

УДК 535.215.4

## **ДВУХМЕРНЫЕ КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА (*p*)InSb–(*n*)CdTe**

А.В. МАРГАРЯН<sup>1\*</sup>, С.Г. ПЕТРОСЯН<sup>1,2</sup>, Л.А. МАТЕВОСЯН<sup>1</sup>, К.Е. АВДЖЯН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак, Армения

<sup>2</sup>Российско–Армянский (Славянский) университет, Ереван, Армения

\*e-mail: artsrnmargaryan@gmail.com

(Поступила в редакцию 23 марта 2016 г.)

Исследована фоточувствительность локально освещенного гетероперехода (*p*)InSb–(*n*)CdTe, созданного методом лазерно-импульсного осаждения тонкого слоя CdTe. На основе такого гетероперехода были изготовлены инфракрасные двухкоординатно-чувствительные фотоприемники и было показано, что они обладают линейными выходными характеристиками. Величина измеренной координатной чувствительности составляла около 30 нА/мкм.

### **1. Введение**

Полупроводниковые координатно-чувствительные фотоприемники, начиная с 60-годов и до настоящего времени, находят широкое применение в системах контроля перемещения, позиционирования, определения линейных и угловых координат [1–5]. Обычно координатно-чувствительный фотоприемник (КЧФ) представляет собой полупроводниковую структуру с одним или несколькими *p–n* переходами, имеющую на своей достаточно большой фоточувствительной поверхности несколько омических контактов, выходные сигналы от которых пропорциональны положению светового пятна относительно центра структуры. Принцип действия КЧФ основан на явлении продольного фотоэффекта, который был экспериментально обнаружен Велмарком в 1957 г. [6]. Если на одной из областей *p–n* перехода симметрично расположены два удаленных электрода и между ними измеряется напряжение, то при локальном освещении поверхности такого фотодиода фокусированным световым пучком, смещенным относительно центра, величина и знак возникающего фотонапряжения будут меняться с изменением положения луча. Если же измеряются фототоки, протекающие между этими контактами и общим контактом в коллекторной области, то величина и знак разности этих токов также дают однозначную информацию относительно смещения светового пятна от центра структуры.

Для получения максимальной величины продольной фоточувствительности необходимо обеспечить как наиболее полное разделение  $p$ - $n$  переходом электронно-дырочных пар, генерированных светом, так и высокое сопротивление того слоя перехода, с контактов которого снимается фотонапряжение. С этой точки зрения весьма интересным представляется использование гетеропереходов для создания продольных фотоэлементов [7]. В гетеропереходе генерация электронно-дырочных пар при освещении светом с энергией фотонов меньше ширины запрещенной зоны материала верхнего слоя происходит непосредственно в области объемного заряда  $p$ - $n$  перехода. При малой плотности пограничных состояний и при малой величине или отсутствии разрыва краев зон в одной из энергетических зон происходит почти полное разделение электронно-дырочных пар, созданных светом.

В настоящей работе приводятся результаты исследования  $X$ - $Y$  чувствительности локально освещенных фотоприемников на основе гетероперехода  $(p)\text{InSb}$ - $(n)\text{CdTe}$ , работающих в среднем ИК диапазоне 0.8–5 мкм (рис.1).

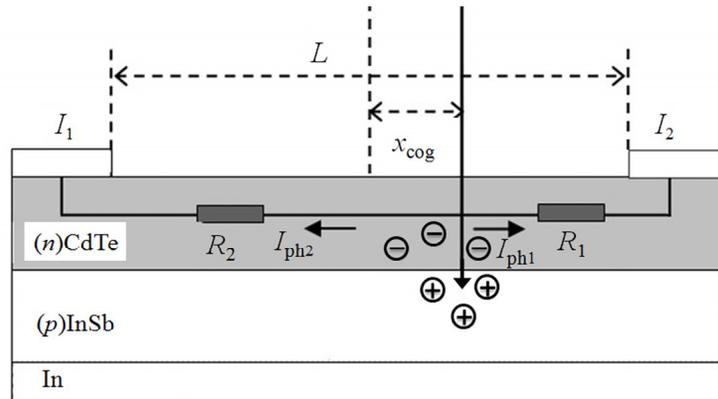


Рис.1. Основная схема КЧФ на основе  $(n)\text{CdTe}$ - $(p)\text{InSb}$ .

