

К. ф.-м. н. О. А. БОДНАРУК, Е. Д. ГРОМКО, к. ф.-м. н. А. В. МАРКОВ,  
к. ф.-м. н. С. Э. ОСТАПОВ, д. ф.-м. н. И. М. РАРЕНКО,  
к. т. н. А. Г. ШВЕЦ

Дата поступления в редакцию  
26.04 2004 г.

Украина, Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича  
E-mail: ostar@chv.ukrpack.net

Оппонент д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ДЕТЕКТОР ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ HgCdTe

*Координатно-чувствительные термоэлектрически охлаждаемые фотоприемные устройства регистрируют угол положения излучения и его мощность в диапазоне 8—14 мкм.*

Полупроводниковый твердый раствор HgCdTe чаще всего применяется для изготовления различных фотоприемников ИК-излучения в спектральном диапазоне 8—14 мкм. На базе этого материала в основном изготавливаются фотодиоды и фоторезисторы. Эти типы фотоприемников обладают многочисленными преимуществами, например высокой подвижностью электронов, достаточно большим временем жизни, возможностью управления свойствами базовых кристаллов и т. д. [1, 2].

Однако указанные виды приемников имеют и достаточно серьезные недостатки. Это и наличие тока для разделения носителей в фоторезисторах, который порождает токовые шумы, сопровождающие его прохождение, и напряжение обратного смещения для фотодиодов, и необходимость дополнительного источника питания. Кроме этого, для получения максимальных характеристик [3] фоторезисторы и фотодиоды необходимо охлаждать до температуры, близкой к температуре кипения жидкого азота.

Вместе с тем существует класс задач, для которых предельные характеристики фотоприемников не обязательны. Одна из них — обнаружение мощного излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Для решения такой задачи можно было бы использовать слабо охлаждаемые или вовсе не охлаждаемые фотоприемники указанных типов. Однако, как показывают исследования [4], при температурах порядка 200 К обнаружительная способность и чувствительность их резко падает до неприемлемых значений (например, обнаружительная способность  $D^* \approx 5 \cdot 10^7 \dots 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ ). Что касается фотодиодов, то их сопротивление при таких температурах становится настолько малым ( $R_0 A = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ), что практически не позволяет уменьшить токи утечки до приемлемых величин. Именно по этой причине фотодиоды не могут конкурировать с фоторезисторами в этой области температур.

Кроме фоторезисторов, в последнее время усилился интерес разработчиков радиоэлектронной аппаратуры к детекторам ИК-излучения на основе фотоэлектромагнитного эффекта (ФЭМ-эффекта). Как известно, преимущества этого эффекта состоят в

следующем: 1) детектор работает в бестоковом режиме, а значит, имеет малый уровень шумов; 2) температурная зависимость ФЭМ-эффекта несколько слабее, чем у фотопроводимости и других фотовольтаических эффектов. Это позволяет получить фотоприемник с достаточными параметрами для уверенной регистрации сильных источников ИК-излучения в диапазоне температур, доступных для термоэлектрического охлаждения [5].

Данная работа посвящена разработке конструкции координатно-чувствительного фотоэлектромагнитного детектора (ФЭМД) на основе эпитаксиальных слоев HgCdTe для регистрации лазерного излучения длиной 10,6 мкм и определения дальности и координаты источника излучения.

### Теоретические расчеты

Рассмотрим пластину фоточувствительного материала, чувствительного в данном диапазоне (ширина запрещенной зоны  $\approx 0,1 \text{ эВ}$  при рабочей температуре), на которую падает ИК-излучение  $h\nu$ . Под действием магнитного поля индукции  $B$  образуются разделенные потоки фотогенерированных носителей  $J_n$  (электронов) и  $J_p$  (дырок), которые отклоняются в магнитном поле на углы  $\varphi_n$  и  $\varphi_p$ , соответственно, и, попадая на боковые контакты, создают фото-ЭДС (рис. 1).

Уравнения токопереноса в данном случае будем рассматривать при таких ограничениях:

- невырожденный полупроводник;
- толщина фоточувствительного слоя гораздо меньше его ширины и длины (бесконечная пластина);
- равномерное (но слабое) освещение фоточувствительного элемента (ФЧЭ);
- независимость времени релаксации от энергии;
- слабые магнитные поля.

