

УДК.621.383.4/5

Метод измерения квантовой эффективности и темнового тока в матричных ФПУ

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

Разработан новый метод определения квантовой эффективности и темнового тока фоточувствительных элементов матричных ФПУ. Метод основан на экспериментально опробованной аналитической модели этих устройств, позволяющей рассчитывать все их параметры, в том числе сигнал и шум приборов. Метод опробован и позволяет получить полный массив величин этих важнейших характеристик в матрицах фоточувствительных элементов. Метод позволяет быстро определить значения средней квантовой эффективности и темнового тока каждого фоточувствительного элемента матрицы и экспрессно квалифицировать качество приборов.

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

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

Введение

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) являются сложными высокотехнологичными устройствами [1, 2]. Они включают матрицу фоточувствительных элементов (МФЧЭ), содержащую, примерно, от 1000 фотодиодов (формат 4×288) [3] до более чем 1000000 фотодиодов (формат 1280×1024) [4], состыкованную поэлементно с интегральным кремниевым мультиплексором, и работают во всех диапазонах спектра, а именно, от 0,25 мкм до более чем 50 мкм. 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 выполняется с помощью кремниевых БИС-мультиплексоров. Современные мультиплексоры-процессоры позволяют также преобразовывать выходной сигнал из аналоговой формы в цифровую и осуществлять предварительную цифровую обработку сигналов [5, 6].

Контроль параметров всех составных частей МФПУ проводится в течение всего процесса его изготовления. Особенно это относится к квантовой эффективности и темновому току фоточувствительных элементов (ФЧЭ) матрицы ФПУ [7]. Эти параметры являются важнейшими и определяют все фотоэлектрические характеристики устройства — пороговую облученность (NEI), пороговую мощность (NEP), удельную обнаружительную способность (D^*), пороговую разность температур (NETD), динамический диапазон, токовую, вольтовую и температурную чувствительности, однородность характеристик по площади МФЧЭ, количество дефектных ФЧЭ [8].

Для качественного МФПУ необходима однородность измеряемых параметров по всем ФЧЭ не хуже 5–10%. Требуется также, чтобы величины темновых токов I_T ФЧЭ не превышали некоторое граничное значение I_0 , а величины квантовой эффективности η были бы не ниже граничного значения η_0 . Все элементы, не удовлетворяющие подобным требованиям, считаются дефектными. Для современных МФПУ количество дефектных элементов не должно превышать величину от 0,1 до 1%.

В настоящей статье описан новый способ контроля величины квантовой эффективности и темнового тока каждого ФЧЭ матрицы, подходящий

Патрашин Александр Иванович, вед. научн. сотруд.¹

Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора¹, профессор².

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор³

Корнеева Марина Дамировна, 1-й зам. генерального директора¹, профессор³

Лопухин Алексей Алексеевич, вед. научн. сотрудник¹

Никонов Антон Викторович, инженер 2-й категории.

Таубкин Игорь Исаакович, главный научный сотруд.¹

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

¹ОАО «НПО «Орион»,

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2,

E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА). Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

³Московский физико-технический институт (МФТИ).

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

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2013 г.

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

также и для определения количества дефектных элементов матрицы.

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_{τ} , 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:

$$U_{Tij} = \frac{I_{Tij} \cdot \tau_0}{C_n}, \quad (1)$$

$$U_{\Phi ij} = \frac{I_{\Phi ij} \cdot \tau_0}{C_n}, \quad (2)$$

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 центра соответствующего ФЧЭ в стандартной матрице следующими соотношениями:

$$K_{npij}(x; y; l; R) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\rho \cdot l^2}{\left[l^2 + (\rho \cdot \cos \varphi - x)^2 + (\rho \cdot \sin \varphi - y)^2 \right]^2} d\rho \cdot d\varphi, \quad (7)$$

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

l — расстояние от диафрагмы до матрицы, см;

R — радиус диафрагмы, см;

r и φ — радиус и угол интегрирования в полярных координатах плоскости диафрагмы.

