

Фотоэлектроника

УДК 621.383.4/5

Конструкция многоплощадочного фотоприемника с термоэлектрическим охладителем

Г. А. Аракелов, В. Р. Магнушевский, В. Н. Сивенкова,
И. М. Троицкий, Г. А. Казанцев

Государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"», Москва, Россия

Разработана конструкция газонаполненного 64-площадочного фотоприемника (ФП) на основе PbSe с двухкаскадным термоэлектрическим охладителем (ТЭО). В стационарном режиме работы ТЭО с потребляемой мощностью 3,3 Вт (ток питания 1,0 А) обеспечивает при температуре окружающей среды 18 °С охлаждение фоточувствительного элемента на уровне -50 °С. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена взаимосвязь оптимальных рабочих характеристик ТЭО и величины теплового сопротивления теплосбрасывающего радиатора.

Конструкция макетного образца 64-площадочного ФП представлена на рис. 1. Фоточувствительный элемент (ФЧЭ) 1 смонтирован на теплопоглощающей поверхности двухкаскадного ТЭО (2), который своей тепловыделяющей поверхностью припаян к медному цоколю 3. Контроль температуры охлаждения ФЧЭ осуществляется с помощью резистивного термодатчика (ТД) 4, размещенного на торце теплопоглощающей поверхности.

Внутренний объем прибора ограничивают, кроме цоколя 3, следующие детали: коваровая подставка 5, токовыводная керамическая плата 6, изолирующее керамическое кольцо 7, коваровая манжета 8, коваровая крышка 9, входное сапфировое окно 10.

При этом герметичные соединения "цоколь — подставка", "подставка — плата", "плата — кольцо", "кольцо — манжета", "крышка — окно" выполнены с помощью клея на основе эпоксидного компаунда, а герметичное соединение "манжета — крышка" — посредством пайки.

Наиболее важным и оригинальным корпусным элементом рассматриваемого ФП является токовыводная керамическая плата. На одной из ее плоскостей, которая в дальнейшем сопрягается с изолирующим кольцом, предварительно методом фотолитографии сформирован металлизационный рисунок, представляющий собой сеть токоведущих дорожек, к которым внутри объема ФП подпаиваются проволочные выводы 11 ФЧЭ, ТЭО и ТД, а снаружи ФП — два плоских кабеля 12 на полиимидной основе (внешние выводы ФЧЭ) и провода 13 (внешние выводы ТЭО и ТД), объединенные в общий разъем 14. Для обеспечения требуемой величины адгезии (1,5—2 кгс/мм²) материала металлизации к подложке на керамику методом вакуумного осаждения наносилось покрытие "хром—медь—хром", характеризующееся наилучшим сцеплением с поверхностью рассматриваемого материала. Далее по полученному металлизационному подслою гальванически осаждался слой меди толщиной 200 мкм, а затем — припойный материал: сплав "олово—висмут" или

никель толщиной 3 мкм. Указанная технология позволила обеспечить необходимые технические требования к плате по значениям электрического сопротивления изоляции между дорожками (≥ 100 МОм) и электрическому сопротивлению дорожек ($\leq 0,05$ Ом), по которым осуществляется питание ТЭО.

