

УДК 535.247.049.7:621.383.52

Инфракрасные фотоприемные устройства на основе системы фотодиод — прямоинжекционное устройство считывания

Д. Д. Карнаушенко, И. И. Ли, В. Г. Половинкин, Ж. В. Гуменюк-Сычевская

Представлена математическая модель многоэлементных инфракрасных фотоприемных устройств на основе системы фотодиод — прямоинжекционное устройство считывания. Модель позволяет проводить анализ с заданием вольт-амперных характеристик фотодиодов как в аналитическом виде, так и аппроксимацией экспериментальных данных, определить основные факторы, лимитирующие характеристики многоэлементных фотоприемных устройств и тепловизионных систем на их основе, в зависимости от электрофизических и конструктивных параметров фотодиодов, устройств считывания, фоновой обстановки.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: $Hg_{1-x}Cd_xTe$, фотодиод, многоэлементное фотоприемное устройство, устройство считывания с прямой инжекцией заряда, тепловизионная система.

Введение

Устройство с прямой инжекцией заряда (ПИ) является основным типом устройств считывания для гибридных многоэлементных инфракрасных фотоприемных устройств (ИК ФПУ) в спектральном диапазоне 5—14 мкм [1]. Поэтому актуальной задачей является разработка математических моделей, обеспечивающих возможность оптимизации фотоэлектрических и конструктивных параметров фотоприемников, кремниевых устройств считывания, а также прогнозирования параметров многоэлементных ИК ФПУ и тепловизионных систем на их основе. Анализ подобной системы, представленный в работах [2, 3], позволяет проводить лишь качественные оценки характеристик системы, достаточные при выполнении условия $g_{вх} \cdot R_{фд} \gg 1$ (здесь $g_{вх}$ — проводимость канала под входным затвором ПИ, а $R_{фд}$ — динамическое сопротивление фотодиода).

Данная работа развивает предложенные в [4, 5] модели и методику анализа системы ИК-фотодиод—ПИ.

Карнаушенко Даниил Дмитриевич, стажер.
Ли Ирлам Игнатьевич, ведущий научный сотрудник.
Половинкин Владимир Григорьевич, старший научный сотрудник.
 Институт физики полупроводников СО РАН.
 Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.
 E-mail: Irlamlee@isp.nsc.ru
Гуменюк-Сычевская Жанна Витальевна, старший научный сотрудник.
 Институт физики полупроводников НАН Украины.
 Украина, 03028, Киев, пр. Науки, 41.
 E-mail: gumenjuk@isp.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 5 марта 2012 г.

© Карнаушенко Д. Д., Ли И. И., Половинкин В. Г., Гуменюк-Сычевская Ж. В., 2012

Математическая модель системы ИК-фотодиод — прямоинжекционное устройство считывания

В данной работе анализ системы фотодиод—ПИ проводится при следующих допущениях.

1. Используется "классическая" модель вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотодиодов:

$$I_{фд} = I_{\phi} + I_0 \left[1 - \exp(-\beta V_{фд}) \right] + \frac{V_{фд}}{R_p}, \quad (1)$$

где I_{ϕ} — ток, обусловленный фоновым излучением;

I_0 — ток насыщения фотодиода;

$V_{фд}$ — напряжение на фотодиоде;

R_p — шунтирующее сопротивление фотодиода, $\beta = kT/q$;

k — постоянная Больцмана;

T — температура;

q — заряд электрона.

2. Для описания ВАХ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ -фотодиодов в спектральном диапазоне 8—14 мкм упрощенная модель фотодиодов (1) недостаточна. При моделировании ВАХ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ -фотодиодов необходимо учитывать основные механизмы токопереноса в p — n -переходе: ток, обусловленный фоновым излучением $\eta_k I_p$, диффузионный ток, ток термической генерации/рекомбинации и туннелирование через локализованные центры в запрещенной зоне обедненной области p — n -перехода, межзонное туннелирование [6], а также токи Шокли—Рида—Холла через ловушечные центры в квазинейтральных n - и p -областях, Оже и излучательная генерация/рекомбинация в p — n -переходе и в квазинейтральных областях [1, 7]. Все вышеперечисленные токи независимы и учитываются аддитивно, кроме термического механизма и туннелирования через ловушки типа Шокли—Рида—Холла в обедненной области p — n -перехода, поскольку интенсив-

ность обоих этих процессов определяется заселенностью ловушек. Указанные механизмы моделировались в приближении уравнений баланса носителей на ловушках [8—10]. Предполагалось наличие локализованных центров донорного типа в запрещенной зоне с энергией $E_t = 0,6—0,7 E_g$ над краем валентной зоны [11]. При расчете ширины запрещенной зоны в зависимости от стехиометрического состава x и температуры использовано выражение [1]:

$$E(x, T) = \left[-0,302 + x[1,93 + x(-0,81 + 0,832x)] + 5,32 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 2x) \frac{-1822,0 + T^3}{255,2 + T^2} \right] \quad (2)$$

3. Анализ системы фотодиод — прямоинжекционное устройство считывания базировался на основе экспериментальных ВАХ. В этом случае экспериментальные ВАХ аппроксимируются аналитическими выражениями типа:

$$I_{\text{ФД}}(V_{\text{ФД}}) = C_0 + C_1 \exp(C_2 V_{\text{ФД}}) + C_3 \exp(C_4 V_{\text{ФД}}) + C_5 V_{\text{ФД}}, \quad (3)$$

где коэффициенты $C_0 — C_5$ подбираются индивидуально для каждого фотодиода.

Работа устройства считывания с прямой инжекцией заряда определяется напряжением на входном затворе V_G . Поэтому необходимо иметь возможность рассчитывать все основные характеристики системы в зависимости от V_G . При расчете используется модель длинноканального транзистора в режиме слабой инверсии [12].

Проводимость канала под входным затвором в режиме слабой инверсии $g_{\text{Вх}}$ определяется выражением:

$$g_{\text{Вх}} = \frac{\partial I_{\text{Вх}}}{\partial V_G} = \frac{q I_{\text{Вх}}}{N^* k T}, \quad (4)$$

где $I_{\text{Вх}}$ — ток, интегрируемый в устройстве считывания;

V_G — напряжение на входном затворе;

$N^* = (C_{\text{Ох}} + C_{\text{Д}} + C_{\text{СС}})/C_{\text{Ох}}$, $C_{\text{Ох}}$ — удельная емкость подзатворного диэлектрика;

$C_{\text{СС}}$ — плотность быстрых поверхностных состояний;

$C_{\text{Д}}$ — емкость области обеднения.

