

*has formed after the first long annealing in wafers, which previously was pasted complete cycle of internal getter formation, already at the oxygen content more than  $6.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , and in wafers, was pasted only 1150 °C anneal, — more than  $7.4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . This allows or to expand range of initial oxygen concentrations, or to do only anneal at 1150 °C.*

УДК 621.362.1:621.384.326.2

## Координатно-чувствительные устройства на основе поперечной термоЭДС

А. А. Ащеулов

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, Черновцы, Украина

*Представлены конструкции ряда устройств на основе анизотропных оптикотермоэлементов, используемых для регистрации излучения. Показана перспективность их использования в качестве безмодуляционных неселективных координатно-чувствительных линеек и приемников, предназначенных для определения координат лучистых потоков в широких спектральном и динамическом диапазонах.*

### Введение

Определение координат излучающих объектов, а также распределения плотности энергии лучистых потоков в настоящее время проводятся 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 термоЭДС характеризуются, с одной стороны, геометрией расположения теплового пятна, вызванного лучом, с другой стороны — местонахождением токосъемных контактов [7]. Это позволило сделать выводы о том, что в определен-

ных 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], работающие в режимах поверхностного поглощения и оптического пропускания.

Ниже дано краткое описание этих координатно-чувствительных устройств и приведены их некоторые характеристики.

### Краткие теоретические положения

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

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

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

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

где  $x_0, z_0$  — координаты падающего луча на верхней грани АОТ;

$\delta$  — дельта-функция, определяемая формой поперечного сечения падающего луча;

$Q = \int q ds$  — 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.

Разность потенциалов (2) обуславливает возникновение в пассивной части объема АОТ вихревых термоэлектрических токов [13]

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

которые, в свою очередь, приводят к падению на боковых ( $a \times b$ ), торцевых ( $b \times c$ ) и рабочих ( $a \times c$ ) гранях соответствующих падений напряжений  $U_x$ ,  $U_y$  и  $U_z$ ; ( $a, b, c$  — длина, высота, 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 АТЛ и КАТП наиболее эффективно использование поперечной составляющей термоЭДС.

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

Экспериментальные исследования опытных образцов АТЛ и КАТП проводили с помощью лазера типа ЛГ-126, излучающего на длинах волн  $\lambda = 0,56; 1,12$  и  $3,36$  мкм энергию плотностью  $q$  порядка  $1 \text{ мВт/мм}^2$ . 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 [13—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. Регистрацию больших плотностей лучистых потоков ( $q \geq 1 \text{ Вт/см}^2$ ) проводили 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  $10 \text{ мкм}$ . Диаметр теплового пятна, вызванного падающим лучом, концентрировался с помощью кварцевых линз и составлял  $0,4—0,5 \text{ мм}$ .

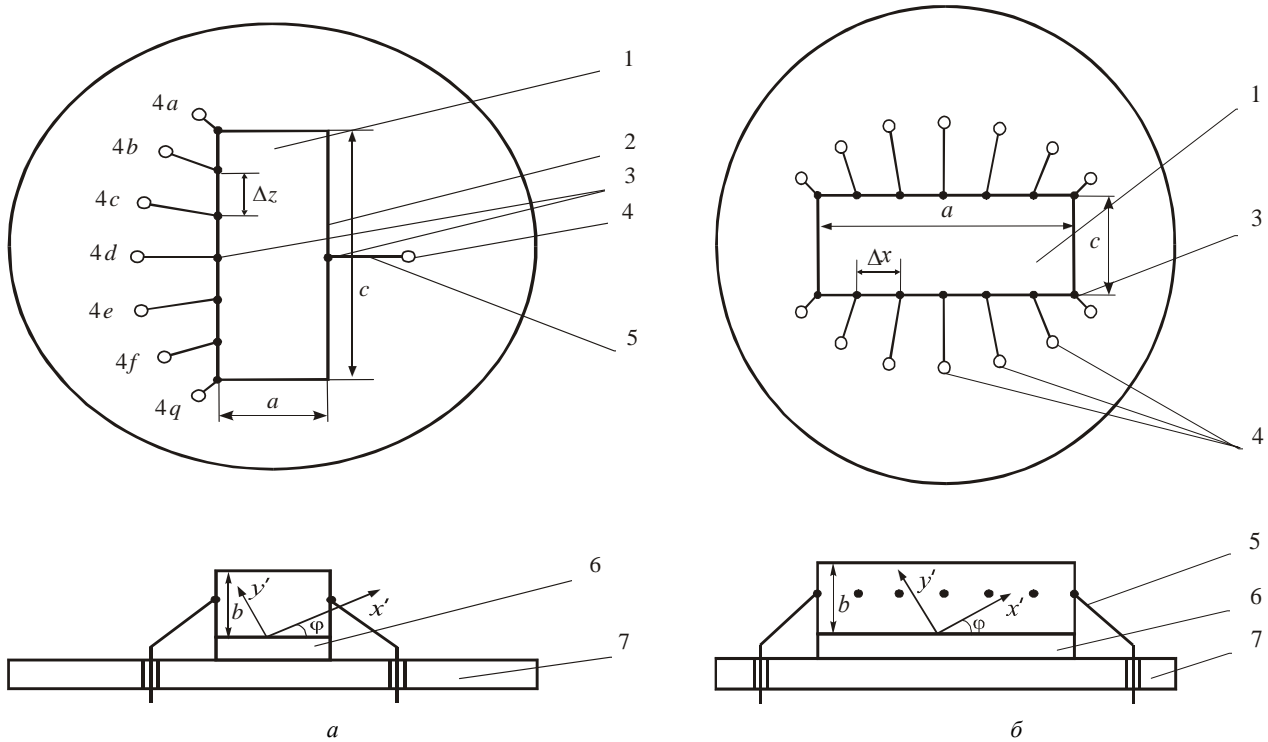
Падение напряжения на выходных электроводах устройств измеряли с помощью цифрового микровольтметра типа Ц-68000.