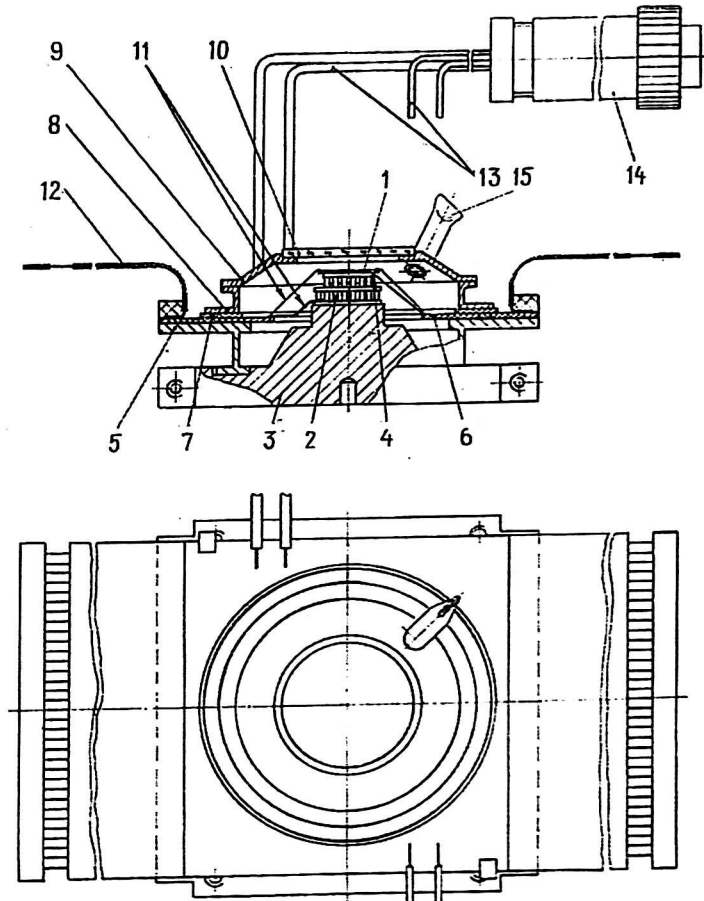


Рис. 1. Общий вид макетного образца 64-площадочного ФП

Предварительное вакуумирование и окончательное заполнение рабочего объема ФП тяжелым инертным газом (ксеноном) осуществляется с помощью медного штенгеля 15, который на заключительной стадии этих технологических процессов перекусывается методом холодного отпая.

Выбор ТЭО для 64-площадочного ФП был осуществлен на основе следующей системы параметров этого изделия:

T_x — температура теплопоглощающей поверхности, °С;

T_r — температура цоколя, °С;

$T_{o.c}$ — температура окружающей среды, °С;

$\Delta T = T_r - T_x$ — текущий перепад температур, °С;

$\Delta T'$ — перепад температур при оптимальных значениях тока и падения напряжения, °С;

ΔT_{max} — максимальный перепад температур при определенной температуре термостабилизации тепловыделяющей поверхности ТЭО, °С;

$\Delta T_3 = T_{o.c} - T_x$ — текущий эффективный перепад температур, °С;

$\Delta T'_3$ — эффективный перепад температур при оптимальных значениях тока и напряжения, °С;

- I — текущее значение тока, А;
 I' — оптимальное значение тока, А;
 I_{\max} — максимальное значение тока при определенной температуре термостабилизации тепловыделяющей поверхности ТЭО, А;
 U — текущее значение падения напряжения, В;
 U' — оптимальное значение напряжения, В;
 U_{\max} — максимальное значение падения напряжения при определенной температуре термостабилизации тепловыделяющей поверхности ТЭО, В;
 W — потребляемая электрическая мощность, Вт;
 P — рассеиваемая тепловая мощность, Вт;
 Q — текущее значение холодопроизводительности, Вт;
 Q_{\max} — максимальное значение холодопроизводительности при определенной температуре термостабилизации тепловыделяющей поверхности ТЭО, Вт;
 Q_0 — тепловая нагрузка на ТЭО, Вт;
 Z — добротность термоэлектрического материала (ТЭМ), $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 e — коэффициент термоЭДС ТЭМ, мВ/ $^{\circ}\text{C}$;
 κ — коэффициент теплопроводности ТЭМ, Вт/(см $\cdot^{\circ}\text{C}$);
 σ — коэффициент электропроводности ТЭМ, 1/(Ом $\cdot\text{см}$);
 α — коэффициент теплоотдачи от радиатора ТЭО к окружающей среде, Вт/(см $^2\cdot^{\circ}\text{C}$);
 F — площадь радиатора ТЭО, см 2 ;
 R_p — тепловое сопротивление радиатора ТЭО, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
 τ_T — тепловая чувствительность ТЭО, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
 τ — время работы ТЭО, с, мин, ч.

Рассмотрение конкретных электрических и теплотехнических характеристик ТЭО неразрывно связано с международной практикой технической сертификации этих изделий и основывается на фиксации так называемых максимальных параметров, а именно ΔT_{\max} , I_{\max} , U_{\max} и Q_{\max} .

