

УДК 621.382.53

Адиабатический анизотропный холодильный элемент

В. Г. Охрем

Идея рассмотренного в данной статье термоэлектрического холодильника зиждется на использовании в качестве рабочего эффекта анизотропии термоЭДС. Эта идея не нова. Во второй половине прошлого столетия очень интенсивно и объемно исследовались возможности применения указанной анизотропии для конструирования генераторов термоЭДС. В настоящей работе приведена теория анизотропного термоэлектрического холодильника, боковые грани которого адиабатически изолированы от внешней среды. Такой холодильник мог бы быть использован для охлаждения микросистемных приборов, т. е. таких, которые выделяют мизерное количество тепла. Отличительной особенностью этого холодильника по сравнению со стандартным холодильником Пельтье является то, что он более прост в конструктивном и технологическом отношении. В работе рассчитано возможное снижение температуры, предложен вариант конструкции холодильника.

PACS: 85.80.F

Ключевые слова: термоэлектрическое охлаждение, адиабатическая изоляция, анизотропный термоэлемент.

Введение

Анизотропные термоэлементы (АТЭ) начали интенсивно изучать и искать им применения во второй половине прошлого столетия. Усилиями группы исследователей под руководством проф. Самойловича А. Г. была создана теория генерирования термоЭДС АТЭ и предложены некоторые применения. Результаты этих исследований представлены в работах [1—6], а также в работе [7], которая вышла в 1997 году и в которую включены новые результаты. В этих трудах изложены исследования работы АТЭ в качестве генератора. Что же касается его работы в качестве холодильника, то таких исследований группой не проводилось. Это можно пояснить тем, что анизотропная термоэлектрическая добротность АТЭ очень мала, и поэтому эффективность охлаждения (перепад температуры, холодопроизводительность и т. д.) тоже мала. Однако если бы удалось создать анизотропный термоэлектрический холодильник (АТХ) и он

давал бы приемлемый перепад температуры, то он бы имел конструктивные и технологические преимущества перед холодильником Пельтье. Об этих преимуществах уже говорилось в работе [8], в которой намечен и путь поисковых исследований, нужных для создания эффективного АТХ.

В настоящей статье в дополнение к температурной модели АТХ, которая применена в [8], предложена еще одна — адиабатическая температурная модель. Этой модели будет соответствовать адиабатический АТХ. Отличие этой температурной модели от описанной в [8] состоит в том, что изотермическое условие на нижней грани АТХ заменено на адиабатическое.

Формулировка задачи и ее решение

Положим, что, как и в [8], кинетические коэффициенты постоянны, причем удельные сопротивление ρ и теплопроводность χ — изотропны. Тогда распределение температуры в АТХ удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} + b = 0, \quad (1)$$

где T — температура, $b = \rho \cdot j^2 / \chi$, j — плотность электрического тока, который считается постоянным, направлен вдоль оси x (см. рис. 1).

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

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2015 г.

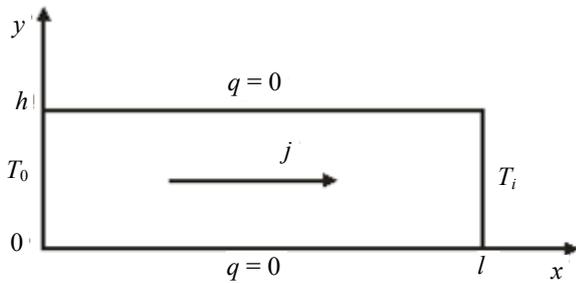


Рис. 1. Принципиальная схема АТХ.

Сделаем замену $T(x, y) = f(x) + \Theta(x, y)$.

Подставив это выражение в (1), получим:

$$\frac{\partial^2 \Theta(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta(x, y)}{\partial y^2} + \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + b = 0. \quad (2)$$

Граничные условия будут иметь вид:

$$f(0) + \Theta(0, y) = T_0, \quad f(l) + \Theta(l, y) = T_l \quad (3)$$

это изотермические условия, а адиабатические условия:

$$-\chi \cdot \frac{d\Theta(x, 0)}{dy} + \alpha_{12} \cdot j \cdot (f(x) + \Theta(x, 0)) = 0,$$

$$-\chi \cdot \frac{d\Theta(x, h)}{dy} + \alpha_{12} \cdot j \cdot (f(x) + \Theta(x, h)) = 0.$$

Выберем функцию $f(x)$ так, чтобы она удовлетворяла уравнению $\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + b = 0$ и граничным условиям $f(0) = T_0, f(l) = T_l$. Эту функцию легко найти. Она имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{b \cdot (l-x) \cdot x}{2} - \frac{\Delta T}{l} x + T_0, \quad (4)$$

где $\Delta T = T_0 - T_l$.

