

Расчетная модель холодильного элемента Пельтье

В. Г. Охрем

Предложена модель термоэлектрического холодильника, работающего на основе эффекта Пельтье, которая приводит к более глубокому охлаждению по сравнению с результатами, достигаемыми с помощью стандартных холодильных элементов. В этой модели по первому варианту ветви p - и n -типа проводимостей расположены в линию и соединены между собой медной перемычкой. Рассчитаны температуры стыков перемычки и ветвей. По второму варианту термоэлектрик p - и n -типа проводимости расположен между двумя медными блоками. Сделан расчет температур стыков. Оценено снижение температуры. В статье приведены также расчетные зависимости температуры охлаждения от плотности электрического тока для радиального холодильника, сделан анализ полученных результатов, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: эффект Пельтье, холодильный элемент, глубина охлаждения.

Введение

Используемый в настоящее время полупроводниковый термоэлектрический холодильный элемент (ХЭ) Пельтье состоит из двух полупроводниковых ветвей p - и n -типа проводимостей, которые соединены между собой либо встык, либо с помощью коммутационной перемычки.

На практике чаще применяется ХЭ, схема которого изображена на рис. 1. Она удобна для использования, т.к. имеет достаточно большую холодильную площадку и поэтому охлаждаемый объект может иметь достаточно большие размеры. Этот вариант ХЭ был предложен и детально изучен А. Ф. Иоффе с сотрудниками в середине прошлого века [1–4] и широко применяется и в настоящее время в различных областях науки и техники. Совершенствуется только технология изготовления ХЭ, применяемых полупроводниковых и других необходимых материалов.

Исследованию и применению этих термоэлектрических холодильников (равно как и генераторов) посвящено большое количество работ (см., например, [5–9]). Полагается, что способ соединения ветвей не влияет (или слабо влияет) на глубину охлаждения. Более того, влияние пере-

мычки на эффект охлаждения вообще не исследовалось. Основные требования, предъявляемые к перемычке состоят в том, что она должна обладать высокими теплопроводностью и электропроводностью. Обычно материалом служит медь. Она удовлетворяет этим требованиям. Температура перемычки считается постоянной и равной T_0 , т. е. перемычка является просто элементом конструкции ХЭ, который в охлаждении участия не принимает. Между тем на соединениях торцов ветвей с металлом образуются контакты, на которых выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) в наибольшем количестве тепло Пельтье [10]. Поэтому интересным является учет влияния медной или изготовленной из другого металла перемычки на эффект охлаждения.

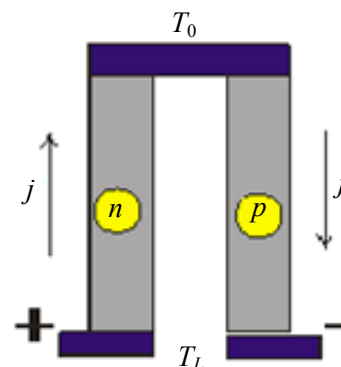


Рис. 1. Соединение ветвей с помощью металлической перемычки.

Целью данной работы является исследование реального влияния перемычки ХЭ на эффективность его работы, что может открыть пути к достижению более глубокого охлаждения по сравне-

Охрем Василий Георгиевич, доцент.
Национальный технический университет «ХПИ»,
Черновицкий факультет.
Украина, 58018, г. Черновцы, ул. Главная, 203-а.
E-mail: okhrem@ukr.net

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2017 г.

© Охрем В. Г., 2017

нию с результатами, достигаемыми с помощью стандартных холодильных элементов Пелтье.

Постановка работы

Конечно, исследовать это влияние, используя схему ХЭ, изображенную на рис. 1, затруднительно, поскольку нужно будет положить, что и ток, и температура двумерны. При этом задача сильно усложнится. Поэтому в работе рассмотрена другая схема, изображенная на рис. 2. Эта схема, с одной стороны, как-то дополнит известные результаты, а с другой – приведет к результатам, которые ранее не были известны. Ниже проведены эти исследования и получены новые оригинальные результаты.

