

УДК 621.382.53

Термоэлектрическое охлаждение с помощью эффекта Пельтье

В. Г. Охрем

Предложены модели бескоммутационных термоэлектрических охладителей Пельтье. Приведен пример алгоритма расчета температурного и электрического полей.

PACS: 85.80.-f

Ключевые слова: термоэлектрический холодильник, глубина охлаждения, эффект Пельтье.

Введение

Термоэлементы Пельтье эффективно используются во многих областях науки и техники для охлаждения различных микроэлектронных приборов и устройств. Они выгодно отличаются от других охлаждающих приборов, так как эти устройства малогабаритны и в них непосредственно электрическая энергия превращается в тепловую без промежуточного механического этапа.

В настоящее время разработаны и применяются одно-, двух- и более каскадные термоэлектрические холодильники Пельтье [1], с помощью которых можно получать достаточно низкое охлаждение. Однако, несмотря на указанные преимущества, они имеют и существенные недостатки, основным из которых является очень громоздкая технология сборки, что обусловлено наличием большого количества коммутационных элементов, а именно, теплопроводящих металлизированных керамических прослоек и электропроводных пластин. Все эти структурные коммутационные элементы вместе с полупроводниковыми ветвями собираются в единую конструкцию при помощи низкотемпературных припоев. Ясно, что наличие большого количества указанных элементов существенно влияет на эффект охлаждения. Поэтому поиск возможностей устранения недостатков, связанных с наличием этих структурных элементов, является задачей достаточно актуальной. Очевидно, что эти недостатки можно устранить только вместе с устранением коммутационных керамических прослоек, т. е. путем создания новых моделей термоэлементов, сохранив при этом принцип действия и используемые для изготовления ветвей

термоэлектрические материалы прежними. Эта задача решалась в работе [2], в которой предложены термоэлементы Пельтье с ветвями L-подобной и тавровой формы, у которых отсутствуют керамические прослойки, а также в работе [3], в которой предложены двухъярусные термоэлементы. Указанные термоэлементы по глубине охлаждения не уступают двухкаскадным холодильникам.

Модели новых термоэлектрических охладителей Пельтье

Термоэлементы с ветвями L-подобной и тавровой формы изображены на рис. 1 и 2. На этих рисунках элементы 1 и 2 представляют собой одинаковые по форме и размерам ветви термоэлементов, изготовленные из термоэлектрических материалов *n*- и *p*-типа проводимостей, 3 и 5 — коммутационные проводящие пластины, 4 и 6 — контакты между коммутационными пластинами и торцами ветвей, 7 — термостатированные токоподводы к термоэлементам. На рисунках показаны также буквенные обозначения размеров ветвей.

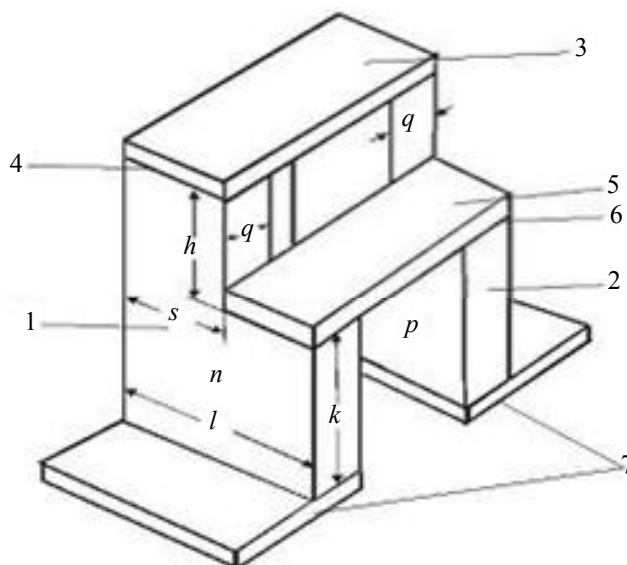


Рис. 1. Термоэлемент с ветвями L-подобной формы

Охрем Василий Георгиевич, доцент.
Национальный технический университет "ХПИ",
Черновицкий факультет.
Украина, 58018, г. Черновцы, ул. Головна, 203-А.
Тел. (380 0372) 52-15-07. E-mail: okhrem@ukr.net
Статья поступила в редакцию 25 марта 2010 г.