Коэффициент ввода тока

$$\eta_I = \frac{g_{\text{Вх}}}{g_{\text{Вх}} + g_{\text{ФД}} + j\omega C_{\text{Вх}}}, \quad (5)$$

где $g_{\text{ФД}} = 1/R_{\text{ФД}}$, $R_{\text{ФД}}$ — динамическое сопротивление фотодиода;

$C_{\text{Вх}}$ — емкость входного узла фотоприемного канала.

Величина шумового заряда $Q(t)$, интегрируемого под затвором накопления прямоинжекционного устройства считывания, рассчитывается с помощью функции Макдональда в терминах спектральной плотности $S_i(\omega)$ [13]:

$$\overline{Q^2}(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{S_i(\omega)}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) d\omega. \quad (6)$$

Спектральная плотность шумового тока канала под входным затвором определяются выражением:

$$S_i(\omega) = 4kTg_{\text{Вх}}\alpha_1 |1 - \eta_I|^2 + \frac{2\pi B_{\text{Вх}} I_{\text{Вх}}^2}{\omega} |1 - \eta_I|^2 + \left(2qI_{\text{ФД}}^2 + \frac{4kT\alpha_2}{R_{\text{ФД}}} \right) |\eta_I|^2 + \frac{2\pi B_{\text{ФД}}}{\omega} |\eta_I|^2. \quad (7)$$

Первое и второе слагаемые в выражении (6) описывают тепловые шумы и шумы типа $1/f$ входного МДП-транзистора; третье слагаемое — тепловой и дробовой шум фотодиода, четвертое слагаемое — шум типа $1/f$ фотодиода; $B_{\text{Вх}} = K/WL(C_{\text{Ох}} + C_{\text{Д}})^2$, $B_{\text{ФД}} = 2\pi\alpha_3^2 (I_{\text{ФД}} - \eta_k I_{\text{Ф}})^2$; W, L — ширина и длина канала входного МДП-транзистора устройства ввода; $\alpha, \alpha_1, \alpha_2, K$ — численные коэффициенты, k — постоянная Больцмана [2, 3, 14, 15].

Оценку тепловых шумов канала под входным затвором Q_1 , выраженную в количестве шумовых электронов, можно получить в аналитическом виде:

$$Q_1^2 = \frac{2kTC_{\text{Вх}}g_{\text{Вх}}R_{\text{ФД}}\alpha_1}{q^2(1 + g_{\text{Вх}}R_{\text{ФД}})} \left[1 - \exp\left(-T_H \frac{1 + g_{\text{Вх}}R_{\text{ФД}}}{R_{\text{ФД}}C_{\text{Вх}}}\right) \right] + \frac{2kTg_{\text{Вх}}\alpha_1}{q^2(1 + g_{\text{Вх}}R_{\text{Д}})^2} \times \left[T_H - \frac{R_{\text{ФД}}C_{\text{Вх}}}{1 + g_{\text{Вх}}R_{\text{ФД}}} \left(1 - \exp\left(-T_H \frac{1 + g_{\text{Вх}}R_{\text{ФД}}}{R_{\text{ФД}}C_{\text{Вх}}}\right) \right) \right]. \quad (8)$$

Для оценки шума типа $1/f$ канала под входным затвором Q_2 , выраженного также в количестве шумовых электронов, при интегрировании необходимо учесть, что режим считывания включает фильтр высоких частот с передаточной характеристикой $\omega^2 / (\omega_0^2 + \omega^2)$, где $\omega_0 = \pi/T_H$. Кроме того, ПИ-устройство считывания является фильтром низких частот с граничной частотой $a = (1 + g_{\text{Вх}}R_{\text{ФД}})/R_{\text{ФД}}C_{\text{Вх}}$. В результате, имеем следующее выражение для Q_2 :

$$Q_2^2 = \frac{2KI_{\text{Вх}}^2}{qWL(C_{\text{Ох}} + C_{\text{Д}})^2} \times \int_0^\infty \frac{\left(\frac{1}{C_{\text{in}}R_{\text{ФД}}} \right)^2 + \omega^2}{\left(\frac{1}{C_{\text{in}}R_{\text{ФД}}} \right)^2 + \omega^2} \frac{1}{\omega(\omega_0^2 + \omega^2)} \sin^2 \frac{\omega T_H}{2} d\omega. \quad (9)$$

Для теплового и дробового шумов фотодиода Q_3 нужное соотношение также можно получить в аналитическом виде

$$Q_3^2 = \frac{(g_{Bx} R_{ФД})^2}{q^2 (1 + g_{Bx} R_{ФД})^2} \left(q I_{ФД} + \frac{2kT\alpha_2}{R_{ФД}} \right) \times \left(T_H - \frac{R_{ФД} C_{Bx}}{1 + g_{Bx} R_{ФД}} \left(1 - \exp \left(-T_H \frac{1 + g_{Bx} R_{ФД}}{R_{ФД} C_{Bx}} \right) \right) \right) \quad (10)$$

Четвертое слагаемое в выражении (6) описывает шумы типа $1/f$ фотодиода:

$$Q_4^2 = 2\alpha_3^2 (I_{ФД} - \eta_K I_\Phi)^2 \frac{g_{Bx}^2}{q^2 C_{Bx}^2} \times \int_0^\infty \frac{1}{\left(\frac{1 + g_{Bx} R_{ФД}}{C_{Bx} R_{ФД}} \right)^2 + \omega^2} \frac{1}{\omega (\omega_0^2 + \omega^2)} \sin^2 \frac{\omega T_H}{2} d\omega \quad (11)$$

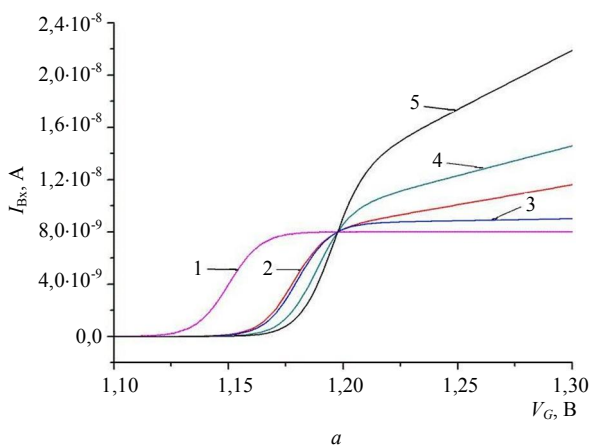
Обнаружительная способность фотоприемного канала со считыванием сигналов с ИК-фотодиода в ПИ-устройстве ввода определяется выражением

$$D^* = \frac{(AT_H/2)^{1/2} \eta_I \eta_K}{\left(\frac{\hbar c}{\lambda} \right) (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + Q_4^2 + Q_{пр}^2)^{1/2}}, \quad (12)$$

где $Q_1 - Q_4$, соответственно, первая, вторая, третья и четвертая составляющие шума в выражении (6), $Q_{пр}$ — прочие шумы, например, шум внешнего электронного тракта и др.

