

УДК 621.383

## Сравнительный анализ методов измерения параметров ФПУ с режимом ВЗН

В. Н. Васильев, И. Ю. Дмитриев, Б. Н. Дрожников, К. В. Козлов,  
П. А. Кузнецов, В. Н. Соляков, В. П. Пономаренко

*В данной работе рассмотрены два метода исследования многорядного фотоприемного устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН), предназначенного для регистрации точечных источников оптического излучения. Первый метод предполагает использование оптико-механической системы сканирования, а также имитатора излучения целевого объекта, второй — равномерную засветку матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) модулированным излучением абсолютно черного тела (АЧТ). Представлена математическая модель ВЗН-ФПУ, позволившая оценить влияние таких факторов, как закон распределения чувствительности по площади ФЧЭ, форму пеленгационной характеристики, передаточную функцию электронного тракта и др., на значения параметров ФПУ. Произведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов. Показано, что значения пороговых характеристик, рассчитанных по каждому из методов, совпадают с учетом значения найденного коэффициента пересчета.*

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

*Ключевые слова:* ФПУ, ВЗН, МФЧЭ, БИС-считывания, ЧКХ, точечный источник

### Введение

Многорядные фотоприемные устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) широко используются для достижения предельных значений по чувствительности и пространственному разрешению [1—6].

В режиме ВЗН сигналы со всех фоточувствительных элементов (ФЧЭ) канала суммируются

последовательно, что позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум (причем в случае идеального ВЗН-суммирования — в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  — количество фоточувствительных элементов в составе ВЗН-канала). К другим преимуществам сканирующего ВЗН-МФПУ (по сравнению с матричным фотодетектором «смотрящего» типа) следует отнести следующие факторы: пониженные требования к дефектности и разбросу чувствительности фоточувствительных элементов (ФЧЭ), возможность увеличения частоты пространственной дискретизации изображения сцены (с помощью топологического перекрытия [7], микросканирования, повышения частоты считывания фотосигналов и т. д.), расширенное поле зрения.

Для оценки качества многорядного фотоприемного устройства используется ряд параметров, в их числе: пороговый поток, пеленгационная, частотно-контрастная (ЧКХ) и передаточная характеристики. Контроль данных параметров в режиме сканирования с имитацией излучения целевого объекта является необходимым этапом испытания прибора. На этапе изготовления предпочтительными являются более простые (и значительно более быстрые) методы контроля. К их числу относится метод измерения пороговых характеристик при равномерной засветке матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) модулированным излучением абсолютно черного тела (АЧТ) (в режиме без оптико-механического сканирования, оптиче-

**Васильев Владимир Николаевич**, начальник лаборатории<sup>2</sup>.  
**Дмитриев Игорь Юрьевич**, начальник отдела<sup>2</sup>.

**Дрожников Борис Николаевич**, начальник подразделения<sup>1</sup>.

**Кузнецов Петр Александрович**, главный специалист<sup>1</sup>.

**Козлов Кирилл Владимирович**, инженер 1 кат.<sup>1</sup>, аспирант<sup>3</sup>.

**Соляков Владимир Николаевич**, главный научный сотрудник<sup>1</sup>, профессор<sup>3</sup>.

**Пonomаренко Владимир Павлович**, главный конструктор по программному и перспективному развитию<sup>1</sup>, профессор<sup>3</sup>, главный конструктор<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>ОАО «НИИ «ОЭП».

Россия, 188540, Ленинградская обл., г. Сосновый Бор, п/я 23.

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер., 9.

<sup>4</sup>АО «Швабе-Фотоприбор».

Россия, 111538, Москва, Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 19 октября 2015 г.

© Васильев В. Н., Дмитриев И. Ю., Дрожников Б. Н.,  
Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н.,  
Пonomаренко В. П., 2015

ская модуляция и ВЗН-суммирование асинхронны) [7]. Другим способом контроля пороговых характеристик чувствительности ВЗН-МФПУ является равномерная засветка МФЧЭ модулированным излучением АЧТ в синхронном с ВЗН режиме (без оптико-механического сканирования, продолжительность входных импульсов равна продолжительности сигналов от малоразмерной цели в режиме сканирования). Данный способ позволяет учесть влияние возможных переходных процессов внутри большой интегральной схемы (БИС) считывания фотосигналов на значения параметров.

