

УДК 621.283.3/4

## Метод расчета параметров ИК матричного фотоприемного устройства

А. И. Патрашин

*Разработан метод расчета фотоэлектрических параметров ИК матричного фотоприемного устройства (МФПУ) на основе фотодиодов, работающих в режиме накопления, с использованием характеристик, экспериментально измеряемых на фоточувствительных сборках МФЧЭ—мультиплексор. В качестве исходных характеристик фоточувствительных элементов (ФЧЭ) использованы размеры  $a_x, b_y$ , темновой ток  $I_d$ , накопительная емкость  $C_{ac}$ , квантовая эффективность  $\eta$ , спектральный диапазон чувствительности  $\lambda_1, \lambda_2$ , напряжение перезарядки емкости накопления  $E_0$ . Выведены аналитические выражения для расчета максимального времени накопления  $\tau_{max}$ , токовой чувствительности  $S_b$ , ограниченной шумом облученности (NEI) и мощности (NEP), удельной обнаружительной способности  $D^*$ , динамического диапазона и ограниченной шумом разности температур (NETD). Из выведенных аналитических выражений можно строить зависимости указанных параметров от измеряемых характеристик и температуры внешней среды.*

PACS: 07.57.Kp

Ключевые слова: фотодиод, мультиплексор, спектральный диапазон, разность температур.

### Введение

При разработке и изготовлении многоэлементных ИК-фотоприемников, работающих в режиме накопления, на разных этапах технологического процесса возникает необходимость промежуточного контроля параметров матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ), мультиплексоров и сборок МФЧЭ—мультиплексор. На этих этапах могут проводиться измерения величины фоточувствительной площадки элементов матриц, спектрального диапазона чувствительности, темнового тока, квантовой эффективности ФЧЭ и накопительных емкостей мультиплексора.

Измеряемые характеристики дают возможность оценить степень воздействия на них технологических операций, но не позволяют прямо оценить потенциальные фотоэлектрические параметры МФПУ на основе изготавливаемых сборок МФЧЭ—мультиплексор. Это максимальное время накопления, пороговые облученность (NEI) и мощность

(NEP), удельная обнаружительная способность  $D^*$ , токовая чувствительность  $S_b$ , динамический диапазон и пороговая разность температур (NETD).

В данной работе предлагается метод, позволяющий рассчитать эти параметры матричного ИК-фотоприемника, используя вышеуказанные характеристики, а также построить всевозможные зависимости фотоэлектрических параметров от измеряемых характеристик и температуры внешней среды.

### Исходные данные

Пусть заданы характеристики изготовленных или приобретенных образцов МФЧЭ, скоммутированных с мультиплексором.

Размер фоточувствительной площадки ФЧЭ, см .....	$a_x; b_y$
Площадь ФЧЭ, см <sup>2</sup> .....	$A_s = a_x \cdot b_y$
Формат матрицы .....	$N \cdot M$
Средний темновой ток ФЧ- матрицы, А .....	$I_d$
Накопительная емкость в ячейке мультиплексора, Ф .....	$C_{ac}$
Напряжение заряда емкостей накопления, В .....	$E_0$
Коэффициент максимального разряда емкости .....	$k_{dis}$
Коротковолновая граница фоточувствительности ФЧЭ, мкм .....	$\lambda_1$
Длинноволновая граница фоточувствительности ФЧЭ, мкм .....	$\lambda_2$
Квантовая эффективность ФЧЭ .....	$\eta(\lambda)$
Температура фона, К .....	$T$

Вместо темнового тока  $I_d$  может быть задана величина  $\Omega = R_0 \cdot A_s$ , в которой  $R_0$  является диффе-

Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник.

ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. (495) 374-48-71.

E-mail: orion@orion-ir.ru; apatrashin@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2008 г.

рещиальным сопротивлением ФЧЭ. Связь между ними известна [1, 2]. (В последующих расчетах мы будем использовать  $I_d$ .)