Температурное разрешение тепловизионных систем рассчитывается по соотношению [1]:

$$NETD = \frac{\sqrt{1/2T_H}}{\frac{F_p^2}{4f^2} (A_{ФД})^{1/2} \Gamma_{ОПТ} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d(R/d\lambda)}{dT} S(\lambda) D_\lambda^*(\lambda_1, \lambda_2, T_\Phi) d\lambda}, \quad (13)$$



где $dR/d\lambda$ — спектральная светимость черного тела;
 F_p/f — относительное отверстие оптики;
 f — фокусное расстояние;
 $\Gamma_{ОПТ}$ — оптическое пропускание системы;
 $S(\lambda)$ — пропускание атмосферы;
 λ_1, λ_2 — спектральные границы фоточувствительности.

Расчет начинается с задания фотоэлектрических параметров фотодиода и расчета их ВАХ, вычисления уровня фонового излучения, задания электрофизических и конструктивных параметров устройств считывания, а также условий работы ИК ФПУ [4, 5]. При заданном напряжении на входном затворе V_G вычисляются значения токов $I_{Bx}, I_{ФД}$. Напряжение на фотодиоде определяется из условия равенства токов $I_{Bx} = I_{ФД}$. В следующем цикле V_G присваивается новое значение. Решение самосогласованной задачи для токов, протекающих в фотодиоде, и токов, интегрируемых в устройстве считывания, позволяет рассчитать основные параметры системы: напряжения на фотодиоде $V_{ФД}$, коэффициент ввода тока η_L , тока I_{Bx} , интегрируемого в устройство считывания, D^* в зависимости от напряжения смещения на входном затворе устройства считывания.

Примеры модельных расчетов системы фотодиод—ПИ

Классическая модель фотодиодов

На рис. 1 приведены ВАХ фотодиодов с использованием “классической” модели (соотношение 1) и расчетные зависимости тока, интегрируемого в устройстве считывания $I_{Bx}(V_G)$, а также обнаружительной способности $D^*(V_G)$, соответственно, при длинноволновой границе чувствительности фотодиода $\lambda = 10$ мкм. Значения конструктивных параметров, использованных при расчетах, приведены в табл. 1.

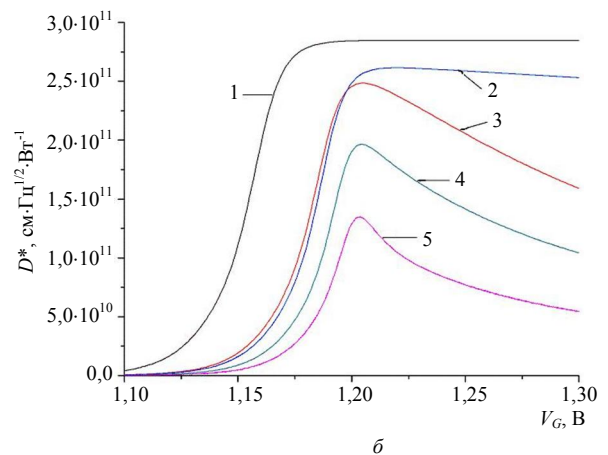


Рис. 1. Расчетные зависимости системы фотодиод—ПИ от напряжения на входном затворе устройства считывания: а — токов I_{Bx} , интегрируемых в устройстве считывания; б — обнаружительной способности $D^*(V_G)$. Зависимости получены при времени накопления $T_H = 5 \cdot 10^{-4}$ с, $I_\Phi = 1 \cdot 10^{-8}$ А, $\eta_K = 0,8$; для кривой 1 — $I_0 = 1 \cdot 10^{-11}$ А, $R_p = 1 \cdot 10^{11}$ Ом; 2 — $I_0 = 5 \cdot 10^{-10}$ А, $R_p = 3 \cdot 10^7$ Ом; 3 — $I_0 = 7 \cdot 10^{-10}$ А, $R_p = 3 \cdot 10^8$ Ом; 4 — $I_0 = 2 \cdot 10^{-9}$ А, $R_p = 2 \cdot 10^7$ Ом; 5 — $I_0 = 5 \cdot 10^{-9}$ А, $R_p = 1 \cdot 10^7$ Ом

Таблица 1

Конструктивные параметры устройств считывания

Обозначение	Наименование параметра	Численное значение
μ	Подвижность неосновных носителей в инверсионном канале МДП транзистора	$500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
N_D	Концентрация доноров в подложке	$7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
Сок	Удельная емкость диэлектрика	$1,24 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-2}$
V_{FB}	Напряжение плоских зон	0 В
N_{SS}	Плотность поверхностных состояний	$1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$
W, L	Ширина, длина канала входного затвора	30; 3 мкм
$C_{Вх}$	Емкость входного узла ФПУ	0,5 пФ
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, K$	Численные коэффициенты	$2, 2, 10^{-3}, 1,5 \cdot 10^{-24} \text{ Ф}^2 \cdot \text{см}^{-2}$

