

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, к. ф.-м. н. Л. Н. ВИХОР

Украина, г. Черновцы, Ин-т термоэлектричества НАНУ
E-mail: vikhor@fromru.com

Дата поступления в редакцию
05.02 2002 г.

Оппонент д. т. н. А. Л. ВАЙНЕР
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПЕРЕХОДОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЕРЕПАД МНОГОКАСКАДНОЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ

Исследовано влияние распределения температуры в межкаскадных теплопереходах из различных материалов на полный перепад температур, создаваемый термоэлектрическим охладителем.

Потребность в достаточно эффективных многокаскадных термоэлектрических батареях охлаждения возникает в ряде областей измерительной и электронной техники [1, с. 339—341]. Методам расчета таких термобатарей и исследованию влияния различных факторов на их основные характеристики посвящены работы [2—4]. Оценка поправок, вносимых в характеристики термоэлектрических охладителей (ТЭО) этими различными факторами, проводится здесь на основе приближенных аналитических методов расчета многокаскадных охладителей. Это оказало эффективное влияние на развитие теории каскадных ТЭО.

Пример подхода к оптимизации каскадного ТЭО с учетом современных возможностей компьютерной техники демонстрируется в [5]. Такой подход получил свое дальнейшее развитие в работе [6] для случая использования в каскадных ТЭО неоднородных термоэлектрических материалов. Однако в [5, 6] учет влияния межкаскадных теплопереходов сводится к поправке общего перепада температур на величину фиксированного перепада температур на керамических пластинах. Такое приближение обусловлено используемой здесь одномерной моделью для расчета ТЭО. Его можно считать вполне удовлетворительным на этапе решения такой сложной задачи как проектирование оптимального каскадного ТЭО. После этого целесообразно уточнить характеристики спроектированного модуля охлаждения, учитывая как можно более точно влияющие на них факторы. При этом следует ориентироваться на разработку численного метода расчета.

Настоящая работа посвящена численному решению задачи теплопроводности для многокаскадного ТЭО, количественному анализу распределения температуры в межкаскадных теплопереходах из традиционно используемых материалов и исследованию зависимости температуры охлаждения от параметров этих теплопереходов.

Модель N -каскадного охладителя, используемая для расчета, представлена на рис. 1. Ввиду того, что области теплопереходов I и II находятся при различных граничных условиях, то в теплопере-

ходах возникает не только продольная (вдоль оси z) компонента градиента температуры, но и две поперечные. Этот факт приводит к трехмерной зависимости температуры в теплопереходах от координат x, y, z . Из конструктивных соображений поверхности каскадов термобатарей чаще всего имеют квадратную форму. В этом случае, учитывая, что коэффициенты теплопроводности материалов теплопереходов и каскадов — изотропные величины, решение трехмерной задачи теплопроводности вводом цилиндрических координат приближенно можно свести к двумерной, т. к. температура не зависит от угловой переменной.

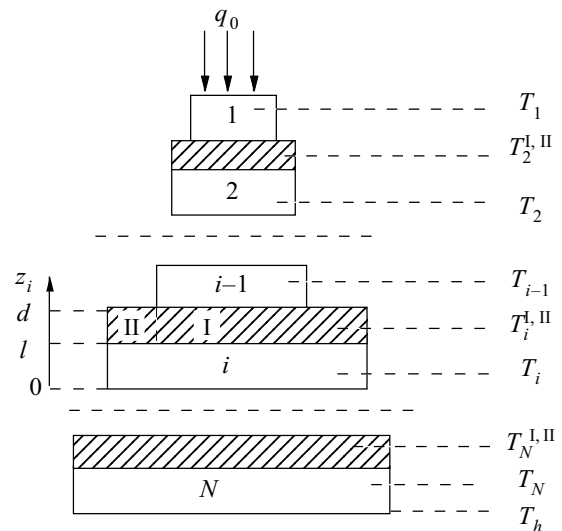


Рис. 1. Модель N -каскадного ТЭО

Ввиду сделанных предположений стационарное распределение температур $T_i^{I,II}(r, z_i)$ в областях теплопереходов I и II задается системой уравнений Лапласа в цилиндрических координатах

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T_i^{I,II}(r, z_i)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i^{I,II}(r, z_i)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_i^{I,II}(r, z_i)}{\partial z_i^2} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, N, \quad (1)$$

причем в уравнении для области I координата r изменяется в интервале $0 < r < R_{i-1}$, а для области II $R_{i-1} < r < R_i$, $l < z_i < d$, где d — высота теплоперехода; l — высота термоэлементов; R_i — радиус теплоперехода i -го каскада.