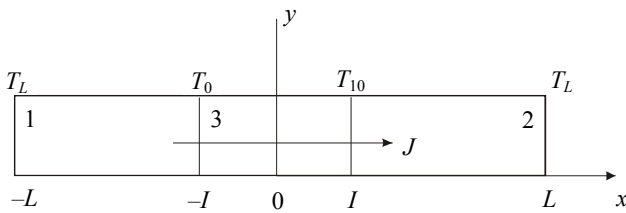


Рис. 2. Схема ХЭ, состоящего из двух полупроводниковых ветвей 1 (*n*-тип), 2 (*p*-тип) и металлической перемычки 3. T_L – температура горячей стороны (термостата) ХЭ, T_0 и T_{10} – температуры стыков, L и l – линейные размеры, j – плотность электрического тока.

Ветви *p*- и *n*-типа проводимостей (они обозначены соответственно цифрами 2 и 1) имеют одинаковое поперечное сечение, расположены в линию и соединены между собой металлической перемычкой 3 того же сечения что и ветви. Считаем, что температура является одномерной (т. е. зависит только от x), кинетические коэффициенты материалов ветвей 1 и 2, а также перемычки 3 не зависят от температуры и координат, а ток плотностью j направлен вдоль x .

Найдем распределения температур в ветвях 1, 2 и в перемычке 3. Запишем для этого обобщенные уравнения теплопроводности с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T_1(x)}{dx^2} + b_1 &= 0, \quad T_1(-l) = T_0, \quad T_1(-L) = T_L, \\ \frac{d^2 T_2(x)}{dx^2} + b_2 &= 0, \quad T_2(l) = T_{10}, \quad T_2(L) = T_L, \\ \frac{d^2 T_3(x)}{dx^2} + b_3 &= 0, \quad T_3(-l) = T_0, \quad T_3(l) = T_{10}, \end{aligned} \quad (1)$$

где T_L – температура термостата, T_0 и T_{10} – температуры стыков перемычки с ветвями 1 и 2, j – плотность электрического тока, $T_1(x)$, $T_2(x)$, $T_3(x)$ – температуры в областях ХЭ, $b_i = \rho_i j^2 / \kappa_i$, i – номер области; ρ_i , κ_i – удельные сопротивление и теплопроводность соответствующих областей.

Распределения температуры в областях 1, 2 и 3 имеют вид:

$$\begin{aligned} T_1(x) &= -\frac{1}{2} b_1 x^2 - \frac{1}{2} \frac{L^2 b_1 - l^2 b_1 - 2T_0 + 2T_L}{L-l} x - \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{L^2 l b_1 - l^2 L b_1 - 2LT_0 + 2lT_L}{L-l}, \\ T_2(x) &= -\frac{1}{2} b_2 x^2 - \frac{1}{2} \frac{L^2 b_2 - l^2 b_2 - 2T_{10} + 2T_L}{L-l} x - \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{L^2 l b_2 - l^2 L b_2 - 2LT_{10} + 2lT_L}{L-l}, \\ T_3(x) &= -\frac{1}{2} b_3 x^2 - \frac{1}{2} \frac{T_0 - T_{10}}{l} x - \frac{1}{2} b_3 l^2 + \frac{T_0 + T_{10}}{2}. \end{aligned}$$

Определим далее температуры T_0 и T_{10} . Для этого используем условия сшивания по тепловому потоку на границах между областями 1 и 3 и областями 2 и 3. Вначале записываем выражения для плотностей потоков тепла в областях 1, 2 и 3. Они имеют вид

$$\begin{aligned} q_1 &= -\kappa_1 \frac{dT_1(x)}{dx} + \alpha_1 j T_1(x), \\ q_2 &= -\kappa_2 \frac{dT_2(x)}{dx} + \alpha_2 j T_2(x), \\ q_3 &= -\kappa_3 \frac{dT_3(x)}{dx} + \alpha_3 j T_3(x), \end{aligned} \quad (2)$$

где α_1 , α_2 и α_3 – термоЭДС материалов, из которых изготовлены части 1, 2, 3 рассматриваемого устройства. Из (2) найдем нужные для сшивания выражения для плотностей потоков тепла

$$\begin{aligned} q_1(-l) &= -\kappa_1 \left(b_1 l - \frac{1}{2} \frac{b_1 (L^2 - l^2) + 2(T_L - T_0)}{L-l} \right) + \\ &\quad + \alpha_1 j T_0, \\ q_2(l) &= -\kappa_2 \left(-b_2 l + \frac{1}{2} \frac{b_2 (L^2 - l^2) + 2(T_L - T_0)}{L-l} \right) + \\ &\quad + \alpha_2 j T_{10}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} q_3(-l) &= -\kappa_3 \left(b_3 l - \frac{1}{2} \frac{T_0 - T_{10}}{l} \right) + \alpha_3 j T_0, \\ q_3(l) &= -\kappa_3 \left(-b_3 l - \frac{1}{2} \frac{T_0 - T_{10}}{l} \right) + \alpha_3 j T_{10}. \end{aligned}$$