Целью данной работы является представление и обсуждение результатов экспериментального и теоретического исследования параметров ВЗН-МФПУ, предназначенного для регистрации малоразмерных источников излучения. В ходе работы проведен сравнительный анализ методов контроля пороговых характеристик прибора.

### Исследуемое МФПУ

Исследуемое в работе крупноформатное ФПУ с режимом ВЗН предназначено для регистрации малоразмерных источников оптического излучения в ИК-диапазоне. Необходимое разрешение видеоизображения обеспечивается благодаря объединению информации с независимых матричных фотоприемных модулей формата  $1024 \times 10$ , расположенных в фокальной плоскости объектива. В качестве фоточувствительных элементов используются фотодиоды на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ) с  $x = 0,39$ . Топология МФЧЭ каждого фотоприемного модуля состоит из 4 субматриц, смещенных друг относительно друга. Расстояния между соседними ФЧЭ в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию, равны соответственно 45 и 60 мкм. Период пространственной дискретизации изображения в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию, равен 15 мкм за счет перекрытия субматриц и трех выборок значений сигналов за время перемещения пятна излучения между соседними ФЧЭ канала.

Режим ВЗН производится в холодной зоне (температура фоточувствительного слоя и БИС равна 165 К). В каждой входной ячейке БИС предусмотрена высокочастотная фильтрация для вычитания неинформативной фоновой составляющей (граничные частоты фильтров равны 35,5 Гц).

### Описание экспериментов

Первый эксперимент [7, 9—11] проводился в режиме без оптико-механического сканирования. При этом МФЧЭ равномерно засвечивалась моду-

лированным излучением АЧТ (частота модуляции составляла 20 Гц, скважность импульсов — 50 %). В ходе данного эксперимента производилось измерение значений порогового потока  $P_{por}$  для каждого из каналов ФПУ.

Значение порогового потока на чувствительный элемент вычислялось в соответствии со следующим выражением:

$$P_{por} = \frac{\Phi_{eff}}{SNR}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{eff}$  — эффективное значение потока на фоточувствительный элемент,  $SNR$  — отношение сигнал/шум на выходе прибора. Эффективное значение потока на чувствительный элемент вычислялось с помощью далее представленных формул:

$$\Phi_{eff} = \Phi \times \varphi, \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{\sigma(\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_0 T_0^4) DA \tau_1}{\pi L^2}, \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) R(\lambda, T_1) d\lambda}{\int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

где  $\Phi$  — полный поток излучения, падающий на один фоточувствительный элемент ФПУ от АЧТ (3) [1],  $\varphi$  — коэффициент использования излучения, определяемый по формуле (4). В представленных формулах использовались также следующие обозначения:

$R(\lambda, T_1)$  — спектральная плотность потока излучения АЧТ при температуре  $T_1$ ;

$\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,669 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;

$S(\lambda)$  — спектральная характеристика чувствительности ФЧЭ;

$\varepsilon_1, \varepsilon_0$  — коэффициенты излучения полости АЧТ и диска модулятора соответственно;

$T_1, T_0$  — температуры полости АЧТ и диска модулятора соответственно;

$D$  — площадь отверстия диафрагмы АЧТ;

$\tau_1$  — интегральный коэффициент пропускания элементов оптической системы;

$A$  — эффективная фоточувствительная площадь ФЧЭ (при расчетах была принята равной 30 мкм);

$L$  — расстояние между диафрагмой АЧТ и плоскостью ФЧЭ;

$\lambda_1, \lambda_2$  — границы спектрального диапазона.

Характерная форма сигналов на выходе ФПУ представлена на рис. 1. Наличие фильтров верхних частот во входных ячейках БИС приводит к зависимости амплитуды выходных сигналов изделия от продолжительности входных воздействий. Так как конечной целью прибора является регистрация малоразмерных объектов, то измеренную ампли-

туду выходных характеристик необходимо умножить на соответствующий коэффициент пересчета [3], определяемый параметрами нерекурсивного ВЗН-фильтра. Теоретически рассчитанное значение данного параметра для исследуемого МФПУ составляет  $\approx 2$ .

