

УДК.621.283.4.5

Исследование метода измерения квантовой эффективности и темнового тока фоточувствительных элементов матричных ФПУ

А.И. Патрашин, И.Д. Бурлаков, К.О. Болтарь, М.Д. Корнеева
А.А. Лопухин, А.В. Никонов, Н.И. Яковлева

Предложен, проанализирован и опробован новый метод измерения квантовой эффективности и темнового тока фоточувствительных элементов матричных ФПУ, позволяющий получить полный массив данных по этим важнейшим характеристикам матриц фоточувствительных элементов. Метод основан на экспериментально опробованной модели матричных ФПУ, позволяющей рассчитывать такие параметры как сигнал и шум приборов. Данный метод позволяет получить экспрессные данные по средней квантовой эффективности и темновому току каждого фоточувствительного элемента матрицы и будет полезным как для производителей ФПУ, так и для их потребителей, а также позволит четко квалифицировать качество приборов.

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

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

Введение

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ), работающие в режиме накопления фототока, являются сложными высокотехнологичными устройствами [1, 2]. Они работают во всех диапазонах спектра (от 0,25 мкм до более чем 50 мкм), включают матрицу фоточувствительных элементов (ФЧЭ), содержащую от более чем 1 000 фотодиодов (формат 4x288) [3] до более чем 1 000 000 фотодиодов (формат 1280x1024) [4], состыкованных с таким же количеством ячеек интегрального кремниевого мультиплексора. Мультиплексор выполняет накопление фототоков ФЧЭ в ячейках, поэлементное считывание накопленных зарядов, преобразование их в напряжение, предварительное усиление и вывод сигналов, как правило, на несколько выходов с заданной

частотой кадров. Кроме этого, современные мультиплексоры-процессоры преобразуют выходной сигнал из аналоговой формы в цифровую форму и осуществляют предварительную цифровую обработку сигналов [5, 6].

При изготовлении МФПУ необходимо контролировать параметры всех его составных частей. Особенно это относится к квантовой эффективности и темновому току ФЧЭ, составляющих матрицу ФПУ [7]. Эти параметры являются важнейшими и определяют, в конечном итоге, все фотоэлектрические характеристики устройства, а именно, пороговую облученность (NEI), пороговую мощность (NEP), удельную обнаружительную способность (D^*), пороговую разность температур (NETD), динамический диапазон, токовую и вольтовую чувствительности, однородность характеристик по площади МФЧЭ, количество дефектных ФЧЭ [8].

Для качественного МФПУ чрезвычайно важно, чтобы однородность измеряемых параметров по всем ФЧЭ была бы не хуже 5–10 %, величина темнового тока I_T не превышала некоторое граничное значение I_0 , а величина квантовой эффективности η была бы не ниже граничного значения η_0 . Все ФЧЭ, не удовлетворяющие подобным требованиям, считаются дефектными. Для современных

Патрашин Александр Иванович, *вед. научн. сотрудник.*
Бурлаков Игорь Дмитриевич, *зам. гендиректора.*
Болтарь Константин Олегович, *начальник НТК.*
Корнеева Марина Дамировна, *первый зам. гендиректора*
Лопухин Алексей Алексеевич, *вед. научн. сотрудник.*
Никонов Антон Викторович, *инженер.*
Яковлева Наталья Ивановна, *зам. начальника НИЦ.*
ОАО «НПО «Орион».
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2013 г.

© Патрашин А.И., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Корнеева М.Д., Лопухин А.А., Никонов А.В., Яковлева Н.И., 2013

МФПУ количество дефектных элементов не должно превышать величину от 0,1 до 1 %. Тогда с помощью последующей обработки сигналов (двухточечная коррекция, медианная фильтрация и т.д.) возможно выровнять характеристики выходных сигналов со всех ФЧЭ.

Однако измерение этих параметров с помощью прямых методов, например зондовых, просто невозможно из-за огромной трудоемкости и угрозы повреждения индиевых столбиков матрицы ФЧЭ.

В данной работе предложен способ контроля величины квантовой эффективности и темнового тока каждого ФЧЭ матрицы, удобный для определения количества дефектных элементов и других характеристик.