Распределение температуры в n - и p -ветвях термоэлементов каждого каскада $T_i^{n,p}(z_i)$ можно при-

нять одномерным, зависящим только от координаты вдоль высоты ветвей, и задать уравнением теплопроводности с источниками тепла Джоуля и Томсона в виде

$$\frac{d}{dz_i} \kappa(T) \frac{dT_i}{dz_i} + jT_i \frac{d\alpha(T)}{dT} \frac{dT_i}{dz_i} + \frac{j^2}{\sigma(T)} = 0 \Bigg\}_{n,p}, \quad i=1, \dots, N, \quad (2)$$

где $0 < z_i < l$, параметры термоэлектрического материала термоэдс $\alpha(T)$, теплопроводность $\kappa(T)$, электропроводность $\sigma(T)$ являются функциями температуры, j — плотность тока питания в ветвях термоэлементов. В (2) для n - и p -типов ветвей под j и α подразумеваются их абсолютные значения.

Плотности тепловых потоков на тепловыделяющих (q^h) и теплопоглощающих (q^c) спаях термоэлементов i -го каскада определяются выражениями

$$q_i^h = \sum_{n,p} \left[-\kappa \frac{dT_i}{dz_i} - \alpha j T_i - j^2 r_0 \right]_{z_i=0}; \quad (3)$$

$$q_i^c = \sum_{n,p} \left[-\kappa \frac{dT_i}{dz_i} - \alpha j T_i + j^2 r_0 \right]_{z_i=l}, \quad (4)$$

где r_0 — величина контактного сопротивления.

Для определения характеристик охлаждения систему дифференциальных уравнений (1), (2) необходимо решить при выполнении следующих граничных условий:

1) баланс тепла на теплопоглощающих спаях первого каскада

$$q_0 = -q_1^c, \quad (5)$$

где q_0 — плотность тепловой нагрузки на ТЭО, которая создается охлаждаемым объектом;

2) условия теплообмена на поверхности теплопереходов $z_i = d$:

$$\begin{aligned} \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^I}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=d} &= -q_{i-1}^h, \quad 0 < r < R_{i-1}; \\ \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^{II}}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=d} &= H(T_a - T_i^{II}(r, d)), \quad R_{i-1} < r < R_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где κ_{cer} — коэффициент теплопроводности материала теплоперехода;

H — коэффициент теплообмена с окружающей средой;

T_a — температура окружающей среды;

3) тепловой баланс в области контакта теплопоглощающих спаев термоэлементов i -го каскада с поверхностями теплопереходов $z_i = l$:

$$\begin{aligned} \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^I}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=l} &= -q_i^c, \quad 0 < r < R_{i-1}; \\ \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^{II}}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=l} &= -q_i^c, \quad R_{i-1} < r < R_i; \end{aligned} \quad (7)$$

4) условия равенства температур на теплопоглощающих и тепловыделяющих спаях термоэлементов:

$$\begin{aligned} T_i^n(l) = T_i^p(l) = T_i^I(r, l), \quad 0 < r < R_{i-1}; \\ T_i^n(l) = T_i^p(l) = T_i^{II}(r, l), \quad R_{i-1} < r < R_i; \\ T_{i-1}^n(0) = T_{i-1}^p(0) = T_i^I(r, d), \quad R_{i-1} < r < R_i; \end{aligned} \quad (8)$$