С учётом сказанного, условия (3) примут вид:

$$\Theta(0, y) = 0, \quad \Theta(l, y) = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (2) с учетом (4) и граничных условий (5) можно представить в виде разложения в ряд Фурье:

$$\Theta(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(y) \cdot \sin \frac{n \cdot \pi}{l} \cdot x, \quad (6)$$

Функции $\varphi_n(y)$ найдем, решив уравнение:

$$\frac{d^2 \varphi_n(y)}{dy^2} - \left(\frac{n \cdot \pi}{l} \right)^2 \cdot \varphi_n(y) = 0$$

с граничными условиями:

$$-\chi \cdot \frac{d\varphi_n(0)}{dy} + \alpha_{12} \cdot j \cdot (C_n + \varphi_n(0)) = 0,$$

$$-\chi \cdot \frac{d\varphi_n(h)}{dy} + \alpha_{12} \cdot j \cdot (C_n + \varphi_n(h)) = 0,$$

где α_{12} — поперечная термоЭДС; C_n — коэффициенты разложения функции $f(x)$ в ряд Фурье по синусам. Решение указанного уравнения для $\varphi_n(y)$ представим выражением:

$$\varphi_n(y) = A_n e^{\frac{n\pi}{l} y} + B_n e^{-\frac{n\pi}{l} y},$$

где A_n и B_n — коэффициенты разложения в ряд Фурье по синусам. A_n и B_n находятся из адиабатических граничных условий. Они представляются выражениями:

$$A_n = \frac{a C_n}{a - \delta_n} \frac{e^{-\delta_n h} - 1}{e^{\delta_n h} - e^{-\delta_n h}};$$

$$B_n = -\frac{a C_n}{a + \delta_n} \frac{e^{\delta_n h} - 1}{e^{\delta_n h} - e^{-\delta_n h}},$$

где $a = \frac{\alpha_{12} j}{\chi}$, $\delta_n = \frac{n\pi}{l}$. Найдём далее коэффициенты C_n . По определению из работы [9] имеем выражение:

$$C_n = \frac{2}{l} \int_0^l \left(\frac{b \cdot (l-x) \cdot x}{2} - \frac{\Delta T}{l} x + T_0 \right) \cdot \sin \frac{n\pi}{l} \cdot x \, dx.$$

Несложные вычисления приводят к следующему выражению:

$$C_n = 2 \cdot \frac{T_0 \pi^2 n^2 + b l^2 + (-1)^{n+1} (T_l n^2 \pi^2 + b l^2)}{n^3 \pi^3}.$$

Распределение температуры вдоль грани $y = 0$ вычислим по формуле:

$$T(x, 0) = T_0 + \frac{b \cdot (l-x) \cdot x}{2} - \frac{\Delta T}{l} x + 2 \cdot a \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-a \cdot sh \delta_n h + \delta_n \cdot ch \delta_n h - \delta_n \cdot T_0 \cdot \pi^2 \cdot n^2 + b \cdot l^2 + (-1)^{n+1} (T_l \cdot n^2 \cdot \pi^2 + b \cdot l^2)}{(a^2 - \delta_n^2) \cdot sh \delta_n h} \cdot \sin \frac{n \cdot \pi}{l} \cdot x.$$

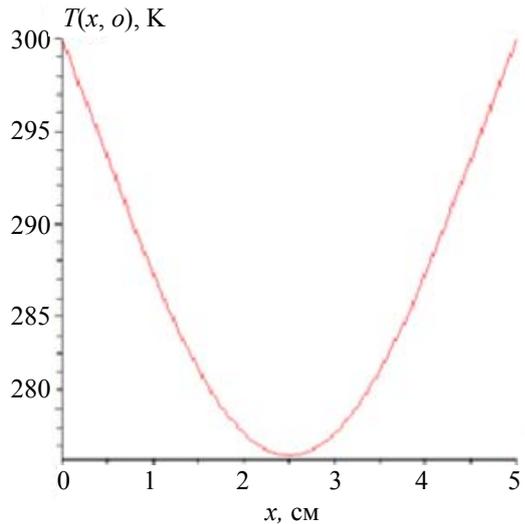


Рис. 2. Распределение температуры вдоль грани АТХ $y = 0$.