Соотношение $g_{Вх}R_{Фд}$ на рис. 1 (при напряжении на фотодиоде $V_{Фд} = 0$ В) равно 794, 11,1, 11,1, 3,4 и 1,4 для кривых 1—5, соответственно. Для кривых 2 и 3 значения I_0 и R_p разные, но подобраны таким образом, чтобы соотношение $g_{Вх}R_{Фд}$ было одинаковым. Как будет показано ниже, основные характеристики системы фотодиод—ПИ будут качественно отличаться. При соотношении $g_{Вх}R_{Фд} > 100$ систему можно назвать "идеальной", ей отвечают кривые 1 на рис. 1. Для "идеальной" системы при возрастании напряжения V_G , когда напряжение на фотодиоде приближается к ~ 0 В, η_I достигает величины близкой к единице, а D^* совпадает с теоретическим пределом (при квантовой эффективности фотодиодов $\eta_k = 0,8$) для режима ОФ. С последующим возрастанием V_G для "идеальной" системы основные характеристики фотоприемного канала ($\eta_I, I_{Вх}, D^*$) практически не зависят от V_G , электрофизических и конструктивных параметров устройств считывания. В "неидеальных" системах (кривые 2—5), для которых соотношение $g_{Вх}R_{Фд} \gg 1$ выполняется недостаточно убедительно, характер зависимостей $I_{Вх}(V_G), D^*(V_G)$ существенно изменяется. Ток $I_{Вх}$, интегрируемый в устройстве считывания, возрастает с увеличением V_G , а $D^*(V_G)$ имеют хорошо выраженный максимум при напряжениях V_G , при которых фотодиод смещен в обратном направлении на 5—30 мВ. Максимальное значение D^* относительно слабо зависит от соотношения $g_{Вх}R_{Фд}$, так при изменении соотношения $g_{Вх}R_{Фд}$ с 794 до 3,4 D^* уменьшается с $2,87 \cdot 10^{11}$ до $1,96 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, т. е. менее чем в 1,5 раза. Отметим, что для кривых 2 и 3 соотношение $g_{Вх}R_{Фд}$ при напряжении на фотодиоде $V_{Фд} = 0$ В имеет одинаковое значение, однако зависимости $I_{Вх}(V_G)$ (см. рис. 1, а), $D^*(V_G)$ (см. рис. 1, б) существенно отличаются.

Причины этих отличий поясняются на рис. 2, на которых дополнительно к зависимостям $D^*(V_G)$

(правая ось) показаны зависимости $Q_1(V_G), Q_2(V_G), Q_3(V_G), Q_4(V_G)$ (левая ось). Для "идеальной" системы Q_Σ определяется токовым шумом фотодиода Q_3 , практически совпадающий с шумом, обусловленным флуктуациями фонового излучения. Для "неидеальных" систем Q_Σ растет с увеличением V_G (см. расчетные зависимости на рис. 2).

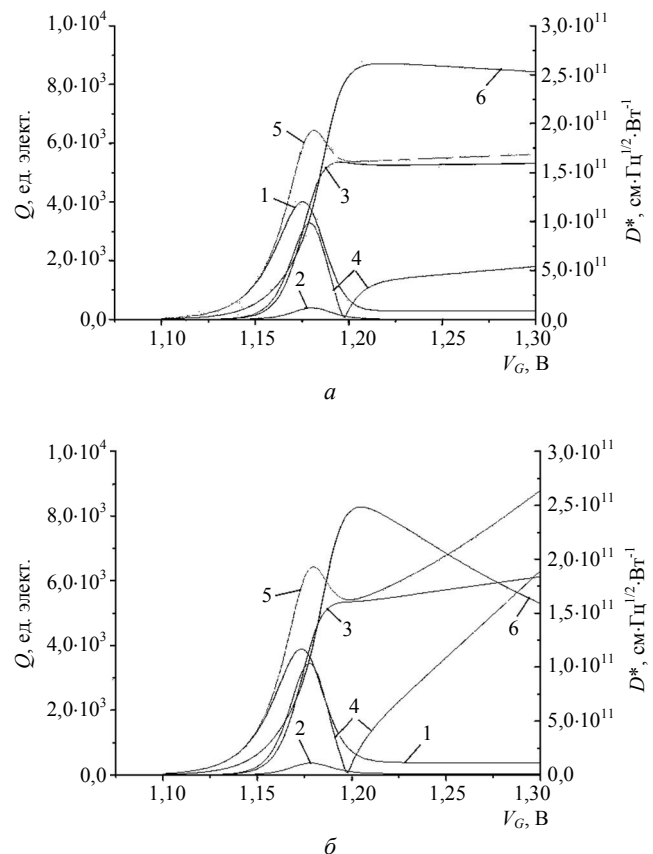


Рис. 2. Расчетные зависимости компонент шума $Q_1—Q_4$ от V_G . Параметры фотодиода на рис. 2, а, б аналогичны параметрам, принятым на рис. 1 для кривых 2, 3, соответственно.

На левой оси 1 — компонента шума Q_1 ; 2 — компонента шума Q_2 ; 3 — компонента шума Q_3 ; 4 — компонента шума Q_4 ; 5 — $Q_\Sigma = (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + Q_4^2)^{1/2}$.

На правой оси — зависимости $D^*(V_G)$, кривая 6

Возрастание шума и, соответственно, снижение D^* определяется главным образом ростом компонент Q_3, Q_4 . Для расчетных зависимостей разница в зависимостях D^* с увеличением V_G определяется, главным образом, ростом шумов фотодиода типа $1/f$, т. е. компонентой Q_4 . Отличие в зависимостях $Q_4(V_G)$ обусловлено большим током $I_{Вх}$ и меньшей величиной коэффициента ввода тока η_L . Таким образом, при равенстве соотношения $g_{Вх}R_{ФД}$ при нулевом напряжении на фотодиоде лучшую чувствительность ИК ФПУ обеспечивают диоды с большим динамическим сопротивлением при их смещении на 10—30 мВ в обратном направлении. Шумы входного МДП-транзистора (кривые 1, 2 на рис. 2) существенны только при напряжениях $V_G < V_{G0}$ даже при соотношении $g_{Вх}R_{ФД} \sim 1$ и, можно утверждать, для современного уровня кремниевой технологии ($C_{ОХ} \sim (0,5—1,2) \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-2}$) не ограничивают обнаружительную способность ИК ФПУ.

Развитая выше методика дает возможность проводить анализ системы фотодиод — прямоинжекционное устройство считывания на основе экспериментальных ВАХ фотодиодов. В этом случае предварительно подбираются соотношения, позволяющие аппроксимировать экспериментальные ВАХ. Результаты анализа системы с ВАХ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов со стехиометрическим составом фоточувствительного слоя $x = 0,225$ приведены в работе [16].

Моделирование системы на основе HgCdTe -фотодиодов

На рис. 3 приведены ВАХ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов в зависимости от длинноволновой границы фоточувствительности в качестве параметра. Перечень основных электрофизических параметров $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов, используемых при расчетах ВАХ, приведен в табл. 2.

