

## СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

### PHYSICAL SENSORS

---

---

УДК 621.362.1:621.384.326.2

#### КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС

*А. А. Ащеулов, Д. Д. Величук, И. С. Романюк*

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины  
Дубинская, 9А, Черновцы, Украина  
ashcheulovaa@rambler.ru

#### Аннотация

##### КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС

*А. А. Ащеулов, Д. Д. Величук, И. С. Романюк*

Показана перспективность использования анизотропных оптикотермоэлементов в качестве безмодуляционных неселективных координатно-чувствительных линеек, приемников и матриц, предназначенных для определения координат лучистых потоков в широких спектральном и динамическом диапазонах.

**Ключевые слова:** Линейка, приемник, матрица, анизотропный оптикотермоэлемент, координатная-чувствительность

#### Анотація

##### КООРДИНАТНО-ЧУТЛИВІ ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ ПОПЕРЕЧНОЇ ТА ПОЗДОВЖНЬОЇ ТЕРМОЕРС

*А. А. Ащеулов, Д. Д. Величук, І. С. Романюк*

Показана перспективність використання анизотропних оптикотермоелементів в якості безмодуляційних неселективних координатно-чутливих лінійок, приймачів і матриць, призначених для визначення координат променевих потоків в широких спектральному і динамічному діапазонах.

**Ключові слова:** Лінійка, приймач, матриця, анизотропний оптикотермоелемент, координатна-чутливість

**Abstract**

**COORDINATE-SENSITIVE SENSORS ON THE BASIS OF CROSS AND LONGITUDINAL THERMOEMF**

*A. A. Ascheulov, D. D. Velichuk, I. S. Romaniuk.*

Perspective is shown to use the anisotropic opticothermoelements as nonselective 1D and 2D coordinate sensors of radiant streams in wide spectral and dynamic ranges.

**Keywords:** 1D and 2D coordinate sensors, anisotropic optical thermoelement, coordinate sensitivity

**Введение**

Определение координат излучающих объектов, а также плотности энергии лучистых потоков в настоящее время проводится с помощью различных приемников излучения [1]. Работа их чувствительных элементов основана на использовании фото- или пироэффектов с последующей модуляцией регистрируемого излучения. Безмодуляционные фотоэлектрические приемники квадрантного типа на основе отражающих пирамид и призм характеризуются селективностью своих спектральных характеристик [2, 3]. Вопрос создания неселективных безмодуляционных термоэлектрических устройств для определения как координат пятна, вызванного излучением, так и распределения энергии в его поперечном сечении, остается открытым.

Исследования термоэлектрических полей, возникающих в анизотропных средах с различной степенью оптической прозрачности [4-6], в частности, для случая, когда площадь поперечного сечения падающего луча меньше площади рабочей грани анизотропного оптикотермоэлемента (АОТ) показали, что величина и знак возникающей при этом термоЭДС, характеризуются, с одной стороны, геометрией расположения теплового пятна, вызванного лучом, с другой – местонахождением токосъемных контактов [7]. Это позволило сделать выводы о том, что в определенных условиях АОТ может служить реальной основой для создания ряда оригинальных датчиков, таких как анизотропные термоэлектрические линейки (АТЛ) [8, 9], координатно-чувствительные анизотропные термоэлектрические приемники (КАТП) [10, 11] и анизотропные термоэлектрические матрицы (АТМ) [12], работающие в режимах поверхностного поглощения и оптического пропускания.

В настоящем сообщении представлено краткое описание конструкций этих координатно-

чувствительных датчиков, а также приведены их некоторые характеристики.

**1. Краткие теоретические положения**

Результаты теоретических расчетов и численного моделирования показывают [13], что при луче точечного сечения

$$Q(x, z) = Q \cdot \delta(x - x_0, z - z_0) \quad (1)$$

разность потенциалов  $\xi$ , возникающая в “активной” части объема АОТ, между точками находящимися на концах его диаметра, качественно может быть представлена в виде

$$U(x, z) = \frac{Q}{\pi k} \cdot \frac{\alpha_{13}(x - x_0) + \alpha_{23}(z - z_0)}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}, \quad (2)$$

где  $x_0, z_0$  — координаты падающего луча на верхней грани АОТ;  $\delta$  — дельта-функция, определяемая формой поперечного сечения падающего луча;  $Q = \int q \cdot ds$  — поток тепла, вызванный падающим лучом;  $q$  — плотность теплового потока;  $\alpha_{13}, \alpha_{23}$  — компоненты тензора термоЭДС;  $\sigma_{ik}$  и  $k$  — электропроводность и теплопроводность материала АОТ;  $a, b, c$  — длина, высота и ширина АОТ.

