

## О составной ветви низкотемпературного термоэлемента

© О.И. Марков

Орловский государственный университет,  
302015 Орел, Россия  
e-mail: Markov@e-mail.ru

(Поступило в Редакцию 10 ноября 2005 г.)

Численным моделированием составной низкотемпературной ветви термоэлемента определено оптимальное соотношение длин составляющих ветви и рассчитан максимальный перепад температуры ветви. Дается качественная интерпретация тепловых процессов в составной ветви.

PACS: 84.60.Rb

Одной из возможностей повысить эффективность термоэлектрических охладителей является использование составных термопар [1,2]. В составном термоэлементе теплота Пельтье поглощается не только в холодном спае, но и в месте соединения составляющих частей ветви и это, утверждается в [1], приводит к дополнительному снижению температуры на холодном спае термоэлемента. Поскольку в месте соединения частей контактное сопротивление приводит к дополнительному выделению теплоты Джоуля, то целесообразно использовать так называемые „градиентные“ ветви с меняющимся по длине ветви составом. Однако создать такие ветви можно не всегда, так как составляющие части ветви могут иметь различную физико-химическую природу, и в таком случае ветви нельзя выполнить в виде одного неоднородного монокристалла. Поэтому составные термоэлементы не потеряли актуальности и могут представлять значительный практический интерес.

С использованием простейших уравнений теплового баланса авторам [1] удалось численно определить кривые зависимости отношения максимальных перепадов температур составного термоэлемента и нижних элементов ветвей от отношения коэффициентов термоЭДС. Расхождение с экспериментом авторы объясняют тем, что для полупроводниковых материалов со значительно отличающимися величинами коэффициентов термоЭДС „не были согласованы свойства и размеры термоэлементов левой и правой ветвей“. Поэтому перед проведением согласования ветвей термоэлемента необходимо оптимизировать свойства каждой ветви в отдельности. Это необходимо сделать также из-за отсутствия симметрии между  $n$ - и  $p$ -ветвями для большинства используемых термоэлектриков. Авторам работы [2] удалось продвинуться несколько дальше по пути развития теории составных термоэлементов, они получили аналитическое выражение для термоэлектрической добротности ступенчатого термоэлемента. Хотя они и не использовали в расчетах температурные зависимости кинетических коэффициентов, но отмечают, „что фактическая температурная зависимость параметров по длине термоэлементов является положительным фактором, способству-

ющим повышению его эффективности“. В связи с этим в исследовании составной ветви необходимо учесть температурную зависимость кинетических коэффициентов.

В последние годы интерес к составным термоэлементам вновь возрос [3,4]. Для расчета составных термоэлементов использованы новые подходы. Так, в [3] сообщается об использовании методов теории оптимального управления для оптимизации составных охладителей без учета температурной зависимости кинетических коэффициентов. В работе [4] предложен метод конечных элементов, позволяющий рассчитать распределение температуры и термоэлектрических свойств вдоль термоэлемента. Работы [1–4] развивают приближенные методы расчета составных термопар, не выясняя причины повышения эффективности в составной термопаре по сравнению с однородной. Действительно, в приведенном выше объяснении не совсем понятна причина роста перепада температур в составной ветви. Если однородные ветви с дифференциальными термоЭДС  $|\alpha_1| < |\alpha_2|$  дают максимальные перепады температур  $\Delta T_1^{\max} < \Delta T_2^{\max}$ , то составная ветвь, на холодном конце которой поглощается  $\alpha_1 T_0 J$ , а на промежуточном контакте  $(\alpha_2 - \alpha_1) T_\xi J$ , создает максимальный перепад  $\Delta T^{\max} > \Delta T_2^{\max}$ . Вызывает сомнение, что относительно малая добавка  $(\alpha_2 - \alpha_1)(T_\xi - T_0)J$  (меньше, по крайней мере, на порядок, чем  $\alpha_1 T_0 J$ ) вызывает заметное снижение температуры.

