

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 621.382.2/.3-046.47

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-7

Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора

Н. К. Юрков¹, И. М. Рыбаков², Е. А. Вершинин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹yurkov_NK@mail.ru, ²rybakov_im@mail.ru, ³egor.verschinin2011@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современной радиоэлектронике одной из главных нерешенных проблем является проблема теплоотвода. Технические решения для оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры становятся все более важными аспектами в контексте повышенных требований внешних воздействующих факторов к эффективности и надежности работы устройств. Предлагается оригинальный подход к оптимизации теплового режима радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода на основе высокотеплопроводного арсенида бора. Цель исследования: разработка и оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с использованием теплоотвода из арсенида бора для обеспечения стабильной температуры работы устройств и повышения их надежности, стойкости. *Материалы и методы.* Проведен анализ современных материалов теплоотвода. Создана модель теплоотвода с учетом физических свойств материала арсенида бора. Проведено численное моделирование системы теплоотвода. Получена оценка эффективности использования теплоотвода из арсенида бора в тепловой системе. *Результаты.* Результаты работы позволили повысить эффективность управления тепловыми потоками и обеспечить оптимальные условия работы радиоэлектронной аппаратуры. Имитационное моделирование подтвердило эффективность управления тепловым режимом и снижение вероятности риска перегрева устройства. *Выводы.* Разработанные научно-технические решения по оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с применением теплоотвода из арсенида бора обеспечивают повышение надежности, стойкости и эффективности работы устройств, приборов, изделий, блоков в условиях агрессивных внешне воздействующих факторов.

Ключевые слова: теплоотвод, тепловой режим, микросхема, материалы, арсенид бора, вычислительная система, радиоаппаратура

Для цитирования: Юрков Н. К., Рыбаков И. М., Вершинин Е. А. Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 64–77. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-7

© Юрков Н. К., Рыбаков И. М., Вершинин Е. А., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Optimizing the thermal system of electronic equipment using boron arsenide heat sink

N.K. Yurkov¹, I.M. Rybakov², E.A. Vershinin³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹yurkov_NK@mail.ru, ²rybakov_im@mail.ru, ³egor.vershinin2011@yandex.ru

Abstract. *Background.* In modern radio-electronic equipment one of the most important tasks is optimization of thermal solution to ensure effective heat dissipation and maintenance of optimal operating temperature of devices, devices, products. This is especially relevant in the conditions of constant increase in the density of components and increase in heat dissipation. Technical solutions to optimize the thermal system of radio electronic equipment are becoming increasingly important aspects in the context of increased requirements of external influencing factors to the efficiency and reliability of devices. One of the approaches attracting the attention of researchers is the use of boron arsenide heat sink. The purpose of the study is to develop and optimize the thermal system of radio-electronic equipment with the use of boron arsenide heat sink to ensure stable temperature operation of devices and increase their reliability, durability. *Materials and methods.* The results obtained on the basis of the analysis of the thermal characteristics of radio electronic components, modeling of heat transfer processes and evaluation of the efficiency of using boron arsenide heat sink in the thermal system are presented. *Results.* The developed thermal system with the use of boron arsenide heat sink allows to effectively control heat flows and provide optimal operating conditions for radio-electronic equipment. The conducted experiments and calculations confirm the improvement of heat dissipation and reduction of the risk of device overheating. *Conclusion.* The developed scientific and technical solutions for optimization of the thermal system of radio-electronic equipment with the use of boron arsenide heat sink provide an increase in reliability, durability and efficiency of devices, devices, products, units in conditions of increased external factors.

Keywords: heat sink, thermal regime, microcircuit, materials, boron arsenide, computer system, radio equipment

For citation: Yurkov N.K., Rybakov I.M., Vershinin E.A. Optimizing the thermal system of electronic equipment using boron arsenide heat sink. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):64–77. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-7

Введение

Эффективная работа, надежность и стойкость к климатическим и механическим воздействиям электронных устройств напрямую зависят от многих факторов, включая обеспечение оптимального теплового режима, что достигается за счет применения в конструкции современных технических решений снижения тепловой нагрузки [1–7]. Анализ выбранных нами материалов позволит выделить ключевые особенности каждого материала и их влияние на общий тепловой режим. Экспериментальные исследования и инженерные разработки в этой области имеют потенциал существенно улучшить характеристики теплоотвода, что, в свою очередь, способствует повышению производительности и долговечности электронных устройств [8–15].