Эта разность потенциалов обуславливает возникновение в пассивной части объема АОТ вихревых термоэлектрических токов [16]

$$j_t = \sigma_{ik} (\xi_k - \xi'_k), \quad (3)$$

в свою очередь приводящих к появлению на боковых ( $a \times b$ ), торцевых ( $b \times c$ ) и рабочих ( $a \times c$ ) гранях соответствующих падений напряжений  $U_x, U_y$  и  $U_z$ . Численный анализ и экспериментальные исследования показали, что эти напряжения характеризуются различной координатной зависимостью, в довольно широких пределах управляемой ориентацией выбранных кристаллографических осей материала термо-

элемента. Проведенные исследования также позволили сделать вывод о том, что при создании АТЛ, КАТП и АТМ наиболее эффективно использование как поперечной, так и продольной составляющих компонент коэффициента термоЭДС.

## 2. Методы экспериментальных исследований координатно-чувствительных устройств на основе АОТ

Экспериментальные исследования опытных образцов датчиков проводились с помощью лазера типа ЛГ-126, излучающего на длинах волн  $\lambda = 0,56; 1,12$  и  $3,36$  мкм энергию плотностью  $q$  порядка  $1$  мВт/мм<sup>2</sup>. Неселективное излучение создавалось установкой “черного тела” типа АЧТ-1А, позволяющей задавать излучение с необходимыми энергетическими и геометрическими распределениями. АОТ с различными геометрическими размерами  $a, b, c$  изготавли-

вались из монокристаллов, характеристики которых представлены в табл.1 [14, 15].

В случае регистрации малых плотностей лучистых потоков АОТ работали в режиме поверхностного оптического поглощения. Их верхние рабочие грани ( $a \times c$ ) содержали неселективное поглощающее покрытие. Регистрация больших плотностей лучистых потоков ( $q \geq 1$  Вт/см<sup>2</sup>) проводилась в режиме оптического пропускания. При этом рабочие грани АОТ и оптически прозрачных теплоотводов содержали оптические просветляющие слои определенной толщины.

Перемещение исследуемых устройств относительно падающего луча или излучения с заданным распределением плотности осуществлялось двухкоординатным столиком в плоскости ( $x\theta z$ ) с точностью  $10$  мкм. Диаметр теплового пятна, вызванного падающим лучом, концентрировался с помощью кварцевых линз и достигал  $0,4-0,5$  мм.

Таблица 1

Характеристики материалов, используемых для АОТ

Материал	Область оптического пропускания, $\lambda$ , мкм	Коэффициент оптического поглощения, $\gamma$ , см <sup>-1</sup>	Коэффициент поперечной термоЭДС, $\alpha_{12}$ , мкВ/К	Коэффициент теплопроводности, $\chi$ , Вт/(см·К)	Коэффициент электропроводности, $\sigma$ , (Ом·см) <sup>-1</sup>
CdSb	2,6-40,0	0,1-0,3	100-300	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,3
ZnSb	2,4-27,0	0,4-0,8	100-200	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,5
CdAs <sub>2</sub>	1,25-16,0	0,5-1,0	250-450	$3 \cdot 10^{-2}$	0,03
ZnAs <sub>2</sub>	1,36-21,0	0,8-1,2	180-360	$6 \cdot 10^{-2}$	0,01
CdS	0,5-18,0	0,2-0,8	120-220	$2 \cdot 10^{-2}$	0,6

Измерение падения напряжения на выходных электровыводах устройств проводилось с помощью цифрового микровольтметра типа ЦЦ-68000.

## 3. Анизотропные термоэлектрические линейки

На рис.1 и 2 представлены конструкции АТЛ-1 и АТЛ-2, работающих в режиме поверхностного оптического поглощения. Основным их элементом является АОТ 1, нижняя рабочая грань ( $a \times c$ ) которого через теплопроводящий диэлектрический слой 6 находится в тепловом контакте с термостатированным корпусом 7. АОТ выполнялся из термоэлектрически анизотропного монокристалла *CdSb* в виде четырехгранной прямоугольной призмы так, что кристаллографические оси с минимальным и максимальным значениями термоЭДС рас-

полагались в плоскости боковой грани ( $a \times b$ ) и ориентировались под оптимальным углом  $\varphi = 45^\circ$  к ее нижней рабочей грани ( $a \times c$ ) [4].

