

## СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

## PHYSICAL SENSORS

---

---

УДК 621.1.016

### АНИЗОТРОПНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ТЭМ ПЕЛЬТЬЕ

*А. А. Ащеулов\*, Д. Д. Величук\*, Р. Г. Черкез\*, И. С. Романюк\*\**

\* Институт термоэлектричества; \*\* ОАО “Кварц”,  
(г. Черновцы, Украина) AshcheulovAA@rambler.ru

### АНИЗОТРОПНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ТЭМ ПЕЛЬТЬЕ

*А. А. Ащеулов, Д. Д. Величук, Р. Г. Черкез, И. С. Романюк*

**Аннотация.** Рассмотрена возможность использования анизотропных оптикотермоэлементов в качестве сенсоров тепловых потоков предназначенных для контроля глубины охлаждения термоэлектрических модулей (ТЭМ) Пельтье.

**Ключевые слова:** сенсор, анизотропный оптикотермоэлемент, глубина охлаждения, термоэлектрический модуль Пельтье.

### АНИЗОТРОПНИЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ СЕНСОРА ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ТЕМ ПЕЛЬТЬЄ

*А. А. Ащеулов, Д. Д. Величук, Р. Г. Черкез, И. С. Романюк*

**Анотація.** Розглянута можливість використання анізотропних оптикотермоелементів в якості сенсорів теплових потоків для контролю глибини охолодження термоелектричних модулів (ТЕМ) Пельтьє в умовах їх серійного виробництва.

**Ключові слова:** сенсор, анізотропний оптикотермоелемент, глибина охолодження, термоелектричний модуль Пельтьє

### ANISOTROPIC THERMO-ELECTRIC SENOR FOR NONCONTACT OGO CONTROL OF THERMAL STREAMS OF TEM PELTIER

*A. A. Ascheulov, D. D. Velichuk, R. G. Cherkez, I. S. Romanyuk*

**Abstract.** Possibility is considered of the use of anisotropic optical-thermoelements as sensor of thermal streams for control of depth of cooling of the thermo-electric modules (TEM) of Peltier in the conditions of their mass production.

**Keywords:** sensor, anisotropic optical-thermoelment, depth of cooling, thermoelectric module Peltier.

В настоящее время определённый интерес представляет эффект поперечной термоЭДС, обусловленный анизотропией коэффициентов термоЭДС [1,2] и теплопроводности [3]. Его исследованию посвящен ряд публикаций [4-8], где на основе различных случаев распределения температуры и термоэлектрического потенциала анизотропных сред, рассмотрены различные оригинальные анизотропные оптикотермоэлементы (АОТ), экспериментальные исследования которых проведены в [9,10].

В предлагаемой работе исследованы возможности практического использования, та-

ких АОТ в качестве сенсора для бесконтактного контроля температуры и радиационных тепловых потоков охлаждаемых граней ТЭМ Пельтье.

Для этого рассмотрим АОТ в виде прямоугольной пластины 1 длиной  $a$ , высотой  $b$  и шириной  $c$  из оптически прозрачного материала, анизотропного по коэффициентам теплопроводности  $\hat{\kappa}$  и термоЭДС  $\hat{\alpha}$  (Рис.1). В лабораторной системе координат  $(XYZ)$ , смещённой на угол  $\varphi$  в плоскости  $XOY$  относительно кристаллографической  $(X'Y'Z')$ , эти тензоры имеют вид:

$$\hat{\kappa} = \begin{vmatrix} \kappa_{\parallel} \cdot \sin^2 \varphi + \kappa_{\perp} \cos^2 \varphi & (\kappa_{\parallel} - \kappa_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & 0 \\ (\kappa_{\parallel} - \kappa_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & \kappa_{\parallel} \cdot \cos^2 \varphi + \kappa_{\perp} \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_{\perp} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

$$\hat{\alpha} = \begin{vmatrix} \alpha_{\parallel} \cdot \sin^2 \varphi + \alpha_{\perp} \cos^2 \varphi & (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & 0 \\ (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi & \alpha_{\parallel} \cdot \cos^2 \varphi + \alpha_{\perp} \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