Исследование теплоотвода из различных материалов становится особенно актуальным в контексте постоянного увеличения мощности и функциональности электронных компонентов. Выбор различных материалов выходит на передний план как потенциальный вариант улучшения теплового режима радиоэлектронного средства [1].

Данная статья посвящена разработке и оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с использованием теплоотвода из арсенида бора для обеспечения стабильной температуры работы устройств и повышения их надежности, стойкости. Рассмотрим основные факторы, влияющие на тепловой режим радиоэлектронной аппаратуры при использовании различных материалов теплоотводящей системы.

Проведем анализ влияния различных материала теплоотвода с помощью численного моделирования.

Анализ материалов

Основными материалами, служащими для создания систем теплоотвода являются арсенид бора, алюминий, железо, золото, медь, серебро и алмаз, на их основе будет проведена предварительная оценка свойств теплоотвода.

Краткая характеристика используемых материалов:

- Арсенид бора благодаря своей высокой теплопроводности применяется в электронике, включая высокоэффективные теплорассеивающие элементы. Также он определяется как «дешевый алмаз» из-за дешевизны и свойств, практически аналогичных свойствам настоящего алмаза.
- Алюминий – широко используемый материал в различных отраслях техники. Он также играет значительную роль в радиоэлектронике. Применяется в радиаторах, тепловых трубах и других элементах систем охлаждения благодаря своей легкости и большой теплопроводности.
- Железо, будучи широко распространенным материалом, также применяется в электронике, но в меньшей степени. Применение осуществляется в виде тепловых трубок, радиаторов и других элементов охлаждения в электронных системах.
- Золото – материал, характеризующийся высокой теплопроводностью, редко используется в электронике в качестве теплоотводов из-за своей высокой стоимости. Но широко используется в микроэлектронике для создания теплопроводящих элементов и покрытий.
- Медь является одним из наиболее распространенных материалов в электронике. Это самый широко используемый в производстве теплорассеивающих элементов и тепловых трубок материал.
- Серебро, как и золото, имеет высокую электропроводность и теплопроводность. Как отличный проводник тепла может использоваться в производстве теплопроводящих материалов и элементов охлаждения, но имеет высокую стоимость.
- Алмаз из-за высокой теплопроводности может использоваться в переходных системах охлаждения, например в виде термопластин или в составе теплопроводящих материалов. Но является дорогостоящим материалом для обеспечения теплового режима.

На основе краткого анализа характеристик наиболее употребляемых материалов для отвода тепла в электронике можно сделать вывод, что наиболее распространенными материалами для отвода тепла являются медь и алюминий. Высокая степень теплопроводности и небольшая стоимость делают данные материалы универсальными для большинства видов электронной аппаратуры. Но существует проблема использования данных материалов в теп-

ловой системе в качестве термопластин и термопрокладок для высокотехнологичных электронных систем. В связи с этим в работе были рассмотрены более перспективные материалы, такие как арсенид бора. Для этого была составлена сравнительная таблица характеристик теплопроводности и плотности материалов [14] (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики различных материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, г/см ³
Арсенид бора	1300	5,22
Алюминий	237	2,70
Железо	94	7,87
Золото	323	19,30
Медь	413	8,92
Серебро	430	10,49
Алмаз	2000	3,55

Из анализа табл. 1 следует, что алмаз по своим теплопроводящим свойствам является идеальным материалом для отвода тепла, а в совокупности с небольшой массой из-за низкой плотности может использоваться в сложных тепловых системах для высокотехнологичных образцов электронной аппаратуры. Но стоимость алмаза как элемента теплоотвода ставит рациональность его использования под вопрос, поэтому в работе предлагается рассмотреть возможность использования арсенида бора для данных видов электроники. Физические свойства и тепловые характеристики арсенида бора наиболее близки к показателям алмаза, но стоимость его производства значительно ниже, чем стоимость технических алмазов.

Для качественной и наглядной оценки физических свойств материалов построим диаграммы параметров характеристик теплопроводности и плотности исследуемых материалов (рис. 1, 2).

