

УДК 535.247.049.7 : 621.383.52

Г. Р. Кунакбаева, И. И. Ли  
(Новосибирск)

ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА  
ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -ФОТОДИОДОВ

Рассмотрена система  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиод — устройство ввода с прямой инжекцией заряда. Анализируется температурное разрешение тепловизионных систем на их основе с многоэлементными фотоприемниками линейчатого и матричного типов в диапазоне 3—14 мкм.

**Введение.** Расширение в длинноволновую область (8—14 мкм) инфракрасного диапазона фотоприемных устройств (ИК ФПУ) с фотодиодами на  $Cd_xHg_{1-x}Te$  сопровождается быстрым снижением динамического сопротивления фотодиодов, что ограничивает возможность реализации потенциально более высокого температурного разрешения тепловизионных систем на их основе. В данной работе рассматриваются вопросы оптимизации спектрального диапазона для ИК ФПУ линейчатого и матричного типов со считыванием фотосигналов методом прямой инжекции [1—3].

1.1. Анализ системы  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиод — прямоинжекционное устройство ввода. Фотодиоды  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с  $x$ , меньшими 0,25, не аппроксимируются «классической» моделью фотодиода:

$$I_{\text{ФД}} = \eta_{\text{к}} I_{\text{ф}} + I_0 [1 - \exp(-\beta U_{\text{ФД}})] + U_{\text{ФД}} / R_p, \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{к}}$  — квантовая эффективность фотодиода;  $I_0$  — ток насыщения фотодиода;  $R_p$  — шунтирующее сопротивление;  $I_{\text{ф}}$  — ток фонового излучения;  $U_{\text{ФД}}$  — напряжение смещения на фотодиоде.

В данной работе при анализе системы  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиод — прямоинжекционное устройство ввода применяется более совершенная модель фотодиода [4]. Ниже приведем основные выражения, используемые при расчетах. Ток фотодиода вычисляется по соотношениям:

$$I_{\text{ФД}} = \eta_{\text{к}} I_{\text{ф}} + I_{\text{диф}} + I_{\text{ген}} + I_{\text{т}} + U_{\text{ФД}} / R_p \quad (2)$$

(где  $I_{\text{диф}}$  — диффузионная компонента тока;  $I_{\text{ген}}$  — генерационная компонента тока;  $I_{\text{т}}$  — туннельная компонента тока);

$$I_{\text{диф}} = qA \left[ \frac{D_p}{l_p} p_{n0} \text{cth} \left( \frac{l_n}{l_p} \right) + \frac{D_n}{l_n} n_{p0} \text{cth} \left( \frac{l_p}{l_n} \right) \right] \left[ \exp \left( \frac{qU_{\text{ФД}}}{kT} \right) - 1 \right];$$

$$I_{\text{ген}} = \frac{qn_1 W_{\text{ОПЗ}}}{\tau_0} \frac{2 \text{sh}(qU_{\text{ФД}}/2kT)}{q(U_{bi} = U_{\text{ФД}})/kT} f(b).$$

Здесь

$$W_{\text{ОПЗ}} = \frac{qn_1}{\tau_0} \left[ \frac{2\epsilon_s \epsilon_0}{q} \frac{(N_a - N_D)}{N_a N_D} \left( (U_{bi} - U_{\text{ФД}}) - \frac{2kT}{q} \right) \right];$$

$$f(b) = \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^2 + 2bx + 1}; \quad b = \exp \left( -\frac{qU_{\text{ФД}}}{2kT} \right) \text{ch} \left[ \frac{E_t - E_i}{kT} + \frac{1}{2} \ln(\tau_{e0}/\tau_{h0}) \right];$$

$$I_{\tau} = \left( \frac{2m_e^*}{E_g} \right)^{1/2} \frac{q^3 E U_{\text{ФД}}}{4\pi^2 h^2} \exp \left[ -\frac{4(2m_e^*)^{1/2} E_g^{3/2}}{3q\hbar E} \right];$$

$l_n, l_p$  — длины нейтральных областей;  $U_{bi}$  — контактная разность потенциалов;  $E$  — напряженность поля в  $p$ - $n$ -переходе;  $A$  — площадь фотодиода; остальные обозначения аналогичны принятым в [5].