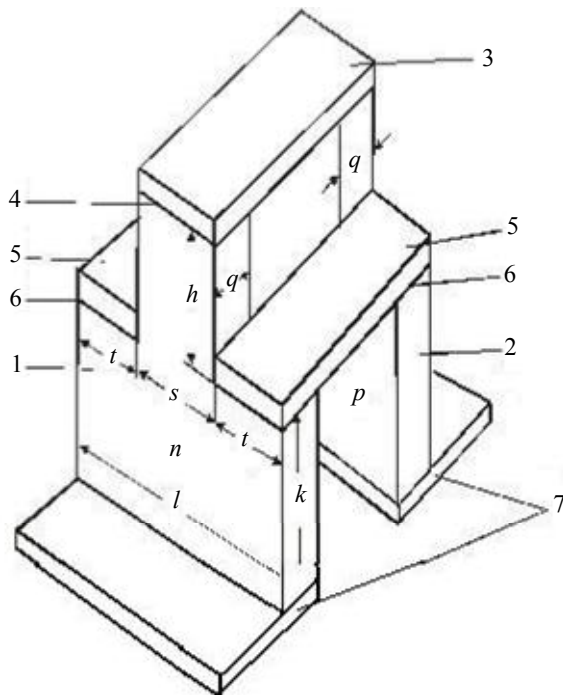


Рис. 2. Термоэлемент с ветвями тавровой формы

Термоэлементы работают следующим образом. Коммутационные проводящие пластины 3 вследствие эффекта Пельтье охлаждаются. Тепло, отобранное от верхних торцов ветвей, устремляется, как и в обычном термоэлементе, вдоль ветвей к термостату. Дополнительные проводящие пластины 5 также охлаждаются вследствие эффекта Пельтье, поэтому тепло, которое отводится от верхних торцов термоэлемента, стекает в термостат как непосредственно вдоль ветвей, так и через дополнительные проводящие пластины, чем и объясняется значительное усиление глубины охлаждения.

Несколько иначе выглядит устройство двухъярусного термоэлемента [3] (рис. 3). В этой конструкции в нижнем ярусе имеются две ветви, изготовленные из материалов n - и p -типа проводимостей, которые соединены между собой проводящей пластиной 1, во втором ярусе также имеются две ветви, верхние торцы которых также соединены между собой проводящей пластиной 2. В работе [3] рассчитано сопротивление пластины 1, найдены соответствующие ток I и соотношения поперечных сечений верхних и нижних ветвей с точки зрения максимального перепада температуры. Этот термоэлемент по глубине охлаждения также не уступает стандартному двухкаскадному термоэлектрическому холодильнику.

Отметим также, что возможно создание трех и более ярусных холодильников. Усиление эффекта охлаждения обусловлено тем, что нижний ярус отбирает отработанное в верхнем ярусе тепло при более низкой температуре, чем температура термостатированных токоподводов.

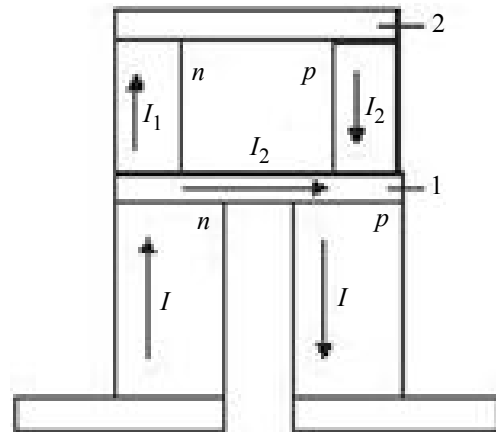


Рис. 3. Двухъярусный термоэлектрический холодильник Пельтье

Исходя из изложенного, а также исследований, приведенных в работах [2, 3], можно сделать вывод о том, что рассмотренные термоэлементы, которые проще в конструктивном и технологическом отношении, являются перспективными с практической точки зрения. Правда, при этом нужно решить еще ряд вопросов, например, подобрать материал перемычки в нижнем ярусе двухъярусного термоэлемента или оптимальные размеры ветвей термоэлементов, которые изображены на рис. 1 и 2. Эти вопросы в данном исследовании не решаются.

В работе предложены новые модели термоэлектрических охладителей на эффекте Пельтье, которые не содержат коммутационных элементов (металлизированных диэлектрических пластин и коммутационных металлических перемычек) за исключением металлических токоподводов и поэтому свободны от недостатков, связанных с этими элементами. Эти термоэлементы изображены на рис. 4 и 5. На рис. 4 изображен *однооконный* термоэлемент, который состоит из двух термоэлементов, а именно, нижнего и верхнего. Через нижний термоэлемент протекает ток силой I_1 , а через верхний — I_2 . Нижний термоэлемент принимает на себя отработанное верхним термоэлементом тепло и вместе со своим собственным отработанным теплом сбрасывает через токоподводы 3 в термостат при температуре T_0 .

