

К. ф.-м. н. Л. Н. ВИХОР, Р. Г. ЧЕРКЕЗ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества
E-mail: vikhori@ukr.net

Дата поступления в редакцию
22.01 2004 г.

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Холодильный коэффициент предлагаемых охладителей в 2—3 раза выше, чем у однородных монолитных термоэлементов.

В системах обеспечения тепловых режимов электронной, медицинской и другой компактной аппаратуры часто используются жидкости и газы. Для охлаждения таких потоков широко применяются термоэлектрические батареи из термопарных элементов, выполненных из однородных полупроводниковых материалов.

Обычно передача тепла от теплоносителя (жидкости или газа) осуществляется в теплообменнике, расположенном непосредственно на теплопоглощающей поверхности термоэлектрической батареи. При этом охлаждаемый теплоноситель, как правило, движется в контуре теплообменника вдоль холодных спаев термоэлементов [1]. Такие конструкции охладителей, использующие схему взаимодействия термоэлементов с охлаждаемым объектом только через поверхность спаев, наиболее распространены в настоящее время. Их энергетическая эффективность ограничена двумя основными факторами — качеством термоэлектрических материалов и потерями в перепаде температуры из-за теплового сопротивления теплообменника.

Общеизвестны и пути повышения энергетической эффективности термоэлектрического охлаждения, основанные на принципиально новых физических подходах.

Во-первых, это применение для ветвей термоэлементов неоднородных или, как их принято называть, функционально-градиентных материалов (ФГМ) вместо однородных материалов, добротность которых, несмотря на многочисленные усилия ученых, остается на уровне критерия Июффе ZT , примерно равного 1. Физическая особенность термоэлементов из таких материалов заключается в использовании для охлаждения не только контактного эффекта Пельтье, имеющего место на спае n - и p -ветвей из однородных материалов, а и объемного эффекта Пельтье [2], возникающего на неоднородностях материала внутри ветвей. Правильный выбор функций неоднородности материала дает повышение энергетической эффективности охлаждения [3—5].

Второй путь связан с улучшением технико-экономических характеристик термоэлектрических батарей

путем организации теплообмена с охлаждаемым теплоносителем не только через поверхность спаев термоэлементов, но и внутри ветвей, в которых имеются поры или капилляры для прокачки через них теплоносителя. Такие термоэлементы часто называют проницаемыми. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что использование термобатарей из таких термоэлементов для охлаждающих устройств дает возможность повысить их холодильный коэффициент в 1,5—2 раза по сравнению с традиционными батареями из монолитных термоэлементов [6].

Таким образом, разработка методов для оптимального проектирования и расчета характеристик проницаемых термоэлементов из ФГМ, в которых реализуются возможности сразу двух указанных путей повышения энергетической эффективности охлаждения, является актуальной и рациональной задачей.

До настоящего времени расчет и оптимизация проницаемых термоэлементов проводились для случая однородного полупроводникового термоэлектрического материала без учета температурных зависимостей его параметров [7, 8]. Поиск оптимальных функций неоднородности термоэлектрических материалов для обычных монолитных охлаждающих термоэлементов успешно проводится методами компьютерного проектирования, разработанными на основе математической теории оптимального управления и ее принципа — максимума Понтрягина [9]. Поэтому целесообразно использовать эти методы и для проектирования проницаемых термоэлементов из ФГМ. Суть задачи оптимального управления состоит в определении функций ФГМ, плотности тока питания и скорости движения теплоносителя в ветвях, при которых достигается наибольший холодильный коэффициент проницаемых термоэлементов.