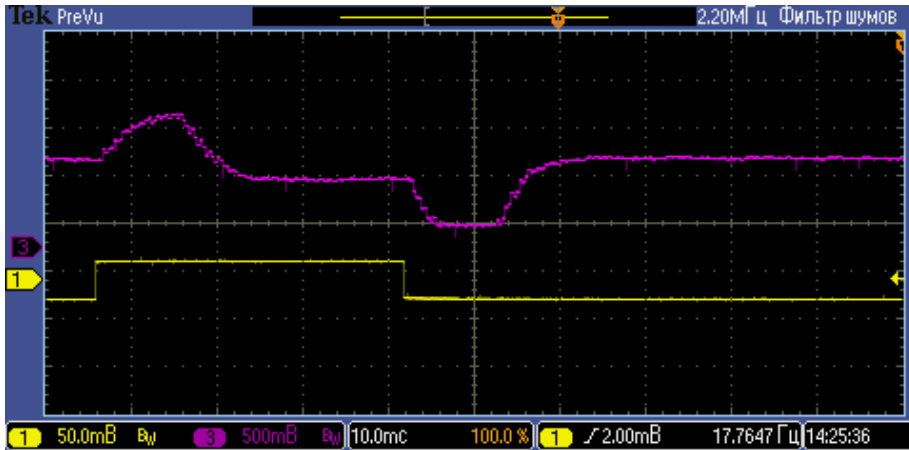


Рис. 1. Выходная реакция (сверху) ФПУ на продолжительный входной импульс (снизу), экспериментальные данные

Во втором эксперименте ФПУ исследовалось в режиме сканирования. Заданное распределение интенсивностей формировалось в плоскости ФЧЭ с помощью оптико-механического тракта, состоящего из линзового объектива, сканера, коллиматора и АЧТ с набором диафрагм. Диаметр пятна излучения, имитирующего целевой объект, был равен  $\approx 30$  мкм (по уровню 80 % функции концентрации энергии). Мощность поглощаемого излучения вычислялась в соответствии с выражением:

$$\Phi_{eff} = \frac{D \tau_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_1) \tau_a(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{F^2} S_L, \quad (5)$$

где использованы следующие обозначения:

$L(\lambda, T_1)$  — спектральная плотность яркости излучения АЧТ при температуре  $T_1$ ;

- $\tau_a(\lambda)$  — спектральная характеристика пропускания атмосферы;
- $S(\lambda)$  — спектральная характеристика чувствительности ФЧЭ;
- $D$  — диаметр диафрагмы АЧТ;
- $\tau_1$  — интегральный коэффициент пропускания элементов оптической системы;
- $F$  — фокусное расстояние зеркала коллиматора;
- $S_L$  — площадь входного зрачка объектива;
- $\lambda_1, \lambda_2$  — границы спектрального диапазона.

Заметим, что значение порогового потока вычислялось по формуле (1).

На рис. 2 представлена реакция системы на сигнал от малоразмерного источника излучения. Отрицательный выброс является результатом дифференцирования сигналов во входных ячейках БИС.

