

# СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОТЕРЬ НА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕПЛОПЕРЕХОДАХ МНОГОКАСКАДНЫХ ТЭ МОДУЛЕЙ

Драбкин И.А.<sup>2</sup>, Ершова Л.Б.<sup>1</sup>, Громов Г.Г.<sup>1</sup>, Дашевский З.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «РМТ», Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт Химических Проблем Микроэлектроники, Москва, Россия

<sup>3</sup> Ben-Gurion University, Beer-Sheva, Israel  
тел: +7-095-132-6817 факс: +7-095-132-5870  
e-mail: [rmtcom@dol.ru](mailto:rmtcom@dol.ru) <http://www.rmtltd.ru>

## 1. Введение

Основное препятствие, не позволяющее достигать расчетных в одномерном (1D) приближении разностей температур  $\Delta T$  на многокаскадных термоэлектрических (ТЭ) модулях, связано с пирамидальностью конструкции модулей. Так как температура в центре теплоперехода под вышерасположенным каскадом оказывается больше температуры на краю теплоперехода, ветви ТЭ модуля на краях теплоперехода работают менее эффективно. Значит, менее эффективным оказывается и работа ТЭ модуля в целом. Явление подобных двумерных (2D) потерь тем существеннее, чем больше тепловое сопротивление  $R_t$  промежуточного теплоперехода между каскадами.

Снизить величину  $R_t$  можно тремя способами: 1) применением для теплоперехода материала с большей теплопроводностью; 2) оптимизацией толщины теплоперехода; 3) оптимизацией конструкции ТЭ модуля. Первое решение порой является слишком дорогостоящим. Второй вариант анализировался в работе [1], где было показано, что такой способ ограничен компромиссом между 1D- и 2D-решениями. Третий вариант кратко обсуждался в работе [2] на примере параллельно-последовательного соединения каскадов в ТЭ модулях, но математического обоснования такой идеи приведено не было.

Цель данной работы – рассмотреть способ уменьшения величины  $R_t$  и, соответственно, 2D потерь с помощью конструктивных изменений ТЭ модуля как при последовательном, так и при параллельном соединении каскадов. Математическая методика [3] позволяет сделать это. В работе приводятся расчетные оценки, подтверждающие эффективность оптимизированных таким образом модулей.

Введем необходимые определения. Под *температурными потерями*  $\delta T$  на промежуточном теплопереходе ТЭ модуля будем понимать разность температуры теплоперехода, усредненной по площади контакта с

тепловыделяющим каскадом, и температуры, усредненной по площади всего теплоперехода. Определим *геометрический фактор* ветви ТЭ модуля как отношение  $s/L$ , где  $s$  – сечение ветви, а  $L$  – ее высота.

Математическое моделирование ТЭ модулей будем проводить в режиме максимального холодильного коэффициента, то есть в оптимальном режиме [4].

## 2. Способы уменьшения температурных потерь на теплопереходах

Будем считать, что нумерация каскадов начинается с самого холодного. Его тепловыделения являются тепловой нагрузкой для второго каскада и так далее. Минимальные тепловые потери обеспечиваются в тех случаях, когда геометрические размеры  $i$ -ого теплоперехода оказываются больше размеров  $(i-1)$ -теплоперехода на величину не более двух толщин самого теплоперехода. Приблизить величину площади последующего теплоперехода к площади предыдущего, можно только за счет увеличения плотности теплового потока холодопроизводительности  $i$ -ого каскада.

