

УДК 537.3:681.3

Термоэлектрические сенсоры из материалов с анизотропной термоЭДС

Л. И. Анатычук, А. В. Прибыла

Приведены результаты исследований анизотропных преобразователей энергии выполненных с применением компьютерных технологий объектно-ориентированного программирования, которые дали возможность определить точные характеристики преобразователей на основе реальных физических моделей. Учтены температурные свойства материалов, краевые эффекты, внутренние эффекты возбуждения вихревых токов, найдены оптимальные конфигурации преобразователей и режимы, при которых достигается их максимальная эффективность. Изучены такие преобразователи как неселективные и полосные приемники излучения для метеорологической аппаратуры инфракрасного излучения.

PACS: 85.80.Fi

Ключевые слова: сенсор, термоэлектрический, термоЭДС, исследование.

Введение

К настоящему времени накопился достаточно большой материал по применению анизотропных термоэлементов в сенсорах. Впервые анизотропный термоэлемент (АТ) был предложен в работах [1—3]. Основные параметры и характеристики анизотропных термоэлементов как чувствительных сенсоров теплового потока были описаны в [4—6]. В [6, 7] показаны преимущества анизотропных сенсоров перед существующими аналогами и определены их предельные возможности. Сенсоры теплового потока на основе вихревых термоэлементов рассмотрены в [7—9]. В работе [10] была описана теория проектирования вихревых сенсоров, пример отдельного термоэлемента представлен в [11], а в [12] дан обзор существующих сенсоров из материалов с анизотропной термоЭДС и проведено их сравнение.

Из анализа литературы следует, что проектирование таких термоэлементов проводилось с использованием простейших физических моделей. В них не учитывались неясность контактов и краевых эффектов, температурная зависимость и анизотропия всех кинетических коэффициентов материала термоэлементов.

Цель настоящей работы — разработка метода точного определения параметров термоэлектрических сенсоров с учетом изложенных выше характеристик.

Физическая модель

Общая физическая модель АТ (рис. 1) представляет собой монокристаллическую анизотропную пластину 5, сверху и снизу которой размещены термостаты (нагреватель 1 и холодильник 7). На боковых гранях пластины 5 находятся токоотводящие контакты 6. На границе термостатов и анизотропной пластины размещена электрическая изоляция 2, а на границе термостата и токоотводящих контактов находится электрическая и тепловая изоляция 3. Проводники 4, которые отводят ток во внешнюю цепь с сопротивлением R , закрепляются на креплении 12, которое находится при температуре внешней среды T_0 .

На границе анизотропной пластины и токоотводящих контактов введены элементы, которые обозначают присутствие контактного электрического сопротивления 10, 11, а на границе термостатов и анизотропной пластины — элементы, которые обозначают контактное тепловое сопротивление 8, 9. При этом материал анизотропной монокристаллической пластины владеет анизотропией всех кинетических коэффициентов, учтены также их температурная зависимость, теплообмен с внешней средой, наличие вихревых термоэлектрических токов в рабочем теле АТ, а также коэффициент теплового расширения материала анизотропной пластины, электрических контактов, термостатов, электрической и тепловой изоляций.

В данной работе была использована немного упрощенная физическая модель анизотропного термоэлемента, в которой не учитывалось присутствие теплообмена с окружающей средой, а также тепловое расширение материала термоэлемента.

Анатычук Лукьян Иванович, директор.

Прибыла Андрей Викторович, аспирант.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины.

Украина, 58000, Черновцы, ул. Дубинская, 9А.

Тел. 8 (03722) 4-44-22. E-mail: anatyuch@inst.cv.ua

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2008 г.