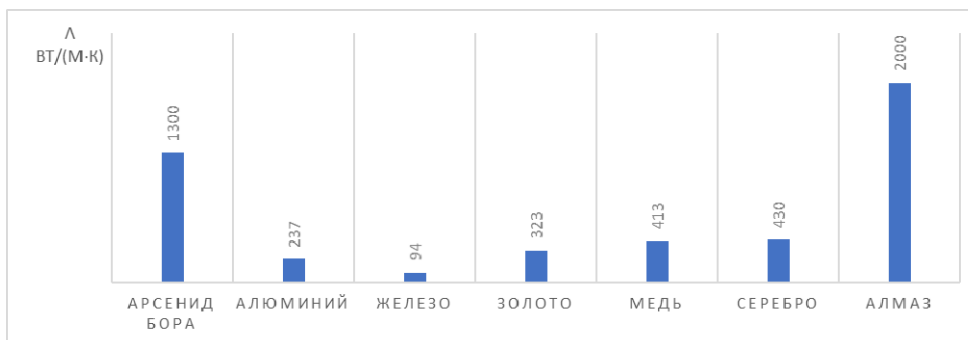


Рис. 1. Параметры теплопроводности исследуемых материалов

Анализ диаграмм позволяет экспертным путем оценить высокие показатели теплопроводности у материала арсенида бора и алмаза. Из рис. 1 следует, что наиболее эффективными, а следовательно, и перспективными материалами для микроэлектроники являются арсенид бора и алмаз. Из рис. 2 отметим низкую плотность арсенида бора по сравнению с другими

материалами, которая может уступать только алмазу. Исходя из общего анализа исследуемых материалов делаем вывод, что основные параметры материалов – коэффициент теплопроводности и плотность арсенида бора и алмаза – наилучшим образом подходят для производства термопрокладок в микроэлектронике, которые могут стабильно поддерживать тепловой режим сложных электронных устройств [3].

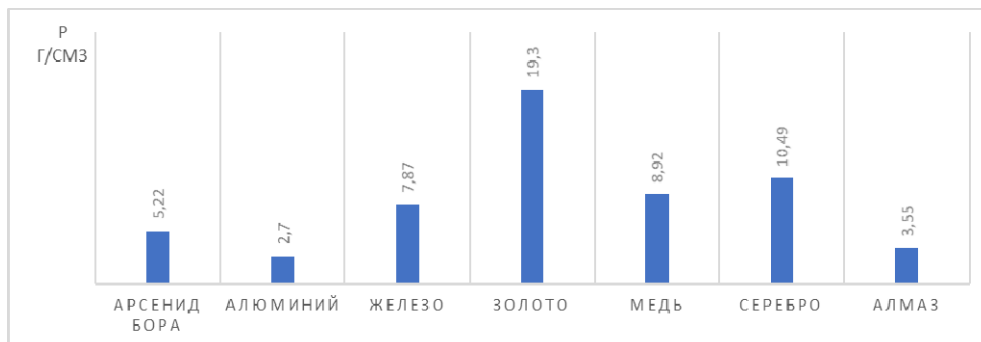


Рис. 2. Параметры плотности исследуемых материалов

На следующем этапе было проведено численное моделирование теплового режима на примере модуля процессорной платы, который используется в широком спектре устройств для военной и космической отраслей.

На рис. 3 можно увидеть поперечное сечение и расположение элементов RK3568J и RK809-5 в программном пакете ANSYS 20.0 модуль *Icepak*. На алюминиевой крышке корпуса устанавливаются теплоотводы, которые плотно прилегают к крышке. Между элементом и теплоотводом устанавливается теплопроводная прокладка КПТД 2М/3 толщиной 1 мм.

