

КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИКОТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

© 2008 г. А. А. Ащеулов, доктор техн. наук

Институт термоэлектричества НАН и Министерства образования
и науки Украины, г. Черновцы, Украина

E-mail: AshcheulovAA@rambler.ru

Показана перспективность использования анизотропных оптикотермоэлементов в качестве безмодуляционных координатно-чувствительных неселективных линеек, приемников и матриц, предназначенных для определения координат точечных источников и распределения лучистых потоков в широких спектральных и динамических диапазонах.

Коды OCIS: 040.6808.

Поступила в редакцию 04.10.2007.

Введение

Определение координат излучающих объектов и распределения плотности энергии лучистых потоков в настоящее время проводится различными приемниками излучения [1]. В основу работы их чувствительных элементов положены фото- или пироэффекты с обязательной модуляцией падающего 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, характеризующихся возможностями определения координат теплового пятна, вызванного падающим лучом, и распределение его энергии в поперечном сечении остается открытым.

Исследования термоэлектрических полей анизотропных сред с различной степенью оптической прозрачности [4–6] в случае, когда площадь поперечного сечения луча меньше площади рабочей грани анизотропного оптикотермоэлемента (АОТ), показали, что величина и знак возникающей при этом термоЭДС определяется, с одной стороны, геометрией расположения теплового пятна, вызванного лучом, с другой – местонахождением токосъемных контактов [7]. Это позволило сделать выводы о том, что АОТ может служить реальной основой для создания оригинальных координатно-чувствительных анизотропных термоэлектрических устройств в виде линеек (АТЛ) [8, 9], приемников (АТП) [10, 11], а также матриц (АТМ) [12], работающих в режимах поверхностного поглощения или оптического пропускания.

В данном сообщении приводится краткое описание этих устройств, а также их некоторые характеристики.

Краткие теоретические положения

Результаты теоретических расчетов и численного моделирования показывают [13], что при падающем луче с сечением точечной формы

$$Q(x, y) = Qs(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

разность потенциалов ξ , возникающая в “активной” части объема АОТ, качественно может быть представлена в виде

$$\xi(x, y) = \frac{Q}{\pi k} \frac{\alpha_{13}(x - x_0) + \alpha_{23}(y - y_0)}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (2)$$

где x_0, y_0 – координаты падающего луча на верхней грани АОТ, $Q = \int q ds$ – поток тепла, вызванный падающим лучом, q – плотность теплового потока, α_{13}, α_{23} – компоненты тензора термоЭДС, σ_{ik} и k – электропроводность и теплопроводность материала АОТ, a, b, c – длина, высота и ширина АОТ, s – площадь верхней облученной поверхности активной части объема АОТ.

Эта разность потенциалов обуславливает возникновение в пассивной части объема АОТ вихревых термоэлектрических токов [14]

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

обуславливающих, в свою очередь, появление 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 управляемых в довольно широких пределах выбором ориентации кристаллографических осей материала термоэлемента. Проведенные исследования также позволили сделать вывод о том, что в случае АТЛ и АТП наиболее эффективно использование компо-

нентов поперечной, а для АТМ – продольной составляющих термоЭДС.

Методы экспериментальных исследований координатно-чувствительных устройств на основе АОТ

Экспериментальные исследования опытных образцов АТЛ, АТП и АТМ 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^2 . Неселективное излучение создавалось установкой “черного тела” типа АЧТ-1А с необходимыми энергетическими и геометрическими распределениями. АОТ различных геометрических размеров a, b, c изготавливались из монокристаллов антимонидов и диарсенидов кадмия и цинка, характеристики которых представлены в табл. 1 [15, 16].

В случае регистрации малых плотностей лучистых потоков АОТ работали в режиме поверхностного оптического поглощения. Их верхние рабочие грани ($a \times c$) имели неселективное поглощающее покрытие. Регистрация лучистых потоков повышенной плотности ($q \geq 1 \text{ Вт/см}^2$) проводилась в режиме оптического пропускания [5]. При этом рабочие грани АОТ и оптически прозрачных теплоотводов имели оптические просветляющие слои из сульфида цинка и других материалов соответствующей толщины.

