

Для цитирования: Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, А.М. Ибрагимова. Термоэлектрические полупроводниковые устройства для термостабилизации мощных транзисторов РЭА. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(1): 30-38. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-30-38

For citation: T.A. Ismailov, A.R. Shakhmaeva, A.M. Ibragimova. Thermoelectric semiconductor devices for thermal stabilisation of REA powerful transistors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 30-38. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-30-38

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК. 621.576:614.8.084

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-30-38

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ РЭА

Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, А.М. Ибрагимова
Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Целью исследования является анализ проблемы отвода выделяющегося тепла в мощных транзисторах и разработка устройств для термостабилизации мощных транзисторов в радиоэлектронной аппаратуре. **Метод.** Предложен способ испытания мощных транзисторов при использовании устройства обеспечения заданной температуры в объеме статирования двухпозиционным регулятором температуры и модели устройств для термостабилизации мощных транзисторов. Предложенные устройства обеспечивают высокую точность термостабилизации мощных транзисторов в системе радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), связанную с высокой точностью поддержания температуры на заданном уровне термоэлектрической батареей. **Результат.** Для обеспечения требуемых тепловых режимов мощных транзисторов разработаны конструкции устройств, повышающих точность термостабилизации мощных транзисторов, с высокой эффективностью, малым потреблением энергии и небольшими размерами. **Вывод.** По результатам экспериментальных исследований были получены оптимальные конструкции устройств, предназначенных для термостабилизации элементов РЭА, рассеивающих при своей работе значительные мощности. Техническим результатом устройств является повышение точности термостабилизации элемента РЭА за счет использования рабочего вещества, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА. Разработанные устройства обладают следующими функциями работы: в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества, будет последовательно отключать секции термоэлементов термоэлектрической батареи; батарея термоэлектрического модуля (ТЭМ) отводит избыток тепла от термостабилизирующего вещества, сохраняя при этом необходимую температуру элемента РЭА, избыток тепла от тепловыделяющих спаев батареи ТЭМ отводится теплообменником; при плавлении рабочего вещества температура тонкостенной металлической емкости и соответственно температура элемента РЭА будет поддерживаться при постоянном значении, равном температуре плавления рабочего вещества.

Ключевые слова: мощные транзисторы, радиоэлектронная аппаратура, термостабилизация, термостатирование, температура плавления, токораспределение

THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR DEVICES FOR THERMAL STABILISATION OF REA POWERFUL TRANSISTORS

T.A. Ismailov, A.R Shakhmaeva, A.M. Ibragimova
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Aim. The aim of the study is to analyse the problem of heat dissipation in high-power transistors and develop devices for their thermal stabilisation when used in electronic equipment. **Method.** A method is proposed for testing power transistors using a device to ensure thermal stabilisation in the stating volume by means of a two-position temperature controller along with a model for the use of these components in electronic devices. The proposed devices support high thermal stabilisation accuracy of power transistors in a radioelectronic device system allowing temperature to be maintained at a given level with high accuracy by means of a thermoelectric battery. **Results.** Device designs were developed for increasing the accuracy of thermal stabilisation of power transistors with high efficiency, low energy consumption and small size. **Conclusion.** Based on the results of experimental studies, optimal designs for devices for the thermostabilisation of radioelectronic device components that dissipate significant power during their operation are presented. The devices can be used to increase the accuracy of thermal stabilisation of the radioelectronic device element by means of a working substance whose melting point coincides with its thermal stabilisation temperature. The developed devices have the following functions: the thermoelectric battery sections of the thermoelectric battery will be sequentially disconnected depending on the electrical signals from the temperature sensors to which the solid phase of the working substance has moved. The battery of the thermoelectric module (TEM) removes excess heat from the heat-stabilising substance while maintaining the required temperature of the radioelectronic device element. Excess heat from the heat-generating junctions of the TEM battery is removed by the heat exchanger. During melting of the working substance, the temperature of the thin-walled metal container – and, accordingly, the temperature of the CEA element – can be maintained at a constant value equal to the melting temperature of the working substance.

Keywords: power transistors, electronic equipment, thermal stabilisation, temperature control, melting temperature, current distribution

Введение. При производстве элементов радиоэлектронной аппаратуры повышение качества их изготовления очень важно, так как от этого зависит надежность работы будущих радиоэлектронных систем.

