

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 150- 300 К

Коржуев М.А., Иванова Л.Д., Свечникова Т.Е., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В., Земсков В.С.
Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова (ИМЕТ) РАН,
Российская Федерация, Москва, 119991, Ленинский просп., д. 49,
E- mail: korzhuev@ultra.imet.ac.ru; ivanova@ultra.imet.ac.ru

Теория *распределенного эффекта Пельтье (РЭП)* показывает, что термоэлементы с неоднородными ветвями имеют повышенную термоэлектрическую добротность Z и могут обеспечивать при охлаждении от комнатной температуры ($T_0 = 300$ К) перепады ΔT на ~ 10 - 20 К большие, чем модули с однородными ветвями [1]. В качестве неоднородных ветвей при экспериментах ранее использовали паянные составные ветви, вырезанные из монокристаллов различного состава параллельно плоскостям спайности (рис.1, а) [2]. В [3] был описан способ получения неоднородных монокристаллических ветвей из *т.н. градиентных* монокристаллов на основе теллуридов Bi и Sb со ступенчатым распределением концентрации носителей тока по длине. Целью настоящей работы было сравнительное исследование в интервале температур 100- 300 К модулей с *однородными, паянными составными* и, полученными в ИМЕТ по методике [3], *градиентными* ветвями. Показано, что использование градиентных ветвей позволяет дополнительно увеличить эффективность работы модулей за счет уменьшения вклада переходных сопротивлений при коммутации.

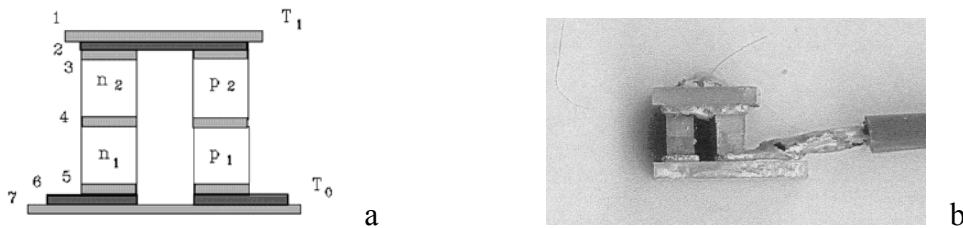


Рис.1. Схема термоэлемента с паянными составными ветвями (а) и общий вид готового модуля (б). n_1 и n_2 , p_1 и p_2 – сегменты n - типа ($Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3$) и p - типа проводимости ($Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$) с разной концентрацией носителей тока ($n_1 < n_2$; $p_1 < p_2$); 1,7- изолирующие теплопереходы (BeO); 2, 6- коммутирующие пластины (Cu); 3, 4, 5- припой (LOT- 139) ($T_0 > T_1$).

В табл. 1 приведены выражения для основных параметров различных термоэлементов, полученные с учетом вклада переходных сопротивлений r_i (i - номер области на рис.1, а) и температурных зависимостей свойств. Здесь T_0 , T_1 , T^* , T^{**} и T^{***} – температура на горячем и холодном спаях, средняя температура ветвей и сегментов (1 и 2); $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$, $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, $\Delta\alpha_T$, $\Delta\alpha_{T1}$ и $\Delta\alpha_{T2}$ – перепады термо-э.д.с. на холодном спае, на неоднородной ветви, а также на однородной ветви и сегментах (1 и 2), связанные с температурными зависимостями α ; $r = L(\rho_1/s_1 + \rho_2/s_2)$ и $k_0 = (k_1s_1 + k_2s_2)/L$ - эффективные электросопротивление и теплопроводность, усредненные по длине ветвей L ; $\rho_{1,2}$, $k_{1,2}$ и $s_{1,2}$ – удельные электропроводность, теплопроводность и поперечное сечение ветвей ($r_4 = 0$ - для градиентных, $r_4 \neq 0$ – для составных ветвей). Из табл.1 видно, что при $\Delta\alpha > 0$ и $\Delta\alpha_T > 0$ величины I_0 , Q_{max} и ΔT_{max} термопар возрастают за счет РЭП [1-5].

Для экспериментов использовали однокаскадные модули, состоявшие из двух термопар (рис.1, б), с градиентными, составными и однородными ветвями $1,2 \times 1,2 \times 2,5$ мм³. Характеристики материалов исследованных модулей приведены в табл.2. В градиентных

ветвях свойства изменялись непрерывно от n_1 к n_2 и от p_1 к p_2 . Результаты сравнительных испытаний модулей в интервале температур 100- 300 К представлены на рис.2.