Известно, что выбранные в данном случае для гетероперехода полупроводниковые соединения имеют близкие постоянные решетки и коэффициенты термического расширения и образуют идеальную гетеропару, причем основной разрыв зон приходится на валентную зону и не препятствует разделению фотоносителей [8]. Как и в случае неравномерно освещенного  $p$ - $n$  перехода [9], возникновение фотонапряжения (при коротком замыкании и фототоке) обусловлено не только локальным разделением неравновесных носителей заряда, но и продольным растеканием основных носителей от области генерации с их последующей реинжекцией через контактный барьер. Заметим, что в случае рассматриваемого нами гетероперехода из-за большого разрыва зон в валентной зоне основной вклад в ток через гетерограницу дают электроны.

## 2. Эксперимент

Для изготовления гетероструктуры  $(p)\text{InSb}-(n)\text{CdTe}$  нами был использован метод лазерно-импульсного осаждения [10], который обеспечивает эпитаксиальный рост пленок CdTe на пластинах InSb при достаточно низких температурах подложки ( $T = 200\text{--}225^\circ\text{C}$ ). В качестве подложки были использованы полированные, высокоомные пластины  $(p)\text{-InSb}[100]$  с толщиной 450 мкм и концентрацией акцепторов  $N_A = 4.17 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

Устройство лазерно-импульсного осаждения состоит из YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера (длина волны излучения 1.064 мкм, длительность импульса 30 нс, энергия одного импульса 0.35 Дж, интенсивность излучения на мишени CdTe  $\sim 2 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$ ) и вакуумной камеры с остаточным давлением  $4 \times 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$  (рис.2).

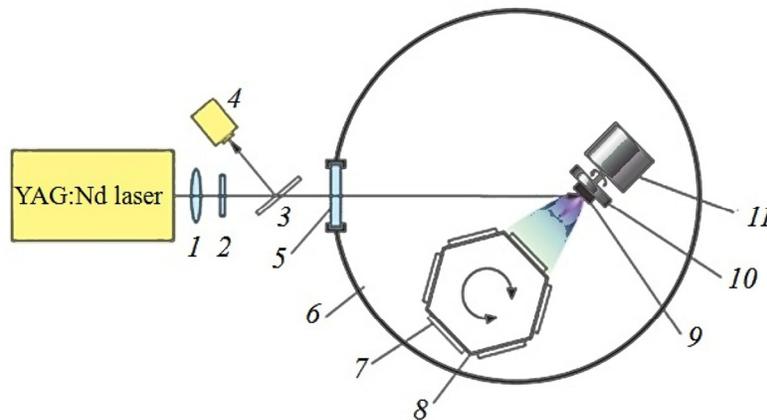


Рис.2. Схема установки лазерно-импульсного осаждения: 1 – кварцевая линза, 2 – фильтр, 3 – разделитель луча, 4 – калориметр, 5 – кварцевое окно, 6 – вакуумная камера, 7 – подложка, 8 – держатель и нагреватель подложки, 9 – мишень, 10 – держатель мишени, 11 – двигатель.

Омические контакты по обеим сторонам гетероструктуры сформированы термическим напылением металлического индия (In) после лазерного осаждения слоя CdTe толщиной порядка 0.4 мкм. Этот слой является достаточно высокоомным, так как концентрация доноров в нем не более  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  [10]. Слой In со стороны  $p\text{-InSb}$  покрывает всю поверхность подложки, а со стороны  $n\text{-CdTe}$  на освещаемой поверхности изготовлены 4 контакта с диаметром не более 0.4 мм.

Исследования морфологии поверхности и элементного состава пленок CdTe методом рентгеновской энергодисперсионной (EDX) спектроскопии проведены на сканирующем электронном микроскопе (SEM) VEGA TS 5130MM. Известно, что при лазерном осаждении сохранение стехиометрии у полупроводников типа  $A_2B_6$  является ключевой проблемой [11].