Рассмотрим последовательное соединение каскадов. Рост холодопроизводительности  $i$ -ого каскада может достигаться как за счет изменения геометрии ветвей, так и за счет увеличения плотности их монтажа – коэффициента заполнения. При последовательном соединении каскадов переход от ветвей одного сечения к меньшему сечению при сохранении фактора  $s/L$  вообще не требует никаких изменений в согласовании каскадов по току. При этом плотность холодопроизводительности  $i$ -ого каскада растет, кроме того, уменьшение сечения ветвей может сопровождаться уменьшением зазоров между ними, что влечет дополнительное увеличение плотности тепловых потоков. Оптимальный ток для  $i$ -ого каскада в режиме максимального холодильного коэффициента  $\varepsilon$  равен:

$$I_{\varepsilon i} = \frac{\alpha_i \Delta T_i}{R_i (M_i - 1)}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – термоэдс материала,  $\Delta T$  – разность температур на каскаде,  $R$  – сопротивление ветви,  $M = \sqrt{1 + Z T_{av}}$ , где  $Z$  – ТЭ эффективность материала и  $T_{av}$  – средняя температура, индекс  $i$  указывает номер каскада.

Если с ростом номера каскада перейти к материалам с меньшей величиной  $\alpha$  и, соответственно, с большей  $\sigma$ , то, так как при этом  $\alpha \sigma$  возрастает, для сохранения  $I_{\varepsilon}$  придется увеличивать высоту ветви  $L$ . Это несколько снизит оптимальную холодопроизводительность  $q_{\varepsilon 0}$  ветви:

$$q_{\varepsilon 0 i} = I_{\varepsilon i}^2 R_i M_i \varepsilon_i, \quad (2)$$

но это уменьшение можно компенсировать плотностью монтажа ветвей.

Рассмотрим двухкаскадный ТЭ модуль. Без учета температурных потерь на промежуточном теплопереходе он должен обеспечивать  $\Delta T_{\max 1D} = 85.1$  К от 300 К при тепловой нагрузке 0.6 Вт. Параметры материалов, использованных в расчете, даны в таблице 1. Зазор между ветвями 0.8 мм, размер промежуточной керамики  $21.6 \times 21.6$  мм<sup>2</sup>, а размер холодного теплоперехода 1-ого каскада и теплового контакта между 1-ым и 2-ым каскадами  $10.8 \times 10.8$  мм<sup>2</sup>. Центры симметрии 1-ого и 2-ого каскадов совпадают. Толщина теплоперехода 1 мм, его теплопроводность 28 Вт/мК ( $Al_2O_3$ ). Коэффициент заполнения 2-ого каскада 0.308.

Таблица 1

Расчетные параметры двухкаскадного модуля

№ каскада	$\alpha$ , мкВ/К	$\sigma$ , Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	$\kappa$ , Вт/мК	Габариты ветви, мм <sup>3</sup>	Число ветвей
1	240	690	1.45	1x1x1.5	36
2	210	910	1.5	1x1x2.1	144

Распределение температур по поверхности теплоперехода между каскадами вдоль прямой, проходящей через центр симметрии параллельно одной из сторон каскада, рассчитанное в соответствии с методом, предложенном в работе [3], дано на рис. 1.

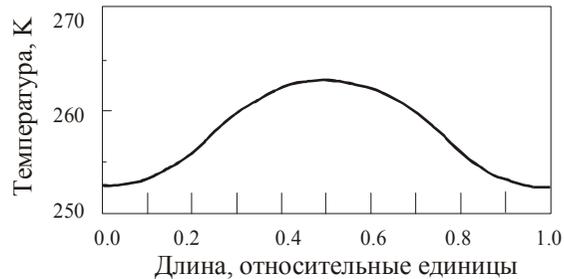


Рис.1. Распределение температур на промежуточном теплопереходе 2-каскадного модуля по линии, проходящей через центр модуля параллельно его стороне

Из рис. 1 видно, что температура в центре промежуточного теплоперехода модуля превышает температуру на краях этого теплоперехода более чем на 10 К. Величина температурных потерь для случая на рис. 1 составляет 6.3 К, и этот перегрев не позволяет получить расчетную разность температур на ТЭ модуле: вместо  $\Delta T_{\max 1D} = 85.1$  К получаем лишь  $\Delta T_{\max 2D} = 80.8$  К, что на 4.3 К меньше. На рис. 2 наглядно

иллюстрируется эффект температурных потерь в диапазоне рабочих токов данного модуля при нагрузке 0.6 Вт.