Таблица 1

Основные параметры термоэлектрических пар с однородными и неоднородными ветвями.

Термопара	Оптимальный ток, I_0 , А	Максимальная холодопроизводительность, Q_{max} , J	Максимальный перепад температуры, ΔT_{max} , К
Однородные ветви	$\sim(\alpha T_1 + \frac{1}{2} \Delta\alpha T^*) / (r + 2r_2 + 2r_3)$	$\sim(\alpha T_1 + \frac{1}{2} \Delta\alpha T^*)^2 / 2(r + 2r_2 + 2r_3)$	$\sim(\alpha T_1 + \frac{1}{2} \Delta\alpha T^*)^2 / 2k_0(r + 2r_2 + 2r_3)$
Неоднородные ветви	$\sim(\alpha T_1 + \frac{1}{2} \Delta\alpha T^* + \frac{1}{2} \Delta\alpha_{T1} T^{**} + \Delta\alpha_{T2} T^{***}) / (r + 2r_2 + 2r_3 + r_4)$	$\sim(\alpha T_1 + \frac{1}{2} \Delta\alpha T^* + \frac{1}{2} \Delta\alpha_{T1} T^{**} + \Delta\alpha_{T2} T^{***})^2 / 2(r + 2r_2 + 2r_3 + r_4)$	$\sim(\alpha T_1 + \frac{1}{2} \Delta\alpha T^* + \frac{1}{2} \Delta\alpha_{T1} T^{**} + \Delta\alpha_{T2} T^{***})^2 / 2k_0(r + 2r_2 + 2r_3 + r_4)$

Сегменты (ветви)	α , $\mu V/K$	σ , Sm/cm	$\kappa 10^3$, W/(cm . K)	$Z 10^3$, 1/K
n_2	-186	1504	17.5	2.97
n_1	-253	640	14.3	2.88
p_2	188	1261	17.2	2.59
p_1	235	629	11.8	2.95

Таблица 2

Характеристики материалов исследованных модулей ($T = 300$ К). Конфигурация модулей: составные и градиентные ветви – ($n_1/ n_2/ p_2/ p_1$); однородные низкоомные ветви – (n_2/ p_2); однородные высокоомные ветви – (n_1/ p_1).

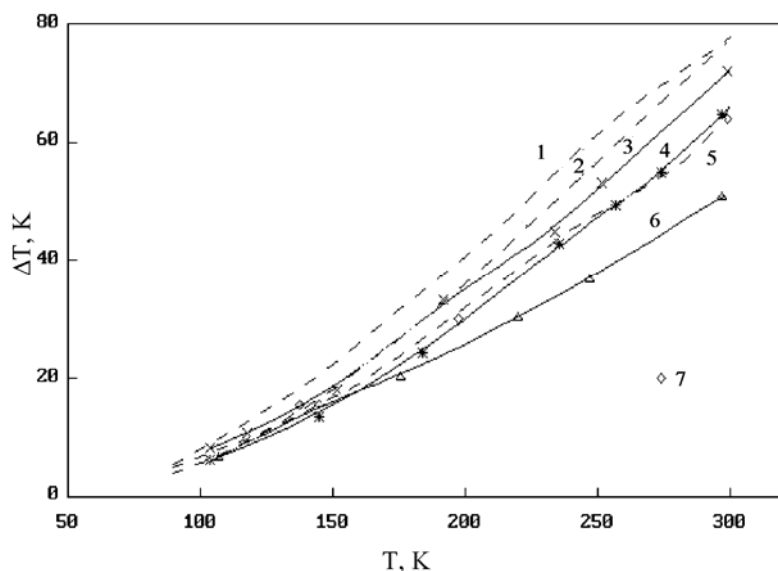


Рис.2. Расчетные ($r_i = 0$) (1, 2, 5) и экспериментальные (3, 4, 6, 7) зависимости $\Delta T_{max} = f(T_0)$ для модулей с градиентными (1, 3), составными (1, 7), однородными низкоомными (2, 4) и однородными высоко-омными ветвями (5, 6). I_0 , А: 3, 4 – 3,5; 6 – 2,0; 7 – 3,0.

