

УДК.621.383.4/5

Аналитическая модель для расчета параметров матричных фотоприемных устройств

А.И. Патрашин, И.Д. Бурлаков, М.Д. Корнеева, В.В. Шабаров

Разработана теория, позволяющая достаточно точно прогнозировать полный набор характеристик (сигналы, шумы фотозлектрические параметры) по всем элементам разрабатываемого матричного фотоприемного устройства (МФПУ) на основе фотодиодной матрицы и осуществить оптимизацию параметров устройства. Теория основана на новом подходе к определению облученности МФПУ, обеспечивающем ее расчет для любой формы диафрагмы в светоизолирующем экране. Рассмотрена работа как «смотрящих», так и «сканирующих» МФПУ, работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Теория проверена на МФПУ формата 320x256. Сравнивались расчетные данные по зависимостям сигналов и шумов фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с экспериментально полученными значениями при разных временах накопления и температурах фонового облучения. Получено полное совпадение теоретических и экспериментальных данных, подтверждающее справедливость модели. Теория, несомненно, будет полезна для разработчиков и производителей МФПУ, а также и для их потребителей. Модель может быть легко распространена и на системы, использующие матричные МФПУ.

PACS: 42.79. Ag, 72.20. Jv, 07.57. Kp, 61.80. Va

Ключевые слова: МФПУ, сигнал, шум, температура фона, время накопления, фотозлектрические параметры.

Введение

Вопросы прогнозирования параметров матричных устройств (МФПУ) всегда интересовали разработчиков, которые уделяли им достаточно внимания. В настоящее время известны несколько таких опубликованных работ [1–3]. Однако все эти теории рассматривали параметры систем, включающих МФПУ, и рассчитывали, как правило, дальности и вероятности обнаружения целей для оценки возможностей разрабатываемого устройства в конкретном применении.

В данной работе рассматривается теоретическая модель МФПУ на основе фотодиодов, позволяющая полностью прогнозировать их сигналы, шумы и все фотозлектрические параметры при работе в смотрящем режиме и в режиме ВЗН. Модель основана на новом подходе к определению облученности, позволяющем разработчикам и изготовителям МФПУ осуществлять корректное обоснование параметров устройства без учета влияния оптической системы, которая может и ухудшать эти параметры. Данный подход позволяет разработчикам корректно предсказать параметры каждого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) матрицы и определять необходимые меры для оптимизации конструкции МФПУ.

Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник¹.
Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора¹, профессор².
Корнеева Марина Дамировна, зам. генерального директора¹, профессор².
Шабаров Владимир Вениаминович, начальник управления¹.

¹ ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru; apatrashin@gmail.com

² Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

³ Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 12 января 2014 г.

© Патрашин А.И., Бурлаков И.Д., Корнеева М.Д., Шабаров В.В., 2014

Модель позволяет анализировать все МФПУ, предназначенные для работы в режиме накопления во всем спектре оптических частот, а именно, от ультрафиолетовой (УФ) до инфракрасной (ИК) части спектра. В таких устройствах излучение одного элемента изображения преобразуется в фототок одного ФЧЭ (фотодиода), разряжающий соответствующую ему накопительную емкость в ячейке мультиплексора в течение заданного времени накопления. В результате на емкости накапливается заряд, который преобразуется в вольтовый сигнал, а затем в цифровой сигнал, пропорциональный этому заряду, или количеству накопленных носителей, или квантовой облученности ФЧЭ и т.д.

Предлагаемая теория позволит разработчикам прогнозировать характеристики разрабатываемых устройств, а изготовителям, в свою очередь, поможет анализировать полученные экспериментальные данные и понять, на каких этапах производства возникли отклонения от нормы.

Параметры, характеризующие МФПУ

Различают два типа МФПУ – смотрящие и сканирующие. Ссмотрящие МФПУ – это устройства, в которых изображение полностью и одновременно попадает на все ФЧЭ так, что одному ФЧЭ соответствует один элемент изображения.

Сканирующие МФПУ – устройства, в которых на каждый ФЧЭ столбца поочередно попадают все элементы столбца изображения, а сигналы, генерированные одним элементом изображения, суммируются по всем ФЧЭ, по которым он прошел.

Рассмотрим перечень параметров МФПУ, приведенный в таблице. Эти параметры можно разделить на три группы.

Первая группа – конструктивные параметры. Это параметры, изменение которых невозможно после изготовления МФПУ.

Вторая группа – эксплуатационные параметры, которые мы можем изменять или которые могут изменяться без нашего участия в процессе работы МФПУ.

Третья группа – выходные параметры МФПУ, характеризующие их качество и зависящие от параметров составляющих первую и вторую группу.