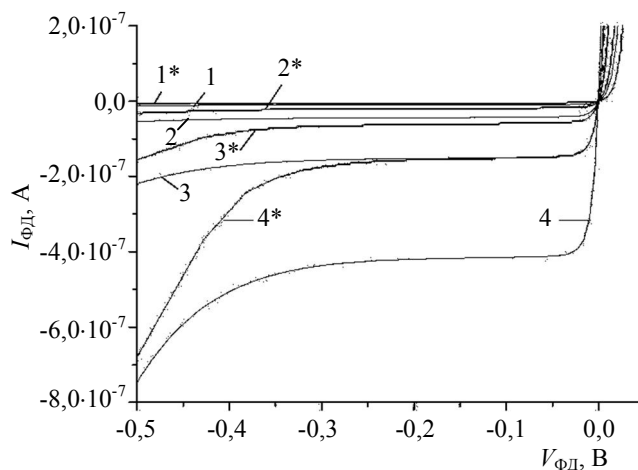


Рис. 3. Расчетные ВАХ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов для температуры 77 К.

Для кривых 1—4, 1*—4* длинноволновая граница фоточувствительности $\lambda_2 = 11, 12, 13$ и 14 мкм , соответственно. Электрофизические параметры фотодиодов приведены в табл. 2, вариант 1 — кривые 1—4, вариант 2 — кривые 1*—4*

Таблица 2

Электрофизические параметры $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов

Обозначение	Наименование параметра	Численное значение	
		Вариант 1	Вариант 2
N_a, N_d	Концентрация акцепторов, доноров	$1,0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $2,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $2,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$
N_t, N_{tV}	Концентрация ловушечных центров области $p-n$ -перехода и квазинейтральных областях	$6,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $2,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$
$\tau_n, \tau_p, \tau_{nV}, \tau_{pV}$	Времена жизни электронов и дырок в области $p-n$ -перехода и в квазинейтральных областях	$0,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}$	$0,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ с}$
E_t	Энергетическое положение ловушки	$E_t = 0,7 E_g \text{ эВ}$	
P	Межзонный оптический матричный элемент	$8,3 \cdot 10^{-10} \text{ эВ} \cdot \text{м}$	
W_{c2}	Квадрат матричного элемента с уровня ловушки в зону	$3 \cdot 10^{-67} \text{ Дж}^2 \cdot \text{м}^3$	
Δ	Константа спин-орбитального взаимодействия	0,96 эВ	
ϵ_r	Статическая диэлектрическая проницаемость	17,5	
$A_{ФД}$	Площадь фотодиода	$9 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$	

Как показано в [8, 9], используемая модель $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов (2) при соответствующем выборе параметров позволяет рассчитать ВАХ в зависимости от стехиометрического состава и температуры, причем с привязкой к электрофизическим параметрам подложки и технологии получения фотодиодов. Это позволяет также рассчитать все основные параметры системы: напряжение на фотодиодах $V_{\text{ФД}}(V_G)$, коэффициент ввода тока $\eta(V_G)$, ток, интегрируемый в устройстве считывания $I_{\text{ВХ}}(V_G)$, обнаружительную способность $D^*(V_G)$, а также температурное разрешение тепловизионных систем на их основе в зависимости от стехиометрического состава и температуры.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости максимальных значений $D^*(V_G)$ от длинноволновой границы fotocувствительности λ_2 . При $\lambda_2 < 10$ мкм и температуре 77 К обнаружительная способность системы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиод—ПИ-устройство считывания для фотодиодов с электрофизическими параметрами варианта 1 из табл. 2 близка к $D_{\text{ОФ}}^*$ (кривая 1). При $\lambda_2 > 10$ мкм обнаружительная способность становится ниже по отношению к $D_{\text{ОФ}}^*$. Для фотодиодов с электрофизическими параметрами варианта 2 из табл. 1 длинноволновая граница fotocувствительности, при которых D^* близка к $D_{\text{ОФ}}^*$, сдвигается в сторону больших длин волн (кривая 2). При охлаждении фотодиодов до температуры 60 К значения D^* близки к $D_{\text{ОФ}}^*$ вплоть до 14 мкм (кривые 3 и 4).

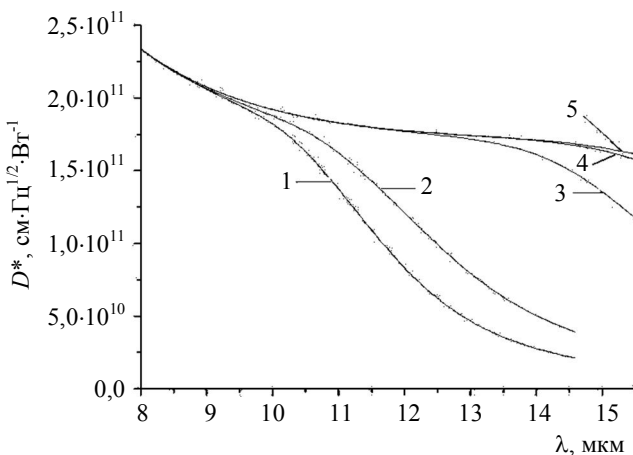


Рис. 4. Расчетные зависимости $D^*(\lambda_2)$ фотоприемного канала на основе системы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиод—ПИ:

кривые 1, 2 — при температуре на фотодиодах 77 К; кривые 3, 4 — при температуре на фотодиодах 60 К. Кривые 1, 3 получены для $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов с параметрами, приведенными в табл. 1, вариант 1, кривые 2, 4 — для варианта 2. Кривая 5 — расчетные зависимости $D_{\text{ОФ}}^*$. Зарядовая емкость устройства считывания $Q_{\text{ЗН}} = 5 \cdot 10^7$ электронов

Для тепловизионных систем более информативны зависимости NETD, показанные на рис. 5. Для "идеальной" тепловизионной системы (кривая 1), когда обнаружительная способность ИК ФПУ равна $D_{\text{ОФ}}^*$ для всего спектрального диапазона, а время накопления равно времени кадра, в нашем случае, $T_H = 20$ мс, получаем известные зависимости для NETD(λ), причем температурное разрешение улучшается с увеличением λ_2 [17, 18].