#### Анизотропные термоэлектрические линейки

На рис. 1, *a, б* представлены конструкции двух 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 выполнен из термоэлектрически анизотропного монокристалла CdSb в виде четырехгранной 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].

Характеристики материалов, используемых для АОТ

Материал	Область оптического пропускания $\lambda$ , мкм	Коэффициент оптического поглощения $\gamma$ , $\text{см}^{-1}$	Коэффициент поперечной термоЭДС $\Delta\alpha$ , мкВ/К	Коэффициент теплопроводности $\chi$ , Вт/(см·К)	Коэффициент электропроводности $\sigma$ , $(\text{Ом·см})^{-1}$
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



**Рис. 1. Конструкция АТЛ с электрическими микроконтактами, расположенными вдоль:**  
*a* — ширины АОТ; *б* — длины АОТ;

1 — АОТ; 2 — металлический слой; 3 — электрические микроконтакты; 4 — электровыводы; 5 — соединительные проводники; 6 — диэлектрическая теплопроводящая прокладка; 7 — термостатированный корпус

В первой конструкции АТЛ (см. рис. 1, *a*) одна из торцевых граней АОТ ( $b \times c$ ) содержала  $(n+1)$  точечных электрических микроконтактов (4*a*–4*n*), 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 с помощью микропроводов 5 соединялись с расположенными в корпусе электровыводами 4.

Во второй конструкции АТЛ (см. рис. 1, *б*) электрические микроконтакты располагались симметрично-парно 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  $a > b$ ) (см. рис. 1, *a*) или ширины  $c$  (при  $c > b$ ) (см. рис. 1, *б*) АОТ определялось необходимой величиной разрешающей способности линеек вдоль заданного геометрического направления. Проведенные исследования показали, что в общем случае предельное значение разрешающей способности определяется радиусом  $r$  точечного микроконтакта и выбирается при выполнении условия  $r \ll b$  не менее  $6r$ . Дальнейшее уменьшение расстояний между микроконтактами ведет к уменьшению чувствительности АТЛ. Общее количество микроконтактов, отвечающих максимальному значению разрешающей способности

по длине  $a$  (см. рис. 1, *a*) или ширине  $c$  (см. рис. 1, *б*) рассматриваемых линеек, составляло  $n_x = 0,6(a/r)$  или  $n_z = 0,6(c/r)$ , соответственно.

Вольт-ваттная чувствительность  $S_x$  и  $S_z$  этих устройств (см. рис. 1, *a*, *б*) представляется следующими соотношениями:

$$S_x = \frac{\alpha_{13} n}{k a};$$

$$S_z = \frac{\alpha_{13} n}{k c}.$$

Результаты исследований показали (рис. 2), что рассматриваемые АТЛ характеризуются различной координатной чувствительностью и могут быть рекомендованы в качестве устройств, позволяющих определять, с одной стороны, координаты падающего луча в широком спектральном диапазоне, а с другой — распределение лучистых потоков и температур в требуемом геометрическом направлении.

Изменение геометрических размеров АОТ позволяет в некоторых пределах управлять крутизной координатной чувствительности этих устройств. В случае высоких плотностей регистрируемых лучистых потоков рекомендуется использовать режим оптического пропускания [6].