В конструкции АТЛ-1 (рис.1) одна из торцевых граней АОТ ( $b \times c$ ) содержала ( $n+1$ ) точечных электрических микроконтактов ( $4a-4n$ ), которые через расстояния  $c/n$  равномерно располагались вдоль его ширины  $c$ . Противоположная торцевая грань ( $b \times c$ ) содержала общий электрический контакт в виде металлического слоя 2. Микроконтакты 3 с помощью микропроводов 5 соединялись с расположенными в корпусе 7 электровыводами 4.

В конструкции АТЛ-2 (рис.2) электрические микроконтакты 3 располагались симметрично попарно на обеих боковых гранях ( $b \times c$ ) АОТ вдоль длины  $a$  через расстояние  $a/n$ .

Общее количество микроконтактов  $n_x$  или  $n_z$  вдоль длины  $a$  (при  $a > b$ ) (рис.1) или ширины  $c$

(при  $c > b$ ) (рис.2) АОТ определялось необходимой величиной разрешающей способности линеек вдоль заданного геометрического направления. Проведенные исследования показали, что в общем случае ее предельное значение определяется радиусом  $r$  точечного микроконтакта 3 и выбирается, при выполнении условия  $r \ll b$ , не менее  $6r$ . Дальнейшее уменьшение расстояний между микроконтактами ведет к уменьшению чувствительности АТЛ. Общее количество микроконтактов, отвечающее максимальному значению разрешающей способности по длине  $a$  (рис.1) или ширине  $c$  (рис.2) рассматриваемых линеек, составляло  $n_x = 0,6(a/r)$  или  $n_z = 0,6(c/r)$ , соответственно.

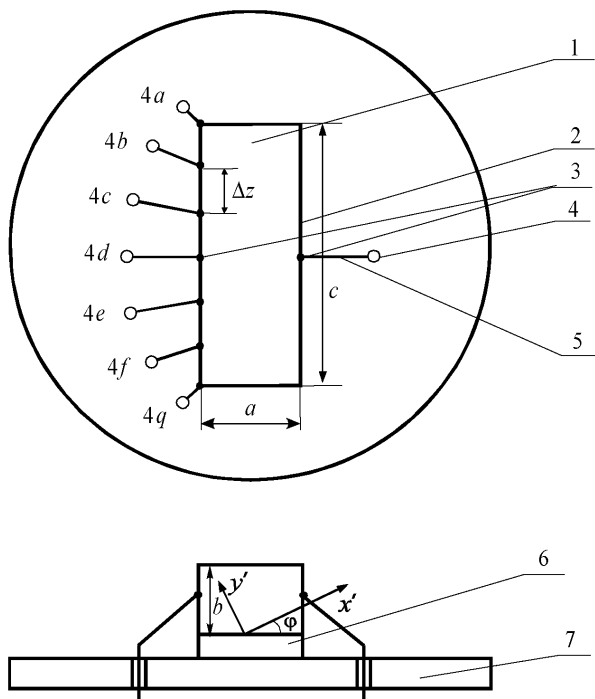


Рис.1. Конструкция АТЛ-1 с электрическими микроконтактами вдоль ширины  $c$  АОТ: 1 — АОТ; 2 — металлические слои; 3 — электрические микроконтакты; 4 — электровыводы; 5 — соединительные проводники; 6 — диэлектрическая теплопроводящая прокладка; 7 — термостатированный корпус.

Вольт-ваттная чувствительность  $S_x$  и  $S_z$  этих устройств (рис.1 и рис.2, соответственно) представляется следующими соотношениями

$$S_x = \frac{\alpha_{13}}{k} \cdot \frac{n}{a}; \quad (4)$$

$$S_z = \frac{\alpha_{13}}{k} \cdot \frac{n}{c}. \quad (5)$$

Результаты проведенных исследований показывают (рис.3), что рассматриваемые датчики

характеризуются различной координатной чувствительностью и могут быть рекомендованы в качестве устройств, позволяющих определять, с одной стороны, координаты падающего луча в широком спектральном диапазоне, с другой — распределение лучистых потоков и температур в требуемом геометрическом направлении.