Предполагается, что фоновое ИК-излучение попадает на МФЧЭ сквозь охлаждаемую диафрагму, установленную в полости МФПУ на расстоянии  $l$  от плоскости МФЧЭ и имеющую коэффициент пропускания  $K_{tr}$ , определяемый следующим выражением [3]:

$$K_{tr}(x, y, l) = \frac{1}{\pi} \times \int_0^{2\pi} \int_0^{r(\phi, l)} \frac{\rho \cdot l^2}{\left[ l^2 + (\rho \cdot \cos \phi - x)^2 + (\rho \cdot \sin \phi - y)^2 \right]^2} d\rho \cdot d\phi, \quad (1)$$

где  $\phi$  — угол в полярной системе координат в плоскости диафрагмы;

$r(\phi, l)$  — радиус-вектор из центра диафрагмы к ее краю;

$x, y$  — координаты точки в плоскости МФЧЭ.

Коэффициент пропускания является безразмерной величиной.

Фоточувствительные элементы преобразуют кванты излучения в носители заряда и в течение заданного времени  $\tau_0$  накапливают их на емкостях  $C_{ac}$ , расположенных в мультиплексоре. Затем происходят считывание величины снижения потенциала накопительных емкостей каждого ФЧЭ и перезарядка этих емкостей до напряжения  $E_0$ .

Уровень фоновой облученности определяется законом Планка [1, 2], согласно которому интегральная плотность мощности фонового излучения ( $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) при температуре фона  $T$  в спектральном диапазоне  $\lambda_2 - \lambda_1$  и в телесном угле  $2\pi$  стерадиан равна

$$P(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda,$$

а интегральная плотность фонового потока квантов ( $\text{квант} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) при тех же температуре фона, спектральном диапазоне и телесном угле равна

$$N(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \cdot \left[ \exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (2)$$

где  $c = 2,998 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  — скорость света;

$k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-1}$  — постоянная Больцмана;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Вт} \cdot \text{с}^2$  — постоянная Планка.

Тогда фоновая облученность МФЧЭ ( $\text{квант} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) будет выражаться следующей формулой:

$$W_{bgn} = K_{tr} \cdot N(T, \lambda_1, \lambda_2), \quad (3)$$

где  $K_{tr}$  и  $N(T, \lambda_1, \lambda_2)$  определяются выражениями (1) и (2), соответственно.

В дальнейших вычислениях нам понадобится квантовая эффективность ФЧЭ, которая в общем случае зависит от длины волны падающего излучения. В последующих выражениях для простоты используется средняя квантовая эффективность ФЧЭ  $\eta$  в диапазоне спектральной чувствительности от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , которая рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$\eta = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c \eta(\lambda)}{\lambda^4 \cdot \left[ \exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \cdot \left[ \exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda}, \quad (4)$$

где  $\eta(\lambda)$  — квантовая эффективность (электрон-квант<sup>-1</sup>), измеренная в диапазоне  $\lambda_2 - \lambda_1$ .

Далее будем предполагать, что фоновое излучение, падающее на МФЧЭ, не содержит паразитной компоненты, ухудшающей его параметры. Это положение является отдельной задачей, одно из решений которой достаточно подробно изложено в работе [4].

Предполагаем также, что шум мультиплексора много меньше шума МФЧЭ, что вполне справедливо для нынешнего уровня развития микроэлектроники.