Для решения поставленной задачи в качестве физической модели выбран проницаемый термоэлемент, используемый для охлаждения потоков теплоносителя (газа или жидкости) за счет его продувки по капиллярам или порам ветвей в направлении от горячих спаев к холодным (рис. 1). Свойства материалов ветвей n - и p -типа проводимости изменяются с координатой x вследствие их зависимости от температуры и неоднородности материала. Температуры горячего (T_h) и холодного (T_c) спаев термоэлемента поддерживаются постоянными. Теплообмен

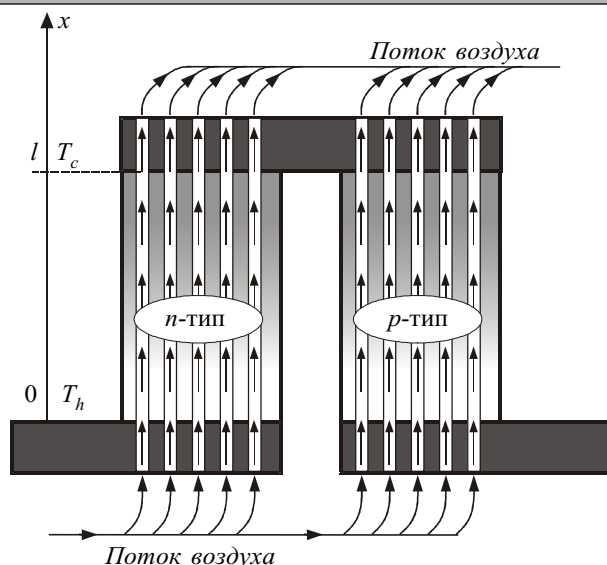


Рис. 1. Модель проникаемого термоэлемента охлаждения

термоэлемента происходит внутри ветвей термоэлемента через поверхности пор или капилляров.

Исходная система дифференциальных уравнений, описывающая тепловые и электрические процессы в бесконечно малой части неоднородной ветви проникаемого термоэлемента, имеет вид [10]

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} = -\frac{\alpha j}{\kappa} T - \frac{j}{\kappa} q; \\ \frac{dq}{dx} = \frac{\alpha^2 j}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + j\rho - \frac{\alpha_T \Pi_k N_k l^2}{(S - S_k)j} (T - t); \\ \frac{dt}{dx} = \frac{\alpha_T \Pi_k N_k l}{V c_p S_k} (T - t), \end{cases} \quad (1)$$

- где T — температура ветви в точке x ;
- x — безразмерная координата, $x=x/l$;
- l — высота веток термоэлемента;
- α, κ, ρ — коэффициенты термо-эдс, теплопроводности и удельного сопротивления, соответственно;
- j — плотность тока $I, j=I/(S-S_k)$;
- I — ток;
- S — площадь поперечного сечения ветви вместе с каналами;
- S_k — площадь поперечного сечения всех каналов;
- q — удельный (отнесенный к силе тока) тепловой поток;
- α_T — коэффициент теплоотдачи;
- Π_k — периметр канала;
- N_k — число каналов;
- t — температура теплоносителя;
- $V=vr_T$ — удельная массовая скорость теплоносителя в канале;
- v — скорость теплоносителя в канале;
- ρ, c_p — плотность и теплоемкость теплоносителя, соответственно.

Коэффициенты термо-эдс α , теплопроводности κ и удельного сопротивления ρ материала являются функциями температуры T и неоднородности материала $\xi(x)$: $\alpha=\alpha(T, \xi(x)), \kappa=\kappa(T, \xi(x)), \rho=\rho(T, \xi(x))$. Функцией $\xi(x)$ может быть концентрация носителей тока, легирующих примесей или иная величина, характеризующая неоднородность термоэлектрической структуры вдоль высоты ветвей термоэлемента.

Отметим, что параметры термоэлектрической среды α, κ, ρ взаимосвязаны. Система этих связей за-

дает некоторую область G_ξ изменения неоднородности ξ . Конкретизируя физическую модель, необходимо задать эти связи (например, в виде теоретических или экспериментальных зависимостей α, κ, ρ от ξ и T) и определить область G_ξ .