Из рис. 2 видно, что наилучшими характеристиками обладает модуль с градиентными ветвями (кривая 3). При переходе к составным (точки 7, рис.2), а также к однородным низкоомным (кривая 4) и однородными высокоомным ветвям (кривая 6), величина ΔT последовательно убывала. В модуле с градиентными ветвями (кривая 3, рис.2) приращение ΔT при температуре $T_0 = 300$ К достигало ~ 8 К ($\sim 13\%$), а при температуре T_0

= 140 К - 4 К (~40%), по сравнению с однородными низкоомными (кривая 4) и высокоомными ветвями соответственно (кривая 6), оптимальными при указанных температурах. Увеличение ΔT в модуле с градиентными ветвями (кривая 3, рис.2) по сравнению с модулем с составными ветвями (точки 7) составляло ~ 7 К при температуре $T_0 = 300$ К и ~ 3 К при температуре $T_0 = 140$ К.

Сравнение экспериментальных зависимостей с расчетными (рис. 2) показывает, что потери ΔT из-за переходных сопротивлений в модулях составляли ~ 6 - 12 К при $T_0 = 300$ К, ~2 - 4 К при $T_0 = 140$ К. Переходные сопротивления определяли путем сравнения экспериментальных и расчетных значений ΔT , I_0 и прямого измерения сопротивлений модулей на переменном токе (табл.3).

Таблица 3

Переходные сопротивления $R_{пер}$ на границах материал п- или р- типа/ припой

Граница	$n_1, p_1/$ припой	$N_2, p_2/$ припой	$n_1, p_1, n_2, p_2/ Ni/$ припой
$R_{пер}, Ом \cdot см^2$	$\sim 2,2 \cdot 10^{-4}$	$\sim 5,2 \cdot 10^{-5}$	$\sim 7 \cdot 10^{-5}$

Показано, что основная часть потерь ΔT в модулях связана с вкладом переходных сопротивлений $R_{пер}$ на фазовых границах материал/припой; величины $R_{пер}$ при пайке низкоомных сегментов неоднородных модулей ($n_1, p_1/$ припой) оказывались существенно меньшими, чем для высокоомных сегментов ($n_2, p_2/$ припой), что связано с различным положением уровня Ферми E_F в материалах; напыление пленок Ni (~2- 3 μ) на торцы ветвей снижало $R_{пер}$ (табл.3). Преимущество градиентных ветвей по сравнению с составными (кривые 3 и 8, рис.2) определялось отсутствием переходного сопротивления $r_4 = 0$.

В целом подтверждено, что эффективность работы однокаскадных термоэлектрических модулей с неоднородными ветвями выше, чем при использовании однородных ветвей [1]. Эффект проявляется в наибольшей степени для *градиентных* ветвей, где переходное сопротивление между сегментами отсутствует ($r_4 = 0$). Механизм роста ΔT при использовании неоднородных ветвей связан с компенсацией тепла Джоуля $Q_{дж}$ РЭП, что увеличивает величину оптимального рабочего тока I_0 и соответственно снижает температуру холодного спая T_1 [3]. К росту ΔT за счет РЭП ведет также температурная зависимость α (табл.1) [3]. Во всех случаях РЭП компенсирует часть $Q_{дж}$ непосредственно в ветвях модулей, то есть при более высокой температуре, чем на холодном спае (T_1), что благоприятно по термодинамическим соображениям (поскольку $\alpha \rightarrow 0$, а $\rho \neq 0$ при $T \rightarrow 0$). Соответственно относительная эффективность неоднородных ветвей увеличивается при понижении температуры. Кроме того, присутствие в холодной части неоднородных ветвей низкоомных сегментов обеспечивает более низкие переходные сопротивления при коммутации ($r_3 < r_5$) и соответственно меньшее тепловыделение в районе холодного спая по сравнению с однородными ветвями (где $r_3 \sim r_5$). Обнаруженное соотношение между переходными сопротивлениями ($r_3 < r_5$) необходимо учитывать при расчетах *многокаскадных* модулей с неоднородными ветвями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Borg Wagner Co. Пат. 1200384 (Канада). - Оpubл. 27.07.70.
- [2] Buist R.J. Proc. of the XIV Int. Conf. on Thermoelectrics. SPb., Russia, 1995, p.301- 304.
- [3] Иванова Л.Д., Гранаткина Ю.В., Сидоренко Н.А. В сб.: Термоэлектрики и их применения. СПб., 2002, с.18- 23.
- [4] Коржуев М.А., Иванова Л.Д., Гранаткина Ю.В., там же, с.333- 338
- [5] Дабкин И.А., Дашевский З.М., там же, с. 281- 286.