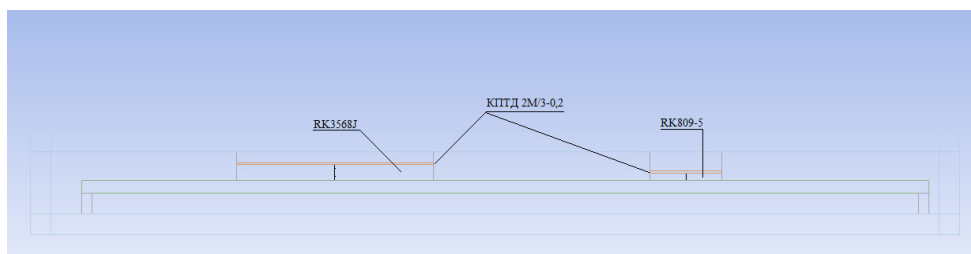


Рис. 3. Поперечное сечение устройства с модулем процессорным

Моделирование проводится на устройстве, выполненном в алюминиевом корпусе. В устройстве горизонтально установлен модуль процессорный АТБ-RK3568J с габаритными размерами $82 \times 50 \times 6,4$ мм. Габаритные размеры модуля процессорного АТБ-RK3568J вместе с корпусом устройства: $90 \times 60 \times 10$ мм. Корпус устройства герметичный и невакуумируемый, следовательно охлаждение прибора – естественная конвекция. Рабочая температура окружающей среды для модуля: плюс 40°C . Давление окружающей среды – нормальное (атмосферное). Допустимая средняя температура воздуха в приборе определяется минимальным значением повышенной рабочей температуры для используемых в приборе электронных компонентов: плюс 80°C .

Численное моделирование

Расчет теплового режима устройства проводился по ОСТ4 ГО.012.032, ОСТ4 ГО.012.014. При расчете использовалось программное обеспечение *ANSYS 20.0* модуль *Icserak*. В основе тепловых расчетов лежат математические законы, описывающие тепловые процессы. Основными уравнениями для описания тепловых процессов являются уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \Delta u = f(r, t), \quad (1)$$

и уравнение Навье – Стокса (2) для описания конвекции:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{v} \cdot (\nabla \vec{v}) + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}. \quad (2)$$

Для того чтобы найти частные решения указанных уравнений, необходимо иметь дополнительные данные. Этими данными являются граничные и начальные условия, которые в совокупности с геометрией исследуемого тела и физическими свойствами материалов называются краевыми условиями. В случае стационарного температурного поля начальные условия не задаются.

Граничные условия для стационарной задачи будут задаваться распределением температур на границе, в нашем случае температура будет постоянной по всей границе области расчета.

Расчет теплового режима проведен при продолжительной эксплуатации устройства в составе объекта [4]. Результаты расчета среднеобъемной температуры воздуха в устройстве, а также температуры воздуха (корпуса/кристалла) у электрорадиоэлемента (ЭРЭ) в сравнении с допустимыми для них по техническим условиям температурами приведены в табл. 2 [5].

Таблица 2

Результаты расчета тепловых режимов с различными материалами

Материал	Наименование	Потребляемая (рассеиваемая) мощность, Вт	Результаты расчета температуры воздуха (корпуса) кристалла*, °C	Допустимая по ТУ температура воздуха (корпуса) кристалла*, °C
1	2	3	4	5
Без материала	Модуль:	5	68,6	80
	RK3568J	2,5	78,2 (97,8) 118,3*	80 125*
	RK809-5	1	74,3 (93,5) 113,2*	125*
Арсенид бора	Модуль:	5	60,1	80
	RK3568J	2,5	60,2 (64,9) 75,0*	80 125*
	RK809-5	1	59,2 (67,2) 71,6*	125*
Алюминий	Модуль:	5	61,0	80
	RK3568J	2,5	60,7 (65,8) 76,0*	80 125*
	RK809-5	1	60,3 (68,2) 72,7*	125*
Железо	Модуль:	5	61,9	80
	RK3568J	2,5	63,8 (67,7) 78,0*	80 125*
	RK809-5	1	62,1 (70,4) 74,7*	125*

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Золото	Модуль:	5	60,9	80
	RK3568J	2,5	60,7 (65,7) 75,9*	80 125*
	RK809-5	1	59,9 (68,0) 72,5*	125*
Медь	Модуль:	5	60,8	80
	RK3568J	2,5	60,6 (65,6) 75,8*	80 125*
	RK809-5	1	59,8 (67,9) 72,4*	125*
Серебро	Модуль:	5	60,7	80
	RK3568J	2,5	60,5 (65,5) 75,7*	80 125*
	RK809-5	1	59,7 (67,9) 72,4*	125*
Алмаз	Модуль:	5	60,0	80
	RK3568J	2,5	61,0 (66,1) 74,2*	80 125*
	RK809-5	1	60,4 (68,4) 71,0*	125*