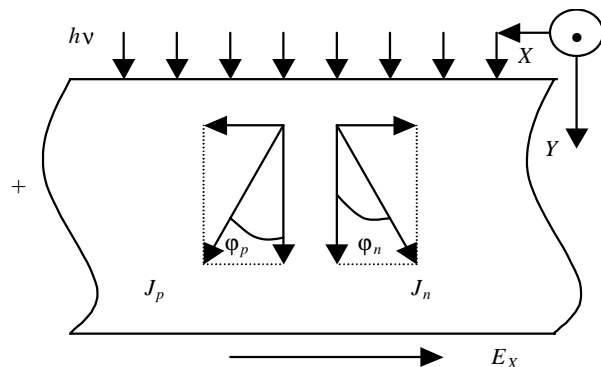


Рис. 1. Схема ФЭМ-эффекта

Тогда уравнения, описывающие прохождение тока в ФЧЭ, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} j_{nx} &= \sigma_n E_x - \mu_{nH} B j_{ny}; \\ j_{px} &= \sigma_p E_x + \mu_{pH} B j_{py}; \\ j_{ny} &= \sigma_n E_y + e D_n d \Delta n / dy + \mu_{nH} B j_{nx}; \\ j_{py} &= \sigma_p E_y - e D_p d \Delta p / dy - \mu_{pH} B j_{px}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_n, \sigma_p$  — удельные проводимости;  
 $\mu_{nH}, \mu_{pH}$  — холловские подвижности электронов и дырок;  
 $e$  — заряд электрона;  
 $D_n, D_p$  — коэффициенты диффузии;  
 $\Delta n, \Delta p$  — концентрации фотогенерированных носителей.

Будем считать  $\Delta n = \Delta p$ , что соответствует равенству времен жизни  $\tau_n = \tau_p$ .

Решая систему уравнений (1) относительно  $E_x$ , получим фото-ЭДС, возникающую в результате действия монохроматического ИК-излучения:

$$E_x = \frac{e a_B Q L(B) \beta}{d \Sigma}, \quad (2)$$

где  $a_B = B(\mu_n + \mu_p)$ ;  
 $Q$  — плотность потока фотонов длиной волны  $\lambda$  —  
 $Q = \frac{\lambda P}{hc l w}$ ;  
 $P$  — мощность ИК-излучения, падающего на ФЧЭ;  
 $l, w, d$  — геометрические размеры ФЧЭ;  
 $L^2(B)$  — длина амбиполярной диффузии в магнитном поле,  
 $L^2(B) = D(B) \tau$ ;

$$\beta = \frac{\gamma_d \operatorname{sh} \frac{d}{L} + \operatorname{ch} \frac{d}{L} - 1}{(\gamma_0 + \gamma_d) \operatorname{ch} \frac{d}{L} + (1 + \gamma_0 \gamma_d) \operatorname{sh} \frac{d}{L}};$$

$\gamma_d, \gamma_0$  — выражения, зависящие от скорости поверхностной рекомбинации на фронтальной и тыльной поверхностях ФЧЭ;

$$\Sigma = \sigma^*(B) \left[ 1 - \frac{e^2 a_B D(B) n_i^2}{k T \sigma^*(B) (n + p)} \xi \right]; \quad (3)$$

$$\sigma^*(B) = \sigma(B) + B^2 \frac{[\mu_n \sigma_n(B) - \mu_p \sigma_p(B)]^2}{\sigma(B)};$$

$\sigma(B) = \sigma_n(B) + \sigma_p(B)$ ;  
 $\sigma_n(B), \sigma_p(B)$  — удельная проводимость электронов и дырок в магнитном поле;

$$\xi = \frac{L}{d} \frac{2(\operatorname{ch} \frac{d}{L} - 1) + (\gamma_0 + \gamma_d) \operatorname{sh} \frac{d}{L}}{(\gamma_0 + \gamma_d) \operatorname{ch} \frac{d}{L} + (1 + \gamma_0 \gamma_d) \operatorname{sh} \frac{d}{L}}.$$

Определив величину фото-ЭДС, мы можем теперь вычислить вольтговую чувствительность  $R_V$  и обнаружительную способность ФЭМД  $D_\lambda^*$ :

$$R_V = \frac{e \lambda a_B L \beta}{hc d w \Sigma}; \quad D_\lambda^* = \frac{e \lambda a_B L \beta}{2 hc \sqrt{k T d \Sigma}}. \quad (4)$$

При расчете обнаружительной способности учитывался только шум Джонсона–Найквиста, поскольку, как уже отмечалось, ток через ФЧЭ не течет и, соответственно, токовых шумов нет.