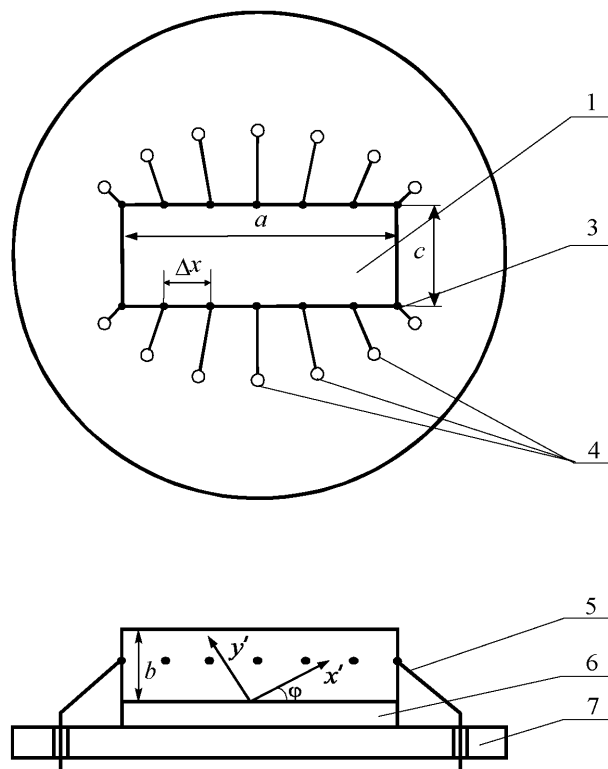


Рис. 2. Конструкция АТЛ-2 с электрическими микроконтактами вдоль длины  $a$  АОТ: 1 — АОТ; 3 — электрические микроконтакты; 4 — электровыводы; 5 — соединительные проводники; 6 — диэлектрическая теплопроводящая прокладка; 7 — термостатированный корпус.

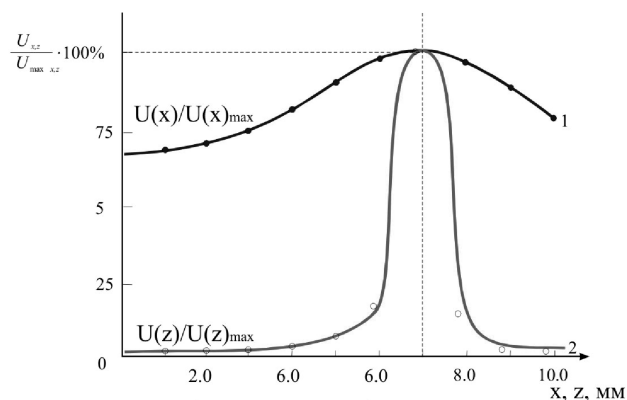


Рис. 3. Зависимость распределения потенциалов АТЛ-1 (кривая 1) и АТЛ-2 (кривая 2) для случаев, когда падающий луч располагается на верхней грани АОТ в точках с координатами  $x=7$  (1) и  $z=7$  (2).

#### 4. Координатно-чувствительный анизотропный термоэлектрический приемник

Предварительные исследования КАТП на основе АОТ с классической ориентацией кристаллографических осей показали, что его координатная чувствительность носит сложный и неоднозначный характер [7]. Поэтому была поставлена задача создания двухкоординатно-чувствительного приемника с тождественной координатной чувствительностью, то есть с одинаковыми от координат теплового пятна  $x$  и  $z$  как характером зависимости, так и величины выходных напряжений  $U_x$  и  $U_z$ .

Анализ выражения (2) показывает, что решение этой задачи достигается подбором ориентации выбранных кристаллографических осей материала АОТ. Это и было использовано в конструкции КАТП, представленной на рис.4.