Для числовых оценок выберем такие параметры (материальные константы по значениям близки к константам висмута): $T_0 = T_i = 300$ К; $\Delta T = 0$; $l = 5$ см; $h = 0.5$ см; $\rho = 10^{-3}$ Ом·см; $\chi = 0,1$ Вт/см·К; $\alpha_{12} = 2 \cdot 10^{-4}$ В/К; $j = 10$ А/см². Расчеты проведены с помощью пакета математических программ MAPLE [10].

На рис. 2 приведены результаты расчетов. Из приведенного на рис. 2 графика видно, что рассмотренный адиабатический АТХ имеет право на внедрение его в обиход исследователей и инженеров. Приведенные расчеты носят иллюстративный характер и поэтому не характеризуют оптимальность АТХ. Для того чтобы найти оптимальные характеристики (материальные константы, размеры, плотность тока) нужно провести соответствующие исследования. Порядок их проведения может быть таким, какой указан в [8].

Если сравнить две модели — изотермическую (как в [8]) и адиабатическую, то видно, что последняя даёт большую глубину охлаждения. Поэтому её можно предложить к внедрению в практику использования. Как должен выглядеть адиабатический АТХ, чтобы можно было реализовать эффект охлаждения — это, конечно решать разработчикам термоэлектрических приборов. Со своей стороны автор может предложить схему АТХ, которая представлена на рис. 3. Торцы образца АТХ приведены в тепловой и электрический контакт с массивными блоками 1 и 2, которые выполнены из материала с хорошей тепло- и электропроводностью и которые являются одновременно токоподводами и электрическими печами с обмотками 3 (материалом может служить, например, медь), 4 — термопары, контролирующие соответствующие температуры. Печи нужны на тот случай, если потребуется менять температуры торцов образца АТХ.

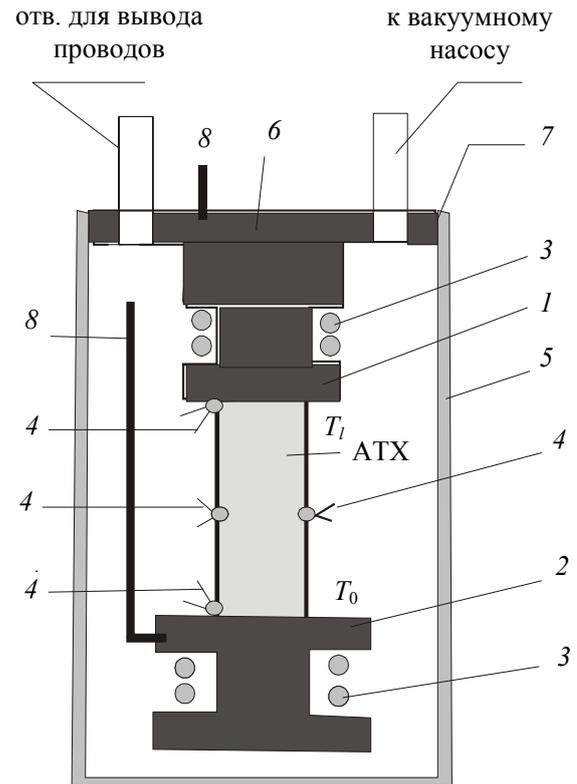


Рис. 3. Принципиальная схема устройства адиабатического АТХ.

Чтобы соблюсти адиабатические условия, можно, например, описанную конструкцию поместить в вакуум. Стакан 5 служит для создания вакуума, 7 — это места соединения стакана с корпусом держателя 6, 8 — токоподводы к образцу АТХ. Все провода выводятся наружу через отверстие для вывода проводов. Здесь имеются в виду провода и термопары, и токоподвод, и провода для питания печей. Конечно, это отверстие должно быть герметизировано. Расположенный между блоками 1 и 2 образец АТХ припаивается торцами к ним.

Из изложенного следует, что макет адиабатического АТХ представляет собой довольно сложное устройство. Это связано, в первую очередь, с необходимостью создания вакуума. Мы здесь не указываем на другие тонкости при разработке конструкции АТХ и те, которые касаются материала и диаметров проводов термопар, токоподводов, обмоток печей, и те, которые возникнут в процессе разработки.