$N_0(T; \lambda_1; \lambda_2)$ определяется из закона Планка [12]:

$$N_0(T; \lambda_1; \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (8)$$

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:

$$U_{\Phi ij} = M_{1ij}(\tau_0) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_0, T) \cdot \eta_{ij} + U_{0ij}, \quad (9)$$

$$x_i = i \cdot a_x - \frac{a_x}{2} - \frac{a}{2} \quad (3)$$

$$y_j = -j \cdot b_y + \frac{b_y}{2} + \frac{b}{2}, \quad (4)$$

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 (3) и (4) будут другими.

Величина фототока ФЧЭ при стационарном облучении определяется выражением

$$I_{\Phi ij} = N_{\Phi ij}(T) \cdot \eta_{ij} \cdot A_s \cdot q, \quad (5)$$

где N_{Φ} — фотонная облученность в плоскости ФЧЭ, фот \times см $^{-2} \times$ с $^{-1}$; A_s — площадь ФЧЭ, см 2 ; q — заряд электрона, К; η_{ij} — средняя квантовая эффективность ФЧЭ в спектре чувствительности [8].

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

$$N_{\Phi ij}(T) = K_1 \cdot K_2 \cdot K_{npij}(x; y; l; R) \cdot N_0(T; \lambda_1; \lambda_2), \quad (6)$$

где K_{np} ($x; y; l; R$) — 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]:

$$M_{1ij}(\tau_0) = \frac{\tau_0}{C_i}, \quad (10)$$

$$M_{2ij}(\tau_0, T) = A_S \cdot q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_{npj}(x; y; l; R) \cdot N_0(T; \lambda_1; \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_i}, \quad (11)$$

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 — 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:

$$U_{1\Phi ij} = M_{1ij}(\tau_{01}) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_{01}, T_1) \cdot \eta_{ij} + U_{constij} \quad (12)$$

$$U_{2\Phi ij} = M_{1ij}(\tau_{02}) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_{02}, T_2) \cdot \eta_{ij} + U_{constij} \quad (13)$$

$$U_{3\Phi ij} = M_{1ij}(\tau_{03}) \cdot I_{Tij} + M_{2ij}(\tau_{03}, T_3) \cdot \eta_{ij} + U_{constij} \quad (14)$$

Решая данную систему уравнений 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 $T_2 = T_1 + DT$.

Тогда, система уравнений (12) — (14) примет вид:

$$U_{1\Phi ij} = U_{0ij} \quad (15)$$

$$U_{2\Phi ij} = \frac{\tau_0}{C_i} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_{npj}(x; y; l; R) \cdot N_0(T_1; \lambda_1; \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_H} \cdot \eta_{ij} + U_{0ij} \quad (16)$$

$$U_{3\Phi ij} = \frac{\tau_0}{C_i} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_{npj}(x; y; l; R) \cdot N_0(T_2; \lambda_1; \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_H} \cdot \eta_{ij} + U_{0ij}, \quad (17)$$

и сводится к системе двух уравнений с двумя неизвестными:

$$U_{21ij} = \frac{\tau_0}{C_H} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_{np}(x_{ij}; y_{ij}; l; R) \cdot N_0(T_1; \lambda_1; \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_H} \cdot \eta_{ij} \quad (18)$$

$$U_{31ij} = \frac{\tau_0}{C_H} \cdot I_{Tij} + A_S \cdot q \cdot K_{np}(x_{ij}; y_{ij}; l; R) \cdot N_0(T_2; \lambda_1; \lambda_2) \cdot \frac{\tau_0}{C_H} \cdot \eta_{ij}, \quad (19)$$

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

$$\eta_{ij} = \left(\frac{U_{32ij}}{\Delta N_{\Phi ij} \cdot A_S \cdot q} \right) \cdot \frac{C_H}{\tau_0}, \quad (20)$$

$$I_{Tij} = \left[U_{21ij} - \frac{N_{\Phi ij}(T_1) \cdot U_{32ij}}{\Delta N_{\Phi ij}} \right] \cdot \frac{C_H}{\tau_H} \quad (21)$$