Теоретические основы метода

Метод вытекает из модели МФПУ, основанной на экспериментальных исследованиях метода расчета параметров ИК МФПУ [9], показавших хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

При работе МФПУ в реальных условиях регистрируется полный сигнал, включающий сумму фотосигнала U_ϕ , прямо пропорционального величине квантовой эффективности, темнового сигнала U_T , обусловленного эффективным темновым током ФЧЭ, и постоянного сигнала, характеризующего начальный уровень отсчета выходного сигнала, определяемый лишь рабочими параметрами выходного каскада мультиплексора.

Величины темнового сигнала и фотосигнала ФЧЭ определяются следующими выражениями:

$$U_{Tij} = \frac{I_{Tij} \cdot \tau_0}{C_n},$$

$$U_{\phi ij} = \frac{I_{\phi ij} \cdot \tau_0}{C_n},$$

где I_T – эффективный темновой ток ФЧЭ;
 τ_0 – время накопления, с;
 I_ϕ – фототок, генерированный излучением, падающим на ФЧЭ, А;
 C_n – накопительная емкость в ячейке мультиплексора, Ф;
 i и j – индексы, указывающие на расположение ФЧЭ в матрице.
 Индексы i и j связаны с координатами цен-

тра соответствующего ФЧЭ в стандартной матрице следующими соотношениями:

$$x_i = i \cdot a_x - \frac{a_x}{2} - \frac{a}{2}, \quad (1)$$

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

где a_x и b_y – размеры ФЧЭ по осям x и y ;
 a и b – размеры поля МФЧЭ по осям x и y .

Здесь следует отметить, что в матрице с нестандартным расположением ФЧЭ выражения (1) и (2) будут другими.

Величина фототока ФЧЭ при стационарном облучении определяется выражением

$$I_{\phi ij} = N_{\phi ij}(\phi) \cdot \eta_j \cdot A_s \cdot q,$$

где N_ϕ – фотонная облученность в плоскости ФЧЭ, фотон \times см $^{-2}$ \times с $^{-1}$;

A_s – площадь ФЧЭ, см 2 ;

q – заряд электрона, К;

η_j – средняя квантовая эффективность ФЧЭ в спектре чувствительности [8].

Фотонная облученность в плоскости ФЧЭ определяется следующей формулой [10]:

$$N_{\phi ij}(T) = K_1 \cdot K_2 \cdot K_{npj}(x, y, l, R) \cdot N_0(T, \lambda_1, \lambda_2),$$

где $K_{npj}(x, y, l, R)$ – коэффициент пропускания диафрагмы в светоизолирующем экране;

K_1 – средний коэффициент пропускания входного окна ФПУ;

K_2 – средний коэффициент пропускания светофильтра, определяющего полосу чувствительности ФПУ.

Если входное окно или светофильтр отсутствуют, то соответствующий коэффициент равен единице.

Коэффициент пропускания круглой диафрагмы в светоизолирующем экране определяется выражением [11]:

$$K_{npj}(x, y, l, R) = \frac{1}{\pi} \cdot$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\rho \cdot l^2}{[l^2 + (\rho \cdot \cos \varphi - x)^2 + (\rho \cdot \sin \varphi - y)^2]^2} d\rho \cdot d\varphi,$$

где x, y – координаты центра ФЧЭ с индексами i и j , см;

l – расстояние от диафрагмы до матрицы, см;

R – радиус диафрагмы, см;

ρ и φ – радиус и угол интегрирования в полярных координатах плоскости диафрагмы.

Исходная фотонная облученность $N_0(T, \lambda_1, \lambda_2)$ в диапазоне длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$ определяется из закона Планка [12]:

$$N_0(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1 \right]} d\lambda,$$

где $c = 2,998 \times 10^{10}$ см \times с $^{-1}$ – скорость света;
 $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$ Вт \times с \times К $^{-1}$ – постоянная

Больцмана;

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ Вт \times с 2 – постоянная Планка.

Тогда полный сигнал каждого ФЧЭ, регистрируемый при облучении его сквозь диафрагму в светоизолирующем экране, описывается следующим выражением:

$$U_{\phi ij} = M_{1ij}(\tau_0) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_0, T) \cdot \eta_{ij} + U_{0ij}$$

$$M_{1ij}(\tau_0) = \frac{\tau_0}{C_i},$$

$$M_{2ij}(\tau_0, T) = A_S \cdot q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_{npj}(x, y, l, R) \cdot N_0(T, \lambda_1, \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_i},$$

где $M_{1ij}(\tau_0)$ и $M_{2ij}(\tau_0, T)$ – коэффициенты, которые зависят лишь от τ_0 и T , а U_0 – постоянный выходной сигнал ФПУ при нулевом времени накопления.