Такой приемник, работающий в режиме внешнего оптического поглощения (рис.4), состоит из АОТ 1, нижняя рабочая грань ( $axc$ ) которого через теплопроводящий диэлектрический слой 2 находится в теплоконтакте с термостатированным корпусом 6. Его верхняя рабочая грань ( $axc$ ) содержит поглощающий неселективный слой. АОТ 1 ( $a=c \gg b$ ) из термоэлектрически анизотропного материала в виде четырехгранной прямоугольной призмы выполнен так, что кристаллографические оси с минимальным и максимальным значениями коэффициентов термоЭДС располагались в плоскости, образованной диагональю  $\sqrt{2} \cdot a$ , высотой  $b$  и ориентировались под оптимальным углом  $\varphi = 45^\circ$  [4] к ее нижней рабочей грани ( $axc$ ). Каждая из боковых граней ( $axb$ ) и ( $cxb$ ) содержала по  $n+1$  точечных электрических микроконтактов 4, равномерно, через расстояния  $a/n$  и  $c/n$  соответственно расположенных вдоль длины  $a$  и ширины  $c$ . С помощью микропроводов 5 эти микроконтакты 4 соединялись с электровыводами 3, расположенными в корпусе-термостате 6.

Аналогично АТЛ, число микроконтактов  $N$  КАТП определялось заданной величиной его разрешающей способности по площади –  $A = \Delta x \cdot \Delta z$ . Проведенные исследования показали, что ее минимальное значение ограничивается радиусом  $r$  точечного электрического микроконтакта и выбиралось также не менее  $6r$  (при условии  $\Delta x = \Delta z \gg 6r$ ), выполняемого при условии  $r \ll b$ . При этом величина минималь-

ной площади равна  $A_{\min} = 36r^2$ , а общее число микроконтактов составляло  $N = 0.6(a/r + 1)$ . Дальнейшее уменьшение этих расстояний при неизменном радиусе микроконтакта 5 ведет к частичному закорачиванию генерируемой термоЭДС и соответствующему падению чувствительности приемника. Минимальное число микроконтактов составляет  $N = 8$  при максимальном значении площади  $A_{\max} = 0.25(a \times c)$ .

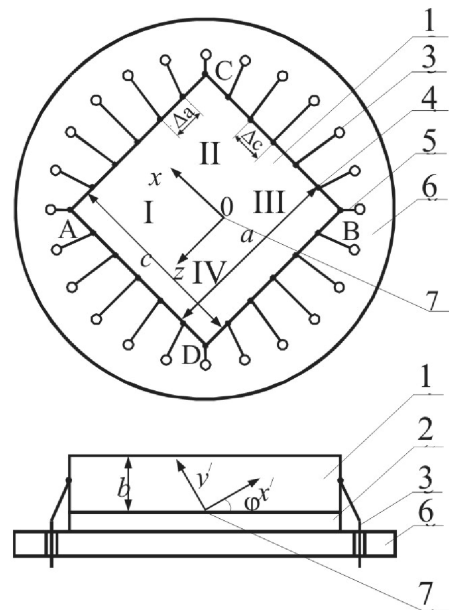


Рис. 4. Конструкция КАТП: 1 – АОТ; 2 – теплопроводящий диэлектрический слой; 3 – электровыводы; 4 – электрические микроконтакты; 5 – соединительные проводники; 6 – термостатированный корпус; I, II, III, IV – номера условных квадрантов;  $a=c=12.0$  мм;  $b=0.5$  мм;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\Delta x = \Delta z = 1.0$  мм.

Таким образом, число точечных электрических микроконтактов  $N$ , расположенных по периферии АОТ, находится в интервале  $8 \leq N \leq 4(a/r + 1)$  и выбирается из необходимого значения разрешающей способности КАТП.

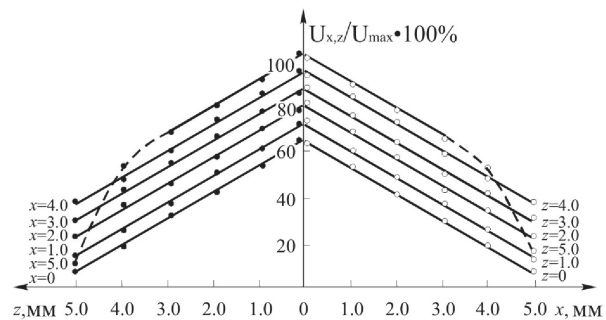


Рис. 5. Координатная чувствительность КАТП (разность потенциалов определялась между контактами AD и AC в I-ом условном квадранте)

Для снижения погрешности определения координат теплового пятна, вызванного излучением, точечные электрические микроконтакты располагались на ребрах  $a$  и  $c$  нижнего основания АОТ. Такое решение позволяет создать изотермические условия работы этих контактов, что ведет к отсутствию влияния, с одной стороны, вихревых термоэлектрических токов Хиросе [16], с другой — анизотропии теплопроводности материала АОТ [17]. Это, в конечном итоге, приводит к повышению точности определения координат падающего луча.