Таблица

ТИПЫ ПАРАМЕТРОВ МФПУ

Конструктивные параметры	Эксплуатационные параметры	Выходные параметры
Формат и площадь МФЧЭ; $M \cdot N$; $a \cdot b$; см^2	Температура фонового излучения (АЧТ); T_1 , К	Сигнал; N_c ; электроны; U_c ; В
Шаг и площадь ФЧЭ; a_x ; a_y ; см ; A_s ; см^2	Степень серости фонового излучения (АЧТ); ϵ_1	Шум; $N_{ш}$; электроны; U_c ; В
Форма, размеры и расстояние холодной диафрагмы от МФЧЭ; r_0 ; l_1 ; l_2 ; l ; см	Температура входного окна МФПУ; T_2 , К	Отношение сигнал/шум; SNR
Коэффициент пропускания диафрагмы; K_d	Температура светоизолирующего экрана; T_3 ; К	Пороговая облученность; $L_{п}$; фотон· $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Степень серости светоизолирующего экрана; ϵ_3	Температура, светофильтра; T_4 ; К	Пороговая мощность; $P_{п}$; Вт
Коэффициент пропускания и степень серости входного окна; $K_{во}$	Облученность ФЧЭ; E_w ; $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; L_{ph} ; фотон· $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Удельная обнаружительная способность; D^* ; $\text{см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{с}^{-1/2}$
Коэффициент пропускания и степень серости светофильтра; $K_{ф}$	Однородность облученности МФЧЭ; ΔE_w ; %	Токовая чувствительность; S_i ; А·Вт $^{-1}$
Границы пропускания светофильтра; λ_1 ; λ_2 ; мкм	Время накопления МФПУ; τ_0 ; с	Пороговая разность температур; NETD; К
Квантовая эффективность ФЧЭ; η	Напряжение зарядки емкости накопления; E_0 ; В	Вольтовая чувствительность; S_u ; В·Вт $^{-1}$
Величина емкости накопления в ячейке; $C_{п}$; пФ	Темновой ток ФЧЭ; I_d ; А	Температурная чувствительность; S_T ; В·град $^{-1}$
Шум мультиплексора; N_M ; электронов; U_M ; В		Динамический диапазон; DR; дБ

Оптическая схема МФПУ

Оптическая схема, используемая для измерения и расчета фотоэлектрических параметров приемника, показана на рис. 1. В указанной схеме любой ФЧЭ видит сквозь диафрагму в светоизолирующем экране только плоскость с постоянной температурой T_1 , обеспечивающую засветку

МФЧЭ [4]. Как было показано в работах [5, 6], такая схема оптимальна для получения максимальных фотоэлектрических параметров, наиболее однородных по площади МФЧЭ. В такой схеме МФПУ получают минимум паразитной облученности, что улучшает пороговые характеристики приборов.

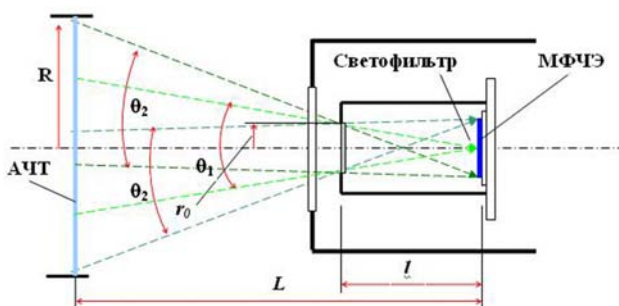


Рис. 1. Оптическая схема МФПУ.

Облученность ФЧЭ

ФЧЭ – это фотодиоды, работающие при обратном смещении. Для фотодиодов коротковолновых диапазонов величина смещения может достигать до нескольких вольт, а для ИК-фотодиодов она невелика (20–50 мВ). Под действием облучения ФЧЭ генерируют фототок $I_{ф}$, который складывается с их темновым током I_d и суммарный ток поступает на накопительную емкость. Величина фототока прямо пропорциональна суммарной фотонной облученности, падающей на ФЧЭ.

При моделировании МФПУ необходимо учитывать следующие источники облучения, показанные на рис. 2:

1. Излучение фона с температурой T_1 от -60 °С до $+60$ °С и степенью черноты ϵ_1 в диапазоне 0,9–0,96.

2. Излучение просветленного входного окна с температурой T_2 , степенью черноты ϵ_2 в диапазоне 0,03–0,1 и коэффициентом пропускания K_2 в диапазоне 0,8–0,95.

3. Излучение светоизолирующего экрана с температурой T_3 , степенью черноты ϵ_3 в диапазоне 0,9–0,96.

4. Излучение светофильтра МФПУ с температурой T_4 , степенью черноты ϵ_4 в диапазоне 0,03–0,1 и коэффициентом пропускания K_4 в диапазоне 0,75–0,95.

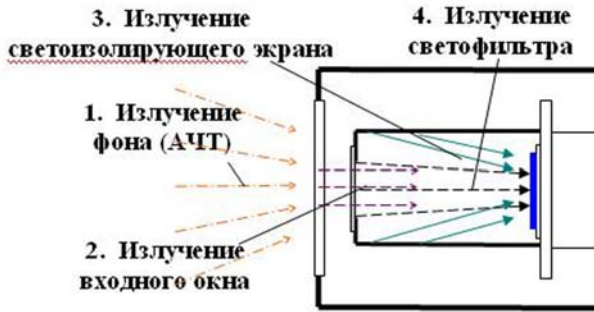


Рис. 2. Источники излучений в МФПУ.

Паразитным внешним излучением, отраженным от стенок светоизолирующего экрана и попадающим на МФЧЭ, мы пренебрегаем, т.к. существует достаточно много конструктивных решений и способов изготовления таких экранов, в которых оно практически отсутствует.