Формулы (4) являются рабочими для исследования и оптимизации основных параметров ФЭМД.

### Оптимизация параметров ФЭМД

Как показывают проведенные расчеты, для обеспечения максимальных значений фото-ЭДС ФЭМД

должен удовлетворять определенным требованиям по соотношению скоростей поверхностной рекомбинации, концентрации носителей при рабочей температуре и магнитному полю.

Скорости поверхностной рекомбинации должны способствовать максимальному диффузионному потоку носителей от освещенной поверхности к неосвещенной. Максимальным этот поток будет, когда скорость поверхностной рекомбинации на фронтальной поверхности минимальна (в идеале — равна нулю), а на неосвещенной поверхности — максимальна (в пределе — бесконечна). В нашем случае, как показывают расчеты, достаточность приближения гарантируется, когда скорость поверхностной рекомбинации на передней поверхности не более 1 м/с, а на задней — не менее 100 м/с.

Оптимальная концентрация носителей в кристалле в нашем случае должна удовлетворять простому соотношению:  $p = (2b)^{1/2}$ , где  $b$  — отношение подвижностей электронов и дырок. Отсюда следует, что оптимальным для ФЭМД будет материал  $p$ -типа с концентрацией дырок  $\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при рабочей температуре.

Наиболее простым является оптимизация по магнитному полю. Все наши вычисления проводились для слабых магнитных полей. Поскольку подвижность в  $p$ -типе материала не превышает  $10^4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , то поле в 0,1—0,2 Тл можно вполне считать слабым. Понятно, что чем больше индукция магнитного поля, тем лучше. Однако тут вступают в силу ограничения фотоприемника по массе и габаритам.

Найденные значения скоростей поверхностной рекомбинации, концентрации акцепторов, подвижности и индукции магнитного поля принимались в качестве рабочих параметров при дальнейших расчетах.

На рис. 2 и 3 показаны температурные зависимости вольтговой чувствительности и обнаружительной способности ФЭМД, рассчитанные по формулам (4).

Из рисунков видно, что при температурах термoeлектрического охлаждения (190—220 К) ФЭМД обеспечивает вольтговую чувствительность  $\approx 100 \text{ В/Вт}$  и обнаружительную способность порядка  $5 \cdot 10^8 \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ ,

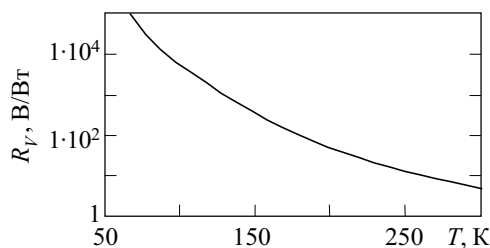


Рис. 2. Вольтговая чувствительность ФЭМД

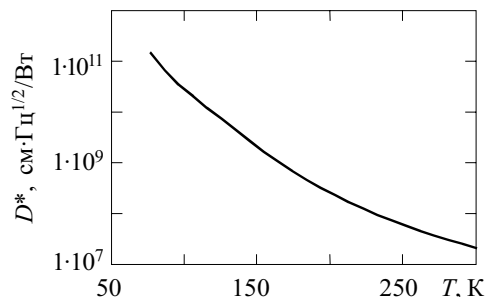


Рис. 3. Температурная зависимость обнаружительной способности

что значительно больше соответствующих параметров фоторезистора.

Для экспериментального подтверждения полученных результатов нами разработано координатно-чувствительное фотоприемное устройство на основе эпитаксиальных слоев HgCdTe на подложке из CdZnTe и созданы опытные образцы в корпусах различной конструкции.