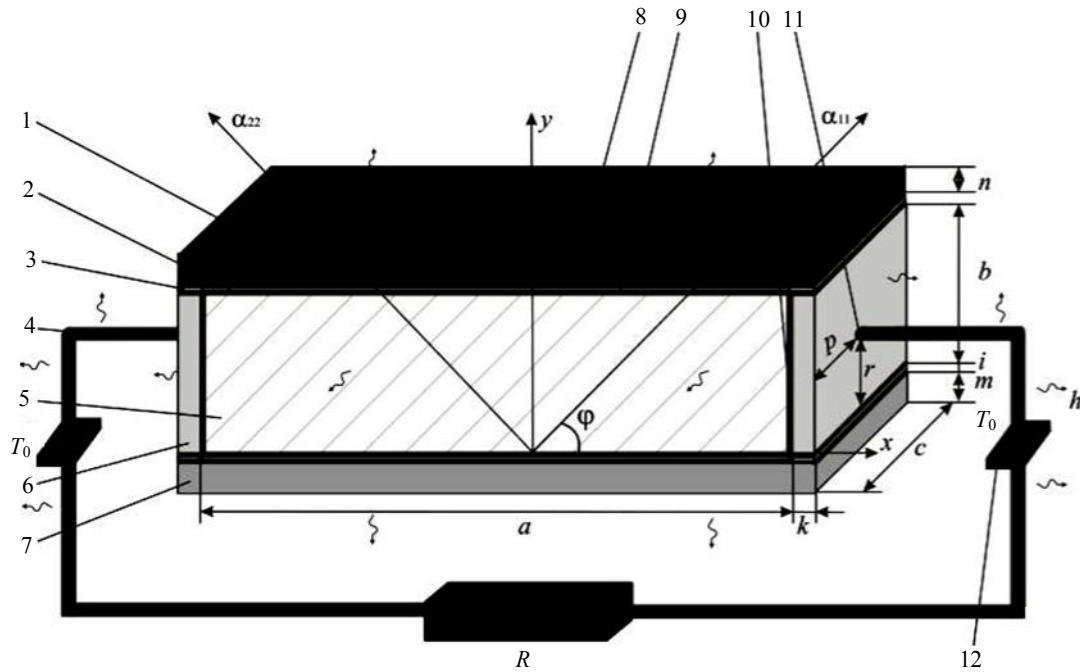


Рис. 1. Общая физическая модель АТ:

1 — нагреватель; 2 — электрическая изоляция; 3 — электрическая и тепловая изоляция; 4 — токоотводящие проводники; 5 — анизотропная пластина; 6 — токоотводящие контакты; 7 — холодильник; 8, 9 — элементы, которые обозначают контактное тепловое сопротивление; 10, 11 — элементы, которые обозначают контактное электрическое сопротивление; 12 — крепление токоотводящих проводников; α_{11} , α_{22} — кристаллографические оси; φ — угол наклона кристаллографических осей к осям x , y ; h — коэффициент теплообмена с внешней средой; R — внешнее сопротивление

Компьютерная модель

На основе выбранной физической модели была создана математическая модель АТ, которая представляет собой уравнения для распределения потенциала и тока в термоэлементе:

$$-\nabla \left[\left(\hat{\kappa}(T) + \hat{\alpha}(T)^2 \hat{\sigma}(T)T + \hat{\alpha}(T)U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla T \right] - \quad (1)$$

$$-\nabla \left[\left(\hat{\alpha}(T) \hat{\sigma}(T)T + U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla U \right] = 0;$$

$$-\nabla \left(\hat{\sigma}(T) \hat{\alpha}(T) \nabla T \right) - \nabla \left(\hat{\sigma}(T) \nabla U \right) = 0. \quad (2)$$

Эти уравнения были получены из законов сохранения энергии и электрического заряда, соответственно. Они являются дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных для искомых функций U и T , которые надо решать со следующими граничными условиями:

термостатирование верхней границы

$$T = T_1 = T_0 + \Delta T = \text{const}_1; \quad (3)$$

термостатирование нижней границы

$$T = T_2 = \text{const}_2; \quad (4)$$

электрическая изоляция верхней и нижней границы

$$(\mathbf{j} \times \mathbf{n}) = 0, \quad (5)$$

где \mathbf{n} — нормаль к граням термоэлемента.