### Расчет необходимых характеристик

При облучении ФЧЭ генерируют фототок

$$I_f = K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) \eta A_s q, \quad (5)$$

где  $A_s$  — площадь ФЧЭ;

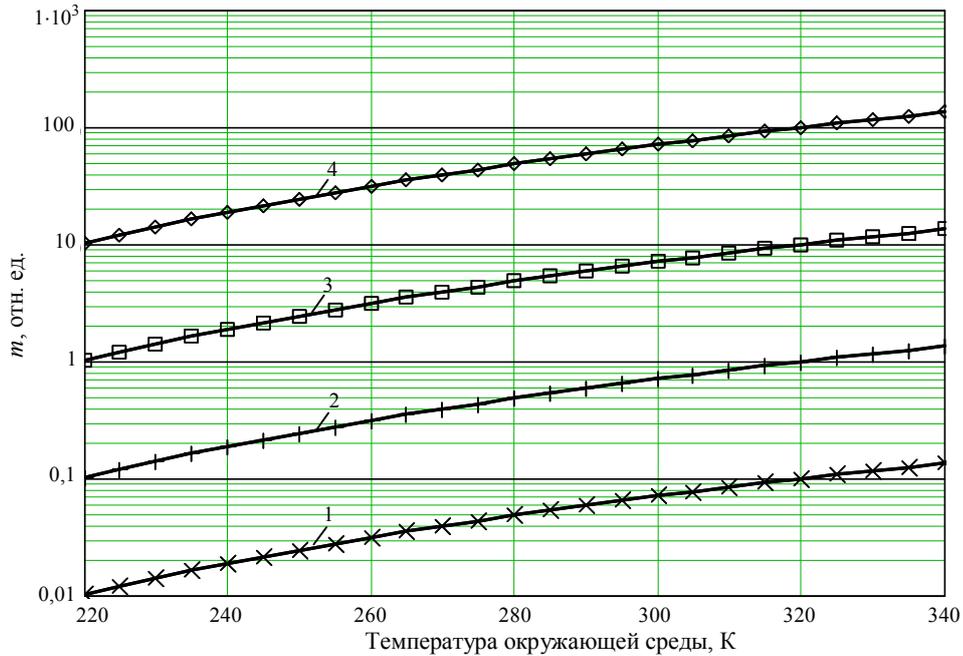
$q$  — заряд электрона ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К}$ ).

Зная фототок и темновой ток, можно определить режим работы МФПУ, оценивая следующий безразмерный параметр:

$$m = \frac{K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) \eta A_s q}{I_d}. \quad (6)$$

При  $m \geq 10$  МФПУ работает в режиме ограничения шумом фонового излучения, при  $m \leq 0,1$  — в режиме ограничения шумом темнового тока, при  $0,1 < m < 10$  — в смешанном режиме.

На рисунке показаны рассчитанные кривые зависимости  $m$  от окружающей температуры фона для МФЧЭ с размером чувствительных элементов  $20 \times 20 \text{ мкм}$ , в спектральном диапазоне от  $7,6$  до  $10,3 \text{ мкм}$ ,  $\eta = 0,6$  и  $K_{tr} = 5 \cdot 10^{-2}$ .



Зависимости отношения фототока к темновому току  $m$  от температуры окружающей среды при различных значениях темнового тока  $I_d$ :  
 1 —  $10E-7A$ ; 2  $10E-8A$ ; 3 —  $10E-9A$ ; 4 —  $10E-10A$

При обратном токе ФЧЭ выше  $10^{-7}$  А МФПУ будет работать в режиме ограничения шумом темнового тока, при значениях от  $10^{-8}$  до  $10^{-9}$  А — в смешанном режиме, при значениях не более  $10^{-10}$  — в режиме ограничения шумом фонового излучения.

В каждой ячейке МФПУ носители темнового тока ФЧЭ и носители, генерированные фототоком, накапливаются на емкости  $C_{ac}$ . Величина зарядовой емкости накопительного элемента  $C_{ac}$  ячейки мультиплексора МФПУ в электронах равна

$$Q_{full} = \frac{C_{ac} E_0}{q}$$

Из этой формулы можно рассчитать максимально возможное время накопления

$$\tau_{max} = \frac{k_{dis} Q_{full}}{I_{full}} = \frac{k_{dis} C_{ac} E_0}{K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) \eta A_s q + I_d} \quad (7)$$

где  $I_{full}$  — полный ток разряда накопительной емкости ячейки МФПУ в электронах, равный сумме темнового тока  $I_d$  и фототока ФЧЭ  $I_f$ , определяемого выражением (5);

$k_{dis}$  — коэффициент, показывающий относительную величину емкости накопительного элемента, которую можно разрядить за время накопления  $\tau_{max}$  ( $k_{dis} \cong 0,5-0,7$ ).