Физический смысл максимальных параметров вытекает из следующих рассуждений. Действительно, в зависимости от величины тепловой нагрузки на ТЭО возможна реализация перепадов температур в диапазоне $\Delta T = 0 - \Delta T_{\max}$. При этом, соответственно, режим $\Delta T = 0$ регистрируется, когда $Q_0 = Q_{\max}$, а режим $\Delta T = \Delta T_{\max}$ при $Q_0 = 0$. В то же время при прочих равных условиях реализация режима ΔT_{\max} возможна только при некоторых оптимальных значениях тока и падения напряжения, которые и получили обозначения как I_{\max} и U_{\max} . Из-за температурной зависимости $Z = e^2 \sigma / \kappa$, во многом определяющей величину реализуемого перепада температур, сертификация максимальных параметров ТЭО проводится при условии термостабилизации его тепловыделяющей поверхности при определенной температуре T_T . В настоящее время практически все отечественные и зарубежные разработчики рассматриваемого класса приборов указывают значения ΔT_{\max} , I_{\max} , U_{\max} и Q_{\max} при $T_T = 300$ $^{\circ}\text{C}$ и давлении остаточных газов окружающей среды $\leq 10^{-3}$ мм рт. ст., при котором конвективная составляющая тепловой нагрузки на ТЭО практически отсутствует.

Рассматривая максимальные электрические и теплотехнические параметры ТЭО, необходимо, тем не менее, заметить, что эксплуатация этих изделий осуществляется, как правило, при некоторых текущих значениях тока $I < I_{\max}$ и падения напряжения $U < U_{\max}$. С теплотехнической точки зрения такие режимы питания ТЭО обуславливаются тем, что в реальной оптоэлектронной аппаратуре всегда имеются весьма жесткие ограничения по сбросу тепла с тепловыделяющей поверхности ТЭО, которая вследствие этого

перегрета относительно $T_{o.c}$. Это, в свою очередь, уменьшает предельные возможности ТЭО в части снижения температуры T_x относительно температуры $T_{o.c}$. Величина перегрева $T_r - T_{o.c}$, безусловно, зависит от степени эффективности теплосбрасывающего радиатора и величины P . В аналитическом виде для радиатора, контактирующего с тепловыделяющей поверхностью ТЭО, справедлива следующая зависимость*:

$$\alpha F = P / (T_r - T_{o.c})$$

или

$$(T_r - T_{o.c}) / P = 1 / \alpha F. \quad (1)$$

Левая часть уравнения (1) представляет собой не что иное, как параметр R_p , который в нашем случае указывает на величину изменения температуры тепловыделяющей поверхности ТЭО при увеличении тепловой мощности на 1 Вт.

Проводя теплотехнический анализ системы "ТЭО + радиатор", можно сформулировать следующее положение: пока при сколь угодно малых увеличениях мощности $P (\Delta P \rightarrow 0)$ приращение разности температур $\Delta(\Delta T) = \Delta(T_r - T_x)$ не будет меньше приращения разности температур $\Delta(\Delta T_1) = \Delta(T_r - T_{o.c})$, настоящая система является продуктивной, т. е. при прочих равных условиях будет происходить рост $\Delta T_3 = T_{o.c} - T_x$. В математической форме это условие можно записать в виде $d \Delta T / dP = d \Delta T_1 / dP$. Поскольку функция $d \Delta T_1 / dP$ носит линейный характер, т. е. отношение $\Delta(\Delta T_1) / \Delta P$ остается постоянным, не зависящим от P , то

$$d \Delta T / dP \geq R_p. \quad (2)$$

Выражение (2) имеет очень важное значение для правильного выбора оптимальных параметров энергопитания ТЭО I' и U' при использовании самых различных теплосбрасывающих радиаторов. Именно во взаимосвязи с величинами I' и U' становится возможным реальное обоснование достижимого значения T'_x , а также $\Delta T'_3$. Величина последнего параметра, как правило, представляет наибольший практический интерес для потребителей ТЭО.

Исходными техническими требованиями для выбора ТЭО являлись следующие:

объект охлаждения — подложка из фотостекла с размерами $7,7 \times 4 \times 0,3$ мм³ и длиной ФЧЭ 6,4 мм;

T_x (при $T_{o.c} = 20$ °С) = $-40 \div -50$ °С;

$U \leq 3$ В;

$W \leq 3$ Вт;

$R_p \sim 3$ °С/Вт.