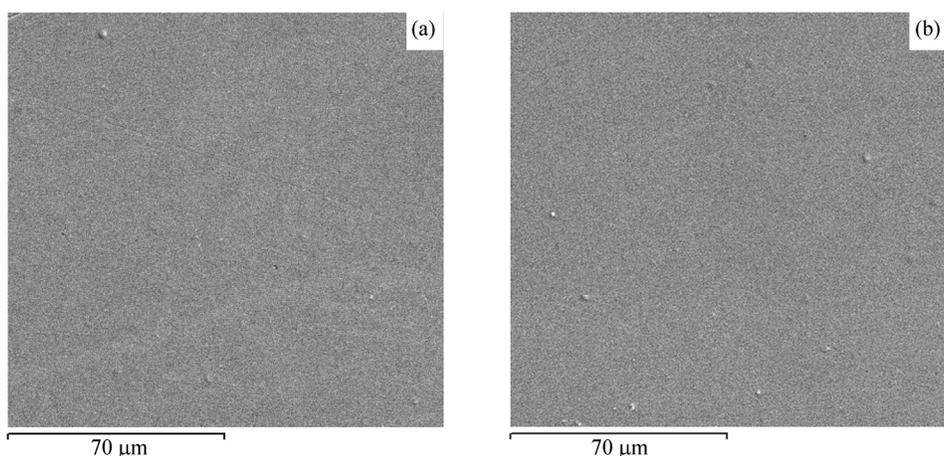


Рис.3. Морфология пленок CdTe, исследованная при помощи SEM с участков (a) 1 и (b) 2.

Из табл.1 видно, что стехиометрия пленок CdTe с учетом погрешности в измерениях концентрации компонент сохраняется во время лазерно-импульсного осаждения. Микроструктура поверхности пленки CdTe вблизи всех металлических контактов безпористая и равномерная (рис.3).

Табл.1. Результаты EDX спектроскопии участков 1 и 2

	Элемент	Концентрация, вес%	Погрешность, вес%	Концентрация, ат%
1	Cd	31.48	0.47	33.47
	In	15.90	0.47	16.55
	Sb	15.53	0.54	15.25
	Te	37.09	0.53	34.73
2	Cd	31.47	0.47	33.46
	In	15.80	0.47	16.45
	Sb	16.15	0.54	15.85
	Te	36.57	0.53	34.25

### 3. Результаты исследований

Исследован двухмерный КЧФ на основе гетероперехода  $(p)\text{InSb}-(n)\text{CdTe}$ , схема которого представлена на рис.4. В качестве источника ИК излучения была использована нагретая до 300°C железная пластина, покрытая белым лаком с коэффициентом излучения  $\epsilon \approx 0.8$  [12]. Немодулированное излучение фокусировалось собирающей линзой из фтористого лития (LiF) и диафрагмой так, чтобы

диаметр луча не превышал 0.3 мм. Согласно закону смещения Вина, нагретое до 300°C тело характеризуется максимумом спектральной плотности излучения на 5 мкм, а его основная часть лежит в среднем ИК диапазоне. Так как ширина запрещенной зоны CdTe составляет 1.6 эВ, то слой CdTe является широкозонным оптическим окном для излучения в области длин волн от  $\lambda_1 = 0.8$  мкм до  $\lambda_2 = 5$  мкм, что подтверждено также измерениями спектрального распределения фототока [10]. Это излучение, пройдя через широкозонное окно, в основном поглощается вблизи границы гетероперехода (в области объемного заряда и в квазинейтральной области базового слоя InSb).

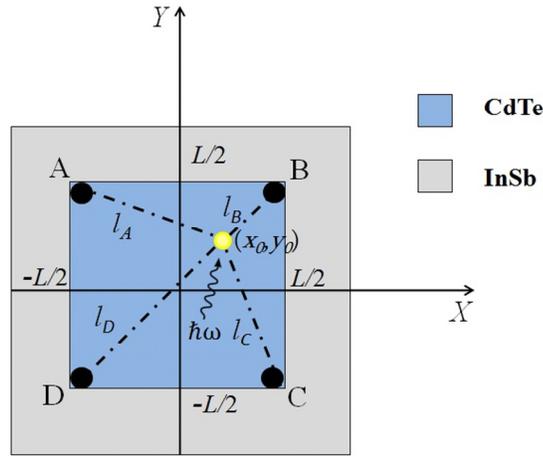


Рис.4. Двухмерный КЧФ.

Зная поток фотонов в этом диапазоне длин волн, а также учитывая возможные отражения падающего излучения от поверхности фотоприемника и от гетерограницы, можно оценить интегральный поток поглощаемого излучения в приконтактном слое InSb толщиной, равной сумме ширины слоя объемного заряда  $l_p$  и диффузионной длины электронов  $L_p$  [13]:

$$N(\lambda_1, \lambda_2) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - R(\lambda)) \frac{C_1 (1 - e^{\alpha(\lambda)(L_n + l_p)})}{\lambda^4 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (1)$$