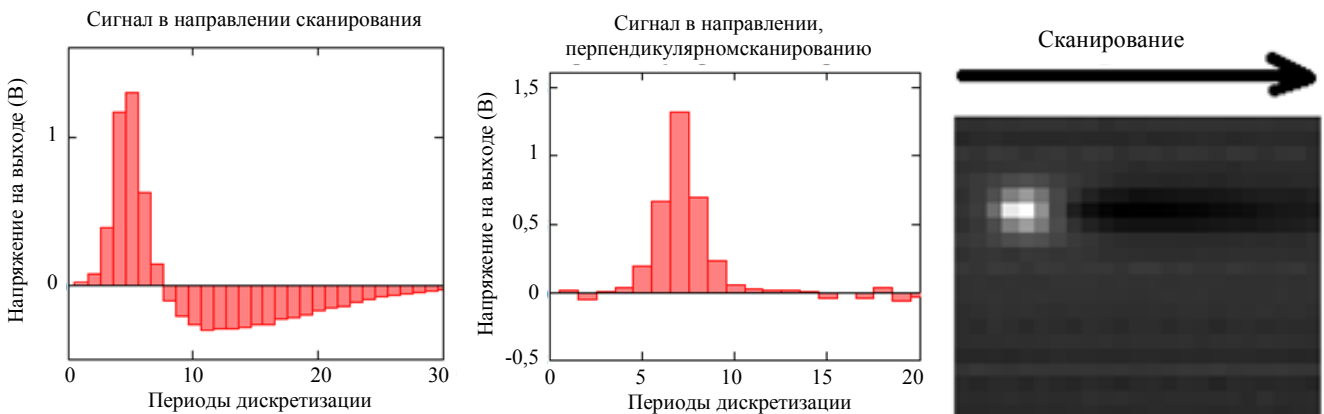


Рис. 2. Сигнал от точечного источника излучения (на равномерном фоне), полученный на основе экспериментальных данных

Оба представленных эксперимента проводились при одних и тех же внешних условиях, таких как: температура МФЧЭ и БИС, значение фоновой облученности МФЧЭ и т. д.

**Модель оптико-электронного тракта МФПУ**

Для корректной интерпретации полученных результатов была разработана математическая модель оптико-электронного тракта ФПУ. Блок схема модели представлена на рис. 3.

В рамках модели тракт формирования видео-изображения был разделен на линейные элементы

(оптическая система, ФЧЭ), и нелинейную БИС-считывания. При расчете импульсных характеристик линейных инвариантных устойчивых систем применялась теория линейной фильтрации [8], являющаяся ветвью Фурье-анализа. С помощью данной теории рассчитаем входной фототок БИС по представленным формулам:

$$z(x, y) = h_{opt}(x, y) \oplus h_{pd}(x, y), \tag{6}$$

$$i_{pd}(x, y) = \frac{z(x, y)}{\max[z(x, y)]} i_{max}. \tag{7}$$

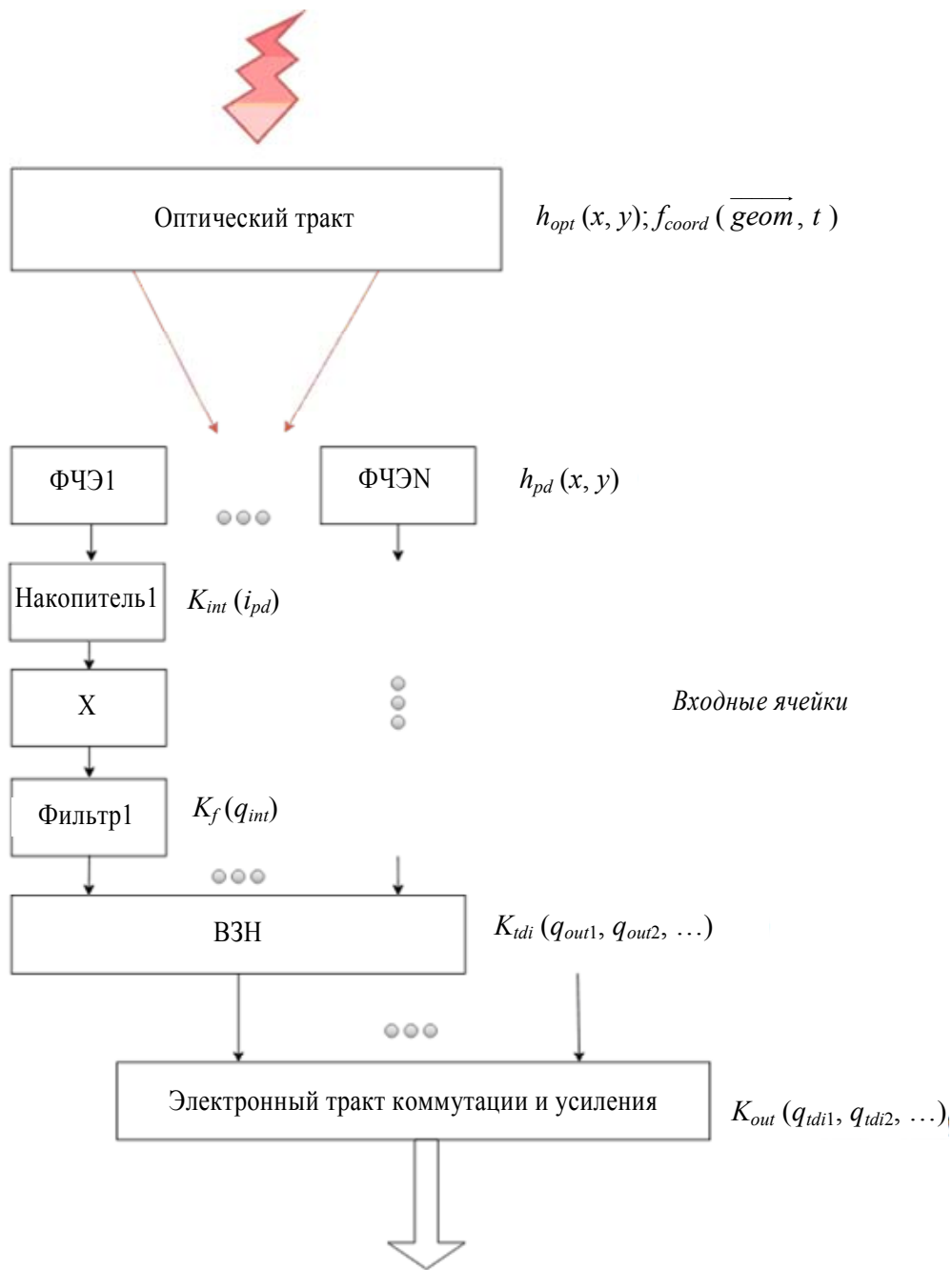


Рис. 3. Модель оптико-электронного тракта ФПУ

В формулах (6) и (7) введены такие обозначения:  $h_{opt}(x, y)$  — импульсная характеристика проекционного объектива (или функция рассеяния точки — ФРТ),  $h_{pd}(x, y)$  — импульсная характеристика ФЧЭ,  $i_{max}$  — входной фототок ячейки БИС при  $z(x, y) \equiv \max[z(x, y)]$ . Для вычисления импульсной характеристики системы «оптический тракт — МФЧЭ» на ЭВМ было использовано свойство Фурье-преобразования свертки функций:

$$h_1 \oplus h_2 = F^{-1}[F[h_1]F[h_2]], \quad (8)$$

где  $F[\alpha]$ ,  $F^{-1}[\alpha]$  — прямое и обратное Фурье-преобразования соответственно.

В рамках модели рассматриваются системы, ограниченные аберрациями (выражение (8) — ФРТ<sub>1</sub>), и системы, ограниченные дифракционным пределом (см. выражение (9) — ФРТ<sub>2</sub>). В выражении (8) принято, что  $x, y$  — линейные координаты в фокальной плоскости объектива,  $R$  — радиус пятна рассеяния (по уровню 0,6 от максимального значения интенсивности). В выражении (9) использованы следующие обозначения:  $J_1$  — первая функция Бесселя (10),  $\eta_x, \eta_y$  — угловые координаты в пространстве изображений. При дальнейших расчетах считается, что пятно излучения распределено по Гауссу.

$$h_{opt}(x, y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2R^2}} \quad (8)$$

$$h_{opt}(\eta_x, \eta_y) = \left(\frac{J_1(2\pi\eta)}{\pi\eta}\right)^2, \quad \eta = \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2} \quad (9)$$

$$J_1(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\cos(\tau - x \sin(\tau))) d\tau. \quad (10)$$

Координата центра изображения в каждый момент времени определяется с помощью функции  $f_{coord}\left(\frac{\text{geom}}{\rightarrow}, t\right)$ , где вектор параметров  $\frac{\text{geom}}{\rightarrow}$  содержит информацию о геометрических параметрах системы, например, таких как положение фоточувствительного слоя относительно зеркала сканера, координаты источника сигналов и т. д.