Результаты расчета теплового режима модуля процессорной платы показали, что значение среднеобъемной температуры перегрева материалов имеют следующие значения. Арсенид бора – 20,1 °С; алюминий – 21,0 °С; железо – 21,3 °С; золото – 20,9 °С; медь – 20,8 °С; серебро – 20,7 °С; алмаз – 20 °С; без термопрокладки температура перегрева составляет 28,6 °С. Из анализа данных о температурах перегрева следует, что теплоотвод (радиатор) из арсенида бора имеет высокие показатели эффективности отвода тепла от критических частей модуля процессорной платы. Следует отметить, что другие исследуемые материалы также проявляют высокие теплоотводящие свойства в данной конструкции, но имеют в среднем на 3 % большую температуру перегрева на самом кристалле конструкции. Характер распределения тепловых полей без теплоотвода представлен на рис. 4, где наглядно показана эпюра критических мест температурных перегревов.

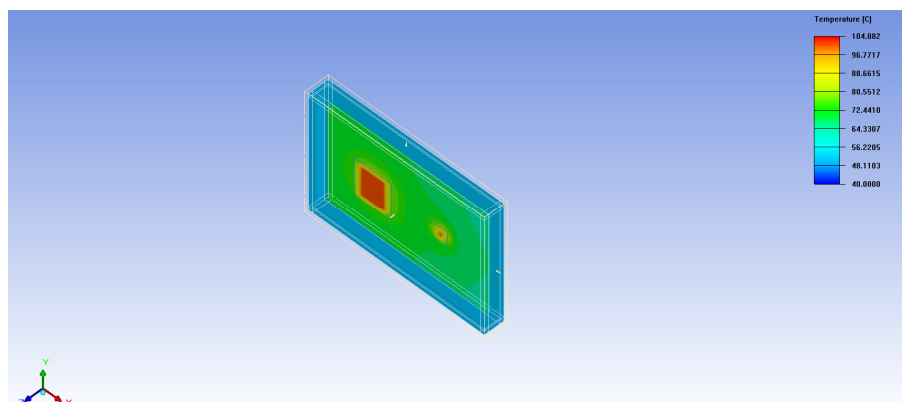
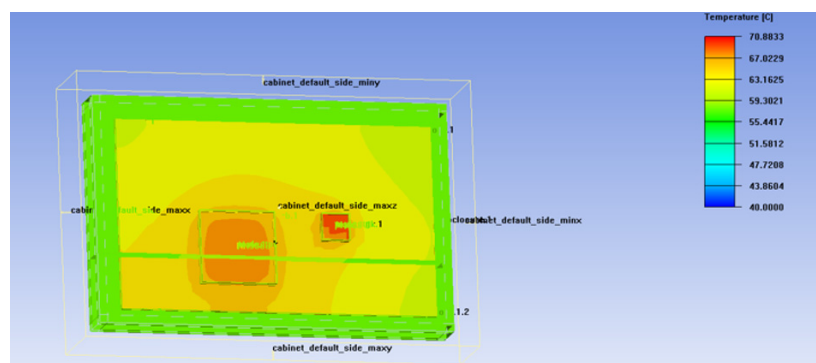
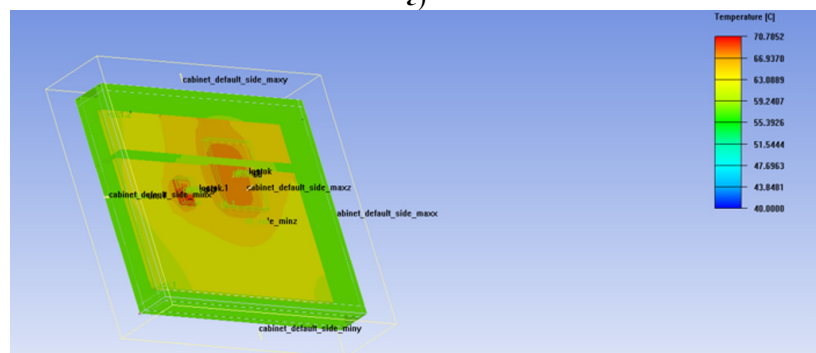