Перемещение исследуемых устройств относительно падающего луча, поперечное сечение которого имеет точечную форму, или излучения с заданным распределением плотности осуществлялось двухкоординатным столиком в плоскости (xOy) с точностью 10 мкм . Диаметр теплового пятна, вызванного падающим лучом, задавался с помощью кварцевых линз и составлял $0,4\text{--}0,5 \text{ мм}$.

Измерение выходных напряжений исследуемых устройств проводилось микровольтметром типа Ш-68000.

Анизотропные термоэлектрические линейки (АТЛ)

На рис. 1 и 2 представлены две конструкции АТЛ, работающие 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 из термоэлектрически анизотропного монокристалла CdSb выполнялся в виде

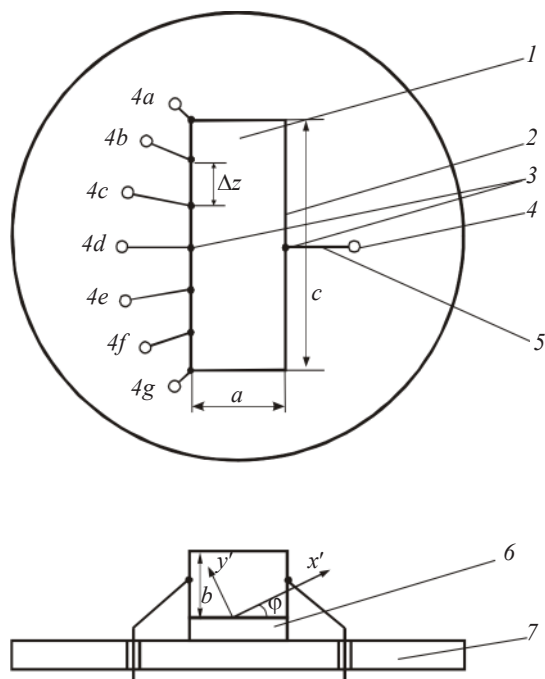


Рис. 1. Конструкция АТЛ-1 с электрическими микроконтактами вдоль ширины c АОТ. 1 – АОТ, 2 – металлический слой, 3 – электрические микроконтакты, 4 – электровыводы, 5 – соединительные проводники, 6 – диэлектрическая теплопроводящая прокладка, 7 – термостатированный корпус.

Таблица 1. Характеристики материалов, используемых для АОТ

Материал	Область оптического пропускания λ , мкм	Коэффициент оптического поглощения γ , см^{-1}	Коэффициент поперечной термоЭДС $\Delta\alpha$, мкВ/К	Коэффициент теплопроводности ξ , Вт/см К	Коэффициент электропроводности σ , $(\text{Ом см})^{-1}$
CdSb	2,6–40,0	0,1–0,3	100–300	$1,5 \times 10^{-2}$	0,3
ZnSb	2,4–27,0	0,4–0,8	100–200	$1,1 \times 10^{-2}$	0,5
CdAs ₂	1,25–16,0	0,5–1,0	250–450	3×10^{-2}	0,03
ZnAs ₂	1,36–21,0	0,8–1,2	180–360	6×10^{-2}	0,01
CdS	0,5–18,0	0,2–0,8	120–220	2×10^{-2}	0,6