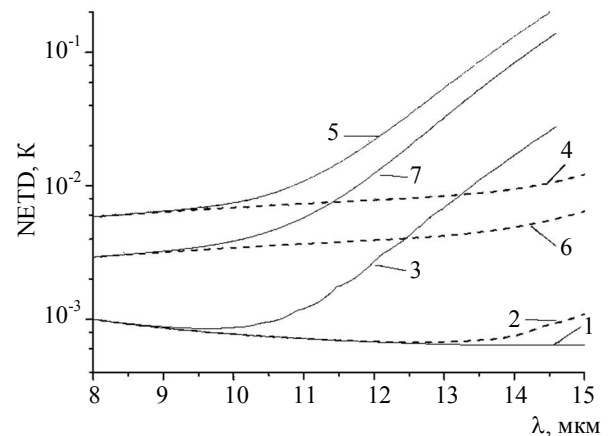


Рис. 5. Расчетные зависимости NETD(λ). При расчетах принято:

$F_p/f = 0,5$, $\Gamma_{\text{ОПТ}} = 0,9$, $\lambda_1 = 4$ мкм. Кривая 1 получена при $D^* = D_{\text{ОФ}}^*$, $T_H = 20$ мс; 2, 3 — с учетом зависимости D_{λ}^* фотоприемного канала со считыванием сигналов в ПИ-устройство считывания, $T_H = 20$ мс; 4—7 — при условии ограниченной зарядовой емкости кремниевого устройства считывания (для кривых 4, 5 $Q_{\text{ЗН}} = 5 \cdot 10^7$ электронов, для кривых 6, 7 $Q_{\text{ЗН}} = 2 \cdot 10^8$ электронов). Кривые 2, 4, 6 получены при температуре 60 К, кривые 3, 5, 7 — при температуре 77 К

Зависимости NETD, учитывающие обнаружительную способность фотоприемных каналов на основе системы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов—ПИ, при $T_H = 20$ мс (вариант 1 табл. 1) показаны кривыми 2 и 3 для температур 60 и 77 К, соответственно. Температурное разрешение при некотором значении λ_2 достигает максимума, а затем ухудшается. Положение максимума температурного разрешения определяется электрофизическими параметрами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов и оптическим пропусканием системы. Однако основным фактором, лимитирующим температурное разрешение, является зарядовая емкость кремниевых устройств считывания (кривые 4—7).

Принятая при расчетах $Q_{\text{ЗН}} = 5 \cdot 10^7$ электронов типична для устройств считывания, предназначенных для многоэлементных матричных ИК ФПУ с кадровым накоплением фотосигналов (при шаге фотоприемников 25—30 мкм). Температурное разрешение тепловизионных систем при такой зарядовой емкости устройств считывания (кривая 5) уже для $\lambda_2 = 8$ мкм более чем на порядок величин

ны, а для $\lambda_2 = 14$ мкм более чем на два порядка хуже в сравнении с “идеальной” тепловизионной системой (кривая 1). Существенно улучшить температурное разрешение можно за счет увеличения зарядовой емкости кремниевых устройств считывания (кривые 6, 7), полученных при зарядовой емкости устройств считывания, равной $2 \cdot 10^8$ электронов [19, 20].

Моделирование характеристик многоэлементных ИК ФПУ

Зависимости $D^*(\lambda_2)$, NETD(λ_2) от длинноволновой границы фоточувствительности λ_2 и зарядовой емкости устройств считывания, приведенные на рис. 4 и 5 и принятые при расчетах электрофизических параметров Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов, а также зарядовой емкости устройств считывания, характеризуют предельные возможности тепловизионных систем. При их построении использовались значения $D^*(V_G)$ в максимуме. Для многоэлементных ИК ФПУ неизбежный технологический разброс пороговых напряжений под входным затвором устройств считывания и разброс стехиометрического состава подложки Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов приводят к появлению “геометрического” шума, а для части фотоприемных каналов многоэлементных ИК ФПУ к более значительному снижению D^* и NETD, чем это следует из расчетных зависимостей на рис. 4 и 5.

При статистических оценках неоднородностей характеристик многоэлементных ИК ФПУ считается, что разброс пороговых напряжений и неоднородность стехиометрического состава в подложке описываются нормальным распределением (количество реализаций принято равным 200). Уровень фототока рассчитывался с учетом длинноволновой границы фоточувствительности индивидуально для каждого фотоприемного канала. Время накопления определялось зарядовой емкостью устройства считывания и максимальным уровнем тока фотодиодов в выборке из 200 реализаций. Для многоэлементных ИК ФПУ с $\lambda_2 \geq 11$ мкм при неоднородности стехиометрического состава подложки Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов с дисперсией $\sigma(x) = 0,1\%$ и средним значением стехиометрического состава $x = 0,2168$ разброс длинноволновой границы фоточувствительности составит от 11 до 11,8 мкм. При дисперсии пороговых напряжений $\sigma(V_{пор}) = 5$ мВ проведенные расчеты показывают, что NETD будет лежать в пределах от 11 до 18 мК при $T = 77$ К (для электрофизических параметров вариант 1 табл. 2). Отметим, что для единичного канала NETD равно 10,8 мК (см. рис. 5, кривая 5) и соответствует литературным данным [21]. В спектральном диапазоне с $\lambda_2 \leq 10$ —11 мкм D^*

фотоприемных каналов ИК ФПУ на основе системы фотодиод—ПИ-устройство считывания практически не зависит от напряжения смещения V_G , и поэтому основной причиной ухудшения NETD является неоднородность стехиометрического состава подложки.

С увеличением длинноволновой границы фоточувствительности требования к однородности пороговых напряжений под входным затвором устройств считывания и стехиометрического состава подложки Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов возрастают. На рис. 6 показаны расчетные гистограммы (распределение выборки для 200 образцов) токов I_{Bx} и NETD тепловизионных систем для Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов с фотоэлектрическими параметрами, приведенными в табл. 2, вариант 1.