Рис. 4. Результаты расчета тепловых режимов без теплоотвода

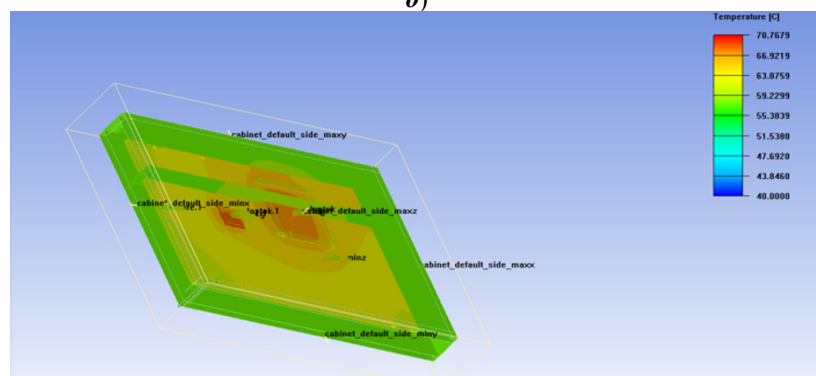
Из рис. 4 следует, что в исследуемом устройстве значения температур микросхем RK3568J и RK809-5 близки к температурам перегрева воздуха, а температура кристалла по техническим условиям выходит за пределы допустимых значений. Для нормализации теплового режима устройства следует обеспечить нормальный отвод тепла от микросхем для предотвращения отказа и выхода их из строя. Для этого проведем моделирование устройства с термопрокладками из различных материалов.



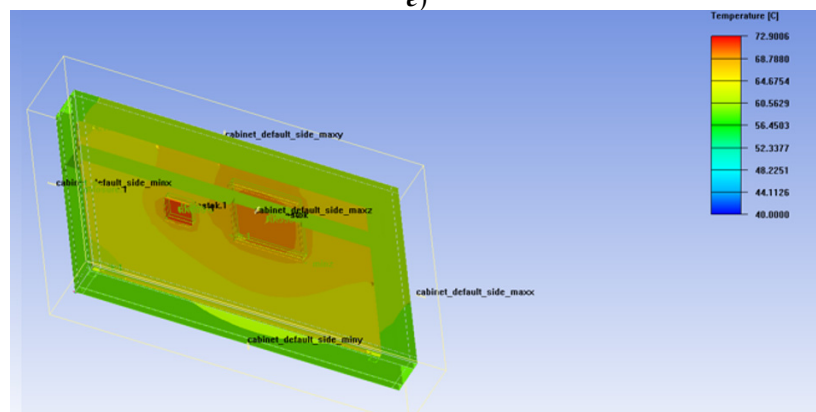
с)



д)



е)



ж)

Рис. 5. Окончание

Анализ диаграммы на рис. 6 показывает, что применение теплоотвода на процессорах RK3568J и RK809-5 в виде теплоотвода из любого из исследуемых материалов позволяет нормализовать тепловой режим всего устройства при повышенных рабочих температурах в условиях агрессивных внешних воздействующих факторов. Но особым преимуществом обладает теплоотвод из арсенида бора.

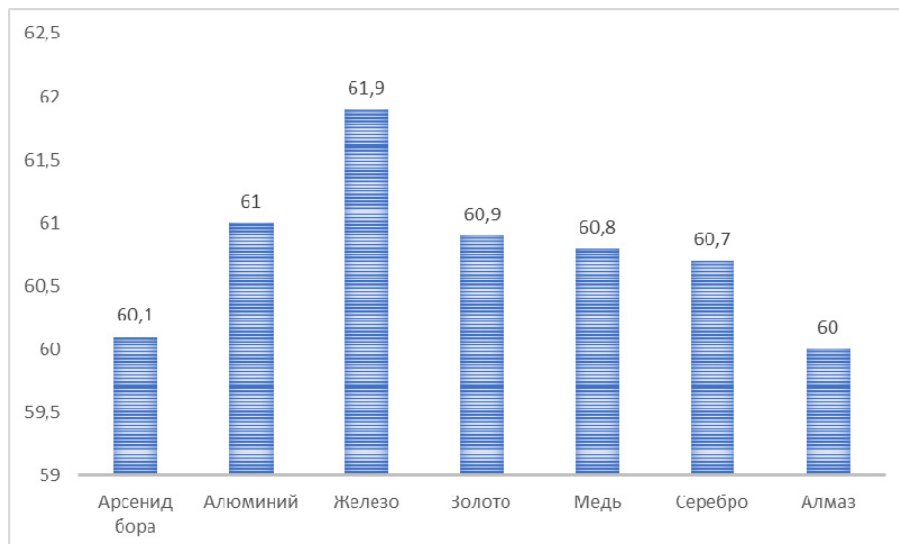


Рис. 6. Сравнительная диаграмма расчета температур перегрева различных материалов

Заключение

В результате проведенных исследований по разработке и оптимизации тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с использованием теплоотвода из различных видов материалов для обеспечения стабильной температуры работы устройств и повышения их надежности были выделены преимущества арсенида бора для использования в качестве теплопроводящего материала.