Импульсная характеристика ФЧЭ определяется в соответствии с выражением (11):

$$h_{pd}(x, y) = 1, \quad \text{если } (|x| \leq pn_x) \wedge (|y| \leq pn_y), \\ \text{иначе } \exp(-\alpha \cdot dist). \quad (11)$$

где  $pn_{x,y}$  — размер  $p$ - $n$ -перехода (в данном эксперименте принят равным 10 мкм по каждому из направлений),  $dist$  — наименьшее расстояние от области  $p$ - $n$ -перехода до точки с координатами  $(x, y)$ ,

$\alpha$  — параметр, определяемый, в первую очередь, диффузионной длиной носителей.

Накопитель описывается с помощью выражения (12), а дискретно-аналоговый фильтр — выражениями (13) и (14):

$$q_{int} \equiv K_{int}(i_{pd}(t)) = \int_{t_1}^{t_1+T_{int}} (i_{pd}(t) + i_T(t)) dt \quad (12)$$

$$Q[n] = Q[n-1] + \frac{C_2 q_{int}[n] - C_1 Q[n-1]}{C_1 + C_2} \quad (13)$$

$$q_{out}[n] \equiv K_f(q_{int}) = \frac{C_2 q_{int}[n] - C_1 Q[n-1]}{C_1 + C_2}, \quad (14)$$

где  $T_{int}$  — время накопления фотосигнала,  $i_T$  — темновой ток,  $n$  — номер цикла накопления,  $Q$  — заряд выходной емкости фильтра,  $C_1$  и  $C_2$  — величины накопительной и выходной емкостей соответственно,  $q_{out}$  — сигнал на выходе фильтра.

В модели реализован ряд режимов ВЗН-суммирования, основанных на реальных схемотехнических решениях, а именно, таких как КМОП ВЗН-регистр, шинно-адресная реализация, цифровое ВЗН-суммирование. Данные алгоритмы подробно изложены в работах [5, 6, 12]. В рассматриваемом ФПУ используется шинно-адресная реализация режима ВЗН.

Элемент со знаком “X”, показанный на рис. 3, представляет особый интерес и будет рассмотрен позже.

### Сравнение методов исследования

Значение порогового потока, измеренное по малоразмерному источнику излучения в режиме сканирования (по рассмотренным методикам), оказывалось в  $\approx 3$  раза хуже соответствующего значения, полученного при равномерной засветке МФЧЭ, тогда как предварительные теоретические расчеты прогнозировали различие результатов не более, чем на 20 % (при диаметре пятна излучения, равном 30 мкм по уровню 80 % энергии). Для разрешения противоречия в первую очередь была проведена оценка размера ФЧЭ. Размер  $p$ - $n$ -перехода был принят равным 10 мкм в обоих направлениях. Значение параметра  $\alpha$  (см. выражение 11) было подобрано таким образом, чтобы обеспечить соответствие экспериментальных и теоретических результатов (таких как пространственное разрешение, пеленгационные характеристики и т. д.) в направлении, перпендикулярном сканированию. Результат представлен на рис. 4 ( $\alpha = 0,2$ ).

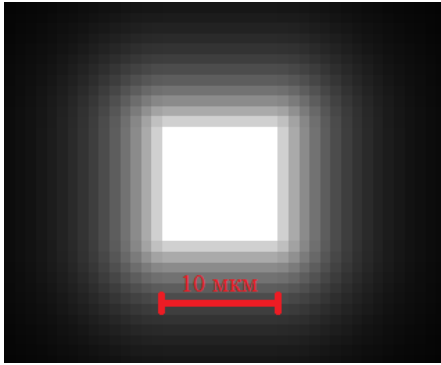


Рис. 4. Распределение чувствительности ФЧЭ, полученное на основе экспериментальных данных

На рис. 5 представлены пеленгационные характеристики ФПУ в направлении, перпендикулярном сканированию. Существенный размер топологии МФЧЭ в направлении сканирования

приводит к повышению требований на точность юстировки экспериментальной системы. Наличие даже малого угла между направлениями сканирования и ВЗН-суммирования приводит к периодическому изменению амплитуды пеленгационной характеристики (рис. 5, а), что может быть причиной ошибочного представления о параметрах прибора. При получении теоретической характеристики (рис. 5, б) величина данного угла была принята равной 2 мрад ( $\approx 6,6'$ ).