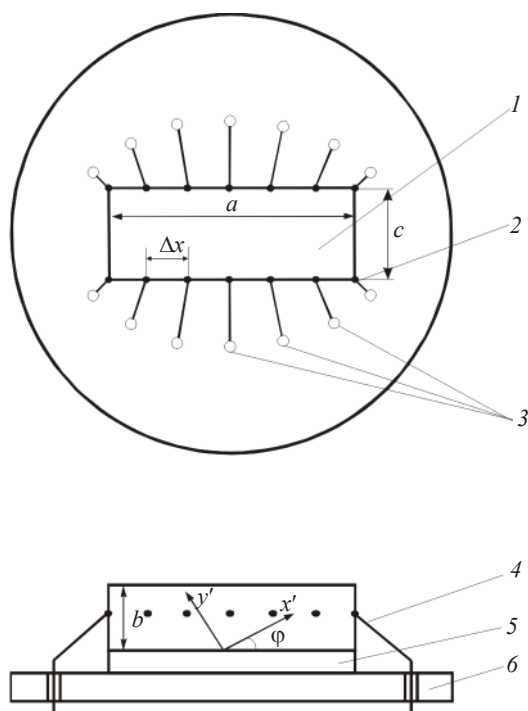


Рис. 2. Конструкция АТЛ-2 с электрическими микроконтактами вдоль длины a АОТ. 1 – АОТ, 2 – электрические микроконтакты, 3 – электровыводы, 4 – соединительные проводники, 5 – диэлектрическая теплопроводящая прокладка, 6 – термостатированный корпус.

четырёхгранной прямоугольной призмы так, что кристаллографические оси с минимальным и максимальным значениями термоЭДС располагались 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 первой конструкции АТЛ-1 (рис. 1) одна из торцевых граней АОТ ($b \times c$) содержала $(n + 1)$ точечных электрических микроконтактов ($4a - 4n$), равномерно расположенных вдоль его ширины c на расстоянии c/n друг от друга. Противоположная торцевая грань ($b \times c$) имела общий электрический контакт в виде металлического слоя 2. Микроконтакты 3 с помощью микропроводов 5 соединялись с расположенными в корпусе 7 электровыводами 4.

Электрические микроконтакты 2 второй конструкции АТЛ-2 (рис. 2) располагались попарно симметрично напротив друг друга на обеих боковых гранях ($b \times c$) АОТ вдоль длины a на равных расстояниях друг от друга a/n .

Экспериментальные исследования показали, что общее количество микроконтактов n_x или n_y вдоль длины a (при $a > b$) (рис. 1) или ширины c (при $c > b$) (рис. 2) АОТ определялось необходимой величиной разрешающей способности ΔL линеек вдоль задан-

ного геометрического направления. Проведенные исследования показали, что в общем случае ее предельное значение определяется радиусом r точечного микроконтакта 2 и выбирается при выполнении условия $r \ll b$ и не менее $6r$. Дальнейшее уменьшение расстояний между микроконтактами ведет к снижению 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 $n_y = 0,6(c/r)$ соответственно.

Вольт-ваттная чувствительность S_x^I , S_y^I рассматриваемых устройств представляется следующими соотношениями:

$$S_x^I = \frac{\alpha_{13}}{k} \frac{n}{a}, \quad (4)$$

$$S_y^I = \frac{\alpha_{13}}{k} \frac{n}{c}. \quad (5)$$

Результаты измерений, представленные на рис. 3, показали, что предложенные АТЛ 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 необходимом геометрическом направлении. Характеристики некоторых АТЛ представлены в табл. 2.

Изменение размеров АОТ позволяет в некоторых пределах управлять крутизной координатной чув-

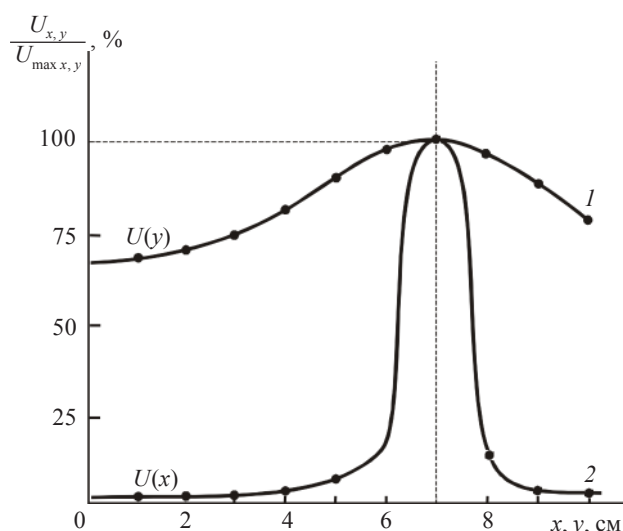


Рис. 3. Зависимости распределения потенциалов АТЛ-1 (кривая 1) и АТЛ-2 (кривая 2) для случаев, когда падающий луч располагается на верхней грани АОТ в точках с координатами $x = 7$ мм (1) и $y = 7$ мм (2).