Для создания компьютерной модели использовалась программа *Femlab*. С ее помощью задачу (1, 2) можно представить в виде краевой задачи

$$\nabla(-C \nabla M) = 0, \quad (6)$$

для матрицы

$$M = \begin{bmatrix} T \\ U \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Если записать дифференциальное уравнение (6) отдельно для компонентов матрицы M :

$$\left. \begin{aligned} \nabla(-C_{11} \nabla T) + \nabla(-C_{12} \nabla U) &= 0 \\ \nabla(-C_{21} \nabla T) + \nabla(-C_{22} \nabla U) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Сравнивая (1), (2) и (9), получаем коэффициенты компьютерной модели:

$$\left. \begin{aligned}
 C_{11}^{11} &= T\kappa_{xx} + TU(\sigma_{xx}\alpha_{xx} + \sigma_{yy}\alpha_{yy}) + T\alpha_{xx} \times \\
 &\times (\sigma_{xx}\alpha_{xx} + \sigma_{yy}\alpha_{yy}) + T\alpha_{yy}(\sigma_{yy}\alpha_{yy} + \sigma_{xx}\alpha_{xx}) \\
 C_{11}^{12} &= T\kappa_{yy} + TU(\sigma_{xx}\alpha_{yy} + \sigma_{yy}\alpha_{xx}) + \\
 &+ T\alpha_{xx}(\sigma_{xx}\alpha_{yy} + \sigma_{yy}\alpha_{xx}) + T\alpha_{yy}(\sigma_{yy}\alpha_{xx} + \sigma_{xx}\alpha_{yy}) \\
 C_{11}^{21} &= T\kappa_{yy} + TU(\sigma_{yy}\alpha_{xx} + \sigma_{xx}\alpha_{yy}) + \\
 &+ T\alpha_{yy}(\sigma_{xx}\alpha_{xx} + \sigma_{yy}\alpha_{yy}) + T\alpha_{xx}(\sigma_{yy}\alpha_{xx} + \sigma_{xx}\alpha_{yy}) \\
 C_{11}^{22} &= T\kappa_{xx} + TU(\sigma_{yy}\alpha_{yy} + \sigma_{xx}\alpha_{xx}) + \\
 &+ T\alpha_{yy}(\sigma_{xx}\alpha_{yy} + \sigma_{yy}\alpha_{xx}) + T\alpha_{xx}(\sigma_{yy}\alpha_{yy} + \sigma_{xx}\alpha_{xx}) \\
 C_{12} &= \begin{vmatrix} T\sigma_{xx}\alpha_{xx} + T\sigma_{yy}\alpha_{yy} + U\sigma_{xx} & T\sigma_{xx}\alpha_{yy} + T\sigma_{yy}\alpha_{xx} + U\sigma_{yy} \\ T\sigma_{yy}\alpha_{xx} + T\sigma_{xx}\alpha_{yy} + U\sigma_{yy} & T\sigma_{yy}\alpha_{yy} + T\sigma_{xx}\alpha_{xx} + U\sigma_{xx} \end{vmatrix} \\
 C_{21} &= \begin{vmatrix} \sigma_{xx}\alpha_{xx} + \sigma_{yy}\alpha_{yy} & \sigma_{xx}\alpha_{yy} + \sigma_{yy}\alpha_{xx} \\ \sigma_{yy}\alpha_{xx} + \sigma_{xx}\alpha_{yy} & \sigma_{yy}\alpha_{yy} + \sigma_{xx}\alpha_{xx} \end{vmatrix} \\
 C_{22} &= \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} \\ \sigma_{yy} & \sigma_{xx} \end{vmatrix}
 \end{aligned} \right\}, (10)$$

здесь α_{xx} , α_{yy} , σ_{xx} , σ_{yy} , κ_{xx} , κ_{yy} — функции температуры.