Излучение фона ослабляется атмосферой [7], входным окном, диафрагмой в светоизолирующем экране и селективируется светофильтром.

Излучение входного окна ослабляется диафрагмой в светоизолирующем экране и селективируется светофильтром.

Излучение светофильтра ограничивается диафрагмой в светоизолирующем экране.

Излучение светоизолирующего экрана ничем не ограничивается и не селективируется.

$$K_D^{ij}(l) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{\rho \cdot l^2 \cdot d\rho \cdot d\varphi}{\left[l^2 + \left(\rho \cdot \cos \varphi - i \cdot a_x - \frac{a_x}{2} - \frac{a}{2} \right)^2 + \left(\rho \cdot \sin \varphi + j \cdot b_y - \frac{b_y}{2} - \frac{b}{2} \right)^2 \right]^2} \quad (4)$$

Теперь можно определить все компоненты облученности ФЧЭ.

Облученность, создаваемая фоном (АЧТ) с температурой T_1 и коэффициентом черноты ϵ_1 [6],

$$L_1^{ij}(l) = K_2 \cdot K_4 \cdot K_D^{ij}(l) \cdot \epsilon_1 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_1}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (5)$$

где λ_1 и λ_2 , соответственно, коротковолновая и длинноволновая граница чувствительности ФЧЭ.

Облученность, создаваемая входным окном МФПУ с температурой T_2 и коэффициентом черноты ϵ_2 ,

$$L_2^{ij}(l) = K_4(\lambda) \cdot K_D^{ij}(l) \cdot \epsilon_2 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_2}\right) - 1 \right]} d\lambda. \quad (6)$$

Облученность, создаваемая светоизолирующим экраном с температурой T_3 и коэффициентом черноты ϵ_3 ,

Коэффициент пропускания атмосферы обозначим $K_A(\lambda)$. В нашем случае его величина равна единице, т.к. при измерении параметров расстояние от АЧТ до МФЧЭ мало в сравнении с характерными расстояниями для $K_A(\lambda)$.

Диафрагма в холодном экране имеет коэффициент пропускания K_D , описываемый следующим выражением [8]:

$$K_D(x, y, l) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{\rho \cdot l^2 \cdot d\rho \cdot d\varphi}{\left[l^2 + (\rho \cdot \cos \varphi - x)^2 + (\rho \cdot \sin \varphi - y)^2 \right]^2} \quad (1)$$

где r_0 – радиус диафрагмы, если она круглая; l – расстояние от диафрагмы до МФЧЭ.

Величина коэффициента пропускания диафрагмы выражает отношение облученности, создаваемой фоновым излучением, в точке плоскости с координатами x и y к облученности в той же точке при полном отсутствии светоизолирующего экрана [8].

Здесь и далее все выражения будут записываться с обозначением индексов, указывающих строку и столбец на пересечении которых расположен ФЧЭ. Тогда, индексы ij будут определять ФЧЭ с координатами его центра, удовлетворяющими следующим выражениям:

$$x_i = i \cdot a_x - \frac{a_x}{2} - \frac{a}{2}; \quad (2)$$

$$y_j = -j \cdot b_y + \frac{b_y}{2} + \frac{b}{2}, \quad (3)$$

где a_x и b_y – размеры шага ФЧЭ по осям x и y ; a и b – известные размеры фоточувствительного поля матрицы; i и j – индексы, определяющие номер ФЧЭ в строке и столбце.

Указанная в (2) и (3) индексация справедлива только для регулярных прямоугольных смотрящих и сканирующих матриц ФЧЭ.

Величина коэффициента пропускания диафрагмы в этом случае будет иметь следующий вид:

$$L_3^{ij}(l) = [1 - K_D^{ij}(l)] \cdot \varepsilon_3 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_3}\right) - 1 \right]} d\lambda. \quad (7)$$

Облученность, создаваемая светофильтром с температурой T_4 и коэффициентом черноты ε_4 .

$$L_4^{ij} = \varepsilon_4 \cdot K_D^{ij}(l) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_4}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) вместо 0 и λ_2 стоят пределы интегрирования λ_1 и λ_2 . Ошибка от такой замены ничтожна.

Все действующие облученности могут быть учтены в каждом конкретном случае.

Из всех указанных облученностей лишь облученность L_l можно считать полезной. Все остальные являются бесполезными и несут паразитный шум, ухудшающий пороговые параметры МФПУ. Полная облученность ФЧЭ равна сумме всех указанных облученностей.

$$L_0^{ij}(l) = \sum_{k=1}^4 L_k^{ij}(l) \quad (9)$$

Однородность облученности рассчитывается стандартным образом:

$$\Delta L_0 = \frac{L_0^{00}(l) - L_0^{MN}(l)}{L_0^{00}(l)} \cdot 100\% \quad (10)$$

Однородность облученности будет тем хуже, чем меньше будет расстояние от диафрагмы до МФЧЭ.

Сигнал ФЧЭ

Сигнал ФЧЭ выражается в вольтах, или в единицах АЦП, или в количестве накопленных электронов, или в величине накопленного заряда. Источником его всегда является фототок и темновой ток ФЧЭ, который накапливается на соответствующей емкости мультиплексора. Переход от одного вида сигнала к другому достаточно хорошо известен. Поэтому мы будем вычислять сигнал и шум в количестве электронов.