Данная работа посвящена расчету и оптимизации составной ветви термоэлемента, определению оптимальных длин компонентов ветви, а также выявлению причин увеличения эффекта охлаждения в составной ветви. Особый интерес представляет низкотемпературное термоэлектрическое охлаждение, поэтому в расчете составной ветви использованы экспериментальные данные по наиболее эффективным низкотемпературным термоэлектрикам. В качестве „холодной“ составляющей ветви — монокристалл сплава  $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  (данные автора) с тригональной осью направленной вдоль ветви „горячая“ составляющая —  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y-z}\text{Se}_y\text{S}_z$  с  $x = 0.16$ ,  $y = z = 0.06$  (экспериментальные данные по кинетическим коэффициентам этого соединения заимствованы из [5]). Использование данных материалов

представляет также интерес, поскольку они обладают параметрами, температурные зависимости которых весьма значительно различаются. Экспериментальные зависимости кинетических коэффициентов названных выше термоэлектриков аппроксимировались степенными многочленами. Расчет температурного поля адиабатически изолированной ветви основан на решении граничной задачи

$$\frac{d}{dx} \left( \chi \frac{dT}{dx} \right) + y^2 \rho - yT \frac{d\alpha}{dT} \frac{dT}{dx} = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\chi_1 \frac{dT'}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha_1 y T' \Big|_{x=0}, \quad (2)$$

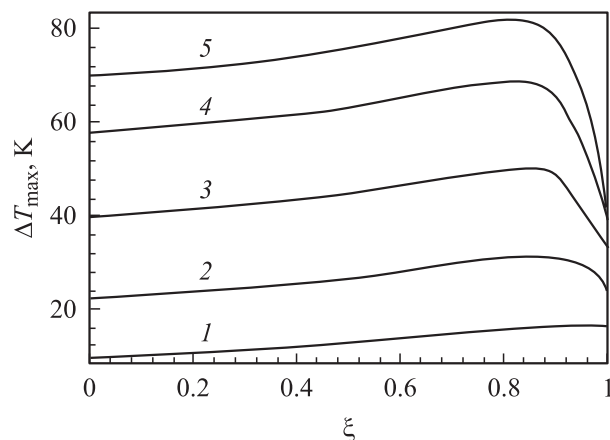
$$\chi_2 \frac{dT''}{dx} \Big|_{x=\xi} - \chi_1 \frac{dT'}{dx} \Big|_{x=\xi} = (\alpha_2 - \alpha_1) y T \Big|_{x=\xi},$$

$$T' \Big|_{x=\xi} = T'' \Big|_{x=\xi}, \quad (3)$$

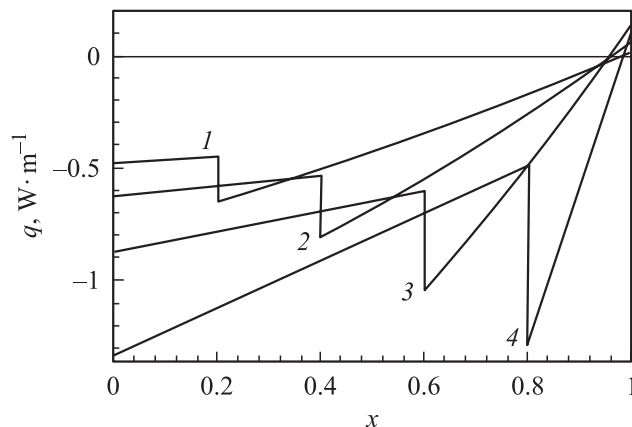
$$T'' \Big|_{x=1} = T_1, \quad (4)$$

где  $T'(x)$  и  $T''(x)$  — распределения температур в „холодной“ и „горячей“ частях ветви,  $y = JI/S$  — удельный ток ветви [6],  $\xi = l_1/l$  — отношение длины „холодной“ части к длине всей ветви, характеризующее положение между частями, составляющими ветвь в относительных единицах. Граничная задача (1–4) решалась численными методами. Одновременно проводилась численная максимализация перепада температуры по удельному току.

Результаты расчета представлены графиками. Кривые распределения температуры (здесь они не приводятся) вдоль ветви качественно согласуются с кривой на рис. 7 [4]. Причем, на „холодном“ участке распределение температуры близко к линейному, а на „горячей“ части ветви напоминает параболу. На рис. 1 представлены зависимости максимального перепада температуры от положения границы, разделяющей составляющие части



**Рис. 1.** Зависимость максимального перепада температуры от положения границ составляющих частей ветви при различных температурах горячего конца ветви:  $T_1 = 100$  К (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4), 300 (5).



**Рис. 2.** Распределение удельного потока вдоль ветви при различных положениях границы раздела составляющих ветви:  $\xi = 0.2$  (1), 0.4 (2), 0.6 (3), 0.8 (4).