В реальности время накопления  $\tau_0$ , как правило, задается в технических требованиях к МФПУ и не должно превышать  $\tau_{max}$ .

За времена накопления  $\tau_0$  и  $\tau_{max}$  накопительные емкости каждой ячейки мультиплексора МФПУ в среднем накопят следующее количество электронов:

$$Q_0 = \frac{K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) \eta A_s q \tau_0 + I_d \tau_0}{q};$$

$$Q_{max} = \frac{k_{dis} F_c E}{q}$$

Учитывая независимость процессов генерации темновых и фотоносителей в ФЧЭ и пренебрегая шумом мультиплексора, получим следующие выражения для полного шума ячейки МФПУ в электронах по истечению времени накопления  $\tau_0$  и  $\tau_{max}$ :

$$N_0 = \sqrt{\left[ K_{tr} \eta A_s N(T, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{I_d}{q} \right] \tau_0}; \quad (8)$$

$$N_{max} = \sqrt{\frac{k_{dis} C_{ac} E_0}{q}} \quad (9)$$

Теперь можно рассчитать основные параметры ФЧЭ.

### Расчет фотоэлектрических параметров

• **Пороговая облученность** (Noise Equivalent Irradiance (NEI)) — величина сигнальной облученности, при которой отношение сигнал/шум равно единице ( $\text{квант} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Чем меньше ее величина, тем лучше фотоприемник.

Шум ячейки МФПУ для времен накопления  $\tau_0$  и  $\tau_{max}$  определяется выражениями (8) и (9). Сиг-

налом ячейки МФПУ является накопленное количество носителей от NEI, которая для  $\tau_0$  и  $\tau_{\max}$  будет определяться следующими выражениями:

$$NEI_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_0 \eta A_s}} \cdot \sqrt{\left( K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{I_d}{q \eta A_s} \right)}, \quad (10)$$

$$NEI_{\min} = \sqrt{\frac{q}{k_{dis} C_{ac} E_0}} \cdot \left( K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{I_d}{q \eta A_s} \right). \quad (11)$$

• **Пороговая мощность** (Noise Equivalent Power (NEP)) — мощность сигнального излучения, падающего на ФЧЭ, при которой отношение сигнал/шум равно единице [1] (Вт·элемент<sup>-1</sup>). Чем меньше NEP, тем лучше приемник.

Ее легко рассчитать из условия, что величина отношения  $\frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}$  равна отношению

$$\frac{NEP}{A_s \cdot NEI} \text{ (Вт·элемент}^{-1}\text{)}. \text{ Заметим, что величина}$$

$$\frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}$$

равна средней энергии кванта с длиной волны  $\lambda_0 \in [\lambda_1; \lambda_2]$ , тогда выражение для NEP с учетом (10) и (11) будет иметь следующий вид:

$$NEP_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_0 \eta}} \times \quad (12)$$

$$\times \sqrt{\left( K_{tr} A_s N(T, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{I_d}{q \eta} \right) \frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}};$$

$$NEP_{\min} = A_s \cdot \sqrt{\frac{q}{k_{dis} C_{ac} E_0}} \times \quad (13)$$

$$\times \left( K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{I_d}{q \eta A_s} \right) \frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}.$$

• **Удельная обнаружительная способность** (Specific detectivity) — величина, обратная NEP, нормированная на единичную площадку и на единичную рабочую частоту [1] (см·Вт<sup>-1</sup>·с<sup>-1/2</sup>).