Выражение для полезного фототока ФЧЭ, в электронах в секунду, будет иметь следующий вид [6]:

$$I_{\text{пол}}^{ij}(l) = L_1^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot A_s, \quad (11)$$

где η_{ij} – среднее значение квантовой эффективности ФЧЭ в спектральном диапазоне его чувствительности, определяемое следующим выражением:

$$\eta_{ij} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c \cdot \eta_{ij}(\lambda)}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1 \right]} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1 \right]} d\lambda}. \quad (12)$$

Полный ток (в электронах в секунду), поступающий в накопительную емкость, описывается выражением

$$I_0^{ij}(l) = L_0^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot A_s + \frac{I_{\text{дij}}}{q}, \quad (13)$$

В результате, с каждого ФЧЭ по истечении времени накопления τ_0 будет считываться сигнал, выражаемый количеством накопленных электронов, а именно,

$$S_0^{ij}(l) = I_0^{ij}(l) \cdot \tau_0, \quad (14)$$

равный сумме полезного сигнала, обусловленного излучением фона (АЧТ), и паразитного сигнала, определяемого темновым током I_d и излучениями входного окна, светоизолирующего экрана и светофильтра.

Здесь необходимо, чтобы заданное время накопления соответствовало величине накопительной емкости в ячейке мультиплексора. Для соответствия необходимо, чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$\tau_0 \leq \frac{k_{\text{раз}} \cdot C_n \cdot E_0}{q \cdot I_0^{ij}(l)}, \quad (15)$$

где k – степень разряда емкости за время накопления; E_0 – напряжение заряда емкости накопления, В.

Величина k обычно выбирается из диапазона от 0,2 до 0,8, соответствующего наилучшему значению остаточной неоднородности сигнала после двухточечной коррекции [9].

Тогда выражение, описывающее полный сигнал смотрящего МФПУ в электронах, в котором каждый ФЧЭ соответствует одному элементу изображения, будет иметь следующий вид:

$$S_{\text{смп}}^{ij}(l) = S_0^{ij}(l). \quad (16)$$

В сканирующем МФПУ формата $M \times N$ один элемент изображения последовательно во времени экспонируется на M ФЧЭ, а их сигналы складываются. При этом эффективная емкость накопления становится равной $M \cdot C_n$.

Тогда сигнал канала сканирующего МФПУ в электронах определяется следующим выражением:

$$S_{\text{скан}}^j(l) = \sum_{i=1}^M S_{\text{смп}}^{ij}(l). \quad (17)$$

Полезный сигнал ФЧЭ смотрящего МФПУ в электронах имеет вид:

$$S_{n_смп}^{ij}(l, T_1) = \tau_0 \cdot A_s \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot \varepsilon_1 \cdot K_D^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_1}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (18)$$

и полезный сигнал канала сканирующего МФПУ в электронах

$$S_{n_скан}^j(l, T_1) = \tau_0 \cdot A_s \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}] \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_1}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (19)$$

где k_B – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; c – скорость света.

Выражения (16), (17), (18) и (19) позволяют рассчитать значения полных и полезных сигналов ФЧЭ смотрящего МФПУ и канала сканирующего МФПУ. Для расчета используют известные данные вышеприведенной таблицы.

Шум МФПУ

Источниками шума МФПУ являются все излучения, попадающие на ФЧЭ, темновой ток ФЧЭ и мультиплексор.

Выражение, описывающее количество шумовых электронов, накопленных на емкости C_n в ячейке мультиплексора за время τ_0 от излучения фона, имеет следующий вид [10, 11]:

$$N_{шФ}^{ij}(l) = \sqrt{S_1^{ij}(l)} = \sqrt{L_1^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot A_s \cdot \tau_0} \quad (20)$$

Аналогично записываются выражения для шумовых электронов, обусловленных излучениями от входного окна, светоизолирующего экрана, светофильтра и носителями темнового тока ФЧЭ.

$$N_{шВО}^{ij}(l) = \sqrt{S_2^{ij}(l)} = \sqrt{L_2^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot A_s \cdot \tau_0} \quad (21)$$

$$N_{шХЭ}^{ij}(l) = \sqrt{S_3^{ij}(l)} = \sqrt{L_3^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot A_s \cdot \tau_0} \quad (22)$$

$$N_{шСФ}^{ij} = \sqrt{S_4^{ij}} = \sqrt{L_4 \cdot \eta_{ij} \cdot A_s \cdot \tau_0} \quad (23)$$

$$N_{шГ}^{ij} = \sqrt{S_5^{ij}(I_d^{ij})} = \sqrt{\frac{I_d^{ij}}{q} \cdot \tau_0} \quad (24)$$

Тогда полный (суммарный) шум смотрящего МФПУ, с учетом шума ячейки накопления N_n и шума мультиплексора N_m , будет определяться выражением:

$$N_{ш_смотр}^{ij}(l) = \sqrt{N_1^2 + N_2^2};$$

$$N_1^2 = [N_{шФ}^{ij}(l)]^2 + [N_{шВО}^{ij}(l)]^2 + [N_{шХЭ}^{ij}(l)]^2; \quad (25)$$

$$N_2^2 = [N_{шСФ}^{ij}]^2 + [N_{шГ}^{ij}]^2 + [N_n^{ij}]^2 + [N_m]^2,$$

а суммарный шум канала сканирующего МФПУ, в случае суммирования сигналов внутри мультиплексора,

$$N_{ш_скан}^j(l) = \sqrt{[N_m]^2 + [N_c]^2 + \sum_{i=1}^M \left\{ [N_{ш_смотр}^{ij}(l)]^2 - [N_m]^2 \right\}}, \quad (26)$$

где N_c – дополнительный шум узла суммирования сигналов ФЧЭ.