Вольт-ваттная чувствительность такого КАТП представляется следующими выражениями

$$S_x = S_z = \frac{\alpha'_{13}}{k} \cdot \frac{n}{a} = \frac{\alpha''_{13}}{k} \cdot \frac{n}{c}, \quad (6)$$

где  $\alpha'$  и  $\alpha''$  — значения коэффициентов поперечной термоЭДС вдоль соответствующих осей  $x$  и  $z$ , при этом  $\Delta x = \Delta z$ .

Опытный образец приемника выполнялся на основе АОТ из монокристалла  $CdSb$  [13] в виде пластины с  $a=c=12$  мм,  $b=1$  мм. Его периферийные микроконтакты 4 соединялись с электровыводами 5 с помощью золотого микропровода радиусом 10 мкм. При этом разрешающая способность КАТП по площади составляла  $A_f = \Delta x \cdot \Delta z = 0.25$  мм<sup>2</sup>, а общее количество микроконтактов —  $N=96$ . Экспериментальные исследования проводились как при когерентным, так и неселективном видах излучений.

Результаты этих измерений (рис.5) показали, что разности потенциалов  $U_{\Delta x}(q)$  и  $U_{\Delta z}(q)$ , снимаемые с соответствующих электровыводов первого квадранта, характеризуются одинаковой координатной зависимостью. При этом, некоторая их асимметрия вызвана, с одной стороны, ошибкой ориентации диагональной плоскости с выбранными кристаллографическими направлениями, с другой — технологическим разбросом расположения точечных микроконтактов.

Для излучений с произвольной энергетической плотностью рассматриваемый приемник использовался с соответствующим преобразователем электрических потенциалов, информационно-аналитическая обработка которых позволила получить однозначную картину распределения плотности лучистой энергии в его поперечном сечении. Изменение

геометрических размеров АОТ  $a$ ,  $b$ ,  $c$  позволяет в некоторых пределах управлять величиной координатной чувствительности. При высоких плотностях контролируемых лучистых потоков используется режим оптического пропускания [6]. В этом случае их спектральный диапазон несколько сужается.

Таким образом, ориентация кристаллографических осей в диагональной плоскости АОТ позволяет создавать безмодуляционные КАТП с тождественным характером зависимостей “сигнал-координата”, работающие в широком спектральном и динамическом диапазонах.

### 5. Анизотропная термоэлектрическая матрица

Конструкция АТМ [18] состоит (рис. 6) из АОТ с геометрическими размерами  $a$ ,  $b$  и  $c$  ( $a=c \geq b$ ), нижняя рабочая грань которой ( $a \times c$ ) находится в тепловом контакте с диэлектрическим корпусом-термостатом. АОТ из термоэлектрически анизотропного монокристалла в виде прямоугольной четырехгранной призмы выполнен так, что кристаллографические оси с максимальным и минимальным значениями термоЭДС размещены в плоскости, созданной длиной  $a$ , высотой  $b$  и ориентированы под углом  $\varphi = 45^\circ$  к нижней рабочей грани ( $a \times c$ ). На верхнюю рабочую грань ( $a \times c$ ) последовательно нанесены поглощающий слой 1 с неселективными характеристиками и электропроводящий слой 3 из металла, например, серебра, который с помощью микропровода соединен с общим электровыводом 6. На нижней рабочей грани ( $a \times c$ ) на расстояниях  $\Delta a = \Delta c$  вдоль длины  $a$  и ширины  $c$  АОТ расположены точечные микроконтакты 5, соединенные с электровыводами 6, запрессованными в объеме термостатированного корпуса 7 из высокотеплопроводящего диэлектрика.

Общее количество  $N$  микроконтактов 5 на нижней рабочей грани АОТ определяется необходимой величиной разрешающей способности АТМ по площади  $A = \Delta a \times \Delta c$ . Проведенные исследования показали, что, аналогично КАТП минимальное значение этой величины определяется радиусом  $r$  точечного электрического микроконтакта.

При этом распределение продольной термоЭДС в объеме АОТ, вызванное падающим излучением плотностью  $q_0$ , измеряется между общим электровыводом 6 и микроконтактами 5.