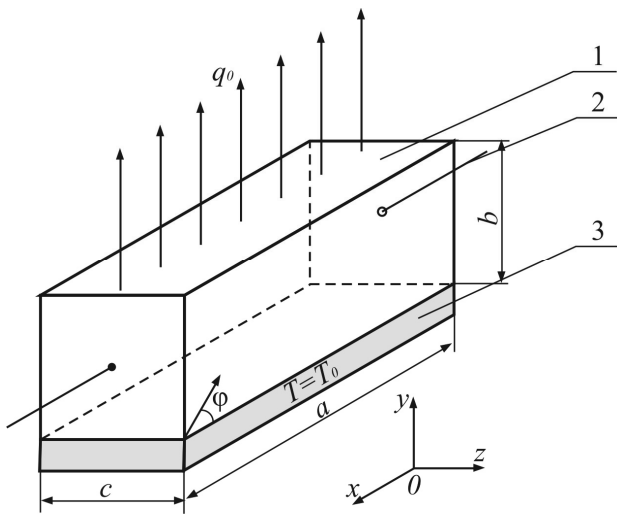


Рис. 1. Схематическое изображение сенсора на основе АОТ. Справа представлена система координат  $XYZ$ . 1 – анизотропная пластина длиной  $a$ , высотой  $b$ , шириной  $c$ , 2 – электровыводы, 3 – термостат.

Верхняя грань этой пластины излучает однородный радиационный тепловой поток плотностью  $q_0$ , а её нижняя грань находится в тепловом контакте с термостатом 2 при температуре  $T=T_0$ . Боковые грани ( $a \times b$ ), и ( $b \times c$ ) АОТ адиабатически изолированы, при этом краевые эффекты не учитываются ( $a=c \gg b$ ) [4].

Распределение температуры АОТ при параллельных направлениях градиента температуры и радиационного теплового потока находится из основного уравнения теплопроводности [6] с учетом наличия внутренних источников тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_0 \cdot d} \sum_{i,k=1}^3 \kappa_{ik} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \cdot \partial x_k} + \frac{q_v}{c_0 \cdot d}, \quad (3)$$

где  $c_0$  – удельная теплоёмкость,  $d$  – плотность материала АОТ,  $\kappa_{ik}$  – соответствующие компоненты тензора теплопроводности,  $q_v$  – количество теплоты, выделяемого внутренними источниками в единице объема за единицу времени и определяемого из закона Бугера-Ламберта.

В случае стационарного распределения температуры ( $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ) для приближений  $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$ ,  $\kappa_{12} < \kappa_{22}$  уравнение (3) приобретает вид

$$\kappa_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_0 \cdot \gamma \cdot e^{-\gamma(b-y)} = 0, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент оптического поглощения материала АОТ.

Решая (4) при граничных условиях

$$T \Big|_{y=0} = T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b} = 0, \quad (5)$$

получим одномерное распределение температуры АОТ

$$T(y) = T_0 + \frac{q_0}{\kappa_{22}} \left[ y + \frac{e^{-\gamma b}}{\gamma} (1 - e^{-\gamma y}) \right]. \quad (6)$$

Компоненты напряженности термоэлектрического поля  $\vec{E}^T$  определяются соотношением

$$E_i^T = \sum_{k=1}^3 \alpha_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7), получим

$$E_x^T = \alpha_{12} \frac{\partial T}{\partial y} = q_0 \frac{\alpha_{12}}{\kappa_{22}} \left[ 1 - e^{-\gamma(b-y)} \right]. \quad (8)$$

В соответствии с [4] поперечная термоЭДС  $\varepsilon$  определяется следующим образом

$$\varepsilon = \frac{1}{b \cdot c} \int_0^b dy \int_0^c dz \int_0^a E_x^T dx. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9), получаем выражение для поперечной термоЭДС  $\varepsilon$

$$\varepsilon = q_0 \cdot a \cdot \frac{\alpha_{12}}{\kappa_{22}} \left[ 1 - \frac{1}{\gamma \cdot b} (1 - e^{-\gamma b}) \right]. \quad (10)$$

Поскольку максимальное значение генерируемой поперечной термоЭДС наблюдается при поверхностном излучении верхней рабочей грани ( $\gamma \times b \gg 1$ ), то подставляя в (10) получаем.

$$\varepsilon = q_0 \cdot a \cdot \frac{\alpha_{12}}{\kappa_{22}}. \quad (11)$$

Таким образом величина поперечной термоЭДС  $\varepsilon$  такого сенсора прямопропорциональна плотности теплового потока  $q_0$ , излучаемой верхней гранью пластины 1 и её длине  $a$ .

В случае пластины 1 (рис.1), выполненной из направлено-закристаллизованной эвтектики [9] CdSb-MeSb соответствующие кристаллографические оси которого ориентированы под углом  $\phi = 45^\circ$ , выражения, представляющие вольт-ваттную чувствительность  $S$ , мощность эквивалентного шума МЭШ, а также постоянную времени  $\tau$  рассматриваемого АОТ имеют следующий вид:

$$S = \frac{\beta \Delta \alpha}{2 \chi c}, \quad (12)$$

$$MЭШ = \frac{8 \kappa}{\Delta \alpha} \sqrt{\frac{ac}{k_0 T \rho b}}, \quad (13)$$

$$\tau = \frac{4b^2}{\pi a_0}, \quad (14)$$

где  $\beta$  – коэффициент черноты излучающего слоя 1 на верхней рабочей грани пластины;  $\Delta \alpha$ ,  $\kappa$ ,  $\rho$ ,  $a_0$  – коэффициенты анизотропии термоЭДС, теплопроводности, электропроводности и температуропроводности материала АОТ;  $T$  – его средняя температура;  $k$  – постоянная Больцмана.