Полученные выражения (25) и (26) для суммарных значений шума ФЧЭ смотрящего МФПУ и канала сканирующего МФПУ позволяют (вместе с полезными значениями сигналов (18) и (19) и численными данными параметров, указанных в таблице 1) точно рассчитать величины фотоэлектрических параметров, указанных в колонке 3 таблицы. Они позволяют также построить и зависимости фотоэлектрических параметров от конструктивных и эксплуатационных параметров, указанных в колонках 1 и 2, для сравнения их с экспериментальными значениями.

Фотоэлектрические параметры МФПУ

Отношение сигнал/шум (Signal to Noise Ratio или SNR) – отношение полезного сигнала к полному шуму [13]. Чем больше эта безразмерная величина, тем лучше фотоприемник.

Для смотрящего МФПУ отношение сигнал/шум – это отношение выражения (18) к выражению (25), а для сканирующего МФПУ – отношение выражения (19) к выражению (26). Легко заметить, что при равных временах накопления и равных шумах мультиплексоров всегда

$$SNR_{смотр}^{ij} < SNR_{скан}^j.$$

Пороговая облученность (Noise Equivalent Irradiance или NEI) – величина сигнальной облученности, при которой отношение сигнал/шум равно единице. Чем меньше эта величина, тем лучше фотоприемник. Размерность пороговой облученности – фотон·см⁻²·с⁻¹.

Это определение означает, что количество носителей заряда, генерированное пороговой облученностью в ФЧЭ за время накопления, равно суммарному количеству шумовых электронов данной ячейки МФПУ.

Для смотрящего МФПУ, количество носителей, генерированных в ФЧЭ облученностью $NEI_{смотр}^{ij}$, равно значению:

$$N_{NEI_смотр}^{ij} = A_s \cdot \tau_0 \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot \varepsilon_1 \cdot K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot NEI_{смотр}^{ij} \quad (27)$$

Полный шум ячейки смотрящего МФПУ в электронах для времени накопления τ_0 определяется выражением (25). Тогда NEI ячейки смотрящего МФПУ будет определяться следующим выражением:

$$NEI_{смотр}^{ij}(l) = \frac{N_{ш_смотр}^{ij}(l)}{A_s \cdot \tau_0 \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot \varepsilon_1 \cdot K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}}. \quad (28)$$

Для сканирующего МФПУ количество генерированных в канале носителей

$$N_{NEI_скан}^{ij} = A_s \cdot \tau_0 \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot \varepsilon_1 \times \sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot NEI_{смотр}^{ij}] \quad (29)$$

В выражении (29) присутствует сумма

$$\sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot NEI_{смотр}^{ij}],$$

которую можно записать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij} \cdot NEI_{смотр}^{ij}] = NEI_{скан}^j \cdot \sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}] \quad (30)$$

Здесь вместо $NEI_{смотр}^{ij}$, стоит средневзвешенная по η_{ij} величина $NEI_{скан}^j$ канала.

Полный шум канала сканирующего МФПУ для времени накопления τ_0 определяется выражением (26). Тогда NEI канала МФПУ будет определяться следующим выражением:

$$NEI_{скан}^j(l) = \frac{N_{ш_скан}^j(l)}{A_s \cdot \tau_0 \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}]} \quad (31)$$

Величина NEI в обоих случаях прямо пропорциональна величине полного шума ячейки МФПУ и обратно пропорциональна времени накопления и квантовой эффективности ФЧЭ. Величина $NEI_{скан}^j$, при прочих равных условиях всегда меньше $NEI_{смотр}^{ij}$.

Пороговая мощность (Noise Equivalent Power или NEP) – мощность сигнального излучения, падающего на ФЧЭ, при которой отношение сигнал/шум равно единице [10, 11, 13]. Чем меньше NEP , тем лучше приемник. Размерность пороговой мощности – Вт·элемент⁻¹.

Говоря иными словами, NEP это суммарная мощность квантов NEI , падающих на одиночный ФЧЭ или M ФЧЭ канала.

В классической литературе по фотоэлектронике выражение для NEP имеет следующий вид:

$$NEP = \frac{P_{ФЧЭ}}{SNR} = \frac{q \cdot N_{ш}}{S_i} \cdot P_{ФЧЭ} = \frac{q \cdot N_{ш}}{I_{ф_пол}} \cdot P_{пол} \quad (32)$$

где $P_{ФЧЭ}$ – мощность сигнального (фонового) излучения, падающего на ФЧЭ.