Ориентируясь на каталог фирмы RMT Ltd (Москва), для охлаждения 64-площадочного ФП был выбран ТЭО со следующими характеристиками:

количество каскадов	2
сечение ветви термоэлемента, мм ²	0,6x0,6
количество термоэлементов:	
в верхнем каскаде	12
в нижнем каскаде	31
размеры, мм ² :	
теплопоглощающей поверхности	4x6
тепловыделяющей поверхности	10x8
высота, мм	4,1
I_{max} , А	1,2

* Термоэлектрические охладители/ Э. М. Лукишкер, А. Л. Вайнер, М. Н. Сомкин, В. Ю. Володагин/Под ред. А. Л. Вайнера — М.: Радио и связь, 1983. — 176 с.

U_{max} , В 3,7
 Q_{max} , Вт 1,3
 ΔT_{max} , °С 96

На рис. 2 приведены типовые нагрузочные функции $\Delta T = f(I)$; $\Delta T = f(U)$ и $\Delta T = F(Q)$ для выбранного ТЭО.

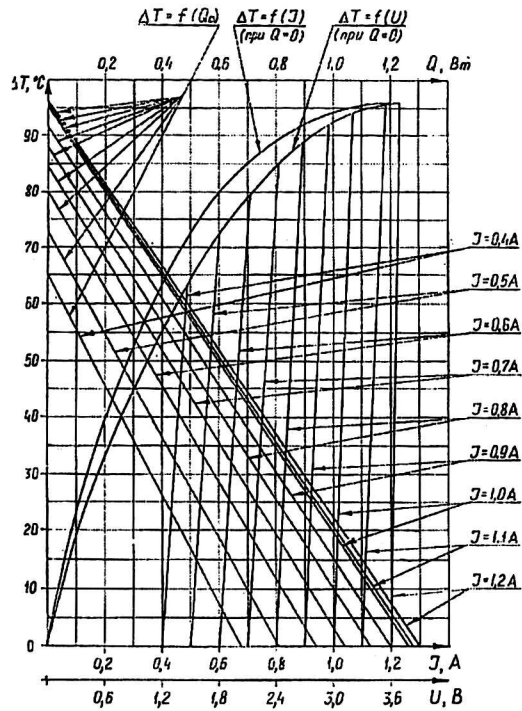


Рис. 2. Типовые нагрузочные функции ТЭО

Испытания ТЭО проводились в составе ФП при его установке на тепло-сбрасывающий радиатор (через теплопроводную пасту КПТ-8) с расчетным значением $R_p = 3$ °С/Вт (общий вид радиатора приведен на рис. 3) при естественно-конвекционном способе охлаждения. Температура T_x фиксировалась с помощью ТД, температура T_r — с помощью дифференциальной медь-константановой термопары, установленной на цоколе ТЭО. Измеренное сопротивление токопроводящих проводников к ТЭО составляло 0,43 Ом.

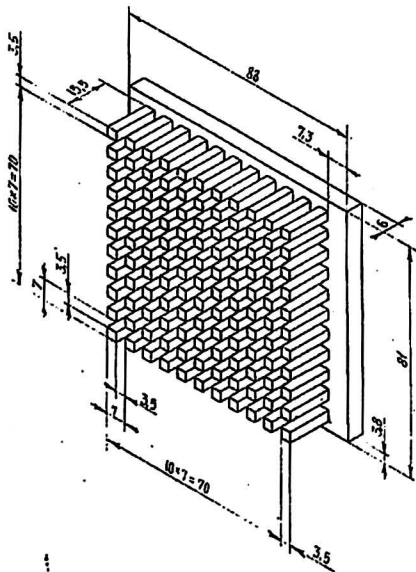


Рис. 3. Общий вид радиатора:
 материал — сплав Д16; масса — 0,184 кг;
 площадь теплосброса — 354,13 см²;
 количество штырей — 121 шт.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Анализ временных температурных характеристик ТЭО в составе испытуемого газонаполненного ФП позволяет выделить следующие стадии его работы:

I стадия (0—43 с) — резкое увеличение значений ΔT_3 , ΔT ; реализация наиболее низких значений T_x ; незначительное увеличение T_r ;

II стадия (43 с — 60 мин) — постепенное уменьшение значения ΔT_3 и повышение значений ΔT , T_x и T_r ;