### Конструкция фотоприемного устройства (ФПУ)

Конструктивно ФПУ состоит из следующих компонентов:

- растровый формирователь изображения;
- спектральный фильтр с полосой пропускания 9—11 мкм;
- предварительный усилитель сигналов приемника с устройством подавления фона;
- микроохладительник на основе термоэлектрического охладителя.

Общий вид ФПУ приведен на рис. 4. В латунном корпусе с входным герметичным окном, прозрачным для ИК-излучения в области  $\lambda=10,6$  мкм, находится ФЧЭ, термоэлектрический охладитель на основе элементов Пельтье (4-каскадный микроохладительник), охлаждающий ФЧЭ до его рабочей температуры 190—220 К, четырехканальный предварительный усилитель сигналов ФЧЭ, выполненный по гибридно-пленочной технологии.



Рис. 4. ФПУ в корпусах различной конструкции

Особенностью конструкции является то, что фоточувствительный элемент, растровый формирователь изображения и спектральный фильтр сформированы на одной полупроводниковой пластине, помещенной в магнитное поле, создаваемое кобальт-самариевыми магнитами.

Корпус ФПУ герметичен и может быть выполнен в двух вариантах: вакуумноплотный (с возможностью создания вакуума  $10^{-2}$ — $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) и газонаполненный ксеноном или аргоном. Входное окно из просветленных пластин селенида цинка и германия вклеено вакуумноплотным клеем в крышку корпуса и обеспечивает угол обзора ФЧЭ в пределах азимута  $60^\circ$ .

Рассмотрим более подробно конструкцию основных составляющих частей ФПУ.

**Фоточувствительный элемент** фотоприемника состоит из 16 детекторов на основе фотомагнитного эффекта, сблокированных в четыре ряда по четыре элемента в каждом. В каждом ряду два элемента ФЭМД предназначены для регистрации угла положения излучения по координате  $X$  и  $Y$ , два других — для регистрации мощности падающего излучения. Отметим, что в данном случае для регистрации мощности излучения можно использовать и один элемент ФЭМД, но для облегчения обработки сигнала удобно иметь приблизительно равные параметры (чувствительность, уровень шума, сопротивление) блоков регистрации углов и мощности излучения.

Фотоэлементы из одного ряда соединены с элементами трех остальных параллельно. Это обеспечивает рост основных параметров всей фоточувстви-

тельной матрицы (в частности, вольтовой чувствительности), улучшая разрешение по углу и повышая надежность ФПУ в целом.

Рассмотрим принцип работы функциональных частей ФЧЭ для регистрации угла положения и мощности излучения отдельно.

**ФЭМД для регистрации угла положения и мощности излучения (ФЭМДУ).**

Основным материалом для ФЭМДУ выбраны эпитаксиальные пленки HgCdTe, чувствительные к излучению в области 10,6 мкм, сформированные на подложке из CdZnTe, оптически прозрачного для данного излучения. Схематический разрез фоточувствительной структуры приведен на рис. 5.

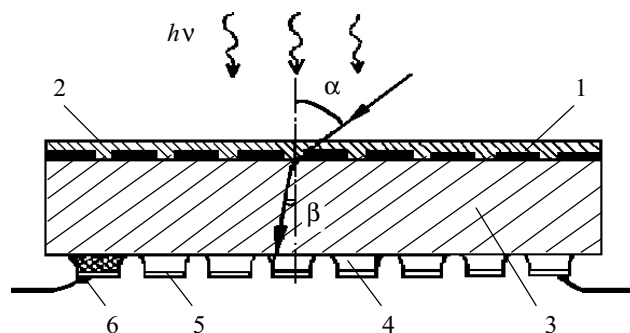


Рис. 5. Разрез ФЧЭ на основе эпитаксиальной структуры HgCdTe:

1 — растровый формирователь изображения; 2 — спектральный фильтр; 3 — подложка из CdZnTe; 4 — фоточувствительный рельеф на основе эпитаксиальной пленки КРТ; 5 — собственный анодный окисел; 6 — контактные площадки