В настоящее время на внутреннем и внешнем рынках имеется большая потребность в мощных транзисторах (МТ), выпуском которых занимаются многие ведущие предприятия России [15]. МТ используются в энергосистемах, в телевидении, в автомобильном транспорте, электровозах, радиосвязи, станкостроении, оборонной и бытовой технике.

Технология изготовления МТ и полупроводниковых приборов включает порядка 200 операций. Для обеспечения требований, предъявляемых к параметрам мощных транзисторов и полупроводниковых приборов, необходимо качественное выполнение наукоемких операций, которые обеспечивали бы надежность работы этих приборов в РЭА.

Функциональные элементы современной РЭА предъявляют жесткие требования к обеспечению заданных тепловых режимов и допустимому разбросу рабочих температур между ними. При этом необходимо иметь в виду, что оптимальный режим работы некоторых элементов РЭА достигается при температурах, превышающих на несколько десятков градусов температуру окружающей среды, но при работе они разогреваются значительно сильнее и необходимо интенсивно отводить от них излишек теплоты [1, 2, 6, 10, 11].

Постановка задачи. На базе научно-исследовательской лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств при Дагестанском государственном техническом университете были проведены экспериментальные работы по посадке МТ марки КТ872 с различной технологией обработки и напыления обратной стороны пластин. Анализ статистических данных показал зависимость брака транзисторных структур КТ872 по электрическим параметрам от технологии обработки и напыления обратной стороны, а также от технологии посадки кристалла на основание корпуса ТО-218.

Анализ транзисторов, вышедших из строя в результате вторичного пробоя, показал, что он возникает из-за концентрации тока в пределах малых областей активной площади прибора, возникает проблема равномерного токораспределения по структуре и отвода выделяющего тепла в транзисторах. Задачей исследований является разработка устройства для термостабилизации МТ в РЭА [14].

Методы исследования. Под влиянием климатических факторов в материалах транзисторов протекают сложные физико-химические процессы, изменяющие их свойства и способствующие возникновению отказов из-за деградации электрических параметров, обрывов, коротких замыканий, потери герметичности [16-19].

Особенно заметное влияние на надежность мощных транзисторов оказывают высокие и низкие температуры, их циклические воздействия. Это объясняется температурной зависимостью основных электрофизических параметров применяемых материалов [20-22].

В лаборатории полупроводниковых термоэлектрических преобразователей и устройств разработано устройство для испытания транзисторов, интегральных схем и микросборок. Оно предназначено для обеспечения заданной температуры в объеме статирования [7].

Устройство представляет собой теплоизолированную камеру, охлаждение которой обеспечивается трехкаскадной термоэлектрической батареей (ТЭБ). Поддержание заданной температуры статирования обеспечивается двухпозиционным регулятором температуры, датчик которого установлен в стенке термостатируемого объема. Кроме того, в состав термостата входит система отключения ТЭБ при перегреве в случае отсутствия подачи охлаждающей воды. Датчики системы защиты установлены в стенках водяных теплообменников. Датчик измерения температуры, имеющий внешний выход, установлен в стенке термостатируемого объема.

Недостатками существующих устройств для отвода тепла, описанных в следующих работах [3-5], являются их малоэффективность, если температура работы элемента РЭА превышает температуру окружающей среды, значительные габариты из-за использования радиаторов больших размеров и потребление большого количества энергии.

Обсуждение результатов. Для обеспечения требуемых тепловых режимов мощных транзисторов в системе РЭА разработаны конструкции устройств, повышающих точность термостабилизации МТ в РЭА [6, 8, 9, 12, 13].

В результате экспериментальных исследований получены оптимальные конструкции устройств, предназначенных для термостабилизации элементов РЭА, рассеивающих при своей работе значительные мощности.

Устройство (рис. 1) содержит тепловой демпфер 1, выполненный из высокотеплопроводного материала в виде усеченной пирамиды, на малом основании которой предусмотрена выемка 2. В выемку помещен кожух 3 с термостатирующим веществом 4, точка фазового перехода которого совпадает с температурой статирования охлаждаемого объекта 5, а охлаждаемый объект - в находящуюся в непосредственном тепловом контакте с кожухом и теплоизолированную от окружающей среды камеру 6. На большем основании усеченной пирамиды через керамическую пластину 7 установлена своими теплопоглощающими спаями ТЭБ 8. Отвод тепла от горячих спаев ТЭБ осуществляется радиатором 9. Блок управления 10 осуществляет контроль сопротивления термостабилизирующего вещества и подачу питания на ТЭБ или ее отключение.