Результаты компьютерных исследований

В результате моделирования были получены распределения физических полей (рис. 2—7) в середине анизотропного и вихревого термоэлементов.

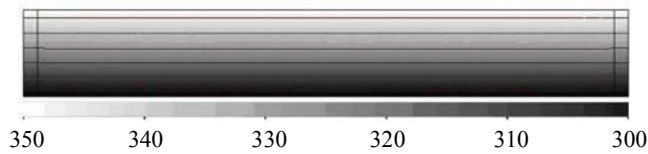


Рис. 2. Распределение температуры в АТ (линиями изображены изотермические поверхности, на шкале поданы значения температуры в кельвинах)

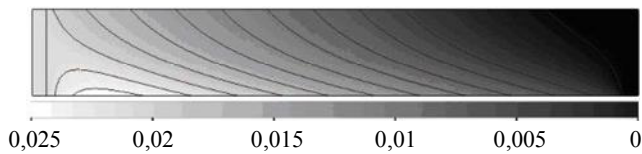


Рис. 3. Распределение электрического потенциала в АТ (линиями изображены линии плотности электрического тока, на шкале представлены значения ЭДС в вольтах)

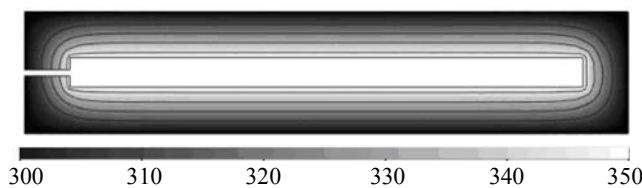


Рис. 4. Распределение электрического потенциала в АТ (линиями изображены линии плотности электрического тока, на шкале представлены значения ЭДС в вольтах)

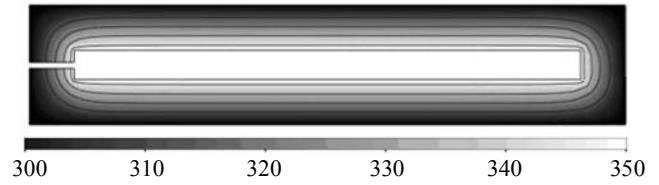


Рис. 5. Распределение температуры в вихревом термоэлементе (линиями изображены изотермические поверхности, на шкале поданы значения температуры в кельвинах)

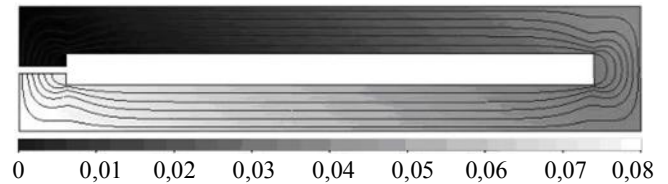


Рис. 6. Распределение электрического потенциала в вихревом термоэлементе (линиями изображены эквипотенциальные поверхности, на шкале поданы значения ЭДС в вольтах)

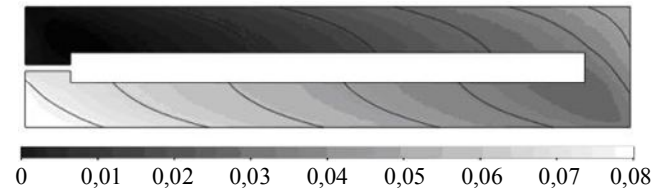


Рис. 7. Распределение электрического потенциала в вихревом термоэлементе (линиями изображены линии плотности электрического тока, на шкале представлены значения ЭДС в вольтах)

Результаты моделирования дают возможность определить основные электрические и энергетические параметры и характеристики термоэлементов путем интегрирования локальных значений плотности тока и теплового потока по соответствующим границам.

Свойства анизотропных и вихревых сенсоров

При использовании анизотропных и вихревых термоэлементов в качестве преобразователей теплового потока применяют следующие основные параметры: вольт-ваттная S_w^u и токовая S_w^i чувствительности, постоянная времени τ , пороговая чувствительность P_w и обнаружительная способность сенсора D .