Она определяется следующим классическим выражением:

$$D^* = \frac{1}{NEP} \cdot \sqrt{\frac{A_s}{2 \tau_0}}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) выражения (7), (12) и (13), получим единое выражение для  $D^*$ , не зависящее от времени накопления:

$$D_0^* = \frac{\eta}{\sqrt{\left( K_{tr} q \eta A_s N(T, \lambda_1, \lambda_2) + I_d \right) / q}} \times \quad (15)$$

$$\times \sqrt{\frac{A_s}{2}} \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}.$$

• **Токовая чувствительность** (Current Sensitivity) — величина сигнального фототока, отнесенная к световой мощности сигнала в полосе чувствительности ФЧЭ [1]

$$S_i = \frac{I_f}{W_p}.$$

Величина сигнального фототока при облучении, равной NEI, определяется с помощью выражений (10), (11).

$$I_f = NEI q \eta A_s.$$

Величина световой мощности сигнального излучения при этом равна NEP и определяется выражениями (12) и (13).

В результате выражение для токовой чувствительности будет иметь классический вид, также не зависящий от величины времени накопления, т. е.

$$S_i = \eta q A_s \cdot \frac{NEI}{NEP} = \eta q \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)} = \eta q \cdot \frac{\lambda_{mid}}{hc}.$$

• **Динамический диапазон ФЧЭ** оценим как отношение максимальной величины сигнала ФЧЭ к его минимальной величине (дБ)

$$Din = 20 \cdot \lg \left( \frac{Q_{L_{\max}}}{Q_{L_{\min}}} \right). \quad (16)$$

Здесь предполагается, что уход от линейной зависимости выходного сигнала от входного не превышает 20 % [5].

Максимальная величина сигнала фактически равна разряжаемой части емкости накопительной ячейки в электронах

$$Q_{L_{\max}} = \frac{k_{dis} C_{ac} E_0}{q}. \quad (17)$$

В этом случае ФЧЭ будет работать в режиме ограничения сигнальным излучением.

Минимальная величина сигнала генерируется NEI и равна:

для времени накопления  $\tau_0$

$$Q_{L_{\min 0}} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\left( K_{tr} N(T, \lambda_1, \lambda_2) \eta A_s + \frac{I_d}{q} \right) \tau_0}; \quad (18)$$

для времени накопления  $\tau_{\max}$

$$Q_{L_{\min 1}} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{k_{dis} C_{ac} E_0}{q}}. \quad (19)$$

Используя формулы (16)—(19), мы получим выражения, описывающие величину динамического диапазона для двух значений времени накопления:

$$Din_0 = 20 \cdot \lg \left( \frac{k_{dis} C_{ac} E_0}{q \sqrt{\left( K_{tr} \eta A_s N(T, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{I_d}{q} \right) \tau_0}} \right); \quad (20)$$

$$Din_{max} = 20 \cdot \lg \left( \sqrt{\frac{k_{dis} C_{ac} E_0}{q}} \right). \quad (21)$$

• **Пороговая разность температур (NETD)** — наименьшая разность температур протяженного теплового тест-объекта и фона, при которой отношение сигнал/шум равно единице [6].

Для расчета величины  $\delta T$  приравниваем прирост облученности ФЧЭ, обусловленный приращением температуры фона  $\Delta N(\delta T)$ , к облученности, ограниченной шумом (NEI). Получим следующее соотношение:

$$[N(T + \delta T, \lambda_1, \lambda_2) - N(T, \lambda_1, \lambda_2)] \cdot K_r = NEI. \quad (22)$$