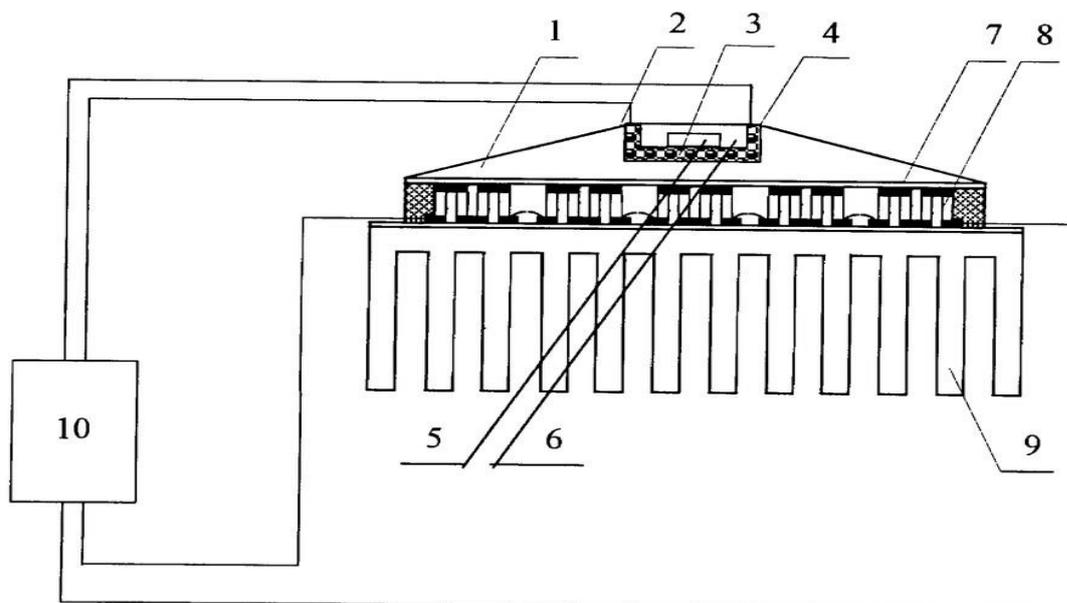


Рис.1. Устройство для термостабилизации элементов РЭА большой мощности
Fig. 1. Device for thermal stabilization of high power CEE elements

Известно, что фазовый переход кристаллических веществ происходит при строго определенном значении температуры. Это значение у некоторых кристаллических материалов находится в диапазоне 30-50°C.

Если поместить в непосредственный тепловой контакт с таким материалом, находящимся в состоянии фазового перехода, тепловыделяющий элемент РЭА, то можно осуществить его термостабилизацию с очень высокой точностью. При этом возникает проблема отвода тепла, выделяемого элементом РЭА, от термостабилизирующего вещества, находящегося в состоянии фазового перехода. В предлагаемом решении такой отвод избытка тепловыделений осуществляется посредством батареи ТЭБ. Контроль состояния термостабилизирующего вещества реализуется измерением его сопротивления.

Если сопротивление термостабилизирующего вещества 4 отличается от допустимого значения, то блок управления 10 подает необходимый ток питания на батарею термоэлектрического модуля (ТЭМ) 8. В результате батарея ТЭМ 8 отводит избыток тепла от термостабилизирующего вещества 4, сохраняя при этом необходимую температуру элемента РЭА 5. Избыток тепла от тепловыделяющих спаев батареи ТЭМ 8 отводится теплообменником 9. При установлении сопротивления термостабилизирующего вещества 4 на необходимый уровень, блок управления 10 отключает батарею ТЭМ 8.