На основе соотношений (12-14) в приближении одномерного распределения температуры и адиабатической изоляции боковых граней АОТ, а также уравнения теплового баланса [11].

$$\int_{S_h} \bar{q} d\bar{s} = \int_{S_D} \left[ \alpha_T (T_D - T_m) + \beta \cdot \sigma_S \cdot \varphi \cdot (T_D^4 - T_m^4) + \frac{\kappa_S}{h} (T_D - T_m) \right] ds, \quad (15)$$

где обозначения  $T_D$ ,  $T_m$  – температуры поверхностей сенсора и модуля соответственно;  $\kappa_S$  – коэффициент теплопроводности среды;  $h$  – расстояние между АОТ и ТЕМ;  $\alpha_T$  – коэффициент теплообмена;  $S_S$  – константа Стефана-Больцмана;  $\beta$  – степень черноты;

$\varphi = \int_{S_c} \frac{\cos \varphi_c \cos \varphi_D}{\pi r^2} dS_c$  – угловой коэффициент излучения;

В соответствии с методиками [12,13] были проведены расчет и компьютерная оптимизация основных характеристик конструкции излучающего анизотропного сенсора (ИАС), предназначенного для контроля температуры и радиационных тепловых потоков охлаждающих граней ТЭМ Пельтье.

Конструкция созданного ИАС представлена на рис.2. Это устройство, в виде анизотропного тепломера, работающего в режиме одновременного компарирования, состоит из батареи 2 на основе 6-ти АОТ выполненных из направлено-закристаллизованной эвтектики CdSb-NiSb, характеризующейся малой температурной зависимостью вольтваттной чувствительности в диапазоне температуры  $T = 220K - 340K$ . Её верхняя рабочая грань содержит тонкий не-селективный слой 1. Нижняя рабочая грань батареи 2 через электроизоляционную тепло-

проводящую керамическую пластину 3 находится в тепловом контакте с цилиндрическим теплоотводом 6. Тепловая защита боковых и торцевых граней батареи осуществляется с помощью корпуса 4 с диафрагмирующим торцевым отверстием, фиксируемого к теплоотводу 6 с помощью винта 5. К противоположной торцевой грани цилиндрического теплоотвода 6 прикреплена электрокоммутирующая колодка 7, к которой подведены электрические выводы батареи 2. Значение вольт-ваттной чувствительности  $S$  ИАС составляла  $S = 0,52 \text{ В/Вт}$  при коэффициенте температурной зависимости  $\eta_s = 0,12\% \times \text{K}^{-1}$ . Постоянная времени сенсора составляет  $\tau = 1 \text{ с}$ .

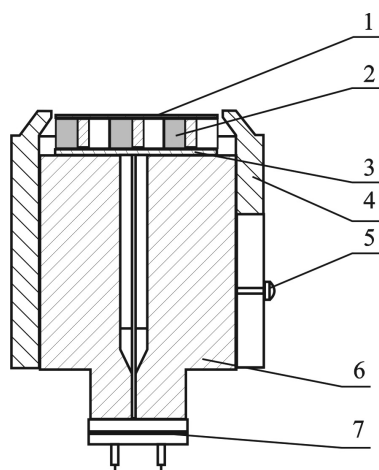


Рис. 2. Схематическая конструкция ИАС. 1 – излучающая площадка, 2 – батарея на основе АОТ, 3 – электроизоляционная теплопроводящая керамическая пластина, 4 – корпус с диафрагмирующим торцевым отверстием, 5 – фиксирующий крепежный винт, 6 – цилиндрический теплоотвод, 7 – электрокоммутирующая колодка.

На рис.3. представлены зависимости температурной чувствительности  $\eta$  (кривая 1) и холодопроизводительности  $Q$  (кривая 2) от расстояния  $h$  между ИАС и ТЭМ для случая, когда устройство находится при нормальных условиях (температура термостатирования горячей стороны ТЭМ и ИАС  $T = 300 \text{ К}$ , давление  $P = 10^5 \text{ Па}$ ).