Условия сшивания плотностей потоков на границах $-l$ и l имеют вид:

$$q_1(-l) = q_3(-l), \quad q_3(l) = q_2(l).$$

$$T_{10} = A/C, \quad T_0 = B/C, \text{ где}$$

$$A = \frac{1}{2}(\kappa_2 \kappa_3 (2L^3 a_1 b_2 j l - 6L^2 a_1 b_2 j l^2 + 4L^2 a_1 b_3 j l^2 + 6L a_1 b_2 j l^3 - 8L a_1 b_3 j l^3 - 2a_1 b_2 j l^4 - L^3 b_1 \kappa_1 + L^3 b_2 \kappa_1 + 3L^2 b_1 \kappa_1 l - 5L^2 b_2 \kappa_1 l + 4L T_L a_1 j l - 3L b_1 \kappa_1 l^2 + 7L b_2 \kappa_1 l^2 - 4L b_3 \kappa_1 l^2 - 4T_L a_1 j l^2 + b_1 \kappa_1 l^3 - 3b_2 \kappa_1 l^3 + 4b_3 \kappa_1 l^3 - 4T_L \kappa_1 l)),$$

$$B = \frac{1}{2}((-2L^3 a_3 b_1 j \kappa_2 l - 2L^3 a_3 b_2 j \kappa_2 l - 6L^2 a_2 b_1 j \kappa_3 + 4L^2 a_2 b_3 j \kappa_3 l^2 + 6L^2 a_3 b_1 j \kappa_2 l^2 + 6L^2 a_3 b_2 j \kappa_2 l^2 + 8L^2 a_3 b_3 j \kappa_2 l^2 + 6L a_2 b_1 j \kappa_3 l^3 - 8L a_2 b_3 j \kappa_3 l^3 - 6L a_3 b_1 j \kappa_2 l^3 - 6L a_3 b_2 j \kappa_2 l^3 + 16L a_3 b_3 j \kappa_2 l^3 + 4TL a_2 j \kappa_3 l - 8TL a_3 j \kappa_2 l + 2L^3 a_2 b_1 j \kappa_3 l + L^3 b_1 \kappa_2 \kappa_3 - L^3 b_2 \kappa_2 \kappa_3 + b_1 \kappa_2 \kappa_3 l^3 + b_2 l^3 \kappa_2 \kappa_3 - 4b_3 \kappa_2 \kappa_3 + 4TL \kappa_2 \kappa_3 l - 2a_2 b_1 j \kappa_3 + 4a_2 b_3 j \kappa_3 l^4 + 2a_3 b_1 j \kappa_2 l^4 + 2a_3 b_2 j \kappa_2 l^4 - 8a_3 b_3 j \kappa_2 l^4 - L^2 b_1 \kappa_2 \kappa_2 l - L b_2 j \kappa_2 \kappa_3 l - 4TL a_2 j \kappa_3 l^2 + 8TL a_3 j \kappa_2 l^2 - 3L b_2 \kappa_2 \kappa_3 l^2 + 4L b_3 \kappa_2 \kappa_3 l^2 + 3L^2 b_2 \kappa_2 \kappa_3 l) \kappa_1)$$

$$C = 2L^2 a_1 a_2 j^2 \kappa_3 l - 2L^2 a_1 a_3 j^2 \kappa_2 l - 4L a_1 a_2 j^2 \kappa_3 l^2 + 4L a_1 a_3 j^2 \kappa_2 l^2 + 2a_1 a_2 j^2 \kappa_3 l^3 - 2a_1 a_3 j^2 \kappa_2 l^3 + L^2 a_1 j \kappa_2 \kappa_3 + L^2 a_2 j \kappa_1 \kappa_3 - 2L^2 a_3 j \kappa_1 \kappa_3 - 4L a_2 j \kappa_1 \kappa_3 + 6L a_3 j \kappa_1 \kappa_2 l - a_1 j \kappa_2 \kappa_3 l^2 + 3a_2 j \kappa_1 \kappa_3 l^2 - 4a_3 j \kappa_1 \kappa_3 l^2 - 2\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 l,$$

где $a_i = \alpha_i j / \kappa_i$.

