

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОТЕРЬ НА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕПЛОПЕРЕХОДАХ МНОГОКАСКАДНЫХ ТЭ МОДУЛЕЙ

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

¹ ЗАО «РМТ», Москва, Россия

² Институт Химических Проблем Микроэлектроники, Москва, Россия

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

1. Введение

Основное препятствие, не позволяющее достигать расчетных в одномерном (1D) приближении разностей температур ΔT 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_i промежуточного теплоперехода между каскадами.

Снизить величину R_i 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_i 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* δT 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 ε равен:

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

где α – термоэдс материала, ΔT – 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 α и, соответственно, с большей σ , то, так как при этом $\alpha \sigma$ возрастает, для сохранения I_{ε} 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 21.6×21.6 мм², а размер холодного теплоперехода 1-ого каскада и теплового контакта между 1-ым и 2-ым каскадами 10.8×10.8 мм². 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	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	κ , Вт/мК	Габариты ветви, мм ³	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.

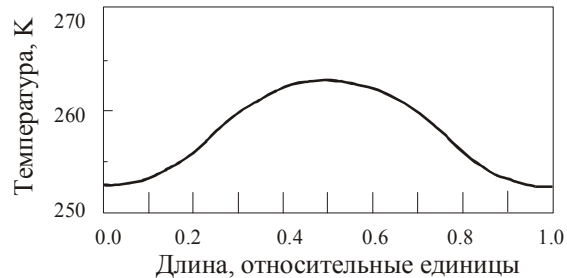


Рис.1. Распределение температур на промежуточном теплопереходе 2-каскадного модуля по линии, проходящей через центр модуля параллельно его стороне

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.

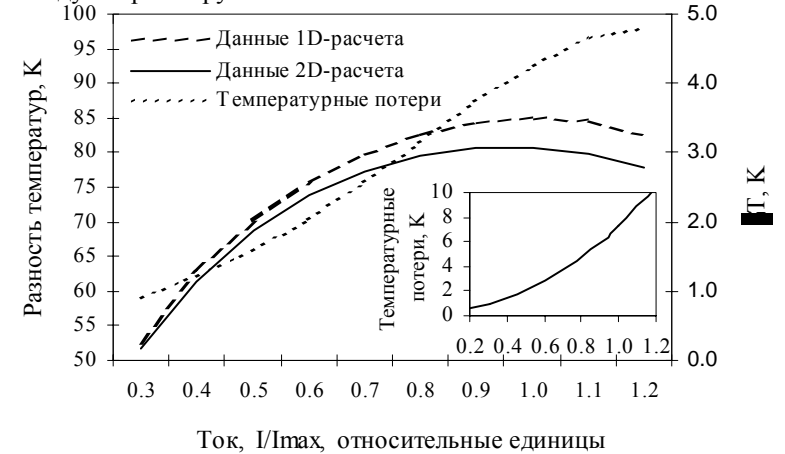


Рис.2. Зависимость разностей температур ΔT_{1D} и ΔT_{2D} от тока без учета и с учетом 2D-потерь для рассматриваемого ТЭ модуля. Величина δT определяется как $\delta T = \Delta T_{1D} - \Delta T_{2D}$

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 $s=0.7 \times 0.7$ мм² 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 13.2×13.2 мм, а коэффициент заполнения станет 0.406. Распределение температур вдоль того же направления, что и на рис. 1, дает теперь рис.3.

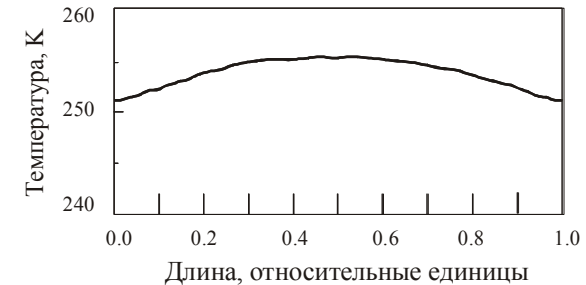


Рис.3. Распределение температур вдоль того же направления, что и на рис. 1, но для уменьшенного сечения ветвей

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.

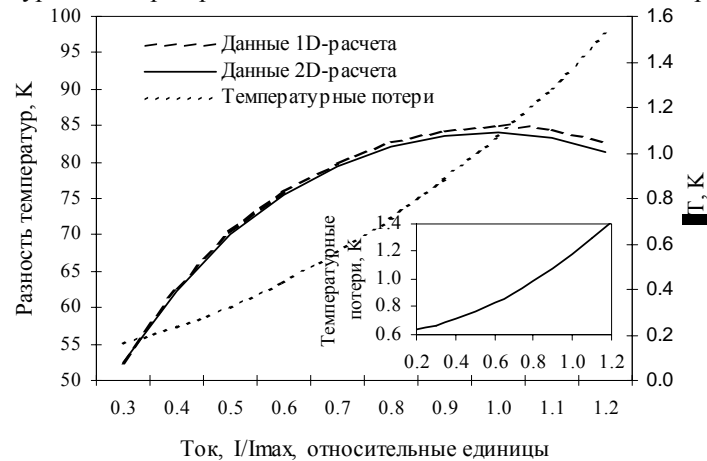


Рис.4. Зависимость разностей температур ΔT_{1D} и ΔT_{2D} от тока без учета и с учетом 2D потерь для оптимизированной конструкции рассматриваемого ТЭ модуля. $\delta T = \Delta T_{1D} - \Delta T_{2D}$.

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 1.4×1.4 мм² и зазоры между ветвями остались прежними (0.8 мм), то размеры теплоперехода будут такими же, как и в случае последовательного питания каскадов: 13.2×13.2 мм². 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.