Величины U_{21ij} , U_{32ij} , $\Delta N_{\Phi ij}$ в (20) и (21) имеют следующий вид:

$$U_{32ij} = U_{3\Phi ij} - U_{2\Phi ij} \quad (22)$$

$$\Delta N_{\Phi ij} = N_{\Phi ij}(T_2) - N_{\Phi ij}(T_1) \quad (23)$$

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 достаточно точной установкой температур T_1 и T_2 , что вполне 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 АЧТ, чтобы его излучающая поверхность полностью закрыла угол обзора ФЧЭ.

Если размер излучающей поверхности АЧТ D , расстояние от АЧТ до МФЧЭ L , диаметр диафрагмы ФПУ $d = 2 \times R$, диагональ МФЧЭ d_1 и расстояние от МФЧЭ до диафрагмы l связаны соотношением

$$D \geq \frac{L \cdot d + d_1 \cdot (L - l)}{l} \quad (24),$$

или

$$L \leq l \cdot \frac{D + d_1}{d + d_1}, \quad (25)$$

то 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 t_0 на емкостях C_π . 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 участвует 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 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 $U_{\text{const}ij}$. 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, 2, 3 и 4 приведены диаграммы и гистограммы измеренных массивов η_{ij} и I_{Tij} для всей матрицы формата 320x256 ФЧЭ. Гистограммы показывают что среднее значение эффективной величины квантового выхода ФЧЭ составляет, примерно, 0,7, а среднее значение эффективной величины темнового тока ФЧЭ — 1×10^{-11} А, что

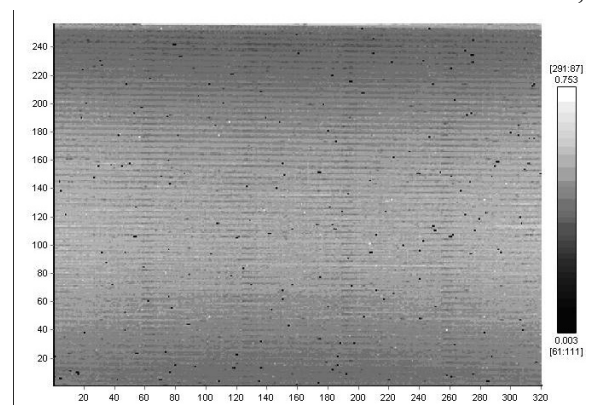


Рис. 1. Распределение значений квантовой эффективности по элементам матрицы InSb формата 320x256. Температура измерений: 301 К (28 °С). Время накопления: 5,4626 мс. Минимальная квантовая эффективность: 0,003, элемент [61:111]. Максимальная квантовая эффективность: 0,753, элемент [291:87].

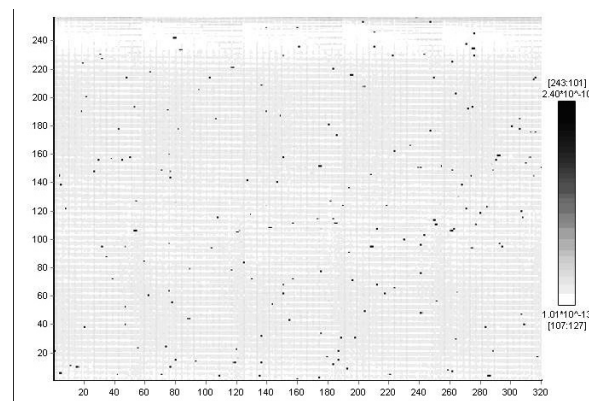


Рис. 2. Распределение значений темнового тока по элементам матрицы InSb формата 320x256. Температура измерений: 301 К (28 °С). Время накопления: 5,4626 мс. Минимальный темновой ток: $1,01 \cdot 10^{-13}$ А, элемент [107:127]. Максимальный темновой ток: $2,40 \cdot 10^{-10}$ А, элемент [243:101]

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.