где  $C_1 = 1.88 \times 10^{23}$  мкм<sup>3</sup>см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> и  $C_2 = 1.438 \times 10^4$  мкмК [14]. Взяв известные значения коэффициентов преломления CdTe ( $n_2$ ), InSb ( $n_3$ ) [15] и коэффициенты поглощения антимолида индия  $\alpha(\lambda)$  в спектральном интервале 0.8–5 мкм, а также используя известное выражение для коэффициента отражения при нормальном падении на гетероструктуру

$$R = \left( \frac{n_3(n_2 - 1) + (n_3^2 - n_2) \tan \beta_3 d}{n_3(n_2 + 1) + (n_3^2 + n_2) \tan \beta_3 d} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\beta_3 = 2\pi n_3/\lambda$  и  $d$  – толщина слоя CdTe, можно вычислить  $N(\lambda_1, \lambda_2)$ .

При внутреннем квантовом выходе, равном единице в вышеуказанном спектральном диапазоне, максимальное значение фототока составляет  $I_{\text{phmax}} = eN(\lambda_1, \lambda_2) S$ , где  $S$  – освещаемая площадь фотоприемника,  $e$  – заряд электрона. Учитывая, что в рассматриваемом диапазоне длин волн соединения CdTe и InSb характеризуются слабой дисперсией, а также зная спектральную зависимость коэффициента поглощения света в InSb [13], можно легко оценить величину  $I_{\text{phmax}}$ . Сравнивая с этой величиной реально измеряемый в эксперименте фототок  $I_{\text{ph}}$ , можно оценить средний внешний квантовый выход фотодиода  $\eta_{\text{ex}} = I_{\text{ph}}/I_{\text{phmax}}$  в условиях его работы при постоянном фоне, но при различных температурах нагрева излучателя. Для проведения измерений фототока при различных положениях светового пятна и температурах излучателя фотоприемник с удельной обнаружительной способностью  $D\lambda^* = 1.8 \times 10^{11} \text{ смГц}^{1/2}\text{Вт}^{-1}$  и временем переключения 15 нс [10] охлаждался до температуры жидкого азота (77 К).

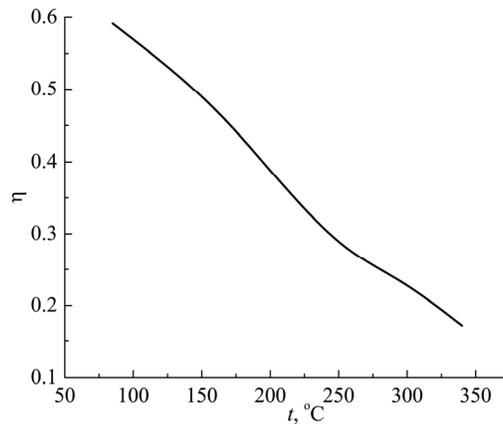


Рис.5. Зависимость среднего внешнего квантового выхода  $\eta$  от температуры.

Из табл.2 и рис.5 видно, что с ростом температуры теплового источника ИК излучения, внешний квантовый выход (измеренный при небольшом отклонении светового пятна от центра структуры) падает значительно, что свидетельствует о незначительной роли фонового излучения в наших экспериментах. Разности компонент фототоков, протекающих через контакты А, В, С и D, являются полезными сигналами, и они были измерены при разных положениях луча при помощи пикоамперметра KEITHLEY 6845.

Табл.2. Измеренные характеристики КЧФ при различных температурах нагрева

$t, ^\circ\text{C}$	$N(\lambda_1, \lambda_2), \text{cm}^{-2}\text{c}^{-1}$	$I_{\text{ph}}, \text{мкА}$	$\eta(t)$
85	$5.3 \times 10^{16}$	0.0317	0.59
170	$3.5 \times 10^{17}$	0.16	0.45
255	$1.3 \times 10^{18}$	0.37	0.28
297.5	$2.2 \times 10^{18}$	0.513	0.23
340	$3.5 \times 10^{18}$	0.6	0.17

На рис.6 представлены зависимости разностей фототоков через контакты, расположенные в полуплоскостях  $y > 0$  и  $x > 0$ , как функции от смещений вдоль координатных осей  $x$  и  $y$ . Видно, что КЧФ характеризуется линейной координат-