Обнаружительная способность определяется выражением

$$D_{\text{АПЗ}}^* = \frac{(AT_H/2)^{1/2} \eta_I \eta_R}{(\hbar c/\lambda)(Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + Q_4^2 + Q_5^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

где  $T_H$  — время накопления;  $\eta_I$  — коэффициент ввода тока;  $Q_1, Q_2$  — тепловой шум и шум типа  $1/f$  входного МДП-транзистора устройства ввода (количество шумовых электронов);  $Q_3$  — шум фотодиода;  $Q_4$  — шум фотодиода типа  $1/f$ ;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $Q_5$  — прочие шумы (шум измерительного канала и т. д.);

$$Q_1^2 = \frac{2kTC_{\text{вх}}g_{\text{вх}}R_D\alpha_1}{q^2(1 + g_{\text{вх}}R_D)} \left[ 1 - \exp \left( -T_H \frac{1 + g_{\text{вх}}R_D}{R_D C_{\text{вх}}} \right) \right] +$$

$$+ \frac{2kTg_{\text{вх}}\alpha_1}{q^2(1 + g_{\text{вх}}R_D)^2} \left[ T_H - \frac{R_D C_{\text{вх}}}{1 + g_{\text{вх}}R_D} \exp \left( -T_H \frac{1 + g_{\text{вх}}R_D}{R_D C_{\text{вх}}} \right) \right]; \quad (4)$$

$$Q_2^2 = \frac{2KI_{\text{н.т}}^2}{WL(q(C_{\text{Ок}} + C_{\text{П}}))^2 (R_D C_{\text{вх}})^2} \int_{\omega_n}^a \frac{2}{\omega(\omega_0^2 + \omega^2)(a^2 + \omega^2)} \sin^2 \frac{\omega T_H}{2} d\omega +$$

$$+ \frac{2KI_{\text{н.т}}^4}{WL(q(C_{\text{Ок}} + C_{\text{П}}))^2} \int_{\omega_n}^a \frac{2\omega}{(\omega_0^2 + \omega^2)(a^2 + \omega^2)} \sin^2 \frac{\omega T_H}{2} d\omega; \quad (5)$$

$$Q_3^2 = \frac{(g_{\text{вх}}R_D)^2}{q^2(1 + g_{\text{вх}}R_D)^2} \left( qI_{\text{ФД}} + \frac{2kT\alpha_1}{R_D} \right) \left( T_H - \frac{R_D C_{\text{вх}}}{1 + g_{\text{вх}}R_D} \exp \left( -T_H \frac{1 + g_{\text{вх}}R_D}{R_D C_{\text{вх}}} \right) \right); \quad (6)$$

$$Q_4^2 = 2\alpha^2 (I_{\text{ФД}} - \eta_R I_{\text{Ф}})^2 \frac{g_{\text{вх}}}{q^2 C_{\text{вх}}^2} \int_{\omega_n}^a \frac{2}{\omega(\omega_0^2 + \omega^2)(a^2 + \omega^2)} \sin^2 \frac{\omega T_H}{2} d\omega, \quad (7)$$

Таблица 1

Обозначение	Параметр	Численное значение
$\mu$	Подвижность неосновных носителей	$500 \text{ см}^2 \cdot \text{В} \cdot \text{с}^{-1}$
$\varphi_F$	Уровень Ферми	0,53 В
$N_d$	Концентрация доноров в подложке	$7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
$C_{\text{дх}}$	Удельная емкость диэлектрика	$4,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$
$V_{FB}$	Напряжение плоских зон	0
$\epsilon_0 \epsilon_s$	Диэлектрическая проницаемость $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	$1,55 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см}$
$N_{sp}$	Плотность поверхностных состояний	$10^9 \text{ см}^{-2}$
$W, L$	Длина и ширина канала входного затвора	60, 14 мкм
$C_{\text{зп}}$	Емкость затвора накопления	1,5 пФ
$C_{\text{вх}}$	Полная емкость входного узла ФПУ	1,0 пФ
$\alpha_1, \alpha_2, \gamma$	Численные коэффициенты	2, 2, 2
$\alpha, K$	То же	$10^{-3}, 1,5 \cdot 10^{-24}$
$A$	Площадь фотодиода	$2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$
$\eta_k$	Квантовая эффективность фотодиода	0,4