В данной работе рассчитаны основные параметры сенсоров из материалов с анизотропной термоЭДС при помощи компьютерного моделирования и при помощи простейших аналитических формул (таблица).

Параметры сенсоров	S_w^u , В/Вт	S_w^f , А/Вт	τ , с	P_w , Вт/см ²	D
Компьютерное моделирование	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,3	$2,3 \cdot 10^{-55}$	$2,1 \cdot 10^8$
Простейшие формулы	$4 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,3	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^8$

Установлено, что погрешность при определении основных параметров сенсоров из материалов с анизотропной термоЭДС при помощи простейших аналитических формул достигает 15 % по сравнению с результатами компьютерного моделирования.

Выводы

1. Разработана методика точного определения параметров термоэлектрических сенсоров с учетом температурных свойств материалов, краевых эффектов, внутренних эффектов возбуждения вихревых токов, найдены оптимальные конфигурации преобразователей и режимы, при которых достигается их максимальная эффективность.

2. Проведено сравнение основных параметров термоэлектрических сенсоров, полученных при помощи компьютерного моделирования и при помощи простейших аналитических формул. Установлено, что погрешность при подсчете параметров анизотропных сенсоров при помощи простейших аналитических формул достигает 15 %.

3. Изучены анизотропные и вихревые преобразователи как неселективные и полосные приемники излучения для метрологической аппаратуры инфракрасного излучения.

Литература

1. Tomson W.// Math. Phys. Papers, Cambridge. 1882. V. 1. P. 248
2. Пилат И. М., Самойлович А. Г., Анатычук Л. И. Термоэлемент. Авт. свид. №230915. 1963.
3. Коренблит Л. Л., Самойлович А. Г. Материал для термоэлемента. Авт. свид. №240065. 1962.
4. Редько Ю. Ф., Михайленко А. В., Лусте О. Я.// ИФЖ. 1974. Т. 27. С. 270.
5. Анатычук Л. И., Михайленко А. В.// Там же. 1976. Т. 31. № 6.
6. Анатычук Л. И., Лусте О. Я. О предельных возможностях микрокалориметров// Там же. 1978. Т. 35. № 4. С. 638—647.
7. Анатычук Л. И., Лусте О. Я. Микрокалориметрия. — Львов: Выща школа, 1981.
8. Редько Ю. Ф. Новые типы термоэлементов в микрокалориметрии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Черновцы, 1981.
9. Редько Ю. Ф., Демчук Б. Н. Быстродействующий малогабаритный микрокалориметр// ПТЭ. 1977. № 3. С. 252—254.
10. Анатычук Л. И., Демчук Б. Н., Лусте О. Я. Теория проектирования вихревых микрокалориметров// Термоэлектричество. 2002. № 3. С. 18—27.
11. Прибыла А. В. Спиральный прямоугольный анизотропный термоэлемент в режиме охлаждения// Там же. 2008. № 1. С. 22—29.
12. Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А. Анизотропные термоэлементы. Обзор// ФТП. 1997. Т. 31. № 11. С. 1281—1298.

Thermoelectric sensors based on materials with anisotropic thermoEMF

L. I. Anatyshuk, A. V. Pribyla

Institute of Thermoelectricity, 9A Dubinskaya str., Chernovtsy, 58000, Ukraine

E-mail: anatysh@inst.ev.ua

The results of research on anisotropic power converters performed with the use of computer technologies of object-oriented programming that made it possible to determine precise characteristics of converters based on real physical models are presented. Temperature properties of materials, edge effects, internal effects of eddy currents excitation are taken into account, optimal configurations of converters and conditions whereby their maximum efficiency is achieved are found. Such converters as nonselective and band-selective radiation detectors for infrared radiation metrological equipment are studied.

PACS: 85.80.Fi

Keywords: sensor, thermoelectric, thermoelectromotive, research.

Bibliography — 12 references.

Received December 12, 2008