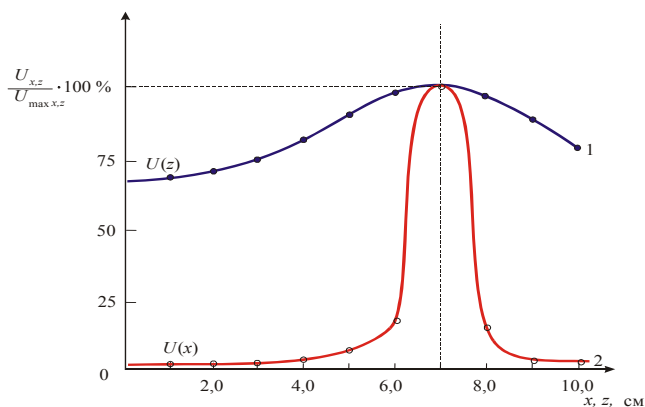


Рис. 2. Зависимость распределения потенциалов на электрических микроконтактах АТЛ для случаев, когда падающий луч располагается на верхней грани АОТ в точках с координатами  $x=7$  (1) и  $z=7$  (2).

Геометрические размеры:  
 $a_1 = 10$  мм;  $b_1 = 2$  мм;  $c_1 = 1$  мм

### 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 одинаковым характером зависимости от координат теплового пятна  $x$  и  $z$  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. 3.

Такой приемник, работающий в режиме внешнего оптического поглощения (см. рис. 3), состоит из АОТ 1, нижняя рабочая грань ( $a \times c$ ) которого через теплопроводящий диэлектрический слой находится в теплосвязи с термостатированным корпусом. Его верхняя рабочая грань ( $a \times c$ ) содержит поглощающий неселективный слой. АОТ 1 ( $a=c \gg b$ ) из термоэлектрически анизотропного материала в виде четырехгранной прямоугольной призмы АСВД 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,

равномерно через расстояния  $a/n$  и  $c/n$ , соответственно расположенных вдоль длины  $a$  и ширины  $c$ . С помощью микропроводов 5 эти микроконтакты соединялись с электровыводами 3, расположенными в корпусе-термостате.

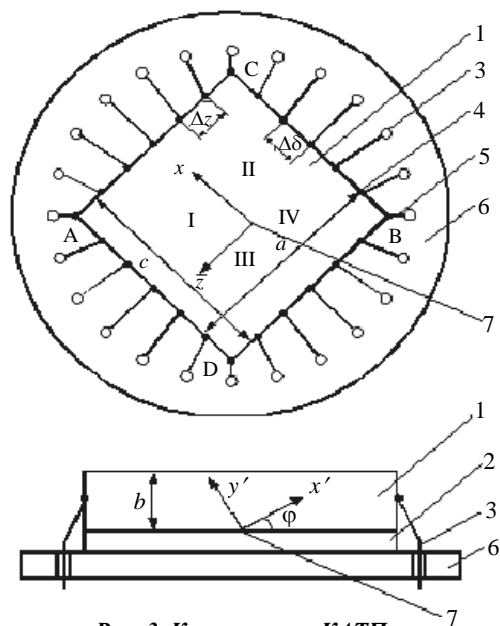


Рис. 3. Конструкция КАТП:

- 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

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

Для снижения погрешности определения координат теплового пятна, вызванного излучением, точечные электрические микроконтакты распола-

гались на ребрах  $a$  и  $c$  нижнего основания АОТ. Такое решение позволило создать изотермические условия работы этих контактов, что привело к отсутствию влияния, с одной стороны, вихревых термоэлектрических токов Хиросе [13], с другой — анизотропии теплопроводности материала АОТ [16]. Это в конечном итоге привело к повышению точности определения координат падающего луча.

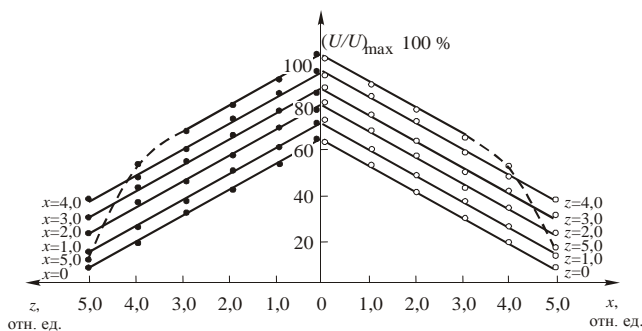
Вольт-ваттная чувствительность такого КАТП представляется следующим выражением:

$$S_x = S_z = \frac{\alpha'_{13} n}{k a} = \frac{\alpha''_{13} n}{k c},$$

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 [14] в виде пластины с  $a = c = 12$  мм,  $b = 1$  мм. Периферийные микроконтакты 4 соединялись с электровыводами 5 (см. рис. 3) с помощью золотого микропровода радиусом 10 мкм. При этом разрешающая способность КАТП по площади составляла  $A_i = \Delta x \Delta z = 0,25$  мм<sup>2</sup>, а общее число микроконтактов  $N = 96$ . Экспериментальные исследования КАТП проводили как при когерентном, так и неселективном виде излучения.