Числовые расчеты и примеры

Для числовых расчетов выбраны кинетические параметры, соответствующие примерно стандартным термоэлектрикам, а параметры перемычки примерно таковы, как у меди. На рис. 3 для примера приведены зависимости температур T_0 и T_{10} от величины плотности электрического тока для следующих параметров:

$$\begin{aligned} \kappa_1 = \kappa_2 &= 10^{-1} \text{ Вт}/(\text{см}\times\text{К}), \quad \kappa_3 = 0,4 \text{ Вт}/(\text{см}\times\text{К}), \\ \rho_1 = \rho_2 &= 10^{-3} \text{ Ом}\times\text{см}, \quad \rho_3 = 10^{-5} \text{ Ом}\times\text{см}, \\ \alpha_1 &= -2,5 \times 10^{-4} \text{ В}/\text{К}, \quad \alpha_2 = 2,5 \times 10^{-4} \text{ В}/\text{К}, \\ \alpha_3 &= 10^{-5} \text{ В}/\text{К}, \quad T_L = 300 \text{ К}, \quad L = 1,02 \text{ см}, \\ l &= 0,02 \text{ см}. \end{aligned}$$

Из графика видно, что температуры T_0 и T_{10} почти одинаковы. Различие незначительно увеличивается с ростом величины плотности тока. Отсюда можно заключить, что перемычка не выравнивает температуры, а играет более существенную роль. С уменьшением длины перемычки различие уменьшается. Если положить $\alpha_3 = 0$, то результат остается прежним. Уменьшение тепло-

проводности материала перемычки приводит к большему расхождению кривых температур и к уменьшению глубины охлаждения. Увеличение термоЭДС материала перемычки приводит с одной стороны к увеличению глубины охлаждения, с другой – к увеличению различия температур T_0 и T_{10} .

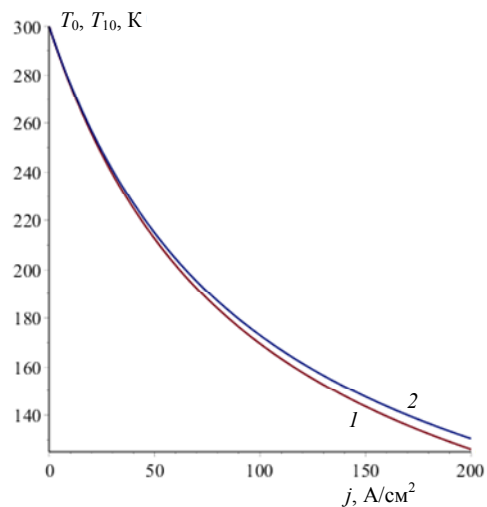


Рис. 3. Зависимость температур стыков T_0 (кривая 1) и T_{10} (кривая 2) от плотности тока.

Из полученных результатов следует, что металлическая (медная) перемычка вносит существенные изменения в привычные представления об эффекте охлаждения: об этом свидетельствуют значительное усиление глубины охлаждения по сравнению с глубиной охлаждения, даваемой устройством, в котором ветви расположены встык (без перемычки). Температуры T_0 и T_{10} зависят также от длин ветвей и перемычки устройства и в зависимости от их значений могут варьироваться в широких пределах. Этот результат можно понять исходя из модельных представлений контактов металл-полупроводник: на контактах слева и справа тепло Пельтье будет поглощаться. Особенно интересным является тот факт, что глубина охлаждения увеличивается с увеличением тока, – это означает, что эффект Пельтье превалирует над эффектом Джоуля. Данный результат требует дальнейших исследований.