Таблица 2. Характеристики АТЛ

Тип устройства	Параметры АОТ			Параметры устройств	
	Материал	Рабочая грань ($a \times c$), мм ²	Режим работы	Разрешающая способность по длине ΔL , мкВ мм ⁻¹	Плотность энергии $q_{\max}$, Вт мм ⁻²
АТЛ-05К	CdSb	12,0	поглощение	0,5	5×10^{-4}
АТЛ-07К	CdSb	2,0	поглощение	0,5	$1,25 \times 10^{-3}$
АТЛ-12К	CdSb	8,0	поглощение	0,5	$1,1 \times 10^{-3}$
АТЛ-21К	CdSb	6,0	поглощение	0,5	$2,4 \times 10^{-4}$

ствительности этих устройств. В случае высоких плотностей регистрируемых лучистых потоков используется режим оптического пропускания [6].

Координатно-чувствительный анизотропный термоэлектрический приемник

Результаты предварительных исследований АТП 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, т. е. с одинаковыми как по величине, так и по характеру зависимостей выходных напряжений U_x и U_y .

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

Этот приемник, работающий в режиме внешнего оптического поглощения, состоит из АОТ 1, нижняя рабочая грань ($a \times c$) которого через теплопроводящий диэлектрический слой 2 находится в тепловом контакте с термостатированным корпусом 6. Его верхняя рабочая грань ($a \times c$) содержит 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 $\sqrt{2}a$, высотой b , и ориентировались под оптимальным углом $\varphi = 45^\circ$ [4] к ее нижней рабочей грани ($a \times c$). Каждая из боковых граней ($a \times b$) и ($c \times b$) содержала по $n + 1$ точечных электрических микроконтактов 4, равномерно, через промежутки a/n и c/n , расположенных соответственно вдоль длины a и ширины c . С помощью микропроводов 5 эти микроконтакты

роконтакты 4 соединены с электровыводами 3, расположенными в корпусе-термостате 6.

Аналогично АТЛ, выбор числа микроконтактов N АТП определялся заданной величиной его разрешающей способности по площади – $\Delta A = \Delta x \Delta y$. Проведенные исследования показали, что ее минимальное значение ограничивается радиусом r точечного электрического микроконтакта и выбирается не менее $6r$ (при условии $\Delta x = \Delta y \gg 6r$), выполняемого при $r \ll b$. При этом величина минимальной площади равна $\Delta A_{\min} = 36r^2$, а общее число микроконтактов составляло $N = 0,6(a/r + 1)$. Дальнейшее

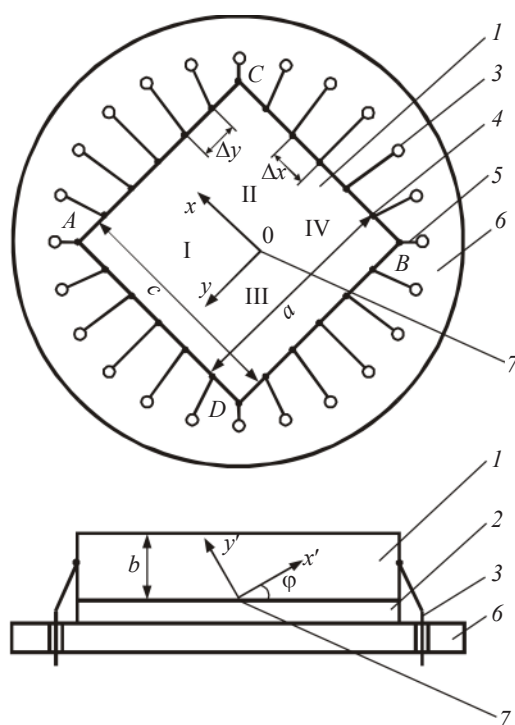


Рис. 4. Конструкция АТП. 1 – АОТ, 2 – теплопроводящий диэлектрический слой, 3 – электровыводы, 4 – электрические микроконтакты, 5 – соединительные проводники, 6 – термостатированный корпус; I, II, III, IV – номера условных квадрантов.