На рис. 5 представлен *двухоконный* термоэлемент, который состоит из трех термоэлементов. Два нижних термоэлемента должны привести к еще большему усилению эффекта термоэлектрического охлаждения. Понятно, что число окон термоэлемента может быть и больше двух. Сложность исследования работы предложенных термоэлементов состоит в том, что здесь распределение температуры и потенциала двумерны и поэтому аналитическое рассмотрение не представляется возможным.

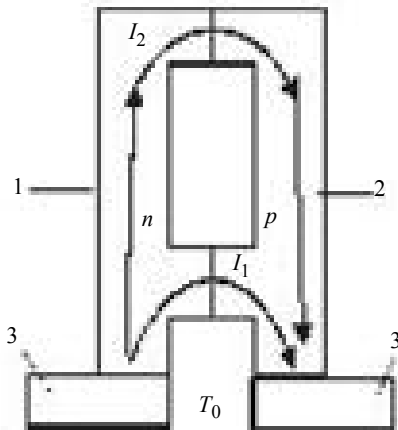


Рис. 4. Однооконный бескоммутационный охладитель: 1 и 2 — ветви *n*- и *p*-проводимостей; стрелками показаны направления токов I_1 и I_2 через нижний и верхний контакты ветвей; T_0 — температура термостатированных токоподводов 3

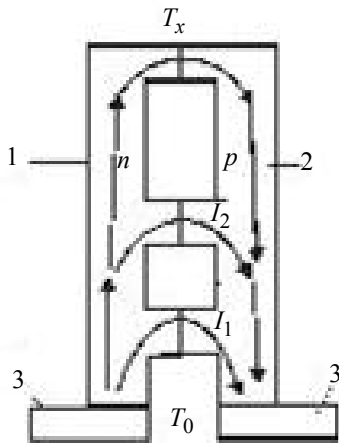


Рис. 5. Двухоконный бескоммутационный термоэлектрический охладитель:

1 и 2 — ветви *n*- и *p*-типа проводимости; стрелки показывают направления токов I_1 , I_2 и I_3 ; 3 — термостатированные при температуре T_0 токоподводы; T_x — температура стыка на холодной стороне охладителя

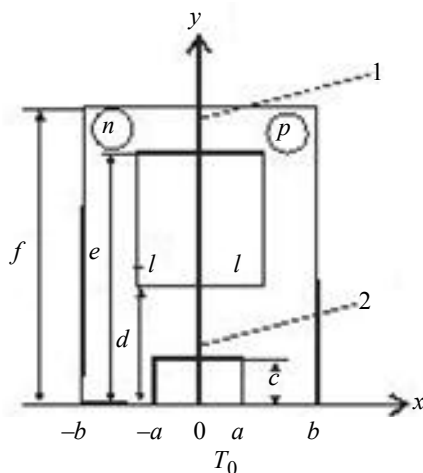


Рис. 6. Схема для расчета распределения температуры и потенциала Лукоша однооконного бескоммутационного термоэлемента Пельтье:

a, b, c, d, e, f, l — геометрические размеры; 1 и 2 — стыки ветвей *p*- и *n*-проводимости верхнего и нижнего термоэлементов, соответственно

Алгоритм расчета

Представим алгоритм задачи, например, для термоэлемента, изображенного на рис. 4. Предположим, что материалы ветвей однородны и изотропны и кинетические коэффициенты не зависят от температуры. Расчетная схема этого термоэлемента изображена на рис. 6. Систему уравнений относительно температуры и потенциала Лукоша в стационарном случае запишем в виде:

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_i}{\partial y^2} = 0; \tag{1}$$

$$\kappa_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) + \rho_i \left(\left(\frac{\partial H_i}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H_i}{\partial y} \right)^2 \right) = 0, \tag{2}$$

где H_i — потенциал Лукоша;

T_i — абсолютная температура;

κ_i и ρ_i — удельные теплопроводность и сопротивление, соответственно;

$i = n$ или p указывает на принадлежность данной величины к ветви *n*- или *p*-проводимости.