Мощность фонового излучения, падающего на ФЧЭ смотрящего МФПУ, определяется следующим выражением:

$$P_{П_смотр}^{ij}(l) = A_s \cdot K_2(\lambda) \cdot K_4(\lambda) \cdot \varepsilon_1 \times P(T, \lambda_1, \lambda_2) \cdot K_{д}^{ij}(l) \quad (33)$$

а для сканирующего МФПУ, мощность фонового излучения, падающего на ФЧЭ канала, равна:

$$P_{П_скан}^j(l) = A_s \cdot K_2(\lambda) \cdot K_4(\lambda) \cdot \varepsilon_1 \times P(T, \lambda_1, \lambda_2) \cdot \sum_{i=1}^M K_{д}^{ij}(l) \quad (34)$$

Тогда после подстановки выражений (18), (25) и (33) в (32), получим следующее выражение для NEP ФЧЭ смотрящего МФПУ:

$$NEP_{смотр}^{ij}(l) = \frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)} \cdot \frac{N_{ш_смотр}^{ij}(l)}{\tau_0} \cdot \frac{1}{\eta_{ij}} \quad (35)$$

Выражение для NEP канала сканирующего МФПУ, после подстановки выражений (19), (26) и (34) в (32), будет иметь следующий вид:

$$NEP_{скан}^j = \frac{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)} \times \frac{N_{ш_скан}^j(l)}{M \cdot \tau_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^M K_{д}^{ij}(l)}{\sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}]} \quad (36)$$

Здесь выражения для $P(T, \lambda_1, \lambda_2)$ и $N(T, \lambda_1, \lambda_2)$ означают плотность мощности и поток квантов на единицу площади в заданном спектральном интервале, определяемые законом Планка. Величина $NEP_{скан}^j$, при прочих равных условиях, всегда меньше $NEP_{смотр}^{ij}$.

Удельная обнаружительная способность (Normalized Detectivity или D^*) – параметр, обратный NEP , нормированный на единичную площадку и на единичную рабочую частоту [10, 12, 13]. Удельная обнаружительная способность имеет размерность см·Вт⁻¹·с^{-1/2}.

Она определяется следующим классическим выражением:

$$D^* = \frac{1}{NEP} \cdot \sqrt{\frac{A_s}{2 \cdot \tau_0}} \quad (37)$$

Подставляя в (37) выражение (35), получим для смотрящего МФПУ

$$D_{смотр}^{*ij}(l) = \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)} \times \frac{\eta_{ij}}{N_{ш_смотр}^{ij}(l)} \sqrt{\frac{A_s \cdot \tau_0}{2}} \quad (38)$$

и, подставляя в (37) выражение (36), получим

$$D^* = \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)} \times \frac{\sum_{i=1}^M [K_{д}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}]}{N_{ш_скан}^j(l) \cdot \sum_{i=1}^M K_{д}^{ij}(l)} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot A_s \cdot \tau_0}{2}} \quad (39)$$

Токовая чувствительность (Current Responsivity) – величина сигнального фототока, отнесенная к световой мощности сигнала в полосе чувствительности ФЧЭ [12, 13].

$$S = \frac{I_{ф_пол}}{P_{п}} \quad (40)$$

Величина сигнального фототока при облученности равной NEI определяется следующим выражением:

$$I_{ф_п_смотр}^{ij} = \frac{N_{ш_смотр}^{ij}(l)}{\tau_0} \cdot q \quad (41)$$

$$I_{ф_п_скан}^{ij} = \frac{N_{ш_скан}^j(l)}{M \cdot \tau_0} \cdot q \quad (42)$$

Величина световой мощности сигнального излучения при этом равна NEP и определяется выражениями (35) и (36).

В результате токовые чувствительности ФЧЭ в смотрящем МФПУ и канала в сканирующем МФПУ будут иметь классический вид, не зависящий от величины времени накопления.

$$S_{I_смотр}^{ij} = q \cdot \eta_{ij} \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)} \quad (43)$$

$$S_{I_скан}^j = q \cdot \frac{\sum_{l=1}^M [K_{\Delta}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}]}{\sum_{l=1}^M K_{\Delta}^{ij}(l)} \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)} \quad (44)$$

При равных η_{ij} токовые чувствительности ФЧЭ в смотрящем МФПУ и канала в сканирующем МФПУ равны. Размерность токовой чувствительности – А·Вт⁻¹.

Вольтовая чувствительность (Voltage Responsivity) – отношение вольтового сигнала ФЧЭ (канала) к падающей на ФЧЭ (канал) мощности сигнального излучения [10]. Размерность вольтовой чувствительности – В·Вт⁻¹.

Вольтовый сигнал ФЧЭ (канала) – величина изменения напряжения на выходе МФПУ в конце процесса накопления, обусловленная сигнальным излучением. В нашем случае это излучение фона.

Изменение напряжения ΔU на емкости накопления C_n происходит в процессе накопления заряда под действием фототока I_{ϕ} , генерированного падающей мощностью светового сигнала $P_{ФЧЭ}$.