Преобразуя равенство (22), получим для двух значений времени накопления следующие выражения:

$$\delta T_0 = \left( \frac{k_B T^2}{ch} \right) \times \frac{1}{\frac{K_r \eta A_s \sqrt{\tau_0}}{\sqrt{\left( K_r N(T, \lambda_1, \lambda_2) \eta A_s + \frac{I_d}{q} \right)} Z(T, \lambda_1, \lambda_2)}}; \quad (23)$$

$$\delta T = \left( \frac{k_B T^2}{ch} \right) \sqrt{\frac{q}{k_{dis} C_{ac} E_0}} \times \frac{1}{\frac{K_r \eta A_s q}{\left( K_r N(T, \lambda_1, \lambda_2) \eta A_s q + I_d \right)} Z(T, \lambda_1, \lambda_2)}, \quad (24)$$

где  $Z(T, \lambda_1, \lambda_2)$  определяется формулой

$$Z(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^5} \frac{\exp\left(\frac{ch}{k_B T \lambda}\right)}{\left[ \exp\left(\frac{ch}{k_B T \lambda}\right) - 1 \right]} d\lambda.$$

Полученные выражения позволяют легко рассчитать усредненные фотоэлектрические параметры ФЧЭ, МФПУ.

Перепишем выражения (10)—(13), (15), (20), (23), (24), используя выражение (6), и получим:

$$\begin{aligned} NEI_0 &= \frac{1}{\eta A_s \sqrt{\tau_0}} \sqrt{\frac{I_d(m+1)}{q}}; \\ NEI_{min} &= \sqrt{\frac{q}{k_{dis} C_{ac} E_0} \frac{I_d(m+1)}{q \eta A_s}}; \\ NEP_0 &= \frac{1}{\eta \sqrt{\tau_0}} \sqrt{\frac{I_d(m+1)}{q} \frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}}; \\ NEP_{min} &= \sqrt{\frac{q}{k_{dis} C_{ac} E_0} \frac{I_d(m+1)}{q \eta} \frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}}; \\ D_{max}^* &= \frac{\eta}{\sqrt{I_d(m+1)}} \sqrt{\frac{q A_s}{2} \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}}; \end{aligned}$$

$$Din_0 = 20 \cdot \lg \left( \frac{\eta k_{dis} C_{ac} E_0}{\sqrt{q \tau_0} \sqrt{I_d(m+1)}} \right);$$

$$\delta T_0 = \left( \frac{k_B T^2}{ch} \right) \sqrt{\frac{q}{\tau_0}} \sqrt{\frac{(m+1)}{m^2 I_d}} \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{Z(T, \lambda_1, \lambda_2)};$$

$$\delta T_{min} = \left( \frac{k_B T^2}{ch} \right) \sqrt{\frac{q}{k_{dis} C_{ac} E_0}} \frac{(m+1)}{m} \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{Z(T, \lambda_1, \lambda_2)}.$$

Полученные выражения, как и литературные данные, показывают, что для заданных  $K_r$ ,  $A_s$ ,  $C_{ac}$  и известных  $\eta$  и  $m$  такие фотоэлектрические параметры, как NEI, NEP,  $D^*$ ,  $Din_0$  и  $\delta T_0$ , фактически определяются величиной темнового тока ФЧЭ. Для получения малого значения  $\delta T_{min}$  необходима как можно более высокая величина зарядовой емкости накопительного элемента в каждой ячейке МФПУ. Поэтому получение низких значений  $I_d$  должно являться главной целью технологии изготовления МФЧЭ, а больших накопительных емкостей — главной задачей технологии изготовления мультиплексоров.

Зная времена накопления, можно оценить и минимальную рабочую частоту мультиплексора для анализа его возможной архитектуры в части числа выходов.

Пусть формат МФПУ составляет  $N_x \cdot M_y$  элементов, тогда необходимая минимальная рабочая частота мультиплексора (Гц) будет определяться выражением

$$F_{min} = \left( \frac{N_x \cdot M_y}{2\tau} \right),$$

где  $N_x$  — число столбцов МФЧЭ;

$M_y$  — число строк МФЧЭ;

$\tau$  — время накопления (максимальное или заданное), с.