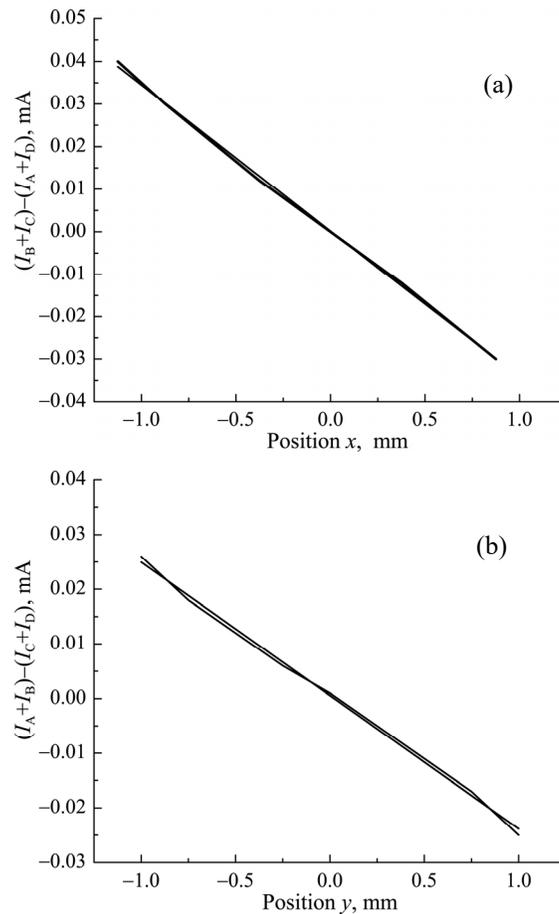


Рис.6. Зависимость тока от координаты при сканировании (а) вдоль оси  $x$  при  $y = 0$  и (б) вдоль оси  $y$  при  $x = 0$ .

ной зависимостью фотоотклика при смещении луча в достаточно большой области около центра поверхности КЧФ, причем отклик является знакопеременным. Величина координатной чувствительности  $\Gamma$ , показывающая изменение тока при единичном изменении координаты светового пятна, составляет около 30 нА/мкм.

Принцип работы двухмерного КЧФ легко можно представить при помощи его эквивалентной схемы (рис.7), которая состоит из источника тока, в качестве которого выступает ток, генерируемый падающим светом, и идеального диода с прямым током и емкостью перехода. Паразитные элементы представлены шунтирующими сопротивлениями.

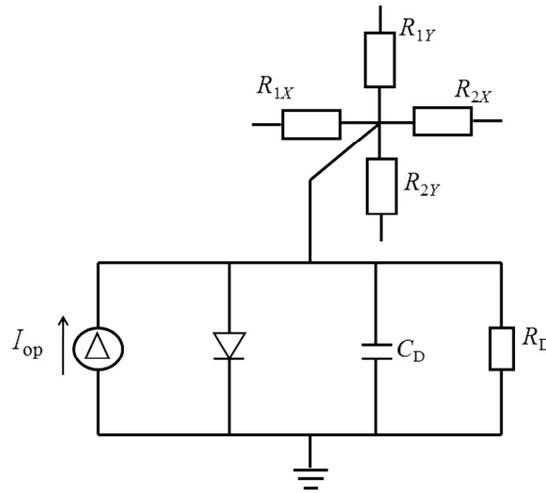


Рис.7. Эквивалентная схема двухмерного КЧФ.

Если при заданном положении центра светового пятна  $(x_0, y_0)$  измерить величины выходных токов  $I_i$  ( $i = A, B, C, D$ ), то можно определить  $x_0, y_0$ . Считая, что продольное сопротивление пленки CdTe между точкой освещения и данным контактом  $R_i$  ( $i = A, B, C, D$ ) линейно возрастает с ростом расстояния между ними, при малых отклонениях луча от центра структуры  $(x_0, y_0 \ll L/2)$  можно представить, например, ток  $I_A$  в виде

$$I_A \sim \frac{1}{R_A} \sim \frac{1}{l_A} \approx \frac{\sqrt{2}}{L \left( 1 + \frac{x_0 - y_0}{L} \right)}. \quad (3)$$

Аналогичные выражения справедливы и для других компонент фототоков. Тогда легко показать, что

$$\frac{(I_B + I_C) - (I_A + I_D)}{(I_B + I_C) + (I_A + I_D)} = \frac{R_A R_D (R_B + R_C) - R_B R_C (R_A + R_D)}{R_A R_D (R_B + R_C) + R_B R_C (R_A + R_D)} \approx \frac{x_0}{L}, \quad (4)$$

$$\frac{(I_A + I_B) - (I_D + I_C)}{(I_A + I_B) + (I_D + I_C)} \approx \frac{y_0}{L}.$$

Такая линейная зависимость фототока от координат при перемещении светового пятна в центральной области структуры с размерами приблизительно  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ , действительно, наблюдается в эксперименте (рис. 6а, б).