III стадия (60—80 мин) — относительная стабилизация, характеризующаяся практически неизменными значениями ΔT_3 , ΔT и T_x , стабильными или малоизменяющимися значениями T_r ;

IV стадия (80—160 мин) — постепенное увеличение значения ΔT_3 , ΔT и уменьшение значений T_x при стабильных или малоизменяющихся значениях T_r ;

V стадия (>160 мин) — более глубокая стабилизация (по сравнению со стадией III), характеризующаяся стабильными или малоизменяющимися значениями ΔT_3 , ΔT , T_x и T_r .

Разница между значениями T_3 , зафиксированными на III и V стадиях, достигает 3,23 °С. Одной из наиболее вероятных причин такого хода временных температурных характеристик ТЭО, начиная с IV стадии, является вымораживание так называемых "легких" газовых фракций (двуокись серы, фреоны 12, 22, 115, хлор, аммиак, пропан и т. д.), попавших в прибор при его заполнении тяжелым инертным газом-ксеноном. Не исключено, что примененный для заполнения изделий ксенон сам не отличается высокой степенью чистоты.

2. Критерием определения оптимальных электрических режимов питания ТЭО, установленного на теплосбрасывающем радиаторе с определенным значением R_p , являются значения ΔT_3 , которые реализуются при длительной работе изделия, когда не наблюдаются сколь-либо существенные изменения текущих значений T_r и происходит стабилизация T_x (стадии III и V работы ТЭО). Испытания показали, что $0,93 \text{ А} < I' < 1,0 \text{ А}$; $3,150 \text{ В} < U' < 3,395 \text{ В}$ и $64,58 \text{ °С} < \Delta T_3' < 66,49 \text{ °С}$.

3. При изменении ориентации прибора из положения "входное окно — вверх" в положение "входное окно — вниз" происходят уменьшение значения $\Delta T_3'$ и соответствующее увеличение значения T_x примерно на 1,1 °С. При возвращении прибора в первоначальное положение происходит восстановление ранних значений $\Delta T_3'$ и T_x . Таким образом, положение прибора "входное окно — вверх" является более предпочтительным.

Возможной причиной такого эффекта может являться изменение направлений конвекционных потоков газа при варьировании ориентацией прибора.

4. Установлено, что при $T_{o.c} = 18 \text{ °С}$ термостабилизация прибора наступает, когда $T_r = 31,75 \text{ °С}$. При этом $I = 1,0 \text{ А}$, $U = 3,295 \text{ В}$ и $\Delta T = 80,6 \text{ °С}$. В то же время из справочных данных поставщика ТЭО известно, что при $I = 1,0 \text{ А}$ и нулевом уровне теплопритоков $\Delta T = 94 \text{ °С}$, а $\tau_T = 0,074 \text{ °С/мВт}$. Тепловая нагрузка Q_o на ТЭО в составе ФП по результатам эксперимента определяется как $(94 - 80,6)/0,074 = 181 \text{ мВт}$. При этом величину теплопритоков к ТЭО за счет теплопроводности выводов ФЧЭ и термодатчика можно оценить по формуле Фурье

$$Q_{\text{пр}} = n S \lambda_{\text{ср}} \Delta T_3 / l,$$

где n — количество выводов, шт.;

S — площадь поперечного сечения вывода, м²;

$\lambda_{\text{ср}}$ — среднее значение коэффициента теплопроводности материала в интервале температур ΔT_3 , Вт/(м·°С);

l — длина вывода, м.

Тогда для выводов ФЧЭ (материал: платина; проволока $\varnothing 20$ мкм, $n = 66$ шт., $S = 314 \cdot 10^{-12}$ м², $\lambda_{\text{ср}} = 75,15$ Вт/(м·°С), $\Delta T_3 = 66,85$ °С, $l = 9,6 \cdot 10^{-3}$ м) $Q_{\text{пр}} \sim 11$ мВт, а для выводов термодатчика (материал: никель, проволока $\varnothing 50$ мкм, $n = 2$ шт., $S = 1962,5 \cdot 10^{-12}$ м², $\lambda_{\text{ср}} = 22,15$ Вт/(м·°С), $\Delta T_3 = 66,85$ °С, $l = 9,6 \cdot 10^{-3}$ м) $Q_{\text{пр}} \sim 1$ мВт. Таким образом, суммарный теплоприток к ТЭО за счет теплопроводности выводов ФЧЭ и термодатчика составляет 12 мВт, а за счет излучения и конвекционных потоков газа (ксенон) — $181 - 12 = 169$ мВт.