Также были подтверждены и обобщены теплопроводные характеристики арсенида бора, которые позволяют сделать вывод о предпочтительности использования данного вида материала для теплоотвода в радиоэлектронных устройствах. Высокая теплопроводность арсенида бора играет ключевую роль в обеспечении эффективного охлаждения и поддержании стабильной работы электронных компонентов.

Испытания арсенида бора показали наиболее результативную динамику снижения высоких температур в условиях повышенной нагрузки, что может сделать его востребованным для сложных тепловых систем и высокотехнологичных образцов электронной аппаратуры. Проведенный анализ подчеркивает преимущества арсенида бора перед другими материалами и увеличивает его потенциал в повышении производительности и надежности радиоэлектронной аппаратуры.

Рекомендуются дальнейшие исследование и внедрение арсенида бора в различные электронные устройства с учетом его положительного влияния на

тепловой режим и общего повышения тепловой эффективности радиоэлектронной аппаратуры.

Таким образом, в работе подтверждены выдвинутые научно-технические предложения по использованию арсенида бора, позволяющие оптимизировать тепловые системы радиоэлектронной аппаратуры с теплоотводом из исследуемого материала.

Список литературы

1. Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Степченков О. В. [и др.]. Влияние конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств на эффективность отведения тепла от процессора // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 63–75. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-63-75 EDN: ESKVQE
2. Алдонин Г. М., Алешечкин А. М., Валиханов М. М., Желудько С. П., Тронин О. А. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств. Красноярск : ИПЦ СФУ, 2011. 360 с.
3. Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Ланин В. Л., Левин В. Г. Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов // Доклады БГУИР. 2014. № 4 (82). С. 16–22.
4. Басов К. А. ANSYS и LMSVirtualLab. Геометрическое моделирование. М. : ДМК Пресс, 2006. С. 240.
5. ANSYS Costumer Portal // ANSYS. URL: http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/127/adv_pcb.pdf (дата обращения 03.03.2024).
6. Алхадж Хасан А., Газизов Т. Р. Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 37–51. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-37-51 EDN: ORYUIH
7. Rybakov I. M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models // 2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N. E. Zhukovsky, TSCZh 2022. 2022. P. 50–53.
8. Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Броستيлов С. А., Герасимова Ю. Е. Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 36–45. doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH
9. Иофин А. А., Боков А. С. Конструктивные пути повышения надежности бортовых радиоэлектронных систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 44–49. EDN: FZVUDA
10. Аброськин Н. С., Данилова Е. А., Жумашев Н. Г. Анализ современных средств тепловизионного исследования // Современные информационные технологии. 2017. № 2. С. 639–645.
11. Вершинин Е. А., Кузнецов С. Д., Данилова Е. А. Анализ эффективности термоинтерфейса и контактной площадки в отводе тепла: сравнительное исследование // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 2. С. 72–74. EDN: PTRXQK
12. Горячев Н. В., Лысенко А. В., Петрянин Д. Л., Граб И. Д., Андреев П. Г. Исследование тепловых режимов радиоэлектронных средств // Ульяновский центр трансфера технологий : сб. аннотаций проектов Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа. Ульяновск : УлГТУ, 2009. С. 96–98.

13. Горячев Н. В., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. Методика однокритериального выбора теплоотвода дискретного теплонагруженного электрорадиоизделия // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018) : сб. докладов. СПб., 2018. Т. 1. С. 397–400.
14. Критериальные уравнения теплообмена: расчет теплоотдачи в трубах и каналах. URL: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschet-teplootdachi-v-trubah-i-kanalah?ysclid=lisz04evan563077006> (дата обращения 03.03.2024).
15. Яновский А. А., Каныгин Я. В. Математическое моделирование и разработка систем охлаждения процессоров персональных компьютеров // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3-4. С. 496–498. URL: <https://eduherald.ru/article/view?id=14148> (дата обращения 03.03.2024).