5) условия адиабатической изоляции боковой поверхности теплоперехода и отсутствия поперечного теплового потока на оси его симметрии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i^{II}}{\partial r} \Bigg|_{r=R_i} &= 0, \quad l < z_i < d; \\ \frac{\partial T_i^I}{\partial r} \Bigg|_{r=0} &= 0, \quad l < z_i < d; \end{aligned} \quad (9)$$

6) непрерывность теплового потока и равенство температур на поверхности раздела областей теплоперехода I и II:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i^I}{\partial r} \Bigg|_{r=R_{i-1}} &= \frac{\partial T_i^{II}}{\partial r} \Bigg|_{r=R_{i-1}}, \quad l < z_i < d; \\ T_i^I(R_{i-1}, z_i) &= T_i^{II}(R_{i-1}, z_i), \quad l < z_i < d \end{aligned} \quad (10)$$

(условия (6) — (10) должны быть записаны для $i = 2, \dots, N$);

7) условия термостатирования (T_h) тепловыделяющих спаев последнего каскада —

$$T_N^n(0) = T_N^p(0) = T_h. \quad (11)$$

Система дифференциальных уравнений (1) и (2) с граничными условиями (5) — (11) может быть эффективно решена численно с помощью метода конечных разностей [7].

Суть метода заключается в построении разностной схемы для системы исходных уравнений с учетом граничных условий. Значения производных, входящих в уравнения (1), (2) и в граничные условия, выражаются через значения функций в узлах двумерной сетки, построенной в рассматриваемой области, в результате чего получается система алгебраических уравнений, называемая разностной схемой.

Компьютерное решение этой системы позволяет определить значения сеточных функций в узлах сетки, которые приближенно считаются равными значениям искомых функций.

Предложенный численный метод использован для расчета распределения температуры в межкаскадных теплопереходах и в ветвях термоэлементов четырехкаскадного ТЭО для фотоприемника, который имеет следующую конструкцию: высота ветвей термоэлементов $l = 0,14$ см, площадь поперечного сечения $0,07 \times 0,07$ см, зазор между кристаллами $0,04$ см, количество термоэлементов в каскадах $n_1 = 6$, $n_2 = 11$, $n_3 = 26$, $n_4 = 64$. Величина коэффициента теплообмена соответствовала работе ТЭО в вакууме порядка $10^{-2} \div 10^{-3}$ мм рт. ст., сопротивление контактов принималось равным $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², температура тер-

мостабилизации тепловыделяющих спаев $T_h=300$ К, тепловая нагрузка со стороны охлаждаемого объекта составляла 80 мВт.

Исследовалось распределение температур в межкаскадных теплопереходах различной толщины, выполненных из окиси бериллия, нитрида алюминия и керамики ВК96. Цель исследований – количественно оценить перепад температуры на теплопереходах из этих материалов и его влияние на температуру охлаждения.

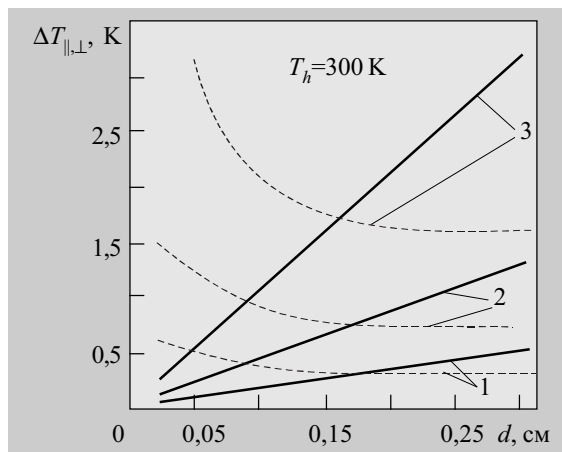


Рис. 2. Зависимости продольного $\Delta T_{||}$ (сплошные линии) и поперечного ΔT_{\perp} (пунктирные линии) градиентов температуры от высоты теплопереходов из разных материалов: 1 — окись бериллия; 2 — нитрид алюминия; 3 — керамика ВК96