Теоретически рассчитанные выходные характеристики ФПУ при засветке МФЧЭ излучением малоразмерного целевого объекта представлены на рис. 6 (траектория движения пятна при сканировании проходит через центры ФЧЭ канала). Следует отметить снижение амплитуды выходных сигналов на 35 % при переходе к реальному распределению чувствительности ФЧЭ.

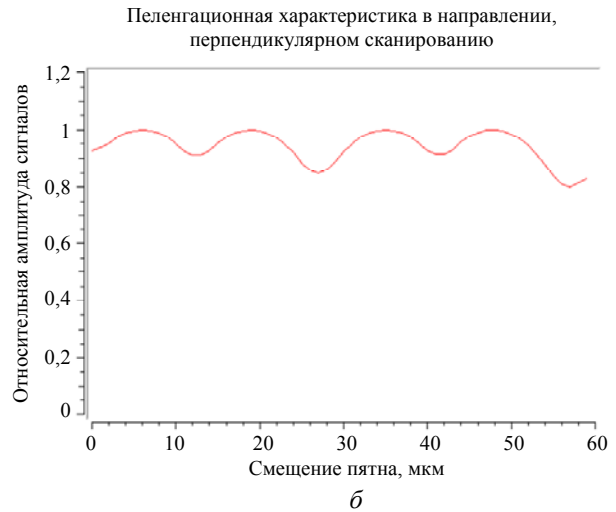


Рис. 5. Пеленгационные характеристики, полученные экспериментально (а) и теоретически (б)

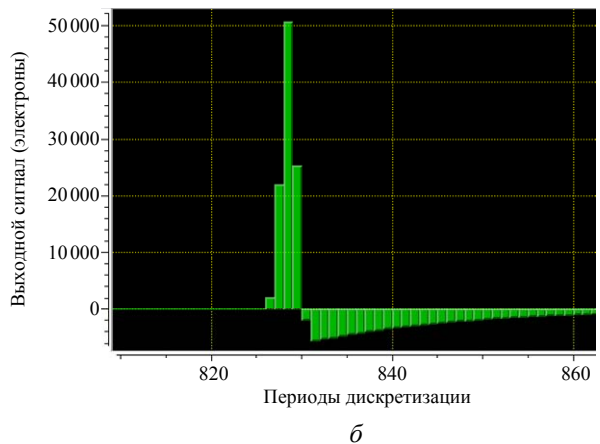
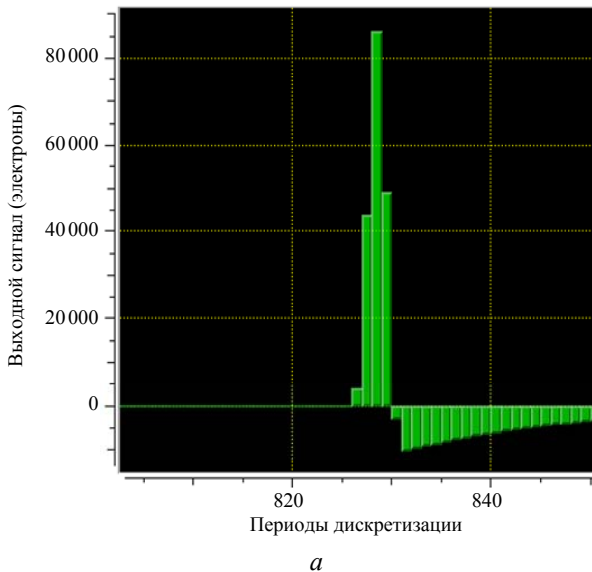