Коэффициенты $M_{1ij}(\tau_0)$ и $M_{2ij}(\tau_0, T)$ легко рассчитываются для известных значений τ_0 и T , т.к. все остальные величины, необходимые для их расчета, являются известными и постоянными.

Сигнал ФЧЭ содержит три неизвестные величины, а именно, темновой ток I_{Tij} , квантовую эффективность η_{ij} и U_{const} . Следовательно, если провести три измерения сигнала каждого ФЧЭ в трех разных условиях, но при известных величинах $M_{1ij}(\tau_0)$ и $M_{2ij}(\tau_0, T)$, то для каждого ФЧЭ мы получим систему трех уравнений с тремя неизвестными I_T , η и U_{const} .

Такая система уравнений для каждого ФЧЭ будет иметь следующий вид:

$$U_{1\phi ij} = M_{1ij}(\tau_{01}) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_{01}, T_1) \cdot \eta_{ij} + U_{constij} \quad (3)$$

$$U_{2\phi ij} = M_{1ij}(\tau_{02}) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_{02}, T_2) \cdot \eta_{ij} + U_{constij} \quad (4)$$

$$U_{3\phi ij} = M_{1ij}(\tau_{03}) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_{03}, T_3) \cdot \eta_{ij} + U_{constij} \quad (5)$$

Решая систему уравнений (3) – (5) относительно темнового тока, квантовой эффективности и U_{const} , мы сможем определить необходимые параметры.

Первый сигнал $U_{1\phi ij}$ можно получить при $\tau_{01} = 0$. При этом $M_{1ij}(0) = 0$ и $M_{2ij}(0, T) = 0$, и автоматически определяется величина U_{0ij} . Второй сигнал $U_{2\phi ij}$ получается при значении $\tau_{02} = \tau_0$ и температуре АЧТ T_1 . Третий сигнал $U_{3\phi ij}$ получаем при том же значении $\tau_{03} = \tau_0$ и температуре излучения $T_2 = T_1 + \Delta T$.

Тогда, система уравнений (3) – (5) примет вид:

$$U_{1\phi ij} = U_{0ij},$$

$$U_{2\phi ij} = \frac{\tau_0}{C_n} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_{npj}(x, y, l, R) \cdot N_0(T_1, \lambda_1, \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_n} \cdot \eta_{ij} + U_{0ij},$$

$$U_{3\phi ij} = \frac{\tau_0}{C_n} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot$$

$$K_{npj}(x, y, l, R) \cdot N_0(T_2, \lambda_1, \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_n} \cdot \eta_{ij} + U_{0ij},$$

и сводится к системе двух уравнений с двумя неизвестными:

$$U_{21ij} = \frac{\tau_0}{C_n} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_{np}(x_{ij}, y_{ij}, l, R) \cdot N_0(T_1, \lambda_1, \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_n} \cdot \eta_{ij}$$

$$U_{31ij} = \frac{\tau_0}{C_n} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_{np}(x_{ij}, y_{ij}, l, R) \cdot N_0(T_2, \lambda_1, \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_n} \cdot \eta_{ij}$$

где $U_{21ij} = U_{2\phi ij} - U_{1\phi ij}$, а $U_{31ij} = U_{3\phi ij} - U_{1\phi ij}$.

Решая эту систему относительно I_{Tij} и η_{ij} , получим:

$$\eta_{ij} = \left(\frac{U_{32ij}}{\Delta N_{\phi ij} \cdot A_S \cdot q} \right) \cdot \frac{C_n}{\tau_0}, \quad (6)$$

$$I_{Tij} = \left[U_{21ij} - \frac{N_{\phi ij}(T_1) \cdot U_{32ij}}{\Delta N_{\phi ij}} \right] \cdot \frac{C_n}{\tau_n}. \quad (7)$$

Величины U_{21ij} , U_{32ij} , $\Delta N_{\phi ij}$ в (6) и (7) имеют следующий вид:

$$U_{32ij} = U_{3\phi ij} - U_{2\phi ij}$$

$$\Delta N_{\phi ij} = N_{\phi ij}(T_2) - N_{\phi ij}(T_1)$$

Заметим, что U_{32ij} – напряжение, определяемое из экспериментальных данных, а $\Delta N_{\phi ij}$

очень точно рассчитывается при использовании протяженного калиброванного абсолютно черного тела (АЧТ) с точной установкой температур T_1 и T_2 , что осуществимо для современных АЧТ.