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 $A_{\max} = 0,25(a \times c)$.

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

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 Хироме [16], с другой – анизотропии теплопроводности материала АОТ [17]. Это в конечном итоге приводит к повышению точности определения координат падающего луча.

Вольт-ваттные чувствительности S_x^{II} и S_y^{II} такого АТП в направлениях x и y соответственно представляются следующим выражением:

$$S_x^{\text{II}} = S_y^{\text{II}} = \frac{\alpha_{13}}{k} \frac{n}{c}, \quad (6)$$

где α_{13} – значения коэффициента поперечной термоЭДС.

Опытный образец приемника выполнялся на основе АОТ из монокристалла CdSb [14] в виде пластины с $a = c = 12$ мм, $b = 1$ мм. Периферийные микроконтакты 4 соединялись с электровыводами 5 с помощью золотого микропровода радиусом 10 мкм. При этом разрешающая способность АТП по площади ΔA составляла $\Delta A_1 = \Delta a \Delta c = 0,25$ мм², а общее количество микроконтактов $N = 96$. Экспериментальные исследования АТП проводились как при когерентном, так и неселективном видах излучений и показывают (рис. 5), что разности потенциалов

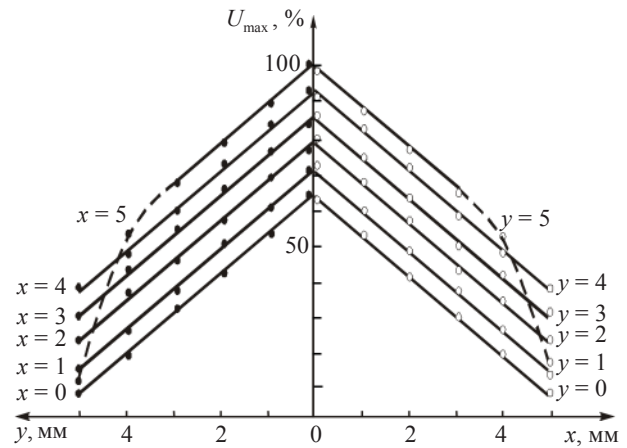


Рис. 5. Координатная чувствительность АТП (разность потенциалов определялась между контактами AD и AC в I-м условном квадранте; $a = c = 12,0$ мм, $b = 0,5$ мм, $\varphi = 45^\circ$, $\Delta x = \Delta y = 1,0$ мм).

$U_{\Delta x}(q)$ и $U_{\Delta y}(q)$ на соответствующих электровыводах первого квадранта характеризуются практически одинаковой координатной зависимостью. При этом некоторая их асимметрия вызывается, с одной стороны, ошибкой ориентации диагональной плоскости с выбранными кристаллографическими направлениями, с другой – технологическим разбросом местонахождения точечных микроконтактов. Характеристики некоторых АТП на основе АОТ из различных кристаллов приведены в табл. 3.

Для излучений произвольной энергетической плотности предложенный приемник применялся с соответствующим преобразователем электрических потенциалов [12]. При этом информационно-аналитическая обработка этих потенциалов позволяет получить приблизительную картину распределения плотности лучистой энергии в поперечном сечении луча с заданной разрешающей способностью.