Результаты проведенных измерений показывают (рис. 4), что выходные разности потенциалов  $U_{\Delta x}(q)$  и  $U_{\Delta z}(q)$ , снимаемые с соответствующих электровыводов квадранта I, характеризуются одинаковой координатной зависимостью. При этом некоторая их асимметрия вызвана, с одной стороны, ошибкой ориентации диагональной плоскости с выбранными кристаллографическими направлениями, а с другой — технологическим разбросом местонахождения точечных микроконтактов.



**Рис. 4. Координатная чувствительность КАТП** (разность потенциалов определялась между контактами AD и AC в I условном квадранте, см. рис. 3)

Для излучений с произвольной энергетической плотностью предложенный приемник использовался с соответствующим преобразователем элект-

рических 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 высоких плотностей контролируемых лучистых потоков используется режим оптического пропускания [6], при котором спектральный диапазон несколько сужается.

Итак, 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.

### Заключение

1. Показана возможность создания:

- анизотропных однокоординатно-чувствительных термоэлектрических линеек на основе поперечной термоЭДС;
- анизотропных двухкоординатно-чувствительных приемников на основе поперечной термоЭДС с тождественной координатной чувствительностью.

2. Созданные устройства позволяют определять координаты теплового пятна, вызванного падающим излучением, в широких спектральном и динамическом диапазонах.

### 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. Катые Г. П. Оптические датчики температуры. — М.: Госэнергоиздат, 1969. — 212 с.
4. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. — Киев: 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. 1141954 СССР от 22.10.1984.

8. Патент 63394А Україна. Анізотропний термоелектричний приймач випромінювання/Ащеулов А. А., Охрем В. Г. 15.01.2004; Бюл. № 1, 2004.
9. Патент 65332А. Україна Анізотропний термоелектричний приймач 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 2484. Україна. Анізотропний термоелектричний приймач випромінювання/Ащеулов А. А. 17.05.2004; Бюл. 5, 2004.
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. Королюк С. Л., Пилат И. М., Самойлович А. Г. и др. Анизотропные термоэлементы//ФТП. 1973. Т. 7. № 4. С. 725—734.
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. Самойлович А. Г., Слипченко В. Н. ЭДС анизотропного термоэлемента//ФТП. 1975. Т. 9. № 3. С. 126—131.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 года.

## Coordinate-sensitive devices based on transverse thermoEMF

A. A. Ascheulov

Institute of Thermoelectricity of the National Academy of Sciences and Ministry of Education of Ukraine, Chernivtsi, Ukraine

*Constructions of a series of devices based on anisotropic opticothermoelements used for radiation recording are represented. A bright outlook for their use as modulation-free nonselective coordinate-sensitive rulers and detectors intended for determination of coordinates of radiant flows over wide spectral and dynamic ranges is demonstrated.*

УДК 621.383

## Влияние отжига на свойства эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ с анодным окислением

Э. К. Гусейнов, Ш. О. Эминов, А. А. Раджабли, Н. Дж. Исмаилов, Т. И. Ибрагимов  
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан

*Исследовано влияние термического отжига на свойства поверхности эпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$ .*

### Введение

Твердый раствор  $HgCdTe$  (КРТ) является очень важным материалом для ИК-техники с точки зрения его фундаментальных свойств, поэтому он привлекает значительное внимание исследователей в течение последних 40 с лишним лет. В начале 90-х годов выращивание объемного КРТ достигло уровня, достаточного для производства фотоприемников первого поколения. Однако выращивание объемных монокристаллов КРТ с однородным составом оказалось очень трудной задачей. Это предопределило существенные измене-

ния в технологии КРТ за последнее десятилетие, что вызвало прежде всего переход от использования объемного материала к эпитаксиальным технологиям (ЖФЭ-, МЛЭ-, ПФЭ-слоям).

В основном полученные варизонные эпитаксиальные слои имели  $p$ -тип (при 77 К), концентрация дырок  $p = 0,6 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для состава  $x = 0,2$  концентрацию носителей меньше чем  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  получить очень трудно. Однако в производстве фоторезисторов и фотодиодов нужны высококачественные кристаллы  $n$ -типа с концентрацией электронов ниже  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , подвижностью выше  $10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и временем жизни неосновных дырок