Требования к измерительной системе

Сигнал ФПУ зависит от фоновой картины окружающей среды, которая может изменяться в течение измерений. Это может вызвать достаточно большой разброс измеряемых фотосигналов и сказаться на точности измерений. Если на ФЧЭ будет попадать стабильное во времени излучение, то разброс сигналов можно будет существенно снизить.

Для устранения возможной некорректности метода, обусловленной неоднородной и нестабильной засветкой МФЧЭ, МФПУ должен облучаться протяженным абсолютно черным телом (АЧТ), чтобы его излучающая поверхность полностью закрыла угол обзора ФЧЭ.

Если обозначить размер излучающей поверхности АЧТ через D , расстояние от АЧТ до МФЧЭ через L и принять диаметр диафрагмы ФПУ $d = 2 \times R$, диагональ МФЧЭ d_1 и расстояние от МФЧЭ до диафрагмы l , то при условии выполнения соотношения

$$D \geq \frac{L \cdot d + d_1 \cdot (L - l)}{l}$$

или

$$L \leq l \cdot \frac{D + d_1}{d + d_1},$$

можно считать, что все ФЧЭ «видят» только однородную по температуре излучающую поверхность протяженного АЧТ [13].

В этом случае источником фотосигнала U_ϕ является только излучение АЧТ с известной температурой T , преобразуемое с помощью ФЧЭ в фототок I_ϕ , накапливаемый в течение времени τ_0 на емкостях C_n . Стабильность фотосигнала будет определяться стабильностью излучения АЧТ.

Вторым требованием к измерительной системе является малый разброс величины каждого измеряемого сигнала. Это требование удовлетворяется, если каждый сигнал ФЧЭ автоматически измеряется, по крайней мере, несколько сотен раз. Затем из полученного массива данных одного ФЧЭ определяется средняя величина его сигнала, которая и уча-

ствует в дальнейших вычислениях параметров. Следовательно, измерительная система должна управляться ПЭВМ и автоматически выполнять все необходимые манипуляции.

Экспериментальные результаты

Экспериментальное исследование проводилось на ФПУ ФЭМ16М, изготовленном в ОАО «НПО «Орион», с матрицей фотодиодов из антимонида индия, чувствительной в диапазоне длин волн 3–5 мкм. Полоса чувствительности задавалась холодным фильтром с границами 3,62 мкм и 4,94 мкм по уровню 0,5, перекрывающим холодную диафрагму с относительным отверстием 1:4.

Для оптимизации вычислений первое измерение сигнала проводилось при $\tau_{01} = 0$ и температуре излучения АЧТ $T_1 = 296$ К. При этом автоматически определялась величина $U_{constij}$. Второе измерение сигнала проводилось при значении $\tau_{02} = 5,4626$ мс и температуре излучения АЧТ $T_1 = 296$ К. Третье измерение сигнала проводилось при $\tau_{03} = 5,4626$ мс и температуре излучения $T_2 = 301$ К. Измерения сигналов проводились на стенде с АЧТ диаметром 60 мм, отстоящим от МФЧЭ на расстоянии 50 мм. Вся обработка массивов данных автоматически проводилась на компьютере со специально разработанным программным обеспечением.

На рис. 1–4 приведены диаграммы и гистограммы измеренных массивов η_{ij} и I_{Tij} части матрицы формата 50x50 ФЧЭ. Гистограммы показывают что среднее значение эффективной величины квантового выхода ФЧЭ составляет, примерно, 0,7, а среднее значение эффективной величины темнового тока ФЧЭ имеет величину 1×10^{-11} А, что соответствует величинам, измеренным на тестовых фотодиодах. На рис. 1 и 2 видна также периодическая структура, обусловленная, по-видимому, мультиплексором, работающим на 4 выхода. Возможно, коэффициенты передачи четырех выходных каналов мультиплексора несколько отличаются. В дальнейшем планируется провести исследование влияния различных параметров мультиплексора МФПУ на выходные результаты метода.

Увеличенный разброс гистограммы темновых токов МФЧЭ может быть обусловлен погрешностью измерения выходных сигналов,

т.к. доля фототока величиной 10^{-11} А в полном сигнале при температуре АЧТ, равной 300 К, составляет чуть более 6 %.