где  $a = (1 + g_{\text{вх}} R_d) / R_d C_{\text{вх}}$ ;  $\omega_0 = \pi / T_n$ ;  $\alpha, \alpha_1, \alpha_2, K$  — численные коэффициенты (табл. 1). Интегралы в выражениях (5), (7) вычислялись численными методами. В диапазоне изменений  $\omega_n \sim (100-1000)^{-1} T_n^{-1}$  значения интегралов в выражениях (5), (7) меняются не более чем на несколько процентов.

Обнаружительная способность ФПУ с «идеальными» устройствами считывания (т. е.  $D_{\lambda\text{фд}}^*$  ограничена лишь тепловыми шумами фотодиодов) вычисляется по соотношению

$$D_{\lambda\text{фд}}^* = \frac{(A)^{1/2} \eta_k}{\frac{hc}{q\lambda} \left( \frac{4kT\alpha_2}{R_d} + 2q\eta_k I_{\text{ф}} \right)^{1/2}} \quad (8)$$

Обнаружительная способность в режиме ограничения фоном (ОФ)  $D_{\lambda\text{ОФ}}^*$  вычисляется по соотношению (8) при  $R_d \sim \infty$ .

Массив исходных электрофизических и конструктивных параметров фотоприемников и устройств считывания приведен в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 2

Обозначение	Параметр	Численное значение
$N_d$	Концентрация доноров	$10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$
$N_a$	Концентрация акцепторов	$10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$
$\sigma_e, \sigma_h$	Сечение захвата электронов и дырок	$10^{-15} \text{ см}^2$

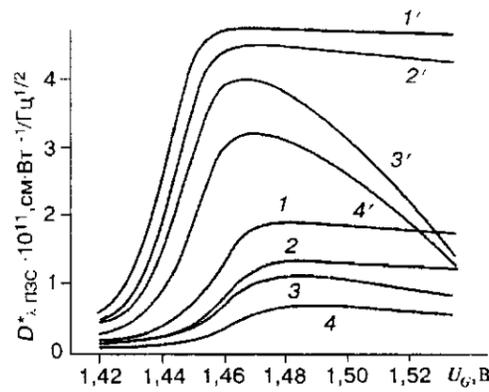


Рис. 1. Расчетные зависимости  $D_{\text{лпзс}}^*$  от  $U_G$  при  $T_{\text{н}} = 3 \cdot 10^{-4}$  с,  $x = 0,21$ ,  $\eta_{\text{к}} = 0,4$ ,  $T = 77$  К:  
 1 —  $N_{\text{а}} = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_{\text{т}} = 0,1N_{\text{а}}$ ; 2 —  $N_{\text{а}} = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_{\text{т}} = 0,2N_{\text{а}}$ ; 3 —  $N_{\text{а}} = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_{\text{т}} = 0,1N_{\text{а}}$ ; 4 —  $N_{\text{а}} = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_{\text{т}} = 0,2N_{\text{а}}$ ; кривые 1'—4' рассчитывались при  $T = 60$  К

Полученные численным моделированием электрофизические и фотоэлектрические параметры  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -фотодиодов хорошо соответствуют литературным данным [6, 7].