ветви. Поведение кривых качественно согласуется с рис. 3 [3]. Однако положение максимумов и характер поведения кривых несколько иные. Для того чтобы понять эти особенности и выяснить причины роста перепада температуры рассмотрим распределение теплового потока вдоль ветви. В качестве характеристики потока использовалась величина  $q = QI/S$  независящая от геометрии ветви, которую можно условно назвать удельным потоком. Знак на графике указывает направление потока. Как видно из рис. 2, по мере приближения промежуточного контакта к горячему концу ветви происходит рост поглощения теплоты Пельтье. При температуре горячего конца ветви 300 К максимум перепада находится вблизи значения  $\xi = 0.8$ , при 250 К  $\xi = 0.82$ , при 200 К  $\xi = 0.85$  и при 150 К  $\xi = 0.9$ . При изменении знака скачка дифференциальных термоЭДС для низких температур максимум на кривой 1 (рис. 1) исчезает. Более высокую эффективность составной ветви можно объяснить тем, что уменьшение доли длины „горячей“ составляющей ветви с большим удельным сопротивлением приводит к уменьшению общего сопротивления ветви, а, следовательно, увеличению оптимального тока ветви (это подтверждается и прямым расчетом оптимального тока). Увеличение тока усиливает эффект Пельтье на границах „холодной“ части ветви, делая выгодным рост ее длины, поскольку в этой части ветви уменьшается доля теплоты Джоуля относительно „горячей“ части. Некоторое увеличение эффекта Пельтье происходит и за счет температурной зависимости термоЭДС составляющих ветви. Дальнейший рост перепада температур по мере приближения к горячему концу ветви границы раздела ограничивается повышением теплопритока из теплообменника. В результате противодействия этих факторов возникает максимум перепада температуры на кривой (рис. 1). Сказанное позволяет понять, почему увеличение перепада наблюдается только тогда, когда удельное сопротивление составляющих ветви растет от холодного конца к горячему. Именно с этим обстоятель-

ством связана возможность повышения термоэлектрической эффективности низкотемпературной составной ветви  $n$ -типа. Для  $p$ -ветви такая возможность пока не реализована, поскольку удельное сопротивление сплавов висмут–сурьма  $p$ -типа резко растет по сравнению с собственными.

Следует отметить, что в проведенном расчете сопротивление переходных контактов не учитывалось, хотя постановка задачи в данном виде позволяет учесть не только сопротивление контакта, но и его температурную зависимость. Использование более двух составляющих ветви, по-видимому, нецелесообразно как из-за увеличения контактных сопротивлений, так и усложнения технологии изготовления и поэтому не рассматривалось.

Итак, проведен численный анализ возможности повышения эффективности  $n$ -ветви низкотемпературного термоэлемента в режиме максимального перепада температуры. Рассмотрена составная ветвь, „холодная“ часть которой представлена сплавом  $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ , а „горячая“ соединением  $n-(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se,S})_3$ . Расчет показал возможность значительного увеличения эффективности ветви термоэлемента в области низких температур. Увеличение перепада температур на составной ветви может составлять 16 при температуре горячего конца ветви 250, 20 при 200 и 28% при 150 К.

Причина роста перепада температуры составной ветви состоит в возможности увеличения силы оптимального тока ветви за счет увеличения длины „холодной“ составляющей ветви с меньшим удельным сопротивлением, что приводит к уменьшению общего сопротивления ветви. Рост тока ветви приводит к положительным результатам: увеличению поглощения теплоты Пельтье на холодном спае ветви и на границе двух составляющих, а также сдвигу этой границы к горячему концу ветви за счет роста разности термоЭДС с повышением температуры: что дополнительно уменьшает теплоприток на холодный конец ветви. В „холодной“ части ветви меньшее удельное сопротивление приводит к выделению относительно меньшего количества теплоты Джоуля, что в совокупности с большей ее теплопроводностью дает распределение температуры близкое к линейному.

## Список литературы

- [1] Семенюк В.А., Нечипорук О.Л. // Изв. вузов. Энергетика. 1976. № 2. С. 105–110.
- [2] Вайнер А.Л., Коломоец Н.В., Лукишкер Э.М., Ржевский В.М. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 3. С. 546–552.
- [3] Semeniouk V.A., Svechnikova T.E., Ivanova L.D. // Proc. of XIV Int. Conf. Thermoelectrics. 1994. P. 485–489.
- [4] Kaliazin A.E., Kuznetsov V.L., Rowe D.M. // Proc. of XX Int. Conf. on Thermoelectrics. 2001. P. 286–292.
- [5] Лукьянова Л.Н., Кутасов В.А., Константинов П.П. // Докл. IX Межгос. семинара „Термоэлектрики и их применения“. СПб., 2005. С. 68–73.
- [6] Марков О.И. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 2. С. 138–140.