Основная цель поставленной задачи оптимального управления — это получение максимального значения холодильного коэффициента проникаемого термоэлемента при фиксированных температурах горячих и холодных спаев и температуры теплоносителя T_a на входе в термоэлемент. Поэтому граничные условия для системы дифференциальных уравнений (1) имеют вид

$$T_{n,p}(0) = T_h; T_{n,p}(l) = T_c; t_{n,p}(0) = T_a. \quad (2)$$

Решение системы уравнений (1) задает распределения температур и теплового потока в материале ветвей и в продуваемом веществе и позволяет вычислить холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c}. \quad (3)$$

Полезная холодопроизводительность Q_c и теплопроизводительность термоэлемента Q_h определяются как

$$Q_c = \sum_{n,p} V c_p S_k (T_a - t(1)); \quad (4)$$

$$Q_h = -(q_n(0) + q_p(0))l \quad (5)$$

и зависят от функций неоднородности термоэлектрических материалов $\xi_{n,p}(x)$, плотности тока в ветвях $j_{n,p}$ и удельной массовой скорости теплоносителя в каналах V .

Задача оптимизации состоит в том, чтобы из множества допустимых управлений $\xi \in G_\xi$ выбрать такие функции неоднородности материалов и одновременно назначить такие значения V и $j_{n,p}$, которые обеспечивают максимальное значение холодильного коэффициента.

Решить поставленную задачу можно используя принцип максимума Понтрягина, в соответствии с которым для получения максимума ε должны выполняться следующие условия.

1. Оптимальные функции $\xi_{n,p}(x)$, характеризующие неоднородность термоэлектрических материалов n - и p -типа, определяются из условия максимума функции Гамильтона (H):

$$\begin{aligned} H_{n,p}(\psi(x), T(x), q(x), t(x), \xi(x), j, V) = \\ = \max_{\xi_{n,p} \in G_\xi} H_{n,p}(\psi(x), T(x), q(x), t(x), \xi, j, V), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$H_{n,p} = (\psi_1 f_1 + \psi_2 f_2 + \psi_3 f_3)_{n,p}, \quad (7)$$

$(f_1, f_2, f_3)_{n,p}$ — правые части уравнений (1), $\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3)_{n,p}$ — вектор импульсов [9, с. 24].

2. Плотность тока должна удовлетворять равенству

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial j_{n,p}} + \int_0^1 \frac{\partial H(\psi, T, q, t, j_n, j_p, V, \xi)}{\partial j_{n,p}} dx = 0. \quad (11)$$

3. Скорость теплоносителя в каналах определяется из уравнения

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial V} + \sum_{n,p} \int_0^1 \frac{\partial H(\psi, T, q, t, j_n, j_p, V, \xi)}{\partial V} dx = 0. \quad (12)$$

Решение задачи оптимального управления реализовано численными методами путем разработки компьютерной программы для проектирования проницаемых термоэлементов из ФГМ.

Приведем результаты расчета холодильного коэффициента проницаемых термоэлементов из функционально-градиентных материалов на основе Вi—Те и сравним их с аналогичными данными, полученными ранее для технологически более простых вариантов термоэлементов — однородных и неоднородных монокристаллических [4], а также однородных проницаемых [10].

Исследования проводились на примере термоэлемента с высотой ветвей 1 см и площадью поперечного сечения 1 см². Проницаемость обеспечивалась при помощи каналов диаметром 0,1 см, плотность расположения которых составляет 25 каналов на 1 см². Температура теплоносителя на входе в пористый термоэлемент T_a принималась равной температуре горячего спаия термоэлемента $T_h=300$ К. Холодильный коэффициент вычислялся для различных температур холодного спаия термоэлемента. Расчеты проводились для двух случаев. В первом случае теплообмен между теплоносителем и материалом ветвей считался идеальным, т. е. коэффициент теплообмена имел граничное значение, при котором теплопередача в каналах проходит при бесконечно малом перепаде температуры. Во втором случае рассматривался реальный проницаемый термоэлемент. Коэффициент конвективного теплообмена внутри термоэлемента принимался равным 0,01 Вт/(см²·К) [7, с. 48].