На рис. 1 приведены расчетные зависимости  $D_{\text{лпзс}}^*$  от напряжения смещения  $U_G$  на входном затворе МДП-транзистора устройства ввода при  $I_{\text{ф}} = 1 \cdot 10^{-8}$  А,  $T_{\text{н}} = 3 \cdot 10^{-4}$  с,  $T = 77$  и 60 К для  $x = 0,21$ . При  $T = 77$  К ( $\lambda_{\text{гр}} = 1,24/E_{\text{г}} = 11,2$ )  $N_{\text{а}} = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_{\text{т}} = 0,1N_{\text{а}}$ ,  $g_{\text{вх}}R_{\text{д}}(U_{\text{фд}} = 0) \sim 0,9$  (кривая 1). Обнаружительная способность  $D_{\text{лпзс}}^*$  в максимум ( $U_G = U_{G_0}$ ) равна  $1,9 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ ,  $D_{\lambda_{\text{фд}}}^* = 2,1 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ , тогда как  $D_{\lambda_{\text{оф}}}^* = 5 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ , для  $N_{\text{а}} = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_{\text{т}} = 0,1N_{\text{а}}$  (кривая 3)  $g_{\text{вх}}R_{\text{д}}(U_{\text{фд}} = 0) \sim 0,6$ ,  $D_{\text{лпзс}}^* = 1,2 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ ,  $D_{\lambda_{\text{фд}}}^* = 1,8 \times 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ . Охлаждение ФПУ до 60 К ( $\lambda_{\text{гр}} = 11,74$  мкм) позволит повысить  $D_{\text{лпзс}}^*$  до уровня, близкого к режиму ОФ (кривые 1' и 3'). При этом  $g_{\text{вх}}R_{\text{д}}$  возрастает до 12 и 4,8 соответственно, а обнаружительная способность в максимум  $D_{\text{лпзс}}^* = 4,7 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ ,  $D_{\lambda_{\text{фд}}}^* = 4,7 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$  для кривой 1' и  $D_{\text{лпзс}}^* = 4,0 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ ,  $D_{\lambda_{\text{фд}}}^* = 4,1 \times 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$  для кривой 3',  $D_{\lambda_{\text{оф}}}^* = 5,3 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{В}^{-1}/\text{Гц}^{1/2}$ . Рост  $D_{\lambda_{\text{оф}}}^*$  с уменьшением температуры обусловлен увеличением  $\lambda_{\text{мах}}$  при фиксированном значении  $I_{\text{ф}}$ .

При  $x = 0,2$  для достижения обнаружительной способности, близкой к режиму ОФ даже при  $N_{\text{а}} = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ , необходимо охлаждение ФПУ до температуры 50 К. При этой температуре  $\lambda_{\text{гр}} = 14,5$  мкм вследствие уменьшения ширины запрещенной зоны. Для  $N_{\text{а}}$ , больших  $2 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ , дальнейшее снижение температуры уже малоэффективно. Так, например, при  $N_{\text{а}} = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$   $D_{\text{лпзс}}^* = 6,8 \cdot 10^{10}$  см $\cdot \text{Гц}^{-1/2}/\text{Вт}^{-1}$ , т. е. почти в 5 раз ниже  $D_{\lambda_{\text{фд}}}^* = 3,6 \cdot 10^{11}$  см $\cdot \text{Гц}^{-1/2}/\text{Вт}^{-1}$  и в 10 раз ниже  $D_{\lambda_{\text{оф}}}^* = 6,6 \times 10^{11}$  см $\cdot \text{Гц}^{-1/2}/\text{Вт}^{-1}$ .

Как следует из рис. 1, уже для  $x = 0,21$  (кривые 3', 4') при  $U_G > U_{G_0}$  проявляется значительное уменьшение  $D_{\text{лпзс}}^*$ . С ростом напряжения смещения начинает преобладать туннельная компонента тока и соответственно уменьшается  $R_{\text{д}}$ . С уменьшением ширины запрещенной зоны, температуры, а также с ростом  $N_{\text{а}}$  эти зависимости проявляются в более резкой форме. Так, для