5. Как известно, рассеиваемая тепловая мощность ТЭО определяется по формуле

$$P = W + Q_0.$$

Тогда в режиме термостабилизации

$$P = 1,0 \times 3,295 + 0,181 = 3,476 \text{ Вт},$$

а экспериментальная величина теплового сопротивления радиатора R_p составит

$$R_p = (T_T - T_X) / P = (31,75 - 18) / 3,476 = 3,956 \text{ °С/Вт}.$$

6. Рассмотрим, насколько точно соответствуют экспериментальные значения $Q_0 = 0,181$ мВт, $\Delta T = 80,6$ °С, $P = 3,476$ Вт и $R_p = 3,956$ °С/Вт их теоретической численной взаимосвязи, вытекающих из логических построений, сформулированных ранее. Для этого, используя зависимости $\Delta T = f(I)$, $\Delta T = f(U)$ и $\Delta T = f(Q_0)$ (см. рис. 2), а также метод графического дифференцирования, построим зависимости $\Delta T = f(P)$ и $R_p = f(P)$ при $Q_0 = 0,181$ мВт (рис. 4). Тогда значению $R_p = 3,956$ °С/Вт (точка А) будут соответствовать $P = 4,1$ Вт (точка В) и $\Delta T = 81,75$ °С (точка С).

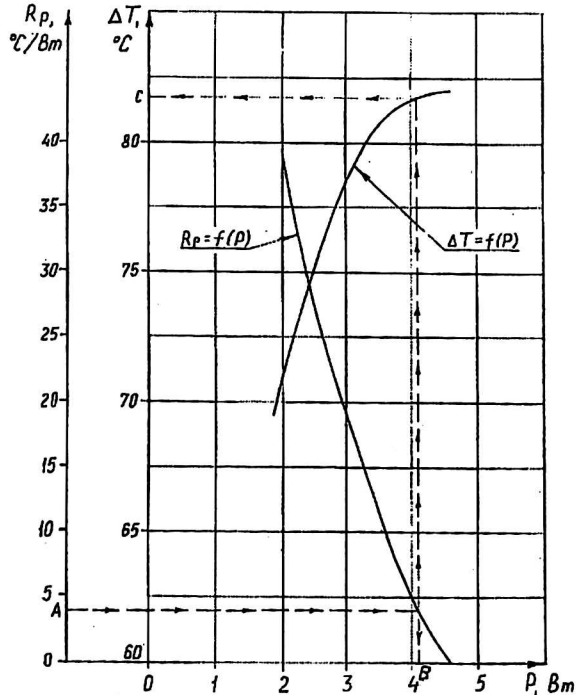


Рис. 4. Графики взаимных зависимостей текущих перепадов температур, рассеиваемых тепловых мощностей ТЭО и тепловых сопротивлений радиатора при тепловой нагрузке на ТЭО $Q_0 = 0,181$ Вт

Можно сделать вывод, что экспериментальные и теоретические значения Q_0 , ΔT , P и R_p достаточно хорошо соответствуют друг другу. Некоторые различия между ними, очевидно, можно объяснить как наличием дополнительного перегрева тепловыделяющей поверхности ТЭО относительно температу-

ры цоколя, так и отличающимися друг от друга значениями Q_0 при различных величинах T' .

Multiarea photodetector with thermoelectric cooler

*G. A. Arakelov, V. R. Magnushevskiy, V. N. Sivenkova,
I. M. Troitskiy, G. A. Kazantsev*
State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

Construction of a gas filled 64-area photodetector based on PbSe with a two-stage thermoelectric cooler (TEC) was developed. In a stationary operation mode TEC with 3.3 V power consumption (power current is 1.0 A) provides cooling a photosensitive element to -50 °C at the environment temperature of 18 °C. Interconnection of optimal operating TEC characteristics and a value of heat resistance of a heat-sink is theoretically motivated and experimentally confirmed.