Примеры зависимостей продольного $\Delta T_{||} = T_2^I(0, d) - T_2^I(0, l)$ и поперечного $\Delta T_{\perp} = T_2^{II}(R_1, d) - T_2^{II}(R_2, d)$ градиентов температуры от высоты d теплоперехода между первым и вторым каскадами ТЭО для различных материалов приведены на рис. 2. Расчет показывает, что поперечный и продольный перепады температуры в керамических пластинах между каскадами сравнимы по величине, а значит, в равной мере влияют на снижение общего перепада температур ТЭО. При типичной толщине керамических пластин 1—2 мм перепады температуры на теплопереходах из окиси бериллия и нитрида алюминия не превышают 1 К, а на керамике ВК96 достигают 2 К. Эти значения могут быть рекомендованы в качестве исходных данных для учета потерь в перепаде температуры в керамических пластинах при проектировании оптимальных конструкций каскадных ТЭО.

В силу того, что с ростом высоты теплопереходов продольный градиент растет, а поперечный падает, существует оптимальная высота, при которой полный перепад температуры, обеспечиваемый ТЭО данной конструкции, достигает максимального значения. Этот результат иллюстрируется зависимостью температуры охлаждения $T_c \equiv T_1(l)$ от высоты теплопереходов (рис. 3). Оптимум приходится на высоту теплопереходов, приблизительно равную 0,2 см. Результаты показывают, что в случае теплопереходов из материалов с высокой теплопроводностью (окись бериллия, нитрид алюминия) изменение высоты в интервале

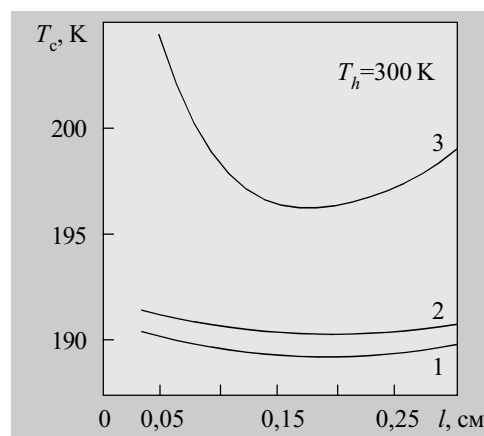


Рис. 3. Зависимости температуры охлаждения T_c от высоты теплопереходов из разных материалов: 1 — окись бериллия; 2 — нитрид алюминия; 3 — керамика ВК96

0,05—0,3 см не приводит к заметному уменьшению полного перепада температуры ТЭО. Для керамики пластин ВК96 этот интервал сужается до 0,1—0,25 см. Глубина охлаждения существенным образом зависит от теплопроводности материала теплопереходов. Расчетная температура охлаждения ТЭО при использовании теплопереходов из окиси бериллия составляет 189 К. Замена этой керамики на нитрид алюминия повысит эту температуру приблизительно на 1 К, а применение ВК96 — на 7 К.

Проведенный количественный анализ влияния теплопереходов на температуру охлаждения может быть использован при разработке новых конструкций каскадных ТЭО для электронной аппаратуры. Предлагаемый уточненный метод расчета характеристик каскадного ТЭО фиксированной конструкции может быть полезен при поиске новых нетрадиционных материалов как для термоэлементов, так и для теплопереходов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Справочник по инфракрасной технике. Т. 3. Приборная база ИК-систем / Под ред. У. Волф, Г. Цисис.— М.: Мир, 1999.
2. Бурштейн А. И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств.— М.: Физматгиз, 1962.
3. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода.— М.: Сов.радио, 1976.
4. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства.— К.: Наукова думка, 1979.
5. Анатычук Л. И., Семенюк В. А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов.— Черновцы: Прут, 1992.
6. Anatyshuk L. I., Luste O. J., Vikhor L. N. Optimal functions as effective method for thermoelectric devices design / In Proceedings of the 15 International Conference on Thermoelectrics.— Pasadena, CA USA, March 26 — 29, 1996.— P. 223 — 226.
7. Турчак Л. И. Основы численных методов. — М.: Наука, 1987.