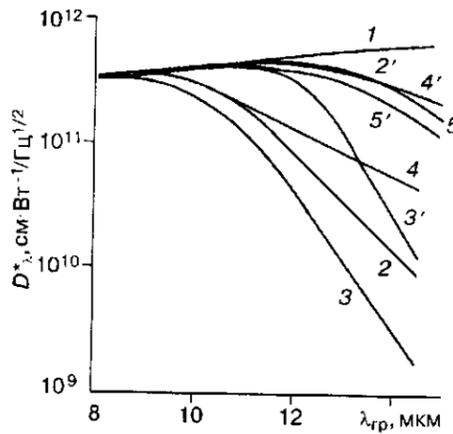


Рис. 2. Расчетные зависимости  $D_{\lambda}^*$  от  $\lambda_{тр}$  при  $T_n = 3 \cdot 10^{-4}$  с,  $I_{\phi} = 1 \cdot 10^{-8}$  А,  $\eta_k = 0,4$ ,  $T = 77$  К:  
 1 — режим ОФ; 2 —  $D_{\lambda_{ПЗС}}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_t = 0,1N_a$ ; 3 —  $D_{\lambda_{ПЗС}}^*$ ,  $N_a = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_t = 0,1N_a$ ; 4 —  $D_{\lambda_{ФД}}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_t = 0,1N_a$ ; кривые 2'—5' рассчитывались при  $T = 60$  К; 5 —  $D_{\lambda_{ФД}}^*$ ,  $N_a = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_t = 0,1N_a$

$x = 0,2$ ,  $N_a = 2 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  и  $T = 50$  К увеличение  $U_G$  от  $U_{G0}$  на 20 мВ приводит к уменьшению  $D_{\lambda_{ПЗС}}^*$  более чем в 2 раза. Это налагает ограничение на величину разброса электрофизических параметров фотодиодов, в частности, на однородность состава подложки, концентрацию легирующей примеси и пороговых напряжений  $\Delta U_G$  под входным затвором устройств ввода и является основным фактором, ограничивающим возможность создания ФПУ на основе многоэлементных  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиодов с длиной волны, превышающей 13—14 мкм, даже за счет снижения температуры до 50—60 К.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости  $D_{\lambda_{ПЗС}}^*$ ,  $D_{\lambda_{ФД}}^*$ ,  $D_{\lambda_{ОФ}}^*$  от  $\lambda_{тр}$ ,  $I_{\phi} = 1 \cdot 10^{-8}$  А,  $T_n = 3 \cdot 10^{-4}$  с для  $T = 77$  и 60 К. Из рисунка следует, что область применимости системы  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиод — прямоинжекционное устройство при  $N_a = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $T = 77$  К и  $I_{\phi} = 1 \cdot 10^{-8}$  А ограничена до  $\lambda_{тр} \sim 11$  мкм, а при  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  — до  $\lambda_{тр} \sim 12$  мкм. В более длинноволновой области предпочтительнее использовать другие типы устройств считывания либо устройства с прямой инжекцией дополнить буферным каскадом [8].

1.2. Анализ температурного разрешения ИК ФПУ на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиодов. Основным параметром тепловизионных систем является разность температур, эквивалентная шуму  $\Delta T_{ш}$ . Этот параметр вычислялся по соотношению [9]

$$\Delta T_{ш} = \frac{4(2/T_n)^{1/2}}{\frac{\varphi_p^2}{f^2} (A)^{1/2} \Gamma_{opt} \int_{\lambda_a}^{\lambda_{тр}} \frac{d(dR/d\lambda)}{dT} D_{\lambda}^*(\lambda_{тр}, \lambda_a, T_{\phi}) \Delta \lambda}, \quad (9)$$

где  $dR/d\lambda$  — спектральная энергетическая светимость черного тела;  $\varphi_p/f$  — относительное отверстие оптики;  $f$  — фокусное расстояние оптики;  $\Gamma_{opt}$  — оптическое пропускание системы;  $T_{\phi}$  — температура фона.

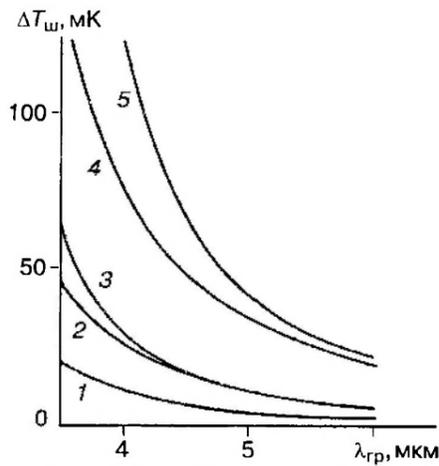


Рис. 3. Зависимости температурного разрешения тепловизионной системы  $\Delta T_{ш}$  от  $\lambda_{гр}$ ,  $\varphi_p/f = 1/2$ ,  $T = 77$  К,  $\lambda_a = 2$  мкм,  $Q_5 = 0$ ,  $Q_6 = 200$  электронов:

1 —  $T_n = 1,6 \cdot 10^{-2}$  с для ФПУ с  $D_{\text{Ф}}^*$ ; 2 —  $T_n = 2,9 \cdot 10^{-3}$  с для ФПУ с  $D_{\text{Ф}}^*$ ; 3 —  $T_n = 2,9 \cdot 10^{-3}$  с для ФПУ с  $D_{\text{ПЗС}}^*$ ; 4 —  $T_n = 3 \cdot 10^{-4}$  с для ФПУ с  $D_{\text{Ф}}^*$ ; 5 —  $T_n = 3 \cdot 10^{-4}$  с для ФПУ с  $D_{\text{ПЗС}}^*$

Перед расчетом  $\Delta T_{ш}$  вычислялись зависимости  $E_g$ ,  $D_i^*$  и ток, обусловленный фоновым излучением  $I_{\text{ф}}$ , от  $\lambda_{гр}$ :

$$I_{\text{ф}} = \frac{\pi q A}{h c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \int_{\lambda_a}^{\lambda_{гр}} \lambda \frac{dR/d\lambda}{dT} d\lambda, \quad (10)$$

где  $\theta = \arctg(\varphi_p/2f)$ ;  $D_i^*$  — обнаружительная способность  $D_{\text{ПЗС}}^*$ ,  $D_{\text{ФД}}^*$  и  $D_{\text{ЛОФ}}^*$ .

На рис. 3 приведены расчетные зависимости  $\Delta T_{ш}(\lambda_{гр})$  при  $\lambda_a = 2$  мкм,  $\varphi_p/f = 1/2$ ,  $T = 77$  К и времени накопления в качестве параметра. Кривая 1 соответствует максимально возможному времени накопления  $T_n = 1,6 \times 10^{-2}$  с (время накопления равно времени кадра) при стандартной кадровой частоте 60 кадров/с. Для матричного ФПУ (диапазон 3—5,4 мкм, фототок  $I_{\text{ф}} = 5,5 \cdot 10^{-9}$  А) время накопления  $T_n = 2,9 \cdot 10^{-3}$  (кривая 2) ограничивается зарядовой емкостью интегратора. Значение  $Q_{\text{н}} = 4 \cdot 10^7$  электронов, принятое при расчетах, максимально для данного типа матричных устройств считывания по литературным источникам [10]. Время накопления  $T_n = 3 \times 10^{-4}$  (кривая 4) характерно для технических телевизионных систем с частотой 25 кадров/с на основе линейки фотоприемников  $1 \times 128$  с разрешением  $128 \times 128$ .

На рис. 4 приведены расчетные зависимости  $\Delta T_{ш}(\lambda_{гр})$ ,  $\lambda_a = 8$  мкм при  $\varphi_p/f = 1/2$ ,  $T = 77$  и 60 К,  $T_n = 3 \cdot 10^{-4}$  с. Отметим качественное отличие данных от зависимостей на рис. 3 для  $\lambda_{гр} = 3$ —6 мкм. В диапазоне 8—10,5 мкм  $I_{\text{ф}} = 8,4 \cdot 10^{-8}$  А, т. е. более чем на порядок выше, чем в диапазоне 3—5,4 мкм. Поэтому для диапазона 8—10,5 мкм максимальное время накопления  $T_n = 1,9 \cdot 10^{-4}$  с при той же зарядовой емкости интегратора. Резкое ухудшение температурного разрешения при  $\lambda_{гр}$ , больших 11 мкм, связано в основном с быстрым падением динамического сопротивления  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ -фотодиодов и соответственно снижением эффективности ввода тока.