Техническим результатом устройства (рис. 2) является повышение точности термостабилизации элемента РЭА за счет использования рабочего вещества, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА. Устройство состоит из тонкостенной металлической емкости 1, заполненной рабочим веществом 2, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА 3, установленном на верхней поверхности тонкостенной металлической емкости 1 с обеспечением теплового контакта. К нижней поверхности тонкостенной металлической емкости 1 присоединена своим теплопоглощающим спаем ТЭБ 4, состоящая из нескольких последовательно соединенных секций термоэлементов. Своим тепловыделяющим спаем ТЭБ 4 приведена в тепловой контакт с воздушным радиатором 5. В объеме тонкостенной металлической емкости 1 с рабочим веществом 2 размещены датчики температуры 6, число которых равно числу секций ТЭ в ТЭБ 4. Они электрически связаны с входом устройства управления 7, выход которого электрически связан с ТЭБ 4.

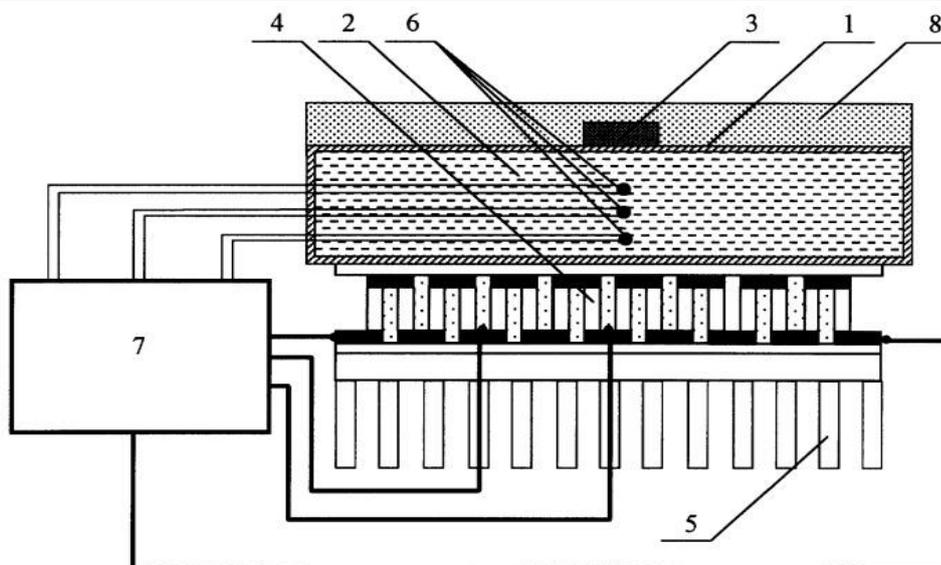


Рис. 2. Устройство термостабилизации элементов РЭА большой мощности
Fig. 2. Device for thermal stabilization of high power CEE elements

Тепло, поступающее от элемента РЭА 3, передается тонкостенной металлической емкости 1 и через поверхность соприкосновения рабочему веществу 2. Далее одновременно происходит прогрев рабочего вещества 2 до температуры плавления и процесс плавления, связанный с появлением жидкой фазы рабочего вещества 2 и ее перемещением в горизонтальной плоскости в направлении, противоположном размещению элемента РЭА 3. При плавлении рабочего вещества 2 температура тонкостенной металлической емкости 1 и соответственно температура элемента РЭА 3 будет поддерживаться при постоянном значении, равном температуре плавления рабочего вещества 2.

До тех пор, пока жидкая фаза расплавленного рабочего вещества 2 не переместится до места расположения первого датчика температуры 6, термоэлектрическая батарея 4 не питается электрической энергией и не отводит тепло. При проплавлении рабочего вещества 2 до места расположения первого датчика температуры 6 с последнего передается электрический сигнал на устройство управления 7, которое начинает осуществлять питание электрической энергией крайней секции термоэлементов в термоэлектрической батарее 4. Часть термоэлектрической батареи 4, состоящая из термоэлементов крайней секции, начинает интенсивно отводить тепло от тонкостенной металлической емкости 1.

При дальнейшем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 3 и соответственно при достижении жидкой фазы расплавленного рабочего вещества 2 второго датчика температуры 6, в соответствии с поступившим от него электрическим сигналом устройство управления 7 начинает осуществлять питание электрической энергией крайней и расположенной рядом с ней секций термоэлементов термоэлектрической батареи 4. При этом отвод тепла от тонкостенной металлической емкости 1 будет осуществляться уже двумя секциями термоэлектрической батареи 4. При еще большем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 3 посредством датчиков температуры 6 и устройства управления 7 к процессу теплоотвода будут подключаться последовательно следующие секции термоэлементов термоэлектрической батареи 4.