Таким образом расположение выбранных кристаллографических осей в диагональной плоскости АОТ позволяет создавать безмодуляционные АТП

Таблица 3. Характеристики АТП

Тип устройства	Параметры АОТ			Параметры устройств	
	Материал	Рабочая грань ($a \times c$), мм ²	Режим работы	Разрешающая способность по площади ΔA_1 , мкВ мм ⁻²	Плотность энергии $q_{\max}$, Вт мм ⁻²
АТП-02	CdS	40,0	пропускание	0,25	$1,2 \times 10^{-2}$
АТП-7	CdSb	144,0	поглощение	0,25	$6,0 \times 10^{-4}$
АТП-12	ZnAs ₂	64,0	поглощение	0,25	$1,5 \times 10^{-3}$

с тождественным характером зависимостей сигнал-координата, работающие в широком спектральном и динамическом диапазонах.

Координатно-чувствительная анизотропная термоэлектрическая матрица

Исследования, проведенные нами, показали, что при тепловом пятне, сравнимом по площади с верхней рабочей гранью АОТ, вышеперечисленные АТЛ и АТП не дают однозначной картины распределения плотности энергии в поперечном сечении падающего луча. Задача эта была решена нами путем использования приемника на основе продольной термоЭДС в виде АТМ [12], одна из конструкций которой представлена на рис. 6.

Эта АТМ состоит из АОТ 4 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 7. АОТ выполнен из термоэлектрически анизотропного монокристалла в виде прямоугольной четырехгранной призмы так, что кристаллографические оси с максимальным и минимальным значениями термоЭДС

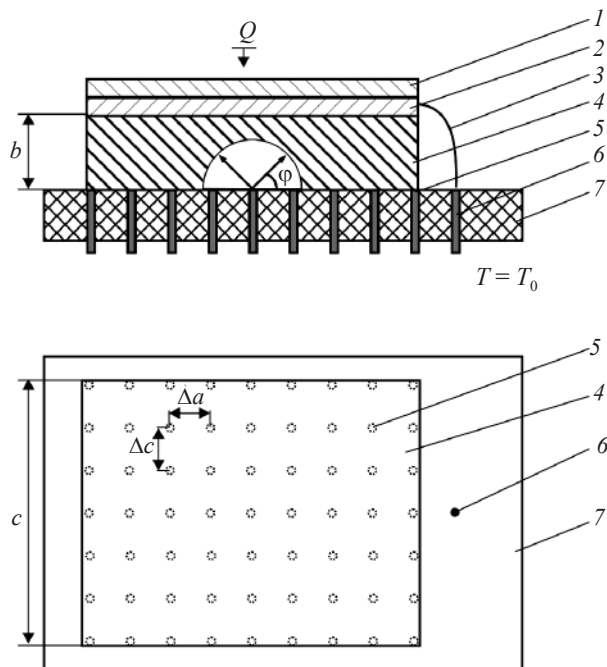


Рис. 6. Конструкция АТМ. 1 – поглощающий слой, 2 – электропроводящий слой, 3 – соединительный провод, 4 – АОТ, 5 – микроконтакты, 6 – общий электровывод, 7 – диэлектрический термостатирующий корпус.

размещены в плоскости, созданной длиной a , высотой b , и ориентированы под углом $\varphi = 45^\circ$ к нижней рабочей грани ($a \times c$). Верхняя рабочая грань ($a \times c$) имеет последовательно расположенные поглощающий слой 1 с селективным покрытием и электропроводящий слой 2 из металла, например, серебра, который микропроводом соединен с общим электровыводом 6. Нижняя рабочая грань ($a \times c$) имеет точечные микроконтакты 3, расположенные на расстояниях $\Delta a = \Delta c$ вдоль длины a и ширины c АОТ 4 и соединенные с электровыводами 5, запрессованными в объеме термостатированного корпуса 7 из высокотеплопроводящего диэлектрика.

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

При этом распределение продольной термоЭДС объема АОТ, вызванное падающим излучением плотностью q_0 , измеряется между общим электровыводом 6 и выводами 5.