Другой вариант холодильника

Рассмотрим еще один возможный вариант холодильника с перемычкой. Назовем его радиальным. Схема этого холодильника представлена на рис. 4. Он состоит из трех частей: 1 и 2 – это n - и p -полупроводниковые ветви, изготовленные из стандартных термоэлектриков, 3 – металлическая (медная) перемычка. Как и в первом случае считаем, что кинетические коэффициенты термоэлектриков постоянны, а температура «одномерна», т. е. зависит только от координаты r . Тогда уравнение теплопроводности в полярной системе координат для случая, когда температура и ток одномерны, т. е. зависят только от координаты r , имеет вид:

$$r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\rho j_0^2}{\kappa} = 0,$$

где положено, что $j = j_0/r$, j_0 – постоянная.

Постоянная j_0 определяет величину плотности тока. Она имеет размерность А/см и определяет также силу тока через устройство по формуле $j_0 \times \theta \times c$, где c – толщина устройства, θ – угол раствора в радианах (см. рис. 4).

Решения для областей 1, 2 и 3 имеют вид:

$$T_1(r) = b_1 \ln r + \frac{(b_1 \ln r_1 - b_1 \ln r_0 - T_0 + T_R)r}{r_0 - r_1} - \frac{b_1 r_0 \ln r_1 - b_1 r_1 \ln r_0 - T_0 r_0 + T_R r_1}{r_0 - r_1},$$

$$T_2(r) = b_2 \ln r + \frac{(b_2 \ln r_2 - b_2 \ln R - T_{10} + T_R)r}{R - r_2} - \frac{b_2 R \ln r_2 - b_2 r_2 \ln R - T_{10} R + T_R r_2}{R - r_2},$$

$$T_3(r) = b_3 \ln r - \frac{(b_3 \ln r_1 - b_3 \ln r_2 - T_0 + T_{10})r}{r_1 - r_2} + \frac{b_3 r_2 \ln r_1 - b_3 r_1 \ln r_2 - T_0 r_2 + T_{10} r_1}{r_1 - r_2}.$$

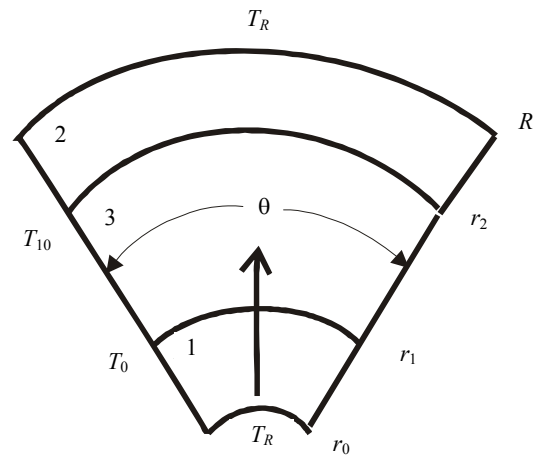


Рис. 4. Принципиальная схема «радиального» термоэлектрического холодильника: R , r_0 , r_1 , r_2 – радиусы соответствующих частей холодильника, стрелкой показано направление электрического тока.

Используя, как и выше, условия сшивания по тепловому потоку на границах областей

$$q_{23} = q_{31},$$

$$q_{11} = q_{13},$$

где

$$q_{11} = -\kappa_1 \left(-\frac{b_1 \ln r_1}{r_1} + \frac{1}{2} \frac{b_1 \ln r_0^2 - b_1 \ln r_1^2 - 2T_0 + 2T_R}{(\ln r_0 - \ln r_1)r_1} \right) + \frac{\alpha_1 T_0 j_0}{r_1}.$$

$$q_{13} = -\kappa_3 \left(-\frac{b_3 \ln r_1}{r_1} + \frac{1}{2} \frac{b_3 \ln r_2^2 - b_3 \ln r_1^2 - 2T_0 + 2T_{10}}{(\ln r_2 - \ln r_1)r_1} \right) + \frac{\alpha_3 T_0 j_0}{r_1}.$$

$$q_{23} = -\kappa_2 \left(-\frac{b_2 \ln r_2}{r_2} + \frac{1}{2} \frac{b_2 \ln R^2 - b_2 \ln r_2^2 - 2T_{10} + 2T_R}{(\ln R - \ln r_2)r_2} \right) + \frac{\alpha_2 T_{10} j_0}{r_2}.$$

$$q_{32} = -\kappa_3 \left(-\frac{b_3 \ln r_2}{r_2} + \frac{1}{2} \frac{b_3 \ln r_2^2 - b_3 \ln r_1^2 - 2T_0 + 2T_{10}}{(\ln r_2 - \ln r_1)r_2} \right) + \frac{\alpha_3 T_{10} j_0}{r_2}.$$