Процесс последовательного подключения секций термоэлементов термоэлектрической батареи 4 и, следовательно, увеличения уровня теплоотвода от тонкостенной металлической емкости 1 будет осуществляться до тех пор, пока граница раздела жидкой и твердой фазы рабочего вещества 2 не стабилизируется на определенном уровне.

При уменьшении уровня тепловыделений элемента РЭА 3 за счет отвода тепла термоэлектрической батареей 4 жидкая фаза рабочего вещества 2 будет перемещаться в обратном

направлении. При этом устройство управления 7 в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры 6, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества 2, будет последовательно отключать секции термоэлементов термоэлектрической батареи 4. Процесс отключения секций термоэлементов термоэлектрической батареи 4 будет происходить до тех пор, пока граница раздела жидкой и твердой фазы рабочего вещества 2 не стабилизируется на определенном уровне.

Отвод тепла от тепловыделяющего спая термоэлектрической батареи 4 производится воздушным радиатором 5. Для снижения до минимума влияния колебаний температуры окружающей среды применяется теплоизоляция 8.

Устройство (рис. 3), повышающее точность термостабилизации мощного транзистора – элемента РЭА за счет использования рабочего вещества, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА. Устройство содержит ТЭБ 1, состоящую из расположенных в середине низких ветвей 2 и по краям высоких ветвей 3, тепловыделяющие спаи которых расположены на одном уровне и примыкают к теплообменнику 4, а теплопоглощающие спаи расположены на двух уровнях. В середине ТЭБ образовано углубление, в которое помещена тонкостенная металлическая емкость 5, заполненная рабочим веществом 6, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации транзистора в системе РЭА 7. Транзистор помещен в камеру 8, размещенную на подставке 9 в тонкостенной металлической емкости 5 и находящуюся в непосредственном тепловом контакте с рабочим веществом 6. В объеме тонкостенной металлической емкости с рабочим веществом размещены два датчика температуры 10 и 11, электрически связанные с входом устройства управления 12, выход которого электрически связан с ТЭБ.

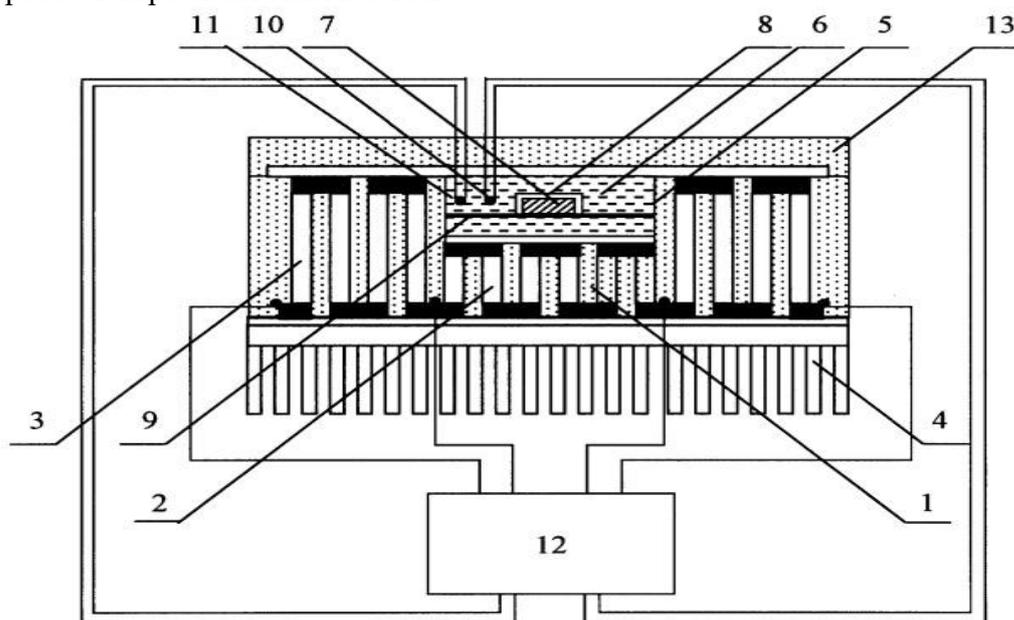


Рис. 3. Устройство термостабилизации мощных транзисторов в системе РЭА
Fig. 3. Thermostabilization device of power transistors in the CEE system