Тепловые граничные условия будут иметь вид:

$$T_n(x, y)|_{-b < x < -a} = T_p(x, y)|_{a < x < b} = T_0; \tag{3}$$

$$\frac{\partial T_n(-b, y)}{\partial x} = \frac{\partial T_p(b, y)}{\partial x} = 0; \tag{4}$$

$$\left. \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial x} \right|_{x=-a, 0 < y < c} = \left. \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial x} \right|_{x=a, 0 < y < c} = 0; \tag{5}$$

$$\left. \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial x} \right|_{x=-l, d < y < e} = \left. \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial x} \right|_{x=l, d < y < e} = 0; \tag{6}$$

$$\left. \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial y} \right|_{-l < x < 0, y=c} = \left. \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial y} \right|_{0 < x < l, y=c} = 0; \tag{7}$$

$$\left. \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial y} \right|_{-l < x < 0, y=d} = \left. \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial y} \right|_{0 < x < l, y=d} = 0; \tag{8}$$

$$\left. \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial y} \right|_{-l < x < 0, y=e} = \left. \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial y} \right|_{0 < x < l, y=e} = 0; \tag{9}$$

$$\left. \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial x} \right|_{y=f} = \left. \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial x} \right|_{y=f} = 0. \tag{9}$$

Уравнения (1) и (2) выражают собой законы сохранения энергии и заряда, а выражения (3)—(9) — тепловые условия на соответствующих гранях термоэлемента. К этим условиям необходимо прибавить еще условия непрерывности температуры и

теплового потока на стыках ветвей 1 и 2. Эти условия будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 T_n(x, y) \Big|_{\substack{x=0, \\ e < y < f}} &= T_p(x, y) \Big|_{\substack{x=0, \\ e < y < f}} ; \\
 \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0, \\ e < y < f}} + \alpha_n T_p(x, y) \frac{\partial H_n(x, y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=0, \\ e < y < f}} &= \\
 = \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0, \\ e < y < f}} + \alpha_p T_p(x, y) \frac{\partial H_p(x, y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=0, \\ e < y < f}} ; \\
 T_n(x, y) \Big|_{\substack{x=0, \\ c < y < d}} &= T_p(x, y) \Big|_{\substack{x=0, \\ c < y < d}} ; \\
 \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0, \\ c < y < d}} + \alpha_n T_n(x, y) \frac{\partial H_n(x, y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=0, \\ c < y < d}} &= \\
 = \frac{\partial T_p(x, y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0, \\ c < y < d}} + \alpha_p T_p(x, y) \frac{\partial H_p(x, y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=0, \\ c < y < d}} .
 \end{aligned}$$

Далее необходимо записать граничные условия для потенциала Лукоша. Эти условия выражают собой электрическое состояние соответствующих граней. За исключением нижних торцов термоэлемента на этих гранях необходимо записать условие электрической изоляции, а на нижних торцах электрические условия будут иметь такой вид:

$$H_n = I / h, \quad H_p = -I / h,$$

где I — сила тока во внешней цепи термоэлемента;
 h — толщина ветвей, которая считается одинаковой для обеих ветвей.

Кроме того, на стыках ветвей должны выполняться условия непрерывности потенциала Лукоша и плотностей электрического тока, которые выражаются соответствующими производными

от H . Аналогично составляется алгоритм задачи и для двухоконного термоэлемента.

Из представленной математической записи видно, что провести исследование в аналитическом виде не представляется возможным. Поэтому исследования могут быть проведены только в численном виде. Для этого необходимо найти распределения температур и потенциалов в ветвях, подобрав размеры и силу тока I так, чтобы температура стыка на холодной стороне термоэлемента была минимальной. Это отдельная задача, решение которой автор предполагает представить в следующей работе.

Выводы

Из представленных в работе результатов можно сделать следующие выводы.

1. Вместо обычно используемых каскадированных термоэлектрических холодильников для глубокого охлаждения возможно использование термоэлементов с ветвями L-подобной или тавровой формы, а также ярусных и бескоммутационных, которые в технологическом и конструктивном отношении более просты по сравнению с ними.
2. Предложенные холодильники могут быть использованы для охлаждения всякого рода микроэлектронных устройств.

Литература

1. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. — М., 1976.
2. Охрем В. Г. // Прикладная физика. 2005. № 1. С. 24.
3. Горбеев Н. В., Охрем В. Г. // Там же. 2007. № 4. С. 1—24.

Thermoelectric cooling by the Peltier effect

V. G. Okhrem

Chernivtsi faculty of National Technical University (KhPI),
 203-A Golovna str., Chernivtsi, 58018, Ukraine
 E-mail: okhrem@ukr.net

In this article, the models of a switchingless thermoelectric Peltier cooler are considered. An algorithm of calculations of temperature and electric fields are shown.

PACS: 85.80.-f

Keywords: thermoelectric cooling, cooling depth, Peltier effect.

Bibliography — 3 references.

Received March 25, 2010