Заключение

Матрицы ФПУ включают от нескольких сотен до нескольких миллионов ФЧЭ. Каждый ФЧЭ характеризуется следующими параметрами, а именно, темновой ток, квантовая эффективность и спектральный диапазон чувствительности. В хороших ФПУ необходимо, чтобы однородность этих параметров

по всем ФЧЭ была бы не хуже заданной величины. Тогда с помощью последующей обработки сигналов (двухточечная коррекция, медианная фильтрация и т.д.) возможно выровнять характеристики выходных сигналов со всех ФЧЭ.

Измерение этих параметров с помощью прямых методов, например зондовых, просто невозможно из-за огромной трудоемкости и угрозы повреждения индиевых столбиков матрицы ФЧЭ.

В настоящей работе исследована работо-

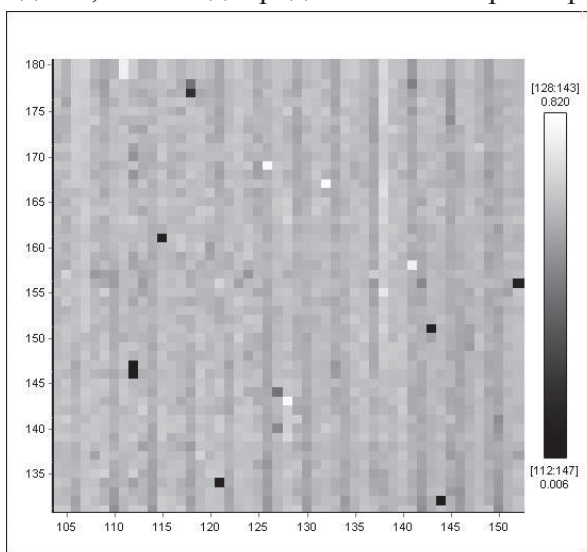


Рис. 1. Распределение значений квантовой эффективности по ФЧЭ матрицы InSb 320x256 (изображен фрагмент матрицы 50x50 элементов). Минимальная квантовая эффективность: 0,006, ФЧЭ [112:147]. Максимальная квантовая эффективность: 0,820, ФЧЭ [128, 143].

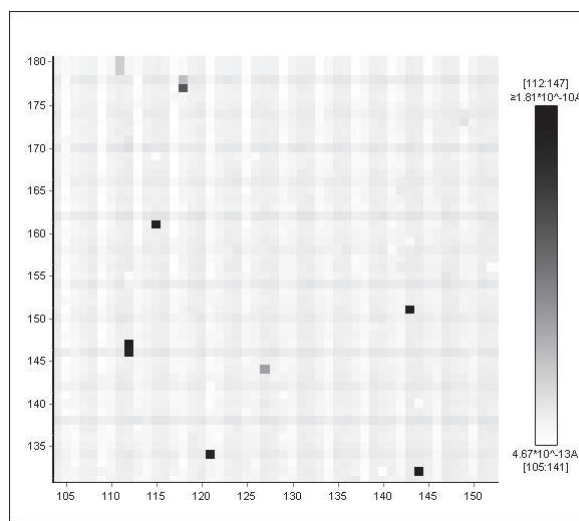


Рис. 2. Распределение значений темнового тока по ФЧЭ матрицы InSb 320x256 (изображен фрагмент матрицы 50x50 элементов). Минимальный темновой ток: $4,67 \cdot 10^{-13}$ А, ФЧЭ [105, 141]. Максимальный темновой ток: $1,81 \cdot 10^{-10}$ А, ФЧЭ [112, 147].

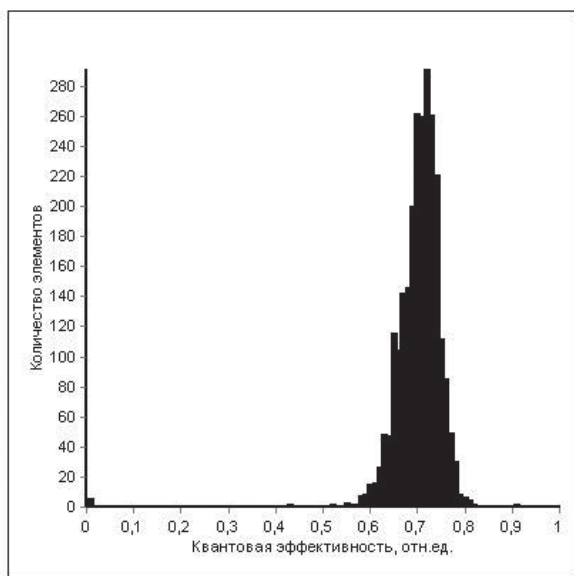


Рис. 3. Гистограмма распределения количества ФЧЭ фрагмента матрицы 50x50 по значениям квантовой эффективности.