Как видно из рис. 4, при  $\lambda_{гр} \sim 11$  мкм и  $T = 77$  К температурное разрешение  $\Delta T_{ш} \sim 15$  МК. В диапазоне 3—5 мкм матричные ФПУ (при равной зарядовой

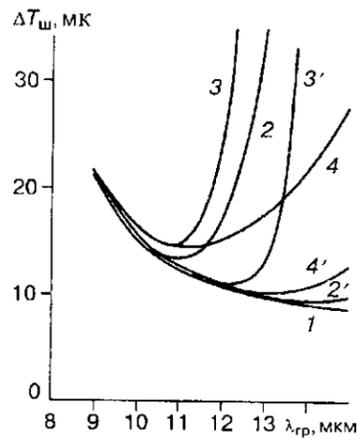


Рис. 4. Зависимости температурного разрешения тепловизионной системы  $\Delta T_{ш}$  от  $\lambda_{гр}$ ,  $\varphi_p/f = 1/2$ ,  $T_n = 3 \cdot 10^{-4}$  с,  $T = 77$  К,  $\lambda_a = 8$  мкм,  $N_i = 0,1N_a$ ,  $Q_5 = 0$ ,  $Q_6 = 200$  электронов:  
 1 — для ФПУ с  $D_{ФФ}^*$ ; 2 — для ФПУ с  $D_{АПЗС}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ; 3 — для ФПУ с  $D_{АПЗС}^*$ ,  $N_a = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ; 4 — для ФПУ с  $D_{ФФ}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ; кривые 2'—4' рассчитывались при  $T = 60$  К

емкости интегратора  $4 \cdot 10^7$  электронов) обеспечивают более высокое температурное разрешение  $\Delta T_{ш} \sim 12$  мК. Охлаждение ФПУ до 60 К теоретически позволит повысить температурное разрешение тепловизора до 10 мК при  $\lambda_{гр} \sim 12-14$  мкм. При этом следует отметить, что для реализации преимущества в температурном разрешении диапазона 8—12 мкм необходимо:

- существенно увеличить зарядовую емкость интегратора (до  $2-5 \cdot 10^8$  электронов);
- технологический разброс пороговых напряжений не должен превышать 10—15 мВ; в диапазоне 3—5 мкм требования ниже (30—50 мВ);
- обеспечить более высокие требования на однородность состава подложки.

Другим важнейшим критерием выбора спектрального диапазона тепловизионных систем является зависимость температурного разрешения от температуры объекта исследований. На рис. 5 приведены зависимости  $\Delta T_{ш}$  от  $T_{ф}$  для диапазонов 2—5,4 и 8—12 мкм при  $T_n = 3 \cdot 10^{-4}$  с. Для диапазона 3—5,4 мкм основной причиной снижения температурного разрешения относительно предельно возможного (кривые 5 и 6) является  $kTC$ -компонента шума (первый член выражения (5), а также  $Q_5$ ). Оценки показывают, что при  $T_{ф} = 250$  К  $I_{ф} = 7 \cdot 10^{-10}$  А, а накопленный заряд составляет всего лишь  $5 \cdot 10^5$  электронов. Для диапазона 8—12 мкм при  $T_{ф} = 250$  К, температуре ФПУ 77 К,  $I_{ф} = 5,5 \cdot 10^{-8}$  А основной причиной снижения температурного разрешения является недостаточно высокое динамическое сопротивление фотодиодов. Это подтверждается расчетными зависимостями температурного разрешения при температуре ФПУ  $T = 60$  К. В данном диапазоне температурное разрешение для ФПУ с «идеальными» устройствами считывания близко к предельно возможному (зависимость 1 на рис. 5).

Значительное ухудшение температурного разрешения в диапазоне 3—5 мкм с понижением температуры фона — одна из основных причин, стимулирующих работы по созданию тепловизионных систем в диапазоне 8—12 мкм.