Фототок при этом можно записать следующим образом

$$I_{\phi} = \frac{C_n}{\tau_0} \cdot \Delta U = S_I \cdot P_{ФЧЭ} \quad (45)$$

Из выражения (45) получается выражение для вольтовой чувствительности ФЧЭ в смотрящем МФПУ

$$S_{U_смотр}^{ij} = \frac{q \cdot \tau_0 \cdot \eta_{ij}}{C_n} \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)}, \quad (46)$$

а для вольтовой чувствительности канала в сканирующем МФПУ имеем

$$S_{U_скан}^j = \frac{q \cdot \tau_0 \cdot \sum_{l=1}^M [K_{\Delta}^{ij}(l) \cdot \eta_{ij}]}{M \cdot C_n \cdot \sum_{l=1}^M K_{\Delta}^{ij}(l)} \times \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{P(T, \lambda_1, \lambda_2)} \quad (47)$$

Вольтовые чувствительности ФЧЭ в смотрящем и канала в сканирующем МФПУ равны при равных η_{ij} .

Температурная чувствительность (Temperature Responsivity, S_T) – отношение полезного вольтового сигнала ФЧЭ (канала) к разности температур сигнального излучения большого объекта и фона. Размерность температурной чувствительности – В·К⁻¹.

Для ее расчета запишем величину вольтового сигнала ФЧЭ в виде

$$U(T) = \frac{I_{\phi} \cdot \tau_0}{C_n} = \frac{A}{C_n},$$

$$A = A_s \cdot \tau_0 \cdot q \cdot \eta \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot \varepsilon_1 \times K_{\Delta}^{ij}(l) \cdot N(T, \lambda_1, \lambda_2) \quad (48)$$

Если рассмотреть отношение разности этих сигналов при температурах $T+\delta T$ и T к приросту температуры фона δT , то получим выражение, описывающее температурную чувствительность ФЧЭ S_T в смотрящем МФПУ.

$$S_{T_смотр}^{ij} = \frac{c \cdot h}{k_B \cdot T^2} \cdot \frac{q \cdot S_{U_смотр}^{ij}}{C_n} \times \frac{Z(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)} \quad (49)$$

В сканирующем МФПУ, с учетом суммирования сигналов ФЧЭ в канале и повышения эффективной величины емкости накопления в M раз, получим следующее выражение для температурной чувствительности:

$$S_{T_скан}^j = \frac{c \cdot h}{k_B \cdot T^2} \cdot \frac{q \cdot S_{U_скан}^j}{M \cdot C_n} \times \frac{Z(T, \lambda_1, \lambda_2)}{N(T, \lambda_1, \lambda_2)} \quad (50)$$

Выражения (49) и (50) содержат функцию $Z(T, \lambda_1, \lambda_2)$, которая возникает при разложении формулы Планка в ряд по малому параметру δT . Она имеет следующий вид:

$$Z(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^5} \frac{\exp\left(\frac{c \cdot h}{k_B \cdot T \cdot \lambda}\right)}{\left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{k_B \cdot T \cdot \lambda}\right) - 1\right]^2} d\lambda. \quad (51)$$

При равных η_{ij} , температурные чувствительности ФЧЭ в смотрящем МФПУ и канала в сканирующем МФПУ равны.

Пороговая разность температур (Noise Equivalent Temperature Difference или $NETD$) – наименьшая разность температур протяженного теплового тест-объекта и фона, при которой отношение сигнал/шум равно единице [10, 12].

Данное определение означает, что прирост облученности ФЧЭ, обусловленный приращением температуры фона, равен облученности, ограниченной шумом (NEI). Это определение записывается следующим соотношением:

$$[N(T + \delta T, \lambda_1, \lambda_2) - N(T, \lambda_1, \lambda_2)] = NEI. \quad (52)$$

Здесь $N(T + \delta T; \lambda_1; \lambda_2)$ и $N(T; \lambda_1; \lambda_2)$ – выражения из закона Планка для потока квантов при температурах $T + \delta T$ и T в спектральном диапазоне от λ_1 до λ_2 , а $\delta T = NETD$.

Преобразуя соотношение (52), получим следующее выражение для $NETD$ ФЧЭ смотрящего МФПУ:

$$NETD_{смотр}^{ij} = \left(\frac{k_B \cdot T^2}{c \cdot h}\right) \times (SNR_{смотр}^{ij})^{-1} \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{Z(T, \lambda_1, \lambda_2)}, \quad (53)$$

а выражение для $NETD$ канала сканирующего МФПУ имеет вид:

$$NETD_{скан}^j = \left(\frac{k_B \cdot T^2}{c \cdot h} \right) \times \left(SNR_{скан}^j \right)^{-1} \cdot \frac{N(T, \lambda_1, \lambda_2)}{Z(T, \lambda_1, \lambda_2)}, \quad (54)$$

где $Z(T, \lambda_1, \lambda_2)$ определяется формулой (51):

Из (53) и (54) следует, что величина $NETD$ определяется отношением сигнал/шум ФЧЭ или канала. Отсюда следует, при прочих равных условиях, она всегда лучше в сканирующем МФПУ.