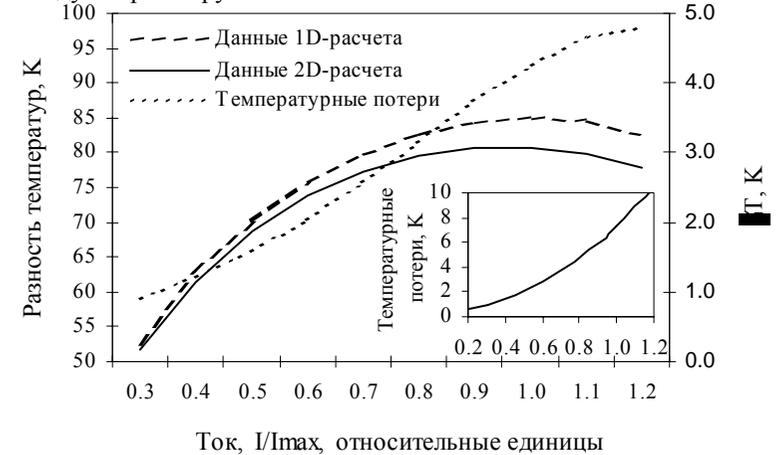


Рис.2. Зависимость разностей температур  $\Delta T_{1D}$  и  $\Delta T_{2D}$  от тока без учета и с учетом 2D-потерь для рассматриваемого ТЭ модуля. Величина  $\delta T$  определяется как  $\delta T = \Delta T_{1D} - \Delta T_{2D}$

Если бы теплопереход имел теплопроводностью 170 Вт/мК ( $AlN$ ), то температурные потери были бы существенно меньше: всего 1 К.

Перейдем во 2-ом каскаде к ветвям  $s=0.7 \times 0.7$  мм<sup>2</sup> и  $L=1$  мм. То есть изменение значения  $s/L$  составляет менее 3%. Зазоры между ветвями уменьшим до 0.4 мм. Площадь промежуточного теплоперехода уменьшится до  $13.2 \times 13.2$  мм, а коэффициент заполнения станет 0.406. Распределение температур вдоль того же направления, что и на рис. 1, дает теперь рис.3.

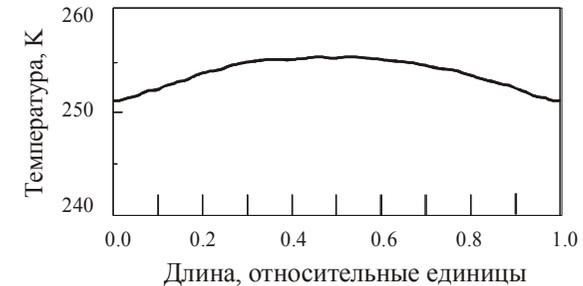


Рис.3. Распределение температур вдоль того же направления, что и на рис. 1, но для уменьшенного сечения ветвей

Видно значительное выравнивание температуры вдоль поверхности теплоперехода. Температурные потери стали составлять всего 1.2 К, то есть эффект получился такой же, как при замене в исходном модуле керамики  $Al_2O_3$  на керамику AlN.

Таким образом, переход к ветвям с меньшим сечением и более высокими коэффициентами заполнения позволяет значительно снизить температурные потери при последовательном питании ветвей – см. рис. 4.

