

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, д. ф.-м. н. И. В. ГУЦУЛ,  
к. ф.-м. н. В. Д. ФОТИЙ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества,  
ЧНУ им. Юрия Федьковича, КТБ «Фонон»  
E-mail: om@inst.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
15.06 2006 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ  
(ДонНУ, г. Донецк)

## КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНОГО ОПТИКОТЕРМОЭЛЕМЕНТА

*Представлена конструкция устройства, предназначенного для регистрации излучения. Показана перспективность его использования в качестве безмодуляционного неселективного координатно-чувствительного приемника.*

Определение координат излучающих объектов, а также распределения 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, характеризующихся возможностями как определения координат теплового пятна, вызванного падающим лучом, 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 термо-эдс характеризуются, с одной стороны, геометрией расположения теплового пятна, вызванного лучом, а 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 устройств, таких как анизотропные термоэлектрические линейки (АТЛ) [8, 9] и координатно-чувствительные анизотропные термоэлектрические приемники (КАТП) [10, 11], работающих в режимах поверхностного поглощения и оптического пропускания.

В настоящем сообщении представлено краткое описание координатно-чувствительного приемника с тождественной чувствительностью от координат, а также приведены некоторые его характеристики.

### Краткие теоретические положения

Результаты теоретических расчетов и численного моделирования показывают [12, 13], что при луче точечной формы

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

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

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

где  $Q = \int q \cdot ds$  — поток тепла, вызванный падающим лучом;  
 $q$  — плотность теплового потока;  
 $s$  — площадь верхней грани “активной” части объема АОТ;  
 $x_0, z_0$  — координаты падающего луча на верхней грани АОТ;  
 $\delta$  — дельта-функция, определяемая формой поперечного сечения падающего луча;  
 $k$  — теплопроводность материала АОТ;  
 $\alpha_{13}, \alpha_{23}$  — компоненты тензора термо-эдс.

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

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

(где  $\sigma_{ik}$  — электропроводность материала АОТ), которые, в свою очередь, приводят к появлению на боковых ( $a \times b$ ), торцевых ( $b \times c$ ) и рабочих ( $a \times c$ ) гранях АОТ соответствующих падений напряжений  $U_x, U_y$  и  $U_z$ . (Здесь  $a, b, c$  — длина, высота и ширина АОТ.)

Численный анализ и экспериментальные исследования показали, что эти напряжения характеризуются различной координатной зависимостью, в довольно широких пределах управляемой ориентацией выбранных кристаллографических осей материала термоэлемента. Проведенные исследования также позволили сделать вывод о том, что при создании КАТП наиболее эффективно использование поперечной составляющей термо-эдс.

### Методы экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования опытных образцов КАТП 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  $a$ ,  $b$ ,  $c$  изготавливались из монокристаллов, характеристики которых представлены в таблице [14, 15].

Характеристики материалов, используемых для АОТ

Материал	Область оптического пропускания, $\lambda$ , мкм	Коэффициент оптического поглощения, $\gamma$ , см <sup>-1</sup>	Коэффициент поперечной термо-эдс, $\Delta\alpha$ , 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

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 теплопроводов содержали оптические просветляющие слои определенной толщины.

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

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

### 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*, т. е. с одинаковыми от координат теплового пятна  $x$  и  $z$  и характером зависимости, и величиной 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. 1. Такой 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 поглощающий неселективный слой.

АОТ 1 ( $a=c \gg b$ ) из термоэлектрически анизотропного материала в виде четырехгранной прямоуголь-

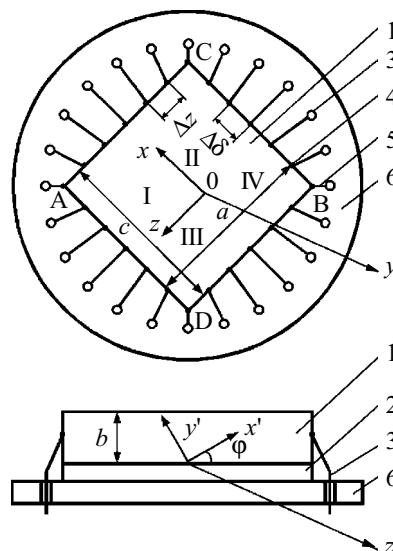


Рис. 1. Конструкция КАТП:

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

ной призмы выполнен так, что кристаллографические оси с минимальным и максимальным значениями коэффициентов термо-эдс располагались в плоскости, образованной диагональю  $\sqrt{2} \cdot a$  и высотой  $b$ , и ориентировались под оптимальным углом ( $\varphi=45^\circ$  [4, с. 88]) 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 расстояния  $a/n$  и  $c/n$ ) расположенных соответственно вдоль длины  $a$  и ширины  $c$ . С помощью теплопроводов 5 эти микроконтакты соединялись с электровыводами 3, расположенными в корпусе-термостате 6.

Аналогично анизотропным термоэлектрическим линейкам [13], число микроконтактов  $N$  КАТП определялось заданной величиной его разрешающей способности по площади  $A=\Delta x \cdot \Delta z$ . Проведенные исследования показали, что минимальное значение  $A$  ограничивается радиусом  $r$  точечного электрического микроконтакта. Оно выбиралось также не менее  $6r$  при условии  $\Delta x=\Delta z \gg 6r$  ( $r < b$ ). При этом величина минимальной площади равна  $A_{\min}=36r^2$ , а общее число микроконтактов составляло  $N_{\min}=0,6(a/r+1)$ . Дальнейшее уменьшение этих расстояний при неизменном радиусе микроконтакта ведет к частичному закорачиванию генерируемой термо-эдс 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 из необходимого значения разрешающей способности КАТП.