Совмещение растрового формирователя изображения, спектрального фильтра и ФЧЭ на одной полупроводниковой пластине реализуется следующим образом: на верхней, фронтальной плоскости CdZnTe-подложки вакуумным напылением или осаждением из водных растворов через маски или с помощью фотолитографии формируется растр в виде металлической пленки с окнами, сквозь которые излучение проникает в толщу CdZnTe-подложки. Сверху или снизу растра (в нашем случае — снизу) вакуумным напылением наносится спектральный фильтр в виде чередующихся слоев ZnS, CrO, Ge, SiO. Излучение длиной волны  $\lambda \leq 8$  мкм поддается пленкой светового фильтра, а в области  $\lambda \leq 0,8$  мкм — эффективно (с коэффициентом подавления  $K \geq 10^5$ ) поглощается «физическим» фильтром — подложкой из CdZnTe.

Принцип работы ФЭМДУ состоит в следующем: пройдя сквозь толщу подложки, излучение ( $\lambda \approx 10,6$  мкм) достигает противоположной поверхности и поглощается в сформированном фоточувствительном рельефе эпитаксиального слоя HgCdTe (см. рис. 5).

Для эффективной работы ФЭМДУ необходимо создать на противоположных поверхностях слоя условия, обеспечивающие максимальное различие в скоростях поверхностной рекомбинации. В рассматриваемом случае верхняя фоточувствительная поверхность находится в толще эпитаксиального слоя (чуть ниже границы раздела эпитаксиальной пленки и подложки), являясь достаточно совершенной. Это обеспечивает минимальную скорость поверхностной рекомбинации ( $S \rightarrow 0$ ). Тыльная поверхность фоточув-

ствительного слоя с большой скоростью поверхностной рекомбинации может формироваться различными методами (шлифовкой, ионной бомбардировкой, химико-механической полировкой и т. д.). Нами использовано электрохимическое анодирование поверхности эпитаксиального слоя.

Фоточувствительный рельеф ФЭМДУ выполнен в виде «змейки». На ее концы нанесены контакты в виде металлизированных площадок. Щелевая диафрагма формирователя изображения нанесена строго посередине над каждой парой элементов. Элементы для регистрации угла положения излучения по осям X и Y расположены перпендикулярно друг другу и под углом 45° к направлению магнитного поля. Этим обеспечивается равное значение компоненты магнитного поля в каждом из направлений.

При нормальном падении излучение, прошедшее сквозь диафрагму, засвечивает строго равные площади расположенных рядом элементов, которые электрически включены последовательно в противофазы. В результате этого результирующая фото-ЭДС будет равна нулю. При сдвиге угла падения излучения положение диафрагмы как бы сдвигается в сторону одного из элементов, что приводит к увеличению засветки одного из элементов и уменьшению засветки расположенного рядом. В этом случае результирующая фото-ЭДС будет отлична от нуля, а ее величина будет зависеть как от угла падения излучения, так и от мощности излучения.

*ФЭМД для регистрации и калибровки мощности излучения (ФЭМДМ).*

При данной конструкции ФПУ невозможно разделить изменение сигнала ФЭМДУ от изменения угла излучения и изменения его мощности. Этот недостаток устраняется при помощи фоточувствительных элементов ФЭМД, расположенных рядом с ФЭМДУ.

Конструктивно элементы блока регистрации мощности (ФЭМДМ) выполнены аналогично элементам ФЭМДУ, т. е. тех же размеров, но без растрового формирователя изображения. Это позволяет регистрировать излучение при любом угле падения излучения. Для предотвращения компенсации фотосигналов от расположенных по соседству элементов каждый второй элемент металлизирован.

Таким образом, в блоке ФЭМДМ почти так же, как и в блоке ФЭМДУ, засвечиваемая площадь составляет приблизительно половину всей площади фоточувствительных элементов, что почти в два раза выше, чем при использовании фоторезистивного, например стандартного четырехэлементного квадрата.