Увеличенная ширина гистограммы темновых токов МФЧЭ может быть обусловлена 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 — 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 работоспособность 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, 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 и количество дефектных ФЧЭ.

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

Литература

- 1 Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А.. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. — М.; Физматкнига, 2012.
- 2 Тришенков 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. P. 56.

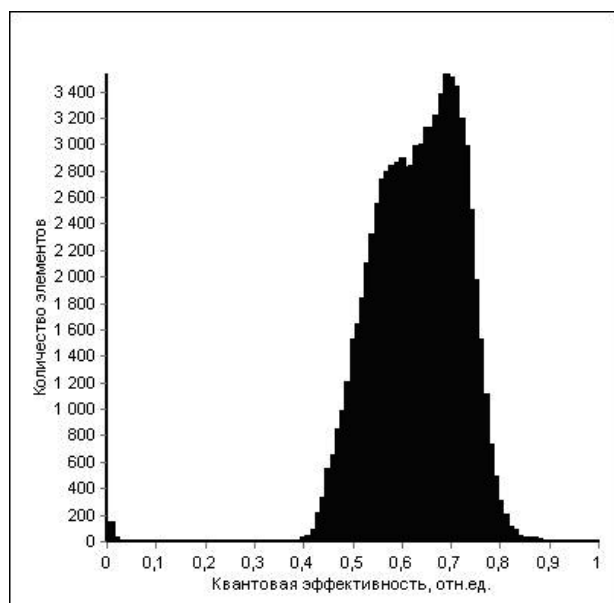


Рис. 3. Гистограмма распределения элементов матрицы по значениям квантовой эффективности.

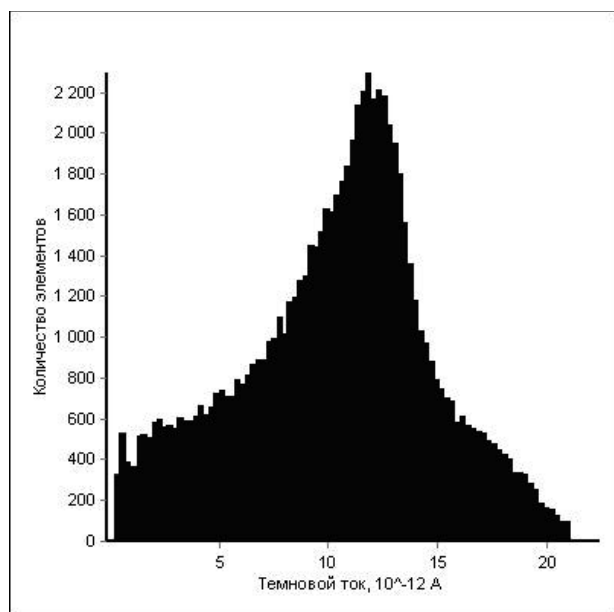


Рис. 4. Гистограмма распределения элементов матрицы по значениям темнового тока.

5 Kozlowski L.J. et al. // Proceedings of SPIE. 2000. V. 4130. P. 245

6 Norton P. et al. // Proceedings of SPIE. 2000. V. 4130. 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

Measurement method of an IR array element's quantum efficiencies and dark currents

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

New determination method of the IR array element's quantum efficiencies and dark currents is developed. The experimental investigation of the IR array element's quantum efficiencies and dark currents performed with InSb photodiode IR array. This method gives opportunity to receive full set of these important parameters of IR arrays. This measurement method is based on analytical model, which allows calculating signal and noise of detectors. The the IR array element's quantum efficiencies and dark currents method allows achieving average quantum efficiency and dark current of each photosensitive element of array. It can use 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.

Bibliography — 13 references

Received November 20, 2013