В результате взаимодействия верхней рабочей грани ИАС, за счет теплопередачи, с охлаждаемой гранью контролируемого микроТЭМ Пельтье, вдоль высоты АОТ возникает градиент температуры приводящий к появлению поперечной термоЭДС, однозначно определяющей величину отрицательно-направленного теплового потока и, при необходимости,

связанной с ним температуры. Выбор режима разновременного компарирования с эталонным ТЭМ, холодные и горячие рабочие грани которого содержат микротермопары, значительно упрощают процесс контроля.

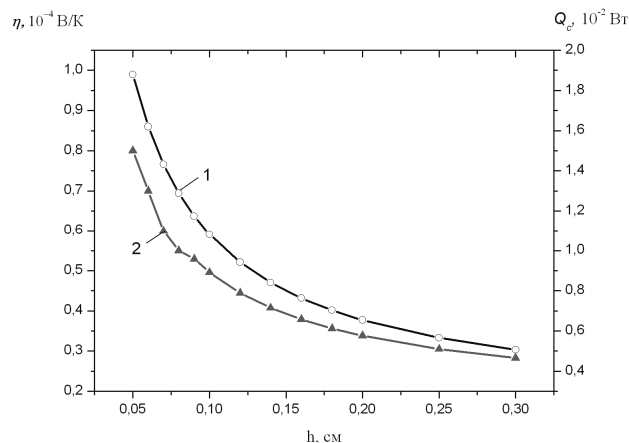


Рис.3. Зависимости температурной чувствительности  $\eta$  и удельной холодопроизводительности  $Q_c$  ИАС от расстояния  $h$  между сенсором и охлаждающим ТЭМ.

Длительное использование предложенного ИАС в установке для бесконтактного контроля характеристик различных конструкций микроТЭМ Пельтье [14,15] показало, что его систематическая погрешность не превышает 0,4%, что позволяет оценивать температуру глубины охлаждения поверяемых приборов с абсолютной погрешностью 0,3 – 0,5К.

### Литература

1. Thomson W. // Math. Phys. Papers / 1982, №1, р. 266-273.
2. Л.И. Анатыхчук. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев “Наукова думка”, 1979., 767 с.
3. Ащеулов А.А., Беликов А.Б., Раренко А.И., Поперечная термоэдс обусловленная анизотропией теплопроводности // УФЖ 1991, №8. — С. 825-833.
4. Ащеулов А.А., Снарский А.А., Пальти А.М. Анизотропные термоэлементы. Обзор // ФТП., 1997., Т. 31. — № 11. — С. 1281-1298.
5. Ащеулов А.А., Охрем В.Г., Охрем Е.А. Термоэлементы с боковым теплоотводом // ФТП. 2003, Т. 37. — № 11. — С. 1389-1394.
6. Ащеулов А.А., Гуцул И.В. Исследование анизотропных оптикотермоэлементов в случае различных оптических и тепловых режимов. // ТКЭА, 2005., №4. — С. 10-19.
7. Ащеулов А.А., Гуцул И.В., Раренко В.И., Анизотропный радиационный термоэлемент в режиме

- внутреннего отражения // Оптический журнал. 1993. — №4. — С. 76-80.
8. Ащеулов А.А., Фотий В.Д., Дунаенко А.Х., Анизотропный координатно-чувствительный термоэлектрический приемник лазерного излучения. // Прикладная физика. 2005. — №2. — С. 45-47.
  9. Ащеулов А.А., Воронка Н.К., Маренкин С.Ф., Раренко И.М. Получение и использование оптимизированных материалов из антимонида кадмия // Неорганические материалы. 1996. — №9. — С. 1049-1060.
  10. Ащеулов А.А., Пилат И.М., Раренко И.М. Влияние теплообмена на вольтваттную чувствительность анизотропных термоэлементов. // Физическая электроника 1980. — №21. — С. 96-100.
  11. Ащеулов А.А. Величук Д.Д., Черкез Р.Г., Романюк И.С. Радиационный анизотропный сенсор // Труды IX-й МНПК СИЭТ 2008. Одесса, 19—23 мая 2008 г.
  12. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Cherkez R.G. Computer simulation of functionally graded materials for thermoelectricity // Journal of Thermoelectricity. — 1997. — №3. — P.43-61.
  13. Комп'ютерне проектування термоелектричних перетворювачів енергії. Методичні рекомендації / Укл.: Черкез Р.Г. — Чернівці: Рута, 2006. — 20с.
  14. Ащеулов А.А., Величук Д.Д., Романюк И.С., Установка для экспресс контроля глубины охлаждения термоэлектрических микромодулей Пельтье. // ТКЭА. 2007. — №4. — С. 35-38.
  15. Патент UA26486 Ащеулов А.А., Величук Д., Романюк И.С., Пристрій контролю параметрів ТЕМ Пельтье. Опубл.25.09.2007. — Бюл №15, 2007.