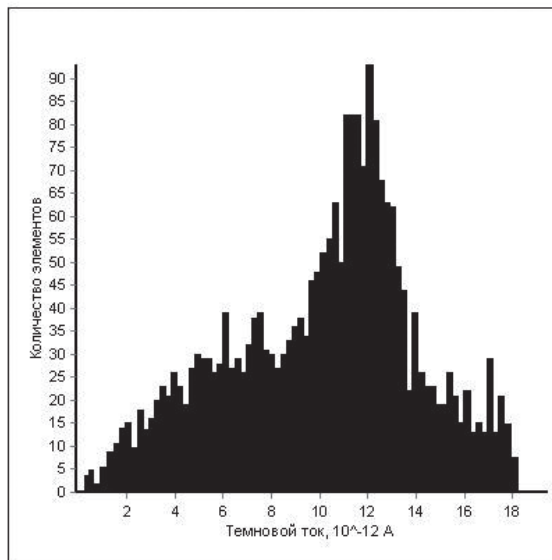


Рис.4. Гистограмма распределения количества ФЧЭ фрагмента матрицы 50x50 по значениям темнового тока.

способность нового метода измерения средней квантовой эффективности и темновых токов в матрицах ФПУ. Представленный метод автоматизирован и позволяет провести измерения без ущерба для МФЧЭ за достаточно короткий промежуток времени.

Практический результат достигается тем, что регистрируют величины сигналов всех ФЧЭ, по крайней мере, при двух заданных температурах фона и двух заданных временах накопления, и по ним автоматически рассчитывают величины квантовых эффективностей и темновых токов всех ФЧЭ.

В результате, зная параметры всех ФЧЭ, можно автоматически получить все параметры МФПУ: пороговую облученность (NEI), пороговую мощность (NEP), удельную обнаружительную способность (D^*), пороговую разность температур (NETD), динамический диапазон, токовую и вольттовую чувствительности, однородность характеристик по площади МФЧЭ и количество дефектных ФЧЭ.

Проведена экспериментальная проверка предлагаемого метода. Полученные результаты свидетельствуют о его работоспособности.

Литература

- 1 Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. – М.: Физматкнига, 2012.
- 2 Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. – М.: Радио и связь, 1992.
- 3 Болтарь К.О., Полунеев В.В., Яковлева Н.И. и др. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 73.
- 4 Shkedy L. et al. // Optical Engineering. 2011. V. 50. No. 6.
- 5 Kozlowski L. J. et al. // Proceedings of SPIE. V. 4130. Infrared Technology and Applications XXVI Conference, July-Aug. 2000. P. 245.
- 6 Norton P. et al. // Proceedings of SPIE. V. 4130. Infrared Technology and Applications XXVI Conference, July-Aug. 2000. P. 226.
- 7 Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
- 8 Патрашин А.И. // Прикладная физика/ 2010. № 2. С. 103.
- 9 Патрашин А.И., Бурлаков И.Д., Лопухин А.А., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 81.
- 10 Патрашин А.И. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 98.
- 11 Патрашин А.И. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.
- 12 Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.
- 13 Patrashin A.I., Ivanov G.A. // Proceedings of SPIE. 1998. V. 3379. P. 555.

Investigation of the IR array element's quantum efficiencies and dark currents measurement method

A.I. Patrashin, I.D. Burlakov, K.O. Boltar, M.D. Korneeva,
A.A. Lopukhin, A.V. Nikonov and N.I. Yakovleva

Orion Research-and-Production Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

The experimental investigation of the IR array element's quantum efficiencies and dark currents measurement method performed with InSb photodiode IR array. This method gives opportunity to receive full set of these important parameters of IR arrays. Measurement method is based on experimental model, which allows calculating signal and noise of detectors. The developed method allows achieving average quantum efficiency and dark current of each photosensitive element of array. It can be used by vendors and consumers of detectors for quality control of devices.

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

Keywords: IR array, signal, noise, background temperature, integration time.