Далее находим выражения для температур стыков T_0 и T_1 . Из-за значительной громоздкости выражений для этих температур мы не приводим здесь их аналитических выражений. Но на рис. 5 в качестве примера приведена зависимость температур T_0 и T_1 от постоянной j_0 , которая определяет величину плотности тока в рассматриваемом устройстве. Здесь для числового расчета взяты такие размерные и материальные константы:

$$\begin{aligned} r_0 &= 0,1 \text{ см}, r_1 = 0,6 \text{ см}, \\ r_2 &= 0,64 \text{ см}, R = 1,14 \text{ см}; \\ \alpha_1 &= -3 \times 10^{-4} \text{ В/К}, \\ \alpha_2 &= 3 \times 10^{-4} \text{ В/К}, \\ \alpha_3 &= 10^{-5} \text{ В/К}, \\ \kappa_1 &= 2 \times 10^{-2} \text{ Вт/см} \times \text{К}, \\ \kappa_2 &= 2 \times 10^{-2} \text{ Вт/см} \times \text{К}, \\ \kappa_3 &= 0,4 \text{ Вт/см} \times \text{К}. \end{aligned}$$

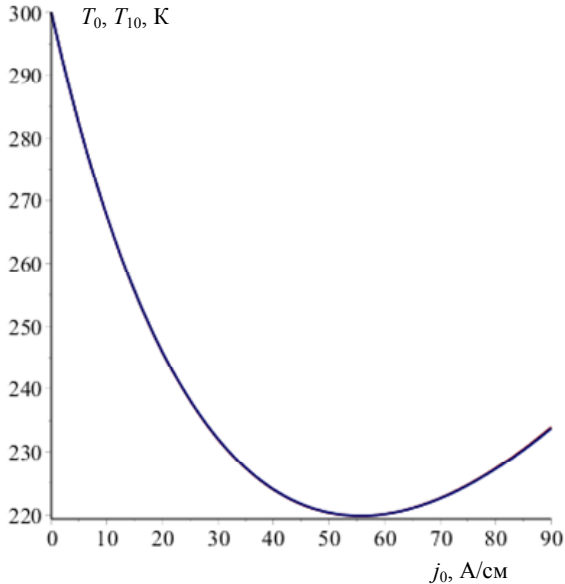


Рис. 5. Зависимость температур T_0 и T_{10} от плотности тока для радиального холодильника.

Температура термостата $T_R = 300$ К. Как видно из графика, представленного на рис. 5, глубина охлаждения для указанных параметров может быть достаточно большой. Следует отметить также, что в этом случае плотность тока имеет оптимальное значение, что свидетельствует о конкуренции эффектов Пельтье и Джоуля. Следует

также указать, что кривые T_0 и T_{10} накладываются друг на друга. Это говорит о том, что температура переключки постоянна.

Интересным является случай, когда переключкой служит термоэлектрик, помещенный между двумя металлическими блоками. Этот термоэлектрик может иметь дырочную или электронную проводимость. Если переключкой между двумя медными блоками служит дырочный термоэлектрик, то при значениях материальных констант: $\alpha = 2,5 \times 10^{-4}$ В, $\rho = 10^{-3}$ Ом/см, $\kappa = 0,18$ Вт/(см К) и размерных $L = 0,5$ см, $l = 0,1$ см температуры T_{10} и T_{20} также с увеличением величины плотности тока уменьшаются, т.е. также имеется охлаждение. Аналогичная ситуация имеет место, если переключкой служит электронный термоэлектрик. Такие холодильные термоэлементы можно было бы назвать **одноветвенными**.

Изложенные результаты расчетов нуждаются в экспериментальном подтверждении и в углублении теоретических исследований. В частности, необходимо провести более глубокие исследования по затронутым в статье вопросам с целью выяснения механизмов охлаждения, подбора термоэлектриков, геометрических размеров структурных элементов холодильников. Особо следует обратить внимание на контакты. Вероятно, они в этих процессах должны играть важную роль.