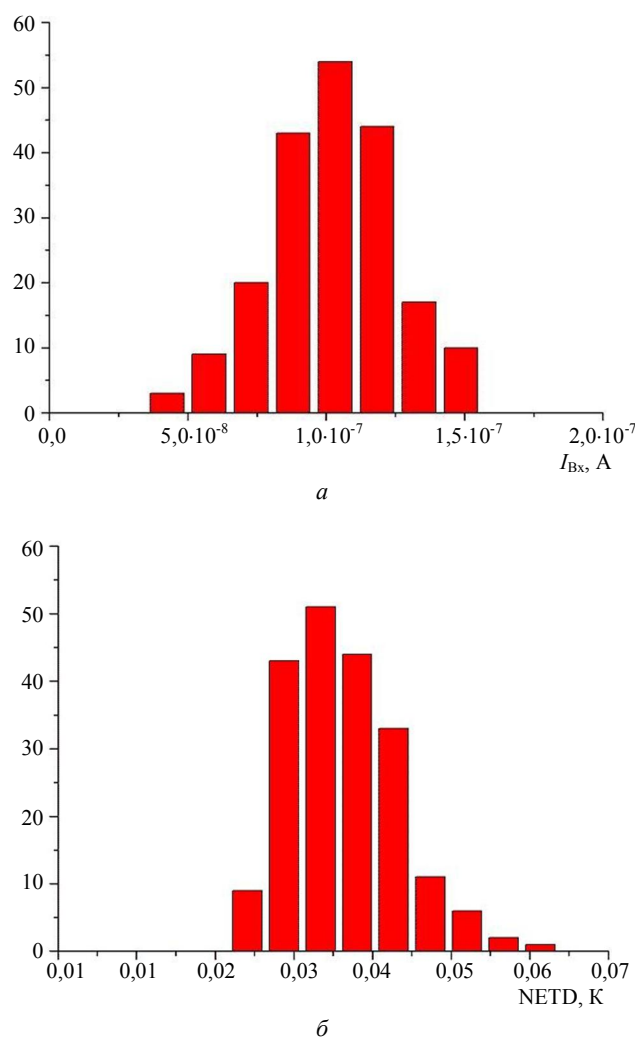


Рис. 6. Расчетные гистограммы (распределение выборки для 200 образцов) многоэлементных ИК ФПУ с учетом неоднородности пороговых напряжений и стехиометрического состава подложки Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов:
 а — для токов I_{Bx} ; б — для NETD. СКО пороговых напряжений входного МДП транзистора $\sigma(V_{пор}) = 5$ мВ, СКО стехиометрического состава Hg_{1-x}Cd_xTe-подложки $\sigma(x) = 0,1\%$. Среднее значение стехиометрического состава $x = 0,2105$, $T = 77$ К, зарядовая емкость устройств считывания $Q_{3H} = 5 \cdot 10^7$ электронов

Так, при необходимости обеспечить чувствительность ИК ФПУ до 12 мкм среднее значение стехиометрического состава подложки должно быть $x = 0,2105$ при $\sigma(x) = 0,1\%$ ($T = 77$ К). Это приведет к разбросу длинноволновой границы фоточувствительности в диапазоне от 12 до 13,2 мкм. Напряжение смещения на входном затворе устройства считывания $V_G = 1,235$ В оптимально при принятых в расчетах фоновой обстановки, электрофизических и конструктивных параметрах фотодиодов, устройств считывания. Уровень разброса входных токов I_{Bx} как один из важнейших параметров многоэлементных ИК ФПУ ограничивает их динамический диапазон и, соответственно, время накопления. Для единичного канала при $\lambda_2 = 12$ мкм обнаружительная способность в максимуме $D^*(V_G) = 7,4 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ (кривая 1 на рис. 4), а NETD = 0,023 К (кривая 5 на рис. 5). Неоднородности пороговых напряжений с $\sigma(V_{пор}) = 5$ мВ и стехиометрического состава подложки с $\sigma(x) = 0,1\%$ приводят к двух- или трехкратному ухудшению NETD для значительной части фотоприемных каналов.

На рис. 7 приведены гистограммы NETD тепловизионных систем для Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов с фотоэлектрическими параметрами, принятыми на рис. 6, но при более жестких требованиях к $\sigma(V_{пор}) = 2$ мВ и $\sigma(x) = 0,03\%$.

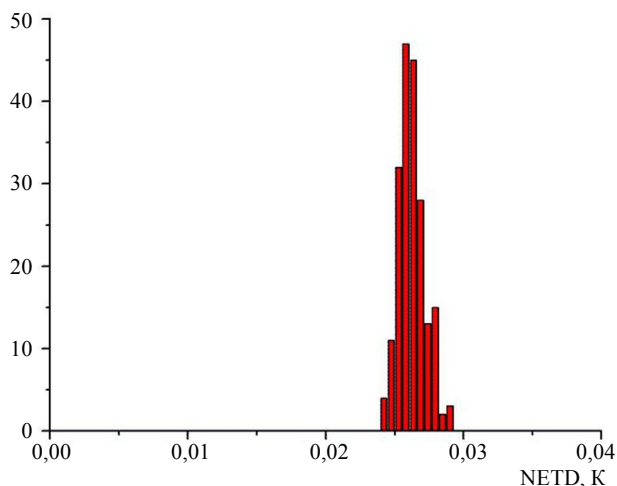


Рис. 7. Расчетные гистограммы NETD многоэлементных ИК ФПУ с учетом неоднородности пороговых напряжений и стехиометрического состава подложки Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов. СКО пороговых напряжений входного МДП-транзистора $\sigma(V_{пор}) = 2$ мВ, СКО стехиометрического состава Hg_{1-x}Cd_xTe-подложки $\sigma(x) = 0,03\%$. Среднее значение стехиометрического состава $x = 0,2126$, $T = 77$ К

Сравнивая гистограммы, приведенные на рис. 6 и 7, видно, что улучшение однородности пороговых напряжений и стехиометрического состава подложки позволяет значительно улучшить NETD тепловизионных систем. Так, расчеты показывают, что повышение однородности пороговых напря-

жений и стехиометрического состава подложки обеспечивает снижение диапазона разброса токов I_{Bx} до $(7,3—9,86) \cdot 10^{-8}$ А (на рис. 6, а диапазон разброса токов I_{Bx} составляет $0,4—16 \cdot 10^{-8}$ А). При этом снижаются требования к динамическому диапазону канала считывания, и, следовательно, появляется возможность увеличить время накопления (для многоэлементных ИК ФПУ время накопления определяется зарядовой емкостью устройства считывания и величиной максимального тока I_{Bx}).