*Предварительный усилитель сигналов приемника.*

Для обеспечения максимального динамического диапазона применяется оптическая модуляция с частотой 2 кГц. С каждого ФЧЭ сигнал подается на индивидуальный усилитель переменного тока с коэффициентом усиления, равным 500 (54 дБ). Полоса усиливаемых частот ограничена снизу конденсатором C1 (рис. 6), сверху — конденсатором C2 и составляет 0,53—7,1 кГц, что вполне достаточно для обеспечения необходимой фазовой характеристики:

$$(3...5)f_{\text{н}} \leq f_{\text{мод}} \leq (3...5)f_{\text{в}}$$

где  $f_{\text{мод}}$  — частота модуляции;  
 $f_{\text{н}}$  — нижняя граница диапазона частот;  
 $f_{\text{в}}$  — верхняя граница диапазона.

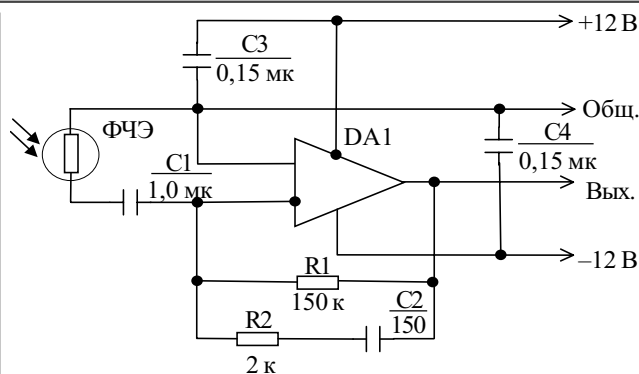


Рис. 6. Принципиальная схема предварительного усилителя ФПУ

Конденсаторы C3 и C4 — общие для каждой пары усилителей.

Применение прецизионного малошумящего операционного усилителя DA1 типа КР140УД26 позволило обеспечить спектральную плотность шума порядка 7 нВ/Гц<sup>1/2</sup>. Резистор R2 необходим для обеспечения устойчивости усилителя в целом.

С выхода усилителя сигнал подается на АЦП. Оцифрованный полезный сигнал выделяется из шумов и помех разложением в ряд Фурье.

Усилители смонтированы на двусторонней печатной плате (по два с каждой стороны). Резисторы и конденсаторы — планарные. Микросхемы выбраны в корпусе типа DIP-8. (Применение бескорпусных микросхем позволит существенно уменьшить размеры печатной платы.)

### Выводы

Таким образом, нами разработано координатно-чувствительное фотоприемное устройство на основе эпитаксиальных слоев HgCdTe на подложке из CdZnTe и созданы экспериментальные образцы в корпусах различной конструкции. ФПУ охлаждается четырехкаскадным термоэлектрическим охладителем до рабочей температуры 190—220 К.

Фотоэлектрические параметры созданных экспериментальных образцов: вольтовая чувствительность 50—100 В/Вт, обнаружительная способность (2...5)·10<sup>8</sup> см·Гц<sup>1/2</sup> Вт<sup>-1</sup>, угол зрения ±60°.

Созданные ФПУ могут применяться в системах автоматического захода летательных аппаратов на посадку по лучу лазера, а также для других целей, когда необходимы термоэлектрически охлаждаемые координатно-чувствительные ФПУ, работающие в спектральном диапазоне 8—14 мкм.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Broudy R. M., Mazurecyk V. T. (HgCd)Te photoconductive detectors // Semiconductors and Semimetals, A. P.— 1981.— Vol. 18, ch. 6.— P. 157—199.
2. Баженов Н. Л., Гасанов С. И., Огородников В. К., Процык В. И. Фотодиоды на основе твердых растворов CdHgTe // Зарубежная электронная техника.— 1986.— Вып. 8.— С. 3—25.
3. Capocci F. A., Harker A. T. Thermoelectrically cooled cadmium mercury telluride detectors of CO<sub>2</sub> laser radiation // Solid State Electronics.— 1983.— Vol. 21.— P. 40—42.
4. Igras E., Piotrowski J. On the performance limits for long-wavelength non-cooled photoconductive (CdHg)Te detectors // Optica Applicata.— 1977.— Vol. 7.— P. 9—12.
5. Genzow D., Grudzien M., Piotrowski J. On the performance of non-cooled CdHgTe photoelectromagnetic detectors for 10,6 mcm radiation // Infrared Physics.— 1980.— Vol. 20.— P. 133—138.