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 термо-эдс вдоль соответствующих осей  $x$  и  $z$ , при этом  $\Delta x = \Delta z$ .

Опытный образец приемника выполнялся на основе АОТ из монокристалла CdSb [15] в виде пластины с  $a=c=12$  мм,  $b=1$  мм. Периферийные микроконтакты 4 соединялись с электровыводами 3 с помощью золотого микропровода радиусом 10 мкм. При этом разрешающая способность КАТП по площади составляла  $A_1 = \Delta x \cdot \Delta z = 0,25$  мм<sup>2</sup>, а общее количество микроконтактов —  $N=96$ . Экспериментальные исследования КАТП проводились как при когерентном, так и неселективном видах излучений.

Результаты проведенных измерений (рис. 2) показывают, что выходные 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 местонахождения точечных микроконтактов.

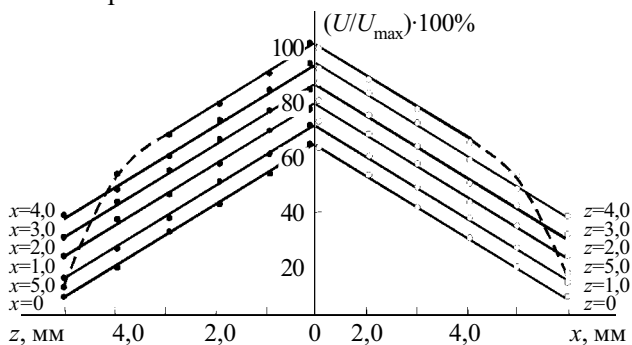


Рис. 2. Координатная чувствительность КАТП (разность потенциалов определялась между контактами AD и AC в I условном квадранте)

Для излучений с произвольной энергетической плотностью предложенный приемник использовался с соответствующим преобразователем электрических потенциалов. При этом информационно-аналитическая обработка этих потенциалов позволяет получить однозначную картину распределения плотности лучистой энергии в его поперечном сечении с заданной разрешающей способностью при отношении площадей поперечного сечения падающего луча к рабочей грани АОТ не более 0,2.

Изменение геометрических размеров АОТ  $a$ ,  $b$ ,  $c$  позволяет в некоторых пределах управлять величиной координатной чувствительности. В случае высо-

ких плотностей контролируемых лучистых потоков используется режим оптического пропускания [6]. В этом случае их спектральный диапазон несколько сужается.

Таким образом, расположение выбранных кристаллографических осей в диагональной плоскости АОТ позволяет создавать безмодуляционные КАТП с тождественным характером зависимостей «сигнал—координата», работающие в широком спектральном и динамическом диапазонах.

### Выводы

1. Показана возможность создания анизотропных двухкоординатно-чувствительных приемников на основе поперечной термо-эдс с тождественной чувствительностью.

2. Предложенный приемник позволяет определять координаты теплового пятна, вызванного падающим излучением, в широких спектральном и динамическом диапазонах.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники.— К.: Техника, 1980.
2. Кравцов Н. В., Стрельников Ю. В. Позиционно-чувствительные датчики оптических следящих систем.— М.: Наука, 1969.
3. Катгис Г. П. Оптические датчики температуры.— М.: Госэнергоиздат, 1969.
4. Анагычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства.— К.: Наукова думка, 1979.
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 анизотропных оптикотермоэлементов в случае различных оптических и тепловых режимов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2005.— № 4.— С. 10—18.
7. А. с. 1141954 СССР. Анизотропный термоэлектрический приемник неселективного излучения / А. А. Ащеулов, В. И. Ильин, В. М. Кондратенко, И. М. Раренко. — 1984.
8. Пат. 63394А Украины. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання / А. А. Ащеулов, В. Г. Охрем.— 2004.— Бюл. № 1.
9. Пат. 65332А Украины. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання / А. А. Ащеулов.— 2004.— Бюл. № 3.
10. Ащеулов А. А., Беспалько В. В., Раренко А. И. Координатно-чувствительный анизотропный термоэлектрический приемник излучения // Оптический журнал.— 1994.— № 2.— С. 51—53.
11. Пат. 2484 Украины. Анизотропный термоэлектрический приемник випромінювання / А. А. Ащеулов.— 2004.— Бюл. № 5.
12. 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.
13. Ащеулов А. А., Гуцул И. В. Анизотропные термоэлектрические координатно-чувствительные линейки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2006.— № 2.— С. 39—40.
14. Ащеулов А. А. Анизотропный радиационный термоэлемент в режиме оптического пропускания // Оптико-механическая промышленность.— 1979.— № 12.— С. 49—50.
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. Корольок С. Л., Пилат И. М., Самойлович А. Г. и др. Анизотропные термоэлементы // ФТП.— 1973.— Т. 7, № 4.— С. 725—734.
17. Самойлович А. Г., Слипченко В. Н. ЭДС анизотропного термоэлемента // Там же.— 1975.— Т. 9, № 3.— С. 126—131.