Из сравнения изотермического АТХ [8] и адиабатического, который здесь описан, видно, что последний имеет то преимущество, что в нем отсутствует подложка, которая обеспечивает изотермическое условие на одной из боковых граней АТХ и тем самым снимается проблема обеспечения надежного теплового контакта.

Заклучение

Рассчитан температурный режим адиабатического анизотропного термоэлектрического холодильника (АТХ). Показано, что такой АТХ мог бы давать снижение температуры, приемлемое для охлаждения микроэлектронных датчиков. Предложен возможный вариант конструкции адиабатического АТХ. Описанный АТХ может быть использован там, где нужно очень глубокое охлаждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлович А. Г., Коренблит Л. Л. УФН. 1953. Т. 49. С. 243.
2. Samoilovich A. G., Korenblit L. L. Патент UK No. 1088764, October 25. 1964.

3. Korolyuk S. L., Pilat I. M., Samoïlovich A. G., Slipchenko V. N., Snarskiï A. A., Tsar'kov E. // Sov. Phys. Semicond. 1973. Vol. 7. P. 725

4. Корольюк С. Л., Пилат И. М., Самойлович А. Г., Слипченко В. Н., Снарский А. А., Царьков Е. Ф. ФТП. 1973. Т. 7. С. 725.

5. Самойлович А. Г., Слипченко В. Н. ФТП. 1975. Т. 9. С. 594.

6. Слипченко В. Н., Снарский А. А. ФТП. 1974. Т. 8. С. 2010.

7. Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А. ФТП. 1997. Т. 31. № 11. С. 1287.

8. Охрем В. Г. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 16.

9. Толстов Г. П. Ряды Фурье. — Москва: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1960.

10. Васильев А. Н. Maple 8. — Москва. Санкт-Петербург. Киев: Диалектика, 2003.

Adiabatic anisotropic cooling element

V. G. Okhrem

Chernivtsi Department of National Technical University "KhPI"
203-a Holovna str., Chernivtsi, 58018, Ukraine
E-mail: okhrem@ukr.net

Received November 11, 2015

The idea discussed in this article is based on the thermoelectric cooler is used as the working effect of the anisotropy of the thermopower. This idea is not new. In the second half of the last century it is very intense and space to explore the possibility of application of this anisotropy for the construction of thermoelectric power generators. This paper presents the theory of anisotropic thermoelectric cooler, which side faces adiabatically isolated from the external environment. Such a fridge could be used for cooling of microelectronic devices, i. e., those that emit negligible amount of heat. A distinctive feature of the cooler compared with conventional Peltier refrigerator is that it is easier to design and technological terms. The paper calculated a possible reduction in temperature, the variant of the design of the refrigerator.

PACS: 85.80.F.

Keywords: thermoelectric cooling, adiabatic insulation, anisotropic thermal element.

REFERENCES

1. A. G. Samoilovich and L. L. Korenblit, Usp. Phys. **49**, 243 (1953).
2. A. G. Samoilovich and L. L. Korenblit, Патент UK No. 1088764, October 25, 1964.
3. S. L. Korolyuk, I. M. Pilat, A. G. Samoïlovich, V. N. Slipchenko, A. A. Snarskiï, and E. F. Tsar'kov *Anisotropic Thermoelements*, Sov. Phys. Semicond., **7**, 725 (1973).
4. S. L. Korolyuk, I. M. Pilat, A. G. Samoïlovich, V. N. Slipchenko, A. A. Snarskiï, and E. F. Tsar'kov *Semiconductors* **7**, 725 (1973).
5. A. G. Samoilovich and V. N. Slipchenko, *Semiconductors* **9**, 594 (1975).
6. V. N. Slipchenko and A. A. Snarskiï, *Semiconductors*, **8**, 2010 (1974).
7. A. A. Snarskiï, A. M. Palti, and Ashcheulov, *Semiconductors* **31** (11), 128 (1997).
8. V. G. Pkhrem, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **3**, 16 (2015).
9. G. P. Tolstov, *Fourier Series*. (Gos. Izdat. Fiz.-Mat. Lit., Moscow, 1960) [in Russian].
10. A. N. Vasil'ev, *Maple 8*. (Dialektika, Moscow, 2003) [in Russian].