#### 4. Заключение

Приведены результаты работ по созданию и исследованию двухкоординатного ИК фотоприемника на основе гетероперехода  $(p)\text{InSb}-(n)\text{CdTe}$ . Гетероструктура получена с помощью относительно простой низкотемпературной технологии лазерно-импульсного осаждения. Показано, что КЧФ обладает линейной характеристикой и позволяет определить координаты положения луча по осям  $X$  и  $Y$  при высоком пространственном разрешении. Чувствительные в ближнем и среднем ИК диапазонах (0.8–5.8 мкм) фотоприемники обладают параметрами, не уступающими традиционным гомопереходным фотоприемникам на основе  $\text{InSb}$  [16], и могут использоваться как для определения линейных и угловых координат светового луча, так и для слежения за движущимися объектами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Виглеб. Датчики. Москва, Мир 1989.
2. А.А. Самарин. Электронные компоненты, 7, 103 (2003).
3. Н.Т. Гурин, С.Г. Новиков, И.В. Корнеев, А.А. Штанько, В.А. Родионов. Датчики и системы, 11, 54 (2011).
4. Н.Т. Гурин, С.Г. Новиков, И.В. Корнеев, А.А. Штанько, В.А. Родионов. Письма в ЖТФ, 37, 57 (2011).
5. В.М. Арутюнян, С.Г. Петросян, В.А. Геворкян, А.С. Хачатурян. Авторское свидетельство СССР, № 1018559, 1982.
6. J. T. Wallmark. Proc. IEEE, 45, 474 (1957).
7. Ж.И. Альферов, В.М. Андреев, Е.А. Портной, И.И. Протасов. ФТП, 3, 1324 (1969).
8. А.Г. Алексанян, Р.К. Казарян, Л.А. Матевосян. Электронная промышленность, 107, 55 (1981).
9. G. Lucovsky. J. Appl. Phys, 31, 1088 (1960).
10. Л.А. Матевосян, К.Э. Авджян, С.Г. Петросян, А.В. Маргарян. Успехи прикладной физики, 2, 403 (2014).
11. Г.А. Калюжная, К.В. Киселева. Труды ФИАН, 177, 5 (1987).
12. Л.З. Криксунов. Справочник по основам инфракрасной техники. Москва, Сов. Радио, 1978.
13. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>
14. А. Амброзяк. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. Москва, Сов. Радио, 1970.
15. [www.filmetrics.com](http://www.filmetrics.com)
16. Characteristics and use of PSD, Hamamatsu technical information. Available <http://sales.hamamatsu.com/en/support/application-notes.php>

ԵՐԶԱՓ ԿՈՈՐԴԻՆԱՏԱԶԳԱՅՈՒՆ ՖՈՏՈՐՆԴՈՒՆԻԻՉՆԵՐ  
(*p*)InSb–(*n*)CdTe ՀԵՏԵՐՈՍՆՅՄԱՆ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

Ա.Վ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Ս.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Լ.Ա. ՄԱԹԵՎՈՍՅԱՆ, Կ.Ե. ԱՎՋՅԱՆ

Հետազոտված է ֆոտոզգայնությունը տեղային ճառագայթված (*n*)CdTe–(*p*)InSb այն հետերոանցման, որը ստացված է CdTe-ի բարակ թաղանթի լազերա-իմպուլսային նստեցման մեթոդով: Այս հետերոանցման հիման վրա պատրաստված են երկչափ կոորդինատազգայուն ինֆրակարմիր ֆոտոդետեկտորներ, և ցույց է տրված, որ դրանք ունեն գծային ելքային բնութագրեր: Կոորդինատային զգայնության չափված արժեքը կազմում է մոտ 30 նԱ/մկմ:

TWO DIMENSIONAL COORDINATE-SENSITIVE PHOTODETECTORS  
BASED ON (*p*)InSb–(*n*)CdTe HETEROJUNCTION

A.V. MARGARYAN, S.G. PETROSYAN, L.A. MATEVOSYAN, K.E. AVJYAN

Photosensitivity of locally irradiated (*n*)CdTe–(*p*)InSb heterojunction formed by laser-pulsed deposition of CdTe thin layer was investigated. Two-coordinate sensitive IR photodetectors based on such heterojunction were fabricated, and it was shown that they have linear output characteristics. The measured value of coordinate sensitivity is about 30 nA/μm.