Чтобы реализовать тепловизионные системы на основе многоэлементных ИК ФПУ в спектральном диапазоне $\lambda > 13$ мкм с NETD, близким к показанным на рис. 5 (кривая 4), необходимо:

качественно улучшить электрофизические параметры Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов; так, например, требования к однородности пороговых напряжений и стехиометрического состава подложки существенно снижаются для Hg_{1-x}Cd_xTe-фотодиодов с электрофизическими параметрами, указанными в варианте 2 табл. 2;

обеспечить более жесткие требования к однородности пороговых напряжений под входным затвором устройств считывания и стехиометрического состава подложки.

Однако более жесткие, чем принятые при расчетах на рис. 7, требования к $\sigma(V_{пор})$, $\sigma(x)$ выходят за достигнутый в настоящее время по этим параметрам технологический уровень как кремниевой КМОП-технологии, так и технологии синтеза эпитаксиальных слоев Hg_{1-x}Cd_xTe [1, 22, 23].

Как показывают проведенные расчеты, реализовать тепловизионные системы в спектральном диапазоне до 14 мкм с NETD, близким к температурному разрешению, ограниченным лишь зарядовой емкостью устройств считывания и с приемлемым уровнем геометрических шумов, можно охлаждением гибридного модуля до температуры ~ 60 К.

Возможность варьирования температуры охлаждения гибридного модуля позволяет проводить анализ временного дрейфа параметров ИК ФПУ в зависимости от стабильности поддержания температуры охлаждаемого гибридного модуля и, соответственно, формулировать требования к криостату и системе охлаждения.

Необходимо отметить, что в данной работе численные значения параметров коэффициентов α_1 , α_2 , $\alpha_{ФД}$, K взяты из литературных источников [14, 15] и могут существенно отличаться от подгонных коэффициентов, измеренных на конкретных фотоприемниках, а также кремниевых кристаллах с устройствами считывания. Более реальные значения численных коэффициентов либо уточненные модели шумов фотодиодов легко могут быть встроены в разработанную программу

расчета, что позволит повысить точность прогнозирования параметров ИК ФПУ.

Выводы

Представлены математическая модель, программа и методика анализа системы фотодиод—ПИ-устройство считывания. При расчетах можно пользоваться различными представлениями ВАХ фотодиодов, как "классической моделью" или моделью, описывающей реальные ВАХ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -фотодиодов, так и экспериментальными ВАХ фотодиодов. Показано, что предложенная модель и методика анализа системы дают возможность выявить основные факторы, лимитирующие характеристики многоэлементных ИК ФПУ (D^* , уровень "геометрического" шума), рассчитать и оптимизировать параметры тепловизионных систем (NETD), проводить полномасштабное численное моделирование и формулировать требования к конструктивным и электрофизическим параметрам устройств считывания, а также непосредственно к ИК-фотодиодам, чтобы обеспечить достижение проектных характеристик тепловизионных систем.

Литература

1. Рогольский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. Felix P., Moulin M., Munier B., Portmann J. // IEEE Transaction on Electron Devices. 1980. V. ED-27. No. 1. P. 175.

3. Longo J. T., Cheung D. T., Andrews A. M. et al. // IEEE J. Solid State Circuits. 1978. V. SC-13. No. 1. P. 139.
4. Кунакбаева Г. П., Лу И. И., Черепов Е. И. // Радиотехника и электроника. 1993. № 5. С. 922.
5. Кунакбаева Г. П., Лу И. И. // Автометрия. 1996. № 5. С. 21.
6. Anderson W. W. // Infrared Physics. 1981. V. 20. P. 353.
7. Anderson W. W., Hoffman H. J. // J. Appl. Physics. 1982. V. 53. No. 12. P. 9130.
8. Gumenjuk-Sichevska J. V., Sizov F. F. // Semicond. Sci. Technol. 1999. V. 14. P. 1124.
9. Sizov F., Lysiuk I., Gumenjuk-Sichevska J. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2006. V. 21. P. 356.
10. Yoshino J., Morimoto J., Wada H., Ajisawa A., Kawano M., Oda N. // Opto-Electronics Review. 1999. V. 7. P. 361.
11. Krishnamurthy S., Berding M. A., Robinson H., Sher A. // Journal of Electronic Materials. 2006. V. 35(6). P. 1399.
12. Overstraeten R., Declerck G., Muls P. // IEEE Trans. Electron Devices. 1975. V. ED-22. P. 282.
13. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. — М.: Мир, 1986.
14. Chow K., Roud J., Blackwell J. // IEEE Trans. Electron Devices. 1982. V. ED-29. P. 3.
15. Reimbold G. // IEEE Trans. Electron Devices. 1984. V. ED-31. P. 1190.
16. Карнаушенко Д. Д., Лу И. И., Половинкин В. Г. // Оптический журнал. 2010. № 9. С. 30.
17. Woolaway J. // Photonics Spectra. 1991. February. P. 113.
18. Таубкин И. И., Трищенко М. А. // Оптический журнал. 1993. № 5. С. 20.
19. Лу И. И. // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 2. С. 131.
20. Lee I. I. // Infrared Physics @ Technology. 2010. V. 53. No. 2. P. 140.
21. Pistone F., Tribolet P., Vuillermet M. // Opto-Electronics Review. 2006. V. 14(2). P. 109.
22. Rogalski A. // Ibid. 2008. V. 16(4). P. 458.
23. Phillips J. D., Edwall D. D., Lee D. L. // Journal of Electronic Materials. 2002. V. 31. No. 7. P. 664.

Infrared focal plane arrays based on systems of photodiode—direct injection readout circuits

D. D. Karnaushenko, I. I. Lee, V. G. Polovinkin
Institute of Semiconductor Physics. SB RAS
13 Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: Irlamlee@isp.nsc.ru

Zh. V. Gumenjuk-Sichevskaya
Institute of Semiconductor Physics. NAS Ukraine
41 Nauka av., Kiev, 03028, Ukraine
E-mail: gumenjuk@isp.kiev.ua

A mathematical model for multi-element IR FRA based on the system 'photodiode-direct injection readout circuits' is reported. With the model, an analysis of IR FRA can be performed with current-voltage characteristics of the photodiodes set either in analytical form or as an approximation of experimental current-voltage curves. The model enables identification of factors that limit the performance characteristics of multi-element IR FPA, and IR thermography systems designed around such IR FPA, versus electrical and design parameters of the photodiodes, readout circuits, and background environment.

PACS: 85.60.-q

Keywords: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, photodiode, multi-element photodetector, direct injection readout circuit, thermal imaging system.

Bibliography — 23 references.

Received March 5, 2012

* * *