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

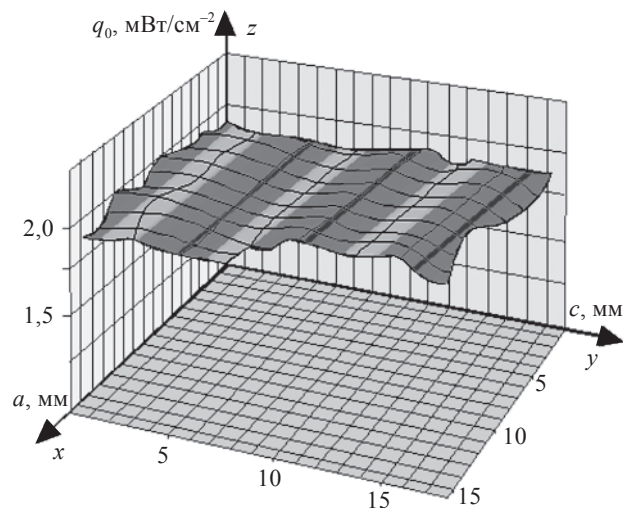


Рис. 7. Фрагмент распределения плотности теплового потока на поверхности верхней грани АТМ при его облучении “черным телом” на установке АЧТ-1А: $a = c = 18,0$ мм, $b = 1,0$ мм, $\varphi = 45^\circ$, $\Delta x = \Delta y = 1,0$ мм.

Таблица 4. Характеристики АТМ

Тип устройства	Параметры АОТ			Параметры устройств	
	Материал	Рабочая грань (a×c), мм ²	Режим работы	Разрешающая способность по площади ΔA, мкВ мм ⁻²	Плотность энергии q _{max} , Вт мм ⁻²
АТМ-03	CdSb	144,0	поглощение	0,25	1,5×10 ⁻³
АТМ-05	CdSb	9,0	поглощение	0,25	0,9×10 ⁻³

$$U(x, y) = q_0 \frac{\alpha_{11} + \alpha_{22}}{\kappa_{11} + \kappa_{22}}. \quad (7)$$

Для излучений с произвольным распределением энергетической плотности $q(x, y)$ предложенная АТМ используется с применением соответствующих преобразований

$$U(x, y) = q_{(x,y)} \frac{\alpha_{11} + \alpha_{22}}{\kappa_{11} + \kappa_{22}}. \quad (8)$$

На рис. 7 представлена типичная зависимость распределения плотности лучистого потока в его поперечном сечении, вызванного источником “черного тела” АЧТ-1А, излучающим в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 5,0\text{--}12,0$ мкм, а в табл. 4 представлены характеристики некоторых экспериментальных АТМ.

Выводы

Впервые на основе АОТ показана возможность создания оригинальных неселективных координатно-чувствительных устройств, таких как анизотропные термоэлектрические линейки и приемники для определения координат точечных источников излучения, а также анизотропные термоэлектрические матрицы, позволяющие определить плотность потоков и их распределение в поперечном сечении в широких спектральных и динамических диапазонах лучистых энергий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. Киев: 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. 212 с.
4. Анатыхук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979. 767 с.
5. Ащеулов А.А. Вольт-ваттная чувствительность радиационных анизотропных оптикотермоэлементов при различных оптических и тепловых режимах // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 5. С. 36–48.
6. Ащеулов А.А., Гуцул И.В. Исследование АОТ в случае различных оптических 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. Бюл. изобр. 1984. № 22.
8. Ащеулов А.А., Охрем В.Г. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання // Патент України № 63394А. 2004.
9. Ащеулов А.А. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання // Патент України № 65332А. 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. Ащеулов А.А. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання // Патент України № 2484. 2004.
12. Ащеулов А.А. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання // Патент України № 4192и. 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. Корольюк С.Л., Пилат И.М., Самойлович А.Г. и др. Анизотропные термоэлементы // ФТП. 1973. Т. 7. № 4. С. 725–734.
15. 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.
16. Ащеулов А.А. Анизотропный радиационный термоэлемент в режиме оптического пропускания // ОМП. 1979. № 12. С. 49–50.
17. Самойлович А.Г., Слипенченко В.Н. ЭДС анизотропного термоэлемента // ФТП. 1975. Т. 9. № 3. С. 126–131.