Динамический диапазон (Dynamic Range) – отношение максимальной величины полезного сигнала ФЧЭ к его минимальной величине.

$$DR = 20 \cdot \lg \left(\frac{N_{max}}{N_{min}} \right) \quad (55)$$

Здесь предполагается, что отклонение от линейной зависимости выходного сигнала от входного не превышает 20% [13].

Максимальная величина полезного сигнала в электронах для ФЧЭ равна разряжаемой емкости накопительной ячейки за вычетом паразитного сигнала $S_{нар} = S_0 - S_{пол}$, т.е.

$$N_{max} = \frac{C_n \cdot E_0}{q} - (S_0 - S_{пол}) \quad (56)$$

Минимальная величина полезного сигнала равна шуму ФЧЭ.

$$N_{Пmin} = N_{ш} \quad (57)$$

Тогда выражение, описывающее величину динамического диапазона ФЧЭ смотрящего МФПУ, будет иметь вид

$$DR_{смотр}^{ij} = 20 \cdot \lg \left(\frac{C_n \cdot E_0 - S_{смотр}^{ij} + S_{П,смотр}^{ij}}{q \cdot N_{ш,смотр}^{ij}} \right), \quad (58)$$

а динамический диапазон канала сканирующего МФПУ будет определяться выражением

$$DR_{скан}^j = 20 \cdot \lg \left(\frac{M \cdot C_n \cdot E_0 - S_{скан}^{ij} + S_{П,скан}^{ij}}{q \cdot N_{ш,скан}^j} \right) \quad (59)$$

Размерность величины динамического диапазона – дБ.

Здесь следует отметить, что наибольший динамический диапазон будут иметь МФПУ, в которых оптическая схема оптимальна, т.е. паразитные световые потоки минимизированы.

Заключение

Разработанная теория позволяет подробно анализировать поведение выходных сигналов и параметров МФПУ в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров и в соответствии с результатами анализа оптимизировать их характеристики.

В следующей работе будут рассмотрены конкретные примеры анализа МФПУ.

Литература

1. Cooke B.J., Laubscher B.E., Borel C.C. et al. // Proc. SPIE. 1996. V. 2743. P. 52.
2. Wan W. // Proc. SPIE. 1996. V. 2743. P. 325.
3. Wan W. // Proc. SPIE. 2009. V. 7300. P. 730005-1.
4. Patrashin A.I., Ivanov G.A. // Proc. SPIE. 1998. V. 3379. P. 555.
5. Патрашин А.И. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 98.
6. Патрашин А.И. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 65.
7. Smith F.G. Atmospheric Propagation of Radiation // The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, v. 2, SPIE Optical Engineering Press, pp. 3-158, 1978.
8. Патрашин А.И. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.
9. Schlesinger J. Oiknine, Calahorra Z., Uri E., et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6542. P. 654231-1.
10. Курбатов Л.Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. – М.: МФТИ, 1999.
11. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотозлектроника. Физические основы. – Москва: Физматкнига, 2005.
12. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. – Новосибирск: Наука, 2003.
13. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, ГОСТ 17772, 1988.

Analytical model for parameters calculation of photo receiver with photodiode focal plane array

A.I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, and V. V. Shabarov

Orion R&P Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received January 12, 2014

The theoretical model of photo detector with photodiode array is developed. The model allows one to calculate a complete set of elements' photoelectric characteristics (signals, noises, all photoelectric parameters). The theory grounded upon a new approach to estimation for element's irradiation, which permits irradiation calculation for any aperture's shape. The model describes usual arrays and arrays with time delay and integration (TDI). The model was verifying on IR array 320x256 with indium antimonide diodes. It was comparing experimental and theoretical data of elements' signals and noises with different integration times and background temperatures. Full agreement of experimental and theoretical data obtained, which confirms the model. The model can be expanding to systems with array photo detectors.

PACS: 42.79. Ag, 72.20. Jv, 07.57. Kp, 61.80. Ba

Keywords: FPA, signal, noise, background temperature, storage time, photoelectric characteristics.

References

1. B. J. Cooke, B. E. Laubscher, C. C. Borel, et al., Proc. SPIE. **2743**, 52 (1996).
2. W. Wan, Proc. SPIE **2743**, 325 (1996).
3. W. Wan, Proc. SPIE **7300**, 730005-1 (2009).
4. A. I. Patrashin and G. A. Ivanov, Proc. SPIE **3379**, 555 (1998).
5. A. I. Паграшин, Прикладная Физика, No. 3, 98 (2011).
6. A. I. Паграшин, Прикладная Физика, No. 4, 65 (2011).
7. F. G. Smith, in *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook* (SPIE Optical Engineering Press, 1978), Vol. 2, pp. 3-158.
8. A. I. Паграшин, Прикладная Физика, No. 3, 123 (2010).
9. J. Oiknine Schlesinger, Z. Calahorra, E. Uri, et al., Proc. SPIE **6542**, 654231-1 (2007).
10. L. N. Kurbanov, *Optoelectronics of Visible and Infrared Spectra* (MFTI, Moscow, 1999) [in Russian].
11. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
12. A. Rogalskii, *Infrared Detectors* (Nauka, Novosibirsk, 2003) [in Russian].
13. Detectors of Radiation. Semiconductor, Photoelectric, and Photodetector Devices. Measuring Methods. GOST 17772 // 1988 [in Russian].