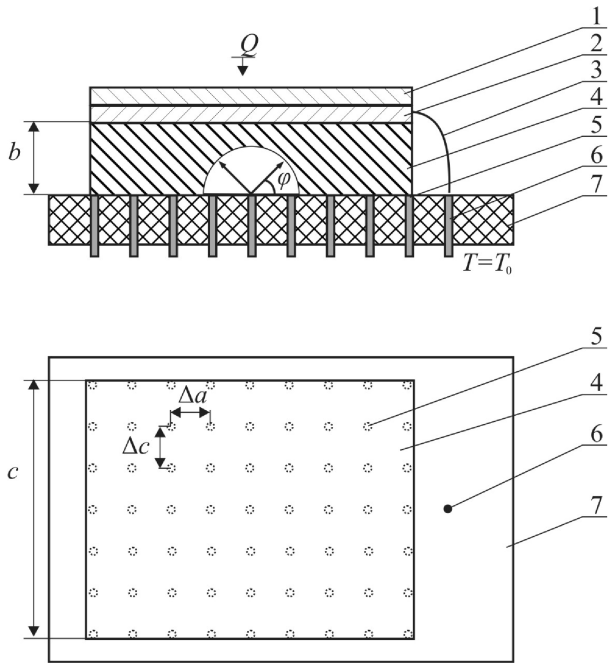


Рис. 6. Конструкция АТМ: 1 — поглощающий слой; 2 — электропроводящий слой; 3 — соединительный провод; 4 — АОТ; 5 — микроконтакты; 6 — общий электровывод; 7 — диэлектрический термостатирующий корпус

Результаты исследований показали, что в случае излучения с постоянной энергетической плотностью, разность потенциалов  $U(x,z)$  на этих электровыводах характеризуется одинаковой величиной

$$U(x,z) = q_0 \frac{\alpha_{23}}{\kappa_{11}}, \quad (7)$$

где  $U(x,z)$  – разность потенциалов между общим электровыводом и контактом с выбранными координатами  $x, z$ ;  $q_0$  – плотность падающего лучистого потока;  $\alpha_{23}, \kappa_{11}$  – коэффициенты продольных термоЭДС и теплопроводности материала АОТ.

В случае произвольного распределения энергетической плотности  $q(x,z)$  используется следующее преобразование

$$U(x,z) = q(x,z) \frac{\alpha_{23}}{\kappa_{11}}, \quad (8)$$

где  $q(x,z)$  – плотность падающего лучистого потока в месте расположения контакта с выбранными координатами  $x, z$ .

На рис. 7 представлен типичный случай экспериментальной зависимости распределения плотности в поперечном сечении лучистого потока, излучаемого источником “черного тела” (установка АЧТ-1А) в спектре длин волн  $\Delta\lambda=5.0-12.0$  мкм, а в табл.2 представлены характеристики некоторых опытных образцов АТМ.

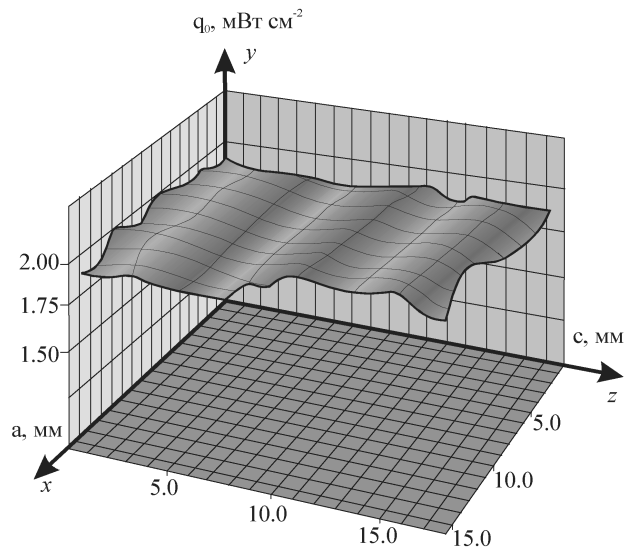


Рис. 7. Фрагмент распределения плотности теплового потока на поверхности верхней грани АТМ при его облучении “черным телом” на установке АЧТ-1А: ( $a=c=18.0$  мм;  $b=1.0$  мм;  $\varphi=45^\circ$ ;  $\Delta x=\Delta z=1.0$  мм).