При расчетах термоэлементов использовались зависимости параметров термоэлектрических материа-

лов на основе Вi—Те от температуры и концентрации носителей, приведенные в [11, с. 66].

Результаты компьютерных расчетов, позволяющие сравнить эффективность работы четырех вариантов термоэлементов при идеальном теплообмене в каналах, приведены на рис. 2. Заметим, что условие идеального теплообмена использовалось с целью более корректного сравнения результатов с холодильными коэффициентами монокристаллических термоэлементов, при расчете которых не учитывались потери на теплообмен между теплоносителем и холодными спаиями.

Как видно, проницаемые термоэлементы по энергетической эффективности значительно превосходят монокристаллические, а при больших перепадах температуры (65—70 К) можно достичь двух- и даже трехкратного роста холодильного коэффициента.

На рис. 3 показан рост холодильного коэффициента монокристаллического и проницаемого термоэлементов при использовании функционально-градиентных материалов вместо наилучших однородных.

Повышение холодильного коэффициента при использовании неоднородных монокристаллических термоэлементов в однокаскадных охладителях становится ощутимым лишь вблизи максимального перепада температуры (65—70 К). Здесь можно получить улучшение на 20—30%. При традиционных для таких батарей рабочих интервалах в 10—50 К применение монокристаллических термоэлементов из ФГМ на основе Вi—Те нецелесообразно.

В отличие от монокристаллического варианта, использование оптимально неоднородных материалов для проницаемых термоэлементов может дать реально ощутимый эффект повышения холодильного коэффициента практически для любого перепада температуры. Применение функционально-градиентных термоэлектрических материалов для проницаемых термоэлементов позволяет дополнительно повысить холодильный коэффициент на 5—20% при небольших перепадах температуры и на 30—40% при граничных ΔT . Такие

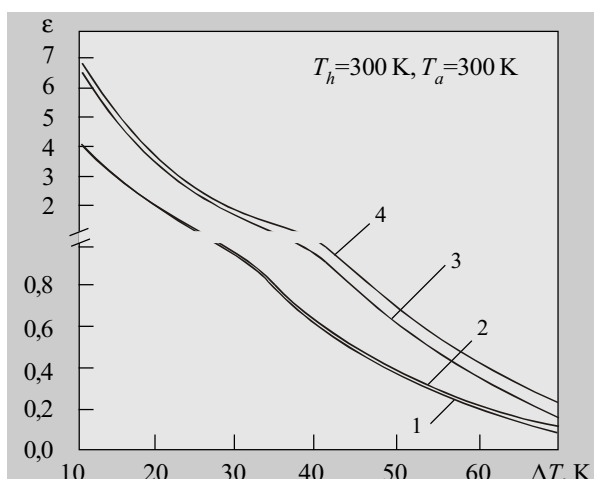


Рис. 2. Зависимость холодильного коэффициента от перепада температуры на термоэлементе при идеальном теплообмене:

1 — оптимально однородный монокристаллический термоэлемент; 2 — монокристаллический термоэлемент из ФГМ; 3 — оптимально однородный проницаемый термоэлемент; 4 — проницаемый термоэлемент из ФГМ

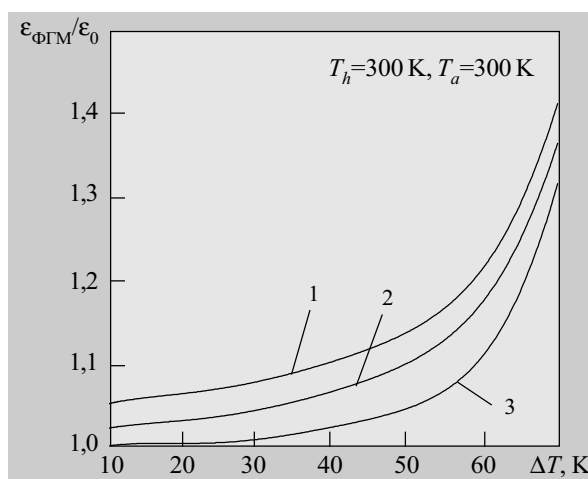


Рис. 3. Рост холодильного коэффициента термоэлемента из ФГМ ($\varepsilon_{\text{ФГМ}}$) относительно его значения для оптимального однородного термоэлемента (ε_0) в зависимости от перепада температуры:

1 — проницаемый термоэлемент с идеальным теплообменом в каналах; 2 — проницаемый термоэлемент с реальным теплообменом; 3 — монокристаллический термоэлемент

данные подтверждают целесообразность использования ФГМ для проницаемых термоэлементов.

Необходимо отметить, что описанный метод проектирования, разработанная компьютерная программа и результаты теоретического анализа холодильного коэффициента справедливы как для термобатарей, у которых каждая ветвь термоэлементов проницаемая (имеет поры или каналы для продувки теплоносителя), так и для термобатарей с монолитными ветвями, между которыми оставлены каналы для прохождения теплоносителя. (В этом случае целесообразно использовать ветви из материалов с оптимальной неоднородностью.)

Теоретическая оценка показала, что энергетическая эффективность проницаемых термобатарей из функционально-градиентных материалов может быть в 2—3 раза выше, чем у традиционно используемых батарей из однородных монолитных термоэлементов. Эти преимущества свидетельствуют в пользу перспективности применения проницаемых термобатарей из функционально-градиентных материалов для компактных кондиционеров и охладителей потоков газов и жидкостей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Каганов М. А., Привин М. Р. Термоэлектрические тепловые насосы.— Л.: Энергия, 1970.

2. Баранский П. И. Объемный эффект Пельтье в германии // ЖТФ.— 1958.— Т. 28, № 2.— С. 225—230.

3. Анатичук Л. И., Семенюк В. А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов.— Черновцы: Прут, 1992.

4. Vikhor L. N. Optimal function as a new step of the thermoelectricity development // J. of Thermoelectricity.— 1996.— № 4.— P. 29—37.

5. Vikhor L. N. The ways of extending competitiveness of thermoelectric cooling // Ibid.— 1999.— № 1.— P. 78—91.

6. Швець Т. Т., Козлюк В. М., Котирло Г. К., Стягов А. С. Перспективи практичного використання термоелектричних генераторів і теплових насосів з розвинутою внутрішньою поверхнею теплообміну // Вісник АН УРСР.— 1981.— № 5.— С. 35—41.

7. Котырло Г. К., Щеголев Г. М. Тепловые схемы термоэлектрических устройств.— Киев: Наукова думка, 1973.

8. Козлюк В. Н., Щеголев Г. М. Термодинамический анализ проницаемых термоэлектрических холодильников / В сб.: Теплофизика и теплотехника.— 1973.— Вып. 25.— С. 96—100.

9. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов.— М.: Наука, 1976.

10. Анатичук Л. И., Вихор Л. М., Черкез Р. Г. Оптимальне керування неоднорідністю напівпровідникового матеріалу для проникних термоелементів охолодження // Термоелектрика.— 2000.— № 3.— С. 46—57.

11. Термоэлектрические охладители / Под ред. А. Л. Вайнера.— М.: Радио и связь, 1983.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

16-19 ноября 2004
 Время работы:
 16-18 ноября 10.00-18.00
 19 ноября 10.00-16.00

Санкт-Петербург
 IV Промышленная
 специализированная выставка



РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Тематика:
 Электронные компоненты
 и комплектующие
 печатные платы материалы
 технологии конструктивы
 приборы оборудование

ОРГАНИЗАТОРЫ ВЫСТАВКИ:
 Выставочное объединение «Ортикон»/«FAREXpo»,
 ООО «ЭкспоТехноком»

Петербургский СКК
 пр. Гагарина, 8 (метро «Парк Победы»)

Тел./факс: 118 3537, 230 3116, 064
www.farexpo.ru/radel.html
 E-mail: radel@orticon.com