Если эта частота превышает рабочую частоту АЦП, преобразующих аналоговые сигналы в цифровые, то необходимо проектировать мультиплексор таким образом, чтобы он опрашивал одновременно  $n$  накопительных ячеек, при этом число  $n$  должно быть целым и удовлетворять следующему неравенству:

$$n \geq \frac{F_{min}}{F_0},$$

где  $F_0$  — рабочая частота АЦП, Гц.

Число выходов у такого МФПУ также будет равно  $n$ .

Например, пусть формат МФПУ составляет  $512 \times 640$  элементов, а время накопления, определяемое фототоком и темновым током,  $\tau_{max} = 300$  мкс. Тогда при одном выходе из МФПУ  $F_{min} = 547$  МГц, а при четырех —  $F_{min} = 137$  МГц, если же  $\tau_{max} = 3$  мс, то при одном выходе из МФПУ  $F_{min} = 55$  МГц, а при четырех —  $F_{min} = 12$  МГц.

АЦП, используемые во внешней схеме для оцифровки выходного сигнала, во втором случае будут надежней и дешевле, так как их рабочая частота существенно ниже. Мощность, потребляемая мультиплексором во втором случае, как и цена, будет также ниже, а надежность — выше.

Таким образом, получение МФЧЭ с низкими обратными токами позволяет максимально увеличить время накопления МФПУ. Это дает возможность повысить надежность за счет снижения тактовой частоты его работы.

Можно также показать, что все параметры многорядных приемников, работающих в режиме ВЗН по  $M$  элементам, будут в  $\sqrt{M}$  раз лучше, чем у одиночного приемника.

### Заключение

Представлен метод расчета фотоэлектрических параметров ИК МФПУ на основе фотодиодных матриц, работающих в режиме накопления.

Метод дает возможность рассчитать все фотоэлектрические параметры, используя стандартные экспериментальные характеристики.

Представлены конечные выражения, позволяющие также рассчитать все фотоэлектрические параметры ИК МФПУ.

Показано, что характеристиками, определяющими параметры, являются темновые токи ФЧЭ,

зарядовые емкости накопительных ячеек МФЧЭ, квантовая эффективность ФЧЭ, заданные времена накопления и краевые длины волн спектра фоточувствительности.

Основной задачей технологии получения МФЧЭ является снижение темновых токов ФЧЭ, а основной задачей технологии получения МОП-мультиплексоров — получение высоких значений накопительных емкостей. Уменьшение темновых токов ФЧЭ позволяет повысить надежность МФПУ и снизить их энергопотребление.

### Литература

1. Курбатов Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — М.: МФТИ, 1999.
2. Dereniak E. L., Borman G. D. Infrared Detectors and Systems. — N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
3. Патрашин А. И. Метод расчета фоновой облученности МФПУ с холодной диафрагмой произвольной формы: Тез. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ФГУП «НПО "Орион"», А02, 2008.
4. Патрашин А. И. ИК МФПУ с оптимальной диафрагмой: Там же. У51, 2008.
5. ГОСТ 17772. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, 1988. С. 32.
6. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — г. Новосибирск: Наука, 2003.

## Calculation technique of IR array photoelectric parameters

A. I. Patrashin

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

*The method of calculation of photoelectric parameters of IR array working in accumulation mode is developed using experimental characteristics. Such experimental characteristics as pixel size, pixel dark current  $I_d$ , integration capacity  $C_{ac}$ , pixel quantum efficiency  $\eta$ , spectral band of sensitivity  $\lambda_1, \lambda_2$  and recharging voltage of integration capacity are used. Analytical expressions for calculation of optimal integration time, current sensitivity  $S$ , noise equivalent irradiance (NEI), noise equivalent power (NEP), specific detectivity  $D^*$ , noise equivalent temperature difference (NETD) were derived.*

PACS: 07.57.Kp

*Keywords:* photodiode, multiplexer, spectral range, differential temperature.

Bibliography — 6 references.

Received 12 December 2008

\* \* \*