Тепло, поступающее от элемента РЭА 7, находящегося в камере 8, размещенной на подставке 9 передается через поверхность соприкосновения рабочему веществу 6. Происходит прогрев рабочего вещества 6 до температуры плавления и процесс плавления, связанный с появлением жидкой фазы рабочего вещества 6 и ее перемещением в направлении от поверхности камеры 8 к стенкам тонкостенной металлической емкости 5. При плавлении рабочего вещества 6 температура тонкостенной металлической емкости 5 и соответственно температура элемента РЭА 7 будет поддерживаться при постоянном значении, равном температуре плавления рабочего вещества 6.

До тех пор, пока жидкая фаза расплавленного рабочего вещества 6 не переместится до места расположения первого датчика температуры 10, термоэлектрическая батарея 1 не питается электрической энергией и не отводит тепло. При проплавлении рабочего вещества 6 до места расположения первого датчика температуры 10, с последнего передается электрический сигнал на устройство управления 12, которое начинает осуществлять питание электрической энергией части термоэлектрической батареи 1, состоящей из низких ветвей 2. Часть термоэлектрической батареи 1, состоящая из низких ветвей, начинает интенсивно отводить тепло от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6. При дальнейшем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 7 и соответственно при достижении жидкой фазы расплавленного рабочего вещества 6 второго датчика температуры 11, в соответствии с поступившим от него электрическим сигналом устройство управления 12 подключает к питанию электрической энергией дополнительно к низким ветвям 2 высокие ветви 3 термоэлектрической батареи 1. При этом отвод тепла от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6 будет осуществляться уже всей термоэлектрической батареей 1.

При уменьшении уровня тепловыделений элемента РЭА 7 за счет отвода тепла термоэлектрической батареей 1 жидкая фаза рабочего вещества 6 будет перемещаться в обратном направлении (от стенки тонкостенной металлической емкости 5 и камере 8). При этом устройство управления 12 в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры 10 и 11, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества 2, будет последовательно отключать высокие ветви 3 и низкие ветви 2 термоэлектрической батареи 1 соответственно.

Последовательное подключение и отключение низких ветвей 2 и высоких ветвей 3 термоэлектрической батареи 1 к процессу теплоотвода от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6 при изменении уровня тепловыделений элемента РЭА 7 будет способствовать повышению экономичности устройства термостабилизации. Отвод тепла от тепловыделяющего спая термоэлектрической батареи 4 производится теплообменником 4. Для снижения до минимума влияния колебаний температуры окружающей среды применяется теплоизоляция 13.

Вывод. Проведенные исследования позволили разработать устройства, которые применялись для термостабилизации мощных транзисторов в РЭА.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: Наукова Думка, 1979. 768 с.
2. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника, №7, 2009. С. 34-37.
3. Вайнер А.Л., Спокойный Ю.Е., Лукишер Э.М., Сомкни М.Н. Проектирование термоэлектрических микрохолодильников глубокого охлаждения для радиоэлектроники // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1970. № 3.
4. Воронин А.Н., Гальперин В.Л., Зорин И.В., Кудасов А.С. Термоэлектрический холодильник для радиоэлектронной аппаратуры ТЭХРА-1 // Приборы и техника эксперимента, 1988. № 5. С. 212-214.
5. Дульнев Г. И. Тепло-и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
6. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005. 534 с.
7. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Полупроводниковое термоэлектрическое устройство для испытания мощных транзисторов // Радиотехника, 2008. № 6. С.134-136.
8. Исмаилов Т.А., Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Термоэлектрическое устройство для обеспечения теплового режима блоков радиоэлектронных систем // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2015. Т. 37, № 2. С.50-59.
9. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Результаты теоретических исследований системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Термоэлектричество, 2015. № 6. С. 74-87.
10. Исмаилов Т.А., Саркаров Т.Э., Шангереева Б.А., Шахмаева А.Р. Защита поверхности кремниевых подложек на основе легкоплавкого стекла для изготовления кремниевых транзисторов // Стекло и керамика, 2017. № 5. С. 25-28.

11. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А. Исследование параметров, влияющих на пробивное напряжение биполярного транзистора со статической индукцией // Известия Высших учебных заведений. Радиоэлектроника, 2017. № 2. С. 23-28.
12. Патент РФ № 2534508. Конденсационный шкаф РЭА // Исмаилов Т.А., Рашидханов А.Т., Гаджиев А.М. Б.И. № 33, 2014.
13. Патент РФ № 2634927. Устройство для отвода теплоты от элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Казумов Р.Ш. Бюл. № 31, 2017.
14. Шахмаева А.Р. Оптимизация технологии посадки кристалла кремниевого транзистора на основании корпуса // Проектирование и технология электронных средств, 2006. № 4. С.26-27.
15. Электроника: Наука, Технология, Бизнес 3/2007. С. 26-29.
16. Cengel Yu., Ghajar A. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. – New-York, McGraw-Hill Education, 6 edition, 2019. 1056 pp.
17. Chin H.S., Cheong K.Y., Ismail A.B. A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices // Metall. Mater. Trans. B, vol. 41, no. 4, 2010. pp. 824-832.
18. Khazaka R., Mendizabal L., Henry D., Hanna R.. Survey of high-temperature reliability of power electronics packaging component s// IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 5, 2015. pp. 2456-2464.
19. Sajid M., Hassan I., Rahman A. An overview of cooling of thermoelectric devices// School of Mechanical & Manufacturing Engineering (SMME), National University of Sciences & Technology (NUST), Islamabad, Pakistan/ Texas A&M University at Qatar, P.O. Box 23874, Doha, Qatar. Energy. Volume 118, 1 January 2017, pp. 1035-1043
20. Tang G., Chai T.C., Zhang X. Thermal optimization and characterization of SiC-based high power electronics packages with advanced thermal design // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 9 (5), art. no. 8423098, 2019. pp. 854-863.
21. Tardiff David W., Dore-North Lyne. Thermal modeling speeds up design // Electron. Packag. and Prod., № 9, 1994.
22. Yangang W., Xiaoping D., Guoyou L., Yibo W., Daohui L., Steve J. Status and Trend of SiC Power Semiconductor Packaging // Electronic Packaging Technology (ICEPT) 2015 16th International Conference on, 2015. pp. 396-402.

References:

1. Anatyshuk L.I. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 s. [Anatyshuk L.I. Thermal elements and thermal-electric devices. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 p. (In Russ.)]
2. Bulat L.P. Prikladnye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. [Bulat L.P. Applied studies and developments in the area of thermal-electric cooling in Russia. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. (In Russ.)]
3. Vainer A.L., Spokoiniy Yu.E., Lukisher E.M., Somkni M.N. Proektirovanie termoelektricheskikh mikroholodilnikov glubokogo okhlazhdeniya dlya radioelektroniki. Voprosy radioelektroniki. Ser. TRTO, 1970 № 3. [Vainer A.L., Spokoiniy Yu.E., Lukisher E.M., Somkni M.N. Design of thermoelectric micro-refrigerators of deep cooling for radio electronics. Voprosy radioelektroniki. Ser. TRTO, 1970. No 3. (In Russ.)]
4. Voronin A.N., Galperin V.L., Zorin I.V., Kudasov A.S. Termoelektricheskiy holodilnik dlya radioelektronnoy apparatury TEHRA-1. Prybory i tekhnika eksperimenta, 1988. – № 5. – S. 212-214. [Voronin A.N., Galperin V.L., Zorin I.V., Kudasov A.S. Thermoelectric refrigerator for electronic equipment TEHRA-1. Prybory i tekhnika eksperimenta, 1988. № 5. pp. 212-214. (In Russ.)]
5. Dulnev G.I. Teplo- i massoobmen v radioelektornnoy apparature. M.: Vysshaya shkola, 1984. – 247 s. . [Dulnev G.I Heat and mass transfer in electronic equipment. M.: Vysshaya shkola, 1984. 247 p. (In Russ.)]
6. Ismailov T.A. Termoelektricheskie poluprovodnikovye ustroystva i intensivatory teploperedachi. SPb.: Politekhnik; 2005. 534 s. [Ismailov T.A. Thermal-electric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint-Petersburg: Politekhnik; 2005. 534 p. (In Russ.)]
7. Ismailov T.A. Shakhmaeva A.R. Poluprovodnikovoe termoelektricheskoe ustroistvo dlya ispytaniya moshnykh tranzistorov. Radiotekhnika, 2008. № 6. S. 134-136. [Ismailov T.A. Shakhmaeva A.R. Semiconductor thermoelectric device for testing power transistors. Radiotekhnika, 2008. No 6. pp. 134-136. (In Russ.)]
8. Ismailov T.A., Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. Thermoelectric device to ensure the thermal regime of blocks of electronic systems // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015. Vol. 37, No. 2. pp.50-59. (In Russ.)]
9. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V. The results of theoretical studies of the cooling system of REA elements operating in the mode of intermittent heat release // Thermoelectricity, 2015. No. 6. pp. 74-87. (In Russ.)]
10. Ismailov T.A., Sarkarov T.E., Shangereeva B.A., Shakhmaeva A.R. Surface protection of silicon substrates based on fusible glass for the manufacture of silicon transistors // Glass and Ceramics, 2017. No. 5 pp. 25-28. (In Russ.)]

11. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R., Shangereeva B.A. Investigation of parameters affecting the breakdown voltage of a bipolar transistor with static induction // News of Higher Education Institutions. Radioelectronics, 2017. No.2. pp 23-28. (In Russ.)]
12. Patent RF No. 2534508. Condensation cabinet REA // Ismailov T.A., Rashidkhanov A.T., Gadzhiev A.M. B.I. No. 33, 2014. (In Russ.)]
13. Patent RF No. 2634927. A device for removing heat from CEA elements operating in the mode of intermittent heat release // Ismailov TA, Evdulov OV, Evdulov DV, Kazumov R.Sh. Bull. No. 31, 2017. (In Russ.)]
14. Shakhmaeva A.R. Optimizatsiya tehnologii posadki kristalla kremnievogo transistor na osnovanie korpusa. Proektirovanie i tehnologiya elektronnyh sredstv, 2006. – № 4. – S. 26-27. [Shakhmaeva A.R. Optimization of technology for chip assembly on the base. Proektirovanie i tehnologiya elektronnyh sredstv, 2006. No 4. pp. 26-27. (In Russ.)]
15. Elektronika: Nauka, Tehnologiya, Biznes 3/2007. – S. 26-29 [Electronics: Science, Technology, Business 3/2007. pp. 26-29 (in Russ.)]
16. Cengel Yu., Ghajar A. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. – New-York, McGraw-Hill Education, 6 edition, 2019. 1056 p.
17. Chin H.S., Cheong K.Y., Ismail A.B. A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices // Metall. Mater. Trans. B, vol. 41, no. 4, 2010 pp. 824-832.
18. Khazaka R., Mendizabal L., Henry D., Hanna R.. Survey of high-temperature reliability of power electronics packaging component s// IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 5, 2015. pp. 2456-2464.
19. Sajid M., Hassan I., Rahman A. An overview of cooling of thermoelectric devices// School of Mechanical & Manufacturing Engineering (SMME), National University of Sciences & Technology (NUST), Islamabad, Pakistan/ Texas A&M University at Qatar, P.O. Box 23874, Doha, Qatar. Energy. Volume 118, 1 January 2017, pp.1035-1043
20. Tang G., Chai T.C., Zhang X. Thermal optimization and characterization of SiC-based high power electronics packages with advanced thermal design // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 9 (5), art. no. 8423098, 2019. pp. 854-863.
21. Tardiff David W., Dore-North Lyne. Thermal modeling speeds up design // Electron. Packag. and Prod., No. 9, 1994.
22. Yangang W., Xiaoping D., Guoyou L., Yibo W., Daohui L., Steve J. Status and Trend of SiC Power Semiconductor Packaging // Electronic Packaging Technology (ICEPT) 2015 16th International Conference on, 2015. pp. 396-402.

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

Шахмаева Айшат Расуловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: fpk12@rambler.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

Aishat R. Shakhmaeva, Cand.Sci. (Technical), Prof., Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Electrical Engineering; e-mail: fpk12@rambler.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 05.02.2020.

Принята в печать 26.02.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 05.02.2020.

Accepted for publication 26.02.2020.