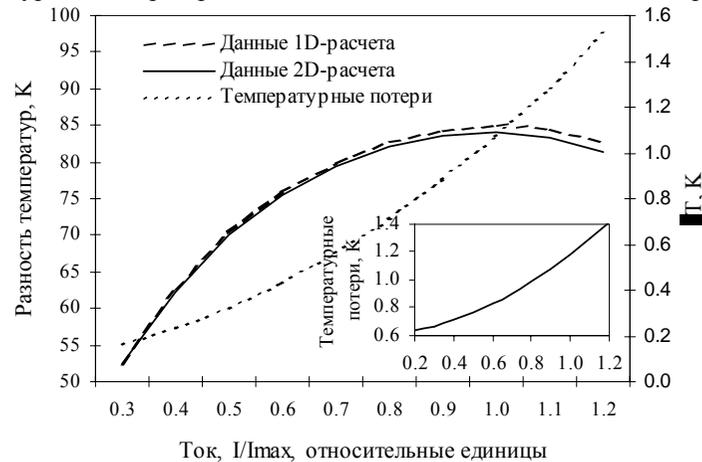


Рис.4. Зависимость разностей температур  $\Delta T_{1D}$  и  $\Delta T_{2D}$  от тока без учета и с учетом 2D потерь для оптимизированной конструкции рассматриваемого ТЭ модуля.  $\delta T = \Delta T_{1D} - \Delta T_{2D}$ .

Тот же эффект достигим и при параллельном питании каскадов. При этом оптимальное напряжение на ветви не зависит от ее геометрии:

$$U_{\epsilon i} = \frac{\alpha_i \Delta T_i M_i}{M_i - 1}. \quad (3)$$

Оптимальная холодопроизводительность ветви  $q_{0\epsilon}$  обратно пропорциональна ее сопротивлению:

$$q_{0\epsilon i} = \frac{U_{\epsilon i}^2 \epsilon_i}{R_i M_i}, \quad (4)$$

Видно, что переход к материалам с большей электропроводностью при росте номера каскада увеличивает холодопроизводительность ветви.

Напряжение на каскадах  $U_i$  задает число ветвей в них. В 1-ом каскаде, после того как определена геометрия ветви, необходимая холодопроизводительность обеспечивается количеством ветвей  $n_1$ , а

$U_1 = U_{\epsilon 1} n_1$ . Напряжение питания 2-ого каскада равно напряжению питания 1-ого, а число ветвей в каскаде определяется как:

$$n_2 = \frac{U_{\epsilon 1} n_1}{U_{\epsilon 2}} \quad (5)$$

Оставляя 1-ый каскад прежним (таблица 1) и используя для 2-ого каскада ТЭ материал в соответствии с данными таблицы 1, получаем, что во 2-ом каскаде необходимо иметь 36 ветвей. С помощью формулы (4) находим отношение  $s/L = 2.5$  мм. Если ветвь имеет сечение  $1.4 \times 1.4$  мм<sup>2</sup> и зазоры между ветвями остались прежними (0.8 мм), то размеры теплоперехода будут такими же, как и в случае последовательного питания каскадов:  $13.2 \times 13.2$  мм<sup>2</sup>. При этом коэффициент заполнения равен 0.52, а высота ветви составляет 0.8 мм. Это обеспечит приблизительно такое же распределение температур по поверхности промежуточного теплоперехода, как и на рис. 3, а следовательно, и снизит температурные потери и увеличит эффективность ТЭ модуля – см рис. 4.

### 3. Заключение

Проведенное рассмотрение показывает, что использование комбинированных схем коммутации каскадов многокаскадных холодильных модулей, а также оптимизация геометрии и термоэлектрического материала ветвей по каскадам позволяют получать заметный (порядка нескольких градусов) выигрыш в эффективности охлаждения, так как снижают двумерные температурные потери на промежуточных теплопереходах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Semeniouk V.A., Bezverkhov D.B. "Modeling and Minimization of Intercascade Thermal Resistance in Multistage Thermoelectric Cooler," Proc. ICT '97', Dresden, pp. 701-704
2. Semeniouk V.A. "Advances in Development of Thermoelectric Modules for Cooling Electro-Optic Components," Proc. ICT '03', La Grande Motte, pp. 631-636
3. Drabkin I.A., Yerzhova L.B., Kondratiev D.A., Gromov G.G. The Effect of the Substrates Two-Dimensional Temperature Distribution on the TEC Performance. Proc. of VIII European Workshop on Thermoelectrics, Poland, Kraków, 2004.
4. Лукишкер Э.М., Вайнер А.Л., Сомкин М.Н., Водолагин В.Ю. Термоэлектрические охладители. Москва, "Радио и связь", 1983, 175.