // Мониторинг. Безопасность жизнедеятельности. СПб.: Элмор. 1997. №2. С 48-49.
16. Anatychuk L.I. Physics of Thermoelectricity. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity . 1998.
17. Harpstep Taseph W.C. Improved spacecraft heat rejection with practical thermoelectric. Energy convers. N.Y., 1980, p. 126.
18. Jianzhong Z., Tiemin W. Application of the thermoelectric cooler in the seventeenth chinesse retrievable satellite // Abstracts of the 17th Int. Conf. on Thermoelectrics, Nagoya, Japan, 1998, p.81.
19. La thermoelectricite: utisee pour le refroidissement electronique et pour lo survie dess homines travaillant en milieux extremes / Steerholm Tohn / techn.mod. 1989,81, N1-3.
20. Sulin A. Knowledge representation for TE devices engineering // Abstracts of the 17th Int/ Conf/ on Thermoelectrics, May 25-26, 1998, Nagoya, Japan, 1998, p. 82.

References

1. RF Patent No. 2335825. Thermoelectric device with a high temperature gradient. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M. 10.10.2008. (In Russ)
2. RF Patent No. 2417356. Method for optimizing the operating modes of a thermoelectric battery taking into account geometric and electrothermophysical parameters with pulsed power supply. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T. A. B.I. 2011; 12. (In Russ)
3. RF Patent No. 2449417. A method for cooling semiconductor heat-generating electronic components through bimetallic thermoelectric electrodes. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. B.I. 2012;12. (In Russ)

4. RF Patent No. 2565523. Cooling device based on nanofilm thermal modules. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. B.I. 2015; 29. (In Russ)
5. RF Patent No. 2575614. Thermoelectric generator with a high temperature gradient between the junctions. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. B.I. 2016;5. (In Russ)
6. RF Patent No. 2595911. Thermoelectric heat pump with nanofilm semiconductor branches. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. Bull. 2016; 24. (In Russ)
7. RF Patent No.2575618. Thermoelectric device with thin-film semiconductor branches and an increased heat sink surface. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. Bull., 2016;5. (In Russ)
8. Anatychuk L.I. *Thermoelectricity*. Thermoelectric energy converters. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003; 2: 386.
9. Gadzhiev Kh.M., Ismailov T.A. Semiconductor thermoelectric energy-efficient devices. St. Petersburg: Lan, 2020; 124. (In Russ)
10. Gadzhiev Kh.M., Akhmedov M.E., Gadzhieva S.M., Kurbanova P.A. Thermoelectric processes in an economical light transistor. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. Makhachkala: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education DSTU, 2019; 46(3):8-19. (In Russ)
11. Gadzhiev Kh.M., Kurbanov I.M., Gadzhiev D.S. Decompression semiconductor thermoelectric desalination plant. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019;46(4):8-18. (In Russ)
12. Ismailov T.A., Gadzhieva S.M. Thermoelectric semiconductor heat transfer intensifiers. *Izv. Universities, Instrumentation*. St. Petersburg 1994; 37(11-12):74-75. (In Russ)
13. Ismailov T.A., Gadzhieva S.M. Experimental studies of semiconductor thermoelectric heat transfer intensifiers of contact type. *Izv. Universities, Instrumentation*. SPb. 1995;38(3-4):51-53. (In Russ)
14. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M. Thermoelectric semiconductor heat removal systems and cooling devices. *Refrigeration*. M. 1997; 4:32-33. (In Russ)
15. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Application of semiconductor thermoelectric modules to form the topology of temperature fields for the purpose of thermal training of tissues of the human body. *Monitoring. Life safety*. SPb.: Elmore. 1997; 2:48-49. (In Russ)
16. Anatychuk L.I. *Physics of Thermoelectricity*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity. 1998.
17. Harpstep Taseph W.C. Improved spacecraft heat rejection with practical thermoelectric. *Energy convers*. N.Y., 1980; 126.
18. Jianzhong Z., Tiemin W. Application of the thermoelectric cooler in the seventeenth chinese retrievable satellite. *Abstracts of the 17th Int. Conf. on Thermoelectrics*, Nagoya, Japan, 1998;81.
19. La thermoelectricite: utilee pour le refroidissement electronique et pour lo survie dess homines travaillant en milieux extremes. *Steerholm Tohn / techn.mod*. 1989; 81:1-3.
20. Sulin A. Knowledge representation for TE devices engineering. *Abstracts of the 17th Int/ Conf/ on Thermoelectrics*, May 25-26, 1998, Nagoya, Japan, 1998; 82.

Сведения об авторах:

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

Гаджиева Солтанат Магомедовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; gadjieva_soltanat@mail.ru

Магомедова Патимат Солтановна, аспирантка кафедры теоретической и общей электротехники; altra588@mail.ru

Курбанов Арслан Магомедович, аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; m.kurbanov.a@mail.ru

Information about authors:

Khadzhimurat M. Gadzhiev, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Head of Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; gadjiev.xad@mail.ru

Soltanat M. Gadzhieva, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; gadjieva_soltanat@mail.ru

Patimat S. Magomedova, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; altra588@mail.ru

Arslan M. Kurbanov, Postgraduate Student, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; m.kurbanov.a@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 09.11.2023.

Одобрена после/рецензирования Revised 29.12.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.12.2023.