References

1. Piskun G.A., Alekseev V.F., Stepchenkov O.V. et al. The influence of the configuration and shape of the outer ribs of sealed housings of technical means on the efficiency of heat removal from the processor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;26(5):63–75. (In Russ.). doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-63-75 EDN: ES-KVQE
2. Aldonin G.M., Aleshechkin A.M., Valikhanov M.M., Zhelud'ko S.P., Tronin O.A. *Osnovy konstruirovaniya i tekhnologii radioelektronnykh sredstv = Fundamentals of design and technology of radio-electronic means.* Krasnoyarsk: IPTs SFU, 2011:360. (In Russ.)
3. Piskun G.A., Alekseev V.F., Lanin V.L., Levin V.G. Modeling of temperature distribution in current-carrying elements of integrated circuits as a result of exposure to electrostatic discharges. *Doklady BGUIR = Proceedings of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.* 2014;(4):16–22. (In Russ.)
4. Basov K.A. *ANSYS i LMSVirtualLab. Geometricheskoe modelirovanie = ANSYS and LMSVirtualLab. Geometric modeling.* Moscow: DMK Press, 2006:240. (In Russ.)
5. ANSYS Costumer Portal. *ANSYS.* Available at: http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/127/adv_pcb.pdf (accessed 03.03.2024).
6. Alkhadzh Khasan A., Gazizov T.R. Comparison of measured frequency responses of printed circuit boards with modal redundancy before and after failure at different temperatures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = University proceedings of Russia. Radioelectronics.* 2023;26(2):37–51. (In Russ.). doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-37-51 EDN: ORYUIH
7. Rybakov I.M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models. *2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2022.* 2022:50–53.
8. Rybakov I.M., Lysenko A.V., Brostilov S.A., Gerasimova Yu.E. Information-measuring and control system for thermophysical modeling of electronic equipment parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(2):36–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH
9. Iofin A.A., Bokov A.S. Design methods for increasing the reliability of onboard electronic systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2022;1:44–49. (In Russ.). EDN: FZVUDA
10. Abros'kin N.C., Danilova E.A., Zhumashev N.G. Analysis of modern means of thermal imaging research. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies.* 2017;(2):639–645. (In Russ.)

11. Vershinin E.A., Kuznetsov S.D. et al. Analysis of thermal interface and contact pad efficiency in heat dissipation: comparative study. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;2:72–74. (In Russ.). EDN: PTRXQK
12. Goryachev N.V., Lysenko A.V., Petryanin D.L., Grab I.D., Andreev P.G. Studying thermal conditions of radio electronic equipment. *Ulyanovskiy tsentr transfera tekhnologii: sb. annotatsiy projektov Molodezhnogo innovatsionnogo foruma Privolzhskogo federal'nogo okruga = Ulyanovsk Center for Technology Transfer: collection of abstracts of projects of the Volga Federal District Youth Innovation Forum*. Ulyanovsk: UIGTU, 2009:96–98. (In Russ.)
13. Goryachev N.V., Rybakov I.M., Yurkov N.K. Methodology of single-criteria selection of heat sink for discrete heat-loaded electronic radio products. *XXI Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM-2018): sb. dokladov = The 21st International conference on soft computing and measurements (SCM-2018): collected reports*. Saint Petersburg, 2018;1:397–400. (In Russ.)
14. *Kriterial'nye uravneniya teploobmena: raschet teplootdachi v trubakh i kanalakh = Heat transfer criteria equations: calculation of heat transfer in pipes and channels*. (In Russ.). Available at: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschet-teplootdachi-v-trubah-i-kanalah?ysclid=lisz04evan563077006> (accessed 03.03.2024).
15. Yanovskiy A.A., Kanygin Ya.V. Mathematical modeling and development of cooling systems for personal computer processors. *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2015;(3-4):496–498. (In Russ.). Available at: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14148> (accessed 03.03.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of design
and production of radio equipment,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Илья Михайлович Рыбаков

кандидат технических наук, доцент
кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rybakov_im@mail.ru

Ilya M. Rybakov

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of design and production of radio
equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Егор Андреевич Вершинин

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: egor.vershinin2011@yandex.ru

Egor A. Vershinin

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 30.05.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.07.2024

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024