Следует отметить, что величина координатной чувствительности этих датчиков в довольно широких пределах (до 64% при  $T=300$  К) управляется наложением внешнего магнитного поля [18]. При этом максимальный эффект наблюдается в случае ортогональной ориентации магнитного поля по отношению к кристаллографическим осям с минимальным и максимальным величинами коэффициентов термоЭДС используемой анизотропной пластины.

Таблица 2

Тип устройства	Параметры АОТ			Параметры устройств	
	Материал	Рабочая грань ( $a \times c$ ), мм <sup>2</sup>	Режим работы	Разрешающая способность $A$ , мкВ·мм <sup>-2</sup>	Плотность энергии, $q_{max}$ , Вт·мм <sup>-2</sup>
АТМ-03	<i>CdSb</i>	12.0×12.0	поглощение	24.6	$1.5 \times 10^{-3}$
АТМ-05	<i>CdSb</i>	3.0×3.0	поглощение	38.6	$0.9 \times 10^{-3}$

## Выводы

1. Показана возможность создания анизотропных термоэлектрических координатно-чувствительных датчиков на основе продольной и поперечной термоЭДС в виде однокоординатных линеек, двухкоординатно-чувствительных приемников с тождественной координатной чувствительностью и двухкоординатно-чувствительных матриц.

2. Созданные устройства позволяют определять как координаты теплового пятна, так и распределение теплового потока в широких спектральном и динамическом диапазонах.

## Литература

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. — К.: Техника, 1980. — 280 с.
2. Кравцов Н.В., Стрельников Ю.В. Позиционно-чувствительные датчики оптических следящих систем. — М.: Наука, 1969. — 185 с.
3. Катус Г.П. Оптические датчики температуры. — М.: Госэнергоиздат, 1969.—212с.
4. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. — К.: Наукова думка, 1979.— 767 с.
5. Снарский А.А., Пальти А.М., Ащеулов А.А. Анизотропные термоэлементы // ФТП. — 1997. — Т.31. — №11. — С.1281-1298.
6. Ащеулов А.А., Гуцул И.В. Исследование АОТ в случае различных оптических и тепловых режимов // Технология и конструирование электронной аппаратуры. — 2005. — №4 (58). — С.10-18.
7. Ащеулов А.А., Ильин В.И., Кондратенко В.М., Раренко И.М. Анизотропный термоэлектрический приемник неселективного излучения. А.с. СССР, №1141954 от 22.10.1984.
8. Патент Украины № 63394А. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання. Ащеулов А.А., Охрем В.Г. 15.01.2004. Бюл. № 1, 2004.
9. Патент України №65332А. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання. Ащеулов А.А. 15.03.2004. Бюл.3, 2004.
10. Ащеулов А.А., Беспалько В.В., Раренко А.И. Координатно-чувствительный анизотропный термоэлектрический приемник излучения // Оптический журнал.— 1994. — №2. — С.51-53.
11. Патент України № 2484. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання. Ащеулов А.А. 17.05.2004. Бюл.5, 2004.
12. Патент України № 4192. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання. Ащеулов А.А. 17.01.2005. Бюл.1, 2005.
13. Снарский А.А., Аджигай А.Г., Ащеулов А.А. Координатно-чувствительный анизотропный приемник излучения. Аналитическое описание и численное моделирование // Термоэлектричество.— 2005.— №1.— С.84-90.
14. Ащеулов А.А., Воронка Н.К., Маренкин С.Ф., Раренко И.М. Получение и использование оптимизированных материалов из антимонида кадмия // Неорганические материалы. — 1996. — Т.12. — №9. — С.1049-1060.
15. Ащеулов А.А. Анизотропный радиационный термоэлемент в режиме оптического пропускания // Оптико-механическая промышленность. — 1979. — №12. — С.49-50.
16. Королюк С.Л., Пилат И.М., Самойлович А.Г. и др. Анизотропные термоэлементы // ФТП. — 1973. — Т.7. — №4. — С.725-734.
17. Самойлович А.Г., Слипенко В.Н. ЭДС анизотропного термоэлемента // ФТП. — 1975. — Т.9. — №3. — С.126-131.
18. Пат.України № 25466. Процес керування координатною чутливістю анизотропних термоелектричних пристроїв. Ащеулов А.А., Гуцул І.В. Бюл.15, 2007.