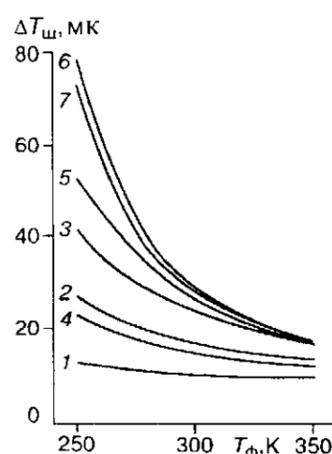


Рис. 5. Зависимости температурного разрешения тепловизионной системы  $\Delta T_{ш}$  от  $T_{ф}$ ,  $T = 77$  К,  $T_{н} = 3 \cdot 10^{-4}$  с для диапазонов 8—12 (кривые 1—4) и 2—5,4 мкм (кривые 5—7):  
 1 — для ФПУ с  $D_{ОФ}^*$ ; 2 —  $D_{АПЗС}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ; 3 —  $D_{АПЗС}^*$ ,  $N_a = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ; 4 —  $D_{ДФД}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ; 5 —  $D_{ОФ}^*$ ; 6 —  $D_{АПЗС}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ; 7 —  $D_{АПЗС}^*$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  при  $T = 60$  К

Достоверность оценок  $D_{АПЗС}^*$  ИК ФПУ и температурного разрешения тепловизионных систем на их основе ограничивается точностью используемых аналитических выражений, описывающих шумы системы, в частности шумы типа  $1/f$ . Численные значения  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\gamma$ ,  $K$  взяты из [2, 11, 12], но результаты экспериментальных измерений этих коэффициентов существенно отличаются у разных авторов. Уточненные модели шумов, полученные из экспериментальных исследований конкретных фотоприемников и устройств считывания, могут быть легко встроены в программу.

**Заключение.** В работе исследовалась система  $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиод — прямоинжекционное устройство ввода. Рассчитаны основные характеристики данной системы — эффективность ввода, обнаружительная способность и температурное разрешение — как функции температуры фотоприемника и объекта исследования, входного напряжения, параметров фотодиода, а также зарядовой емкости интегратора. Проведенный анализ позволяет выбрать обеспечивающий минимальное температурное разрешение спектральный диапазон тепловизионной системы на основе многоэлементных фотоприемников линейчатого и матричного типов в диапазоне 3—14 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Felix P., Moulin M., Munier B. et al. CCD readout of infrared hybrid focal plane arrays // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. ED-27, N 1. P. 175.
2. Chow K., Roud J. P., Sub D. H., Blackwell J. P. Hybrid infrared focal plane arrays // IEEE Trans. Electron. Dev. 1982. ED-29, N 1. P. 3.
3. Кунакбасва Г. Р., Ли И. И., Черепов Е. И. Система фотодиод — ПЗС-устройства ввода с прямой инжекцией для многоэлементных ИК ФПУ // Радиотехника и электроника. 1993. Вып. 5. С. 922.
4. Герасименко Н. Н., Грищенко И. В., Сафронов Л. Н. Пакет программ для оценок оптических и электрофизических параметров  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (0,19 × 0,4). Новосибирск, 1990. (Препр. /АН СССР. Сиб. отд.-ние. ИФП; № 5).
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Ч. 1.

6. Rogalski A., Piotrowski J. Intrinsic infrared detectors // Progr. Quantum Electron. 1988. 12, N 2/3. P. 87.
7. Бурлаков И. Д. Состояние и перспективы создания матричных фотоприемников ИК-диапазона спектра на основе полупроводниковых соединений теллуридов кадмия и ртути // Зарубежная военная техника. М., 1990. Вып. 5(113). С. 3.
8. Bluzer M., Jensen A. // Opt. Eng. 1987. 26, N 3. P. 241.
9. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988.
10. Woolaway J. T. New sensor technology for 3- to 5- $\mu\text{m}$  imaging band // Photonics Spectra. 1991. N 2. P. 113.
11. Reibold G. Noise associated with charge injection into a CCD by current integration through a MOS transistor // IEEE Trans. Electron. Dev. 1985. ED-32, N 5. P. 871.
12. Tobin S. P., Iwasa S., Tredwell T. J.  $1/f$  noise in (Hg, Cd)Te photodiodes // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. ED-27, N 1. P. 43.

*Поступила в редакцию 29 апреля 1996 г.*

---