Заключение

Полученные в статье результаты показывают, что холодильные устройства могут стать более эффективными по сравнению с обычно используемыми, если ветви p - и n -проводимости расположены в линию и соединены медной переключкой. Полученные anomalно низкие расчетные температуры обусловлены тем, что использованные для расчетов материальные константы выбраны не зависящими от температуры. Но очевидно, что они не могут быть таковыми в столь широком интервале температур. Поэтому полученные результаты справедливы не для всего интервала температур, а только для той его части, для которой эти параметры постоянны.

В целом, полученные результаты указывают на одно из возможных направлений поиска более эффективных термоэлектрических холодильников. Аналогичные результаты получены для модели радиального холодильника и для холодильника, состоящего из одной ветви, контактирующей торцами с двумя медными блоками

Очевидно, что важным для экспериментальных исследований должен быть вопрос, связанный с контактами между частями рассмотренных холодильных элементов. Этот вопрос в статье не затрагивался. Считалось, что эти контакты являются

идеальными, что, наверное, не совсем соответствует действительности, особенно при малых размерах перемычки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1960.
2. Иоффе А. Ф. Полупроводники в современной физике. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955.
3. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1957.
4. Иоффе А. Ф., Сильбанс Л. С., Йорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956.
5. Коленко Е. Л. Термоэлектрические охлаждающие приборы. – Наука, Ленинград, 1967.
6. Осипов Э. В. Твердотельная криогеника. – К.: Наукова думка, 1977.
7. Harman T. C., Honig J. M. Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications. – New-York: Mc Graw-Hill book Company, 1967.
8. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / ред. Анатыхук Л. И. – К.: Наукова думка, 1979.
9. Жузе В. П., Гусельникова Е. И. Библиография по термоэлектричеству (термоэлектродгенераторы и охлаждающие устройства). – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963.
10. Кайданов В. И., Нуромский А. Б. Электропроводность, термоэлектрические явления и теплопроводность полупроводников. – Ленинградский политехнический институт, 1981.

PACS: 85.80.F

The design model of the Peltier refrigeration element

V. G. Okhrem

National Technical University «KhPI», Chernovtsy Branch
203-a Golovnya str., Chernovtsy, 58018, Ukraine
E-mail: okhrem@ukr.net

Received February 16, 2017

Consideration is given to a model of a thermoelectric cooler, operated on the basis of the Peltier effect, which leads to a better cooling as compared with cooling by means of standard refrigeration components. In this model, the branches of the first embodiment n- and p-type conductivity are arranged in line and interconnected by a jumper copper. The temperatures of bridge joints and branches are calculated. In the second embodiment, the thermoelectrics of the p- and n-type conductivity are located between two copper blocks. It is presented the calculation of joints temperatures. Estimated is the decrease of the temperature. The article also shows that the calculated cooling temperature depend on the density of the radial electric current of a refrigerator. It is made an analysis of the results and obtained the practical recommendations.

Keywords: Peltier effect, refrigeration unit, cooling depth.

REFERENCES

1. A. F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements* (Izdat. AN USSR, M.-L. 1960) [in Russian].
2. A. F. Ioffe, *Semiconductors in Modern Physics* (Izdat. AN USSR, M.-L. 1955) [in Russian].
3. A. F. Ioffe, *Physics of Semiconductors* (Izdat. AN USSR, M.-L. 1957) [in Russian].
4. A. F. Ioffe, L. S. Stilbans, E. K. Yordanishvili, and T. S. Stavitskaya, *Thermoelectric Cooling* (Izdat. AN USSR, M.-L. 1956) [in Russian].
5. E. L. Kolenko, *Thermoelectric Cooling Devices* (Nauka. Leningrad, 1967) [in Russian].
6. E. V. Osipov, *Solid State Cryogenics* (Naukova Dumka, Kiev, 1977) [in Russian].
7. T. C. Harman and J. M. Honig, *Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Applications*. (New-York: Mc Graw-Hill book Company, 1967).
8. *Thermoelements and Thermoelectric Devices. Handbook*. (Naukova Dumka, Kiev, 1979) [in Russian].
9. V. P. Zhuze and E. I. Guselnikova, *Bibliography on Thermoelectricity* (Izdat. AN USSR, M.-L. 1963) [in Russian].
10. V. I. Kaidanov and A. B. Nuromsky, *Electroconductivity, Thermoelectric Effects and Thermal conductivity of Semiconductors* (Leningradskii Polytechnicheskii Institut, 1981) [in Russian].