Рис. 6. Сигналы от точечной цели в случае: а — размер ФЧЭ равен 30 мкм, распределение чувствительности равномерное; б — ФЧЭ с неравномерно распределенной чувствительностью,  $pn_{x,y} = 10\text{ мкм}$ ,  $\alpha = 0,2$

Теоретически рассчитанные сигналы ФПУ при равномерной засветке МФЧЭ модулированным излучением представлены на рис. 7. Отметим

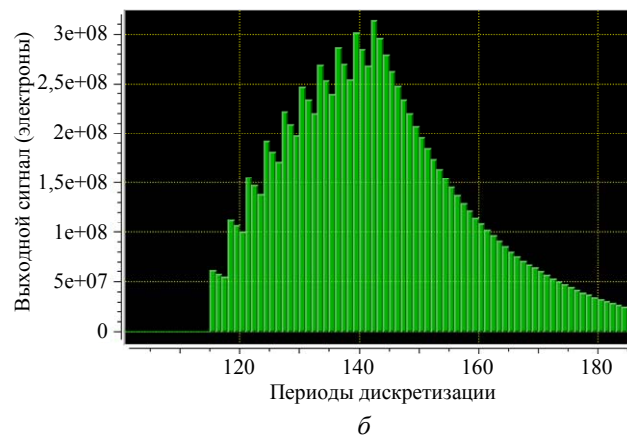
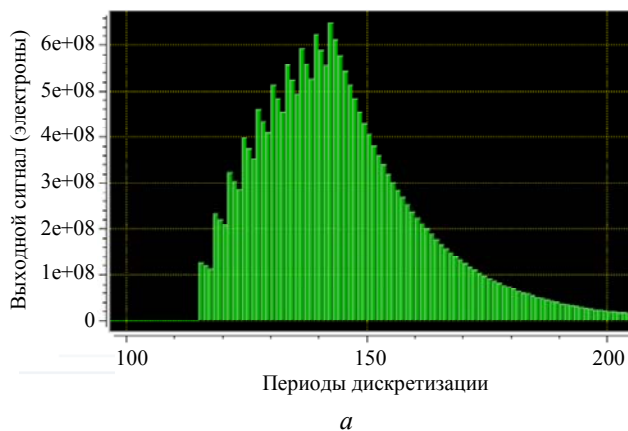


Рис. 7. Реакция на положительный фронт широкого импульса: а — размер ФЧЭ равен 30 мкм, распределение чувствительности равномерное; б — ФЧЭ с неравномерно распределенной чувствительностью,  $p_{x,y} = 10$  мкм,  $\alpha = 0,2$

Амплитуда выходных сигналов в режиме сканирования зависит также от точности юстировки измерительного комплекса (рис. 8), т. к. существует риск попадания в области локальных минимумов, что может привести к ухудшению пороговых характеристик на 30 % и более. Данный эффект также может привести к несоответствию экспериментальных результатов, полученных двумя рассматриваемыми методами.

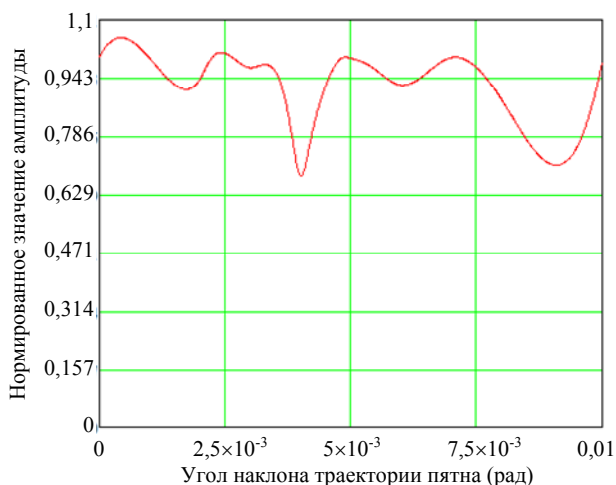


Рис. 8. Полученная теоретически зависимость амплитуды сигнала от угла между направлениями сканирования и ВЗН-суммирования (для точечной цели)

Осуществим сравнение сигналов ФПУ, представленных на рис. 2 и 6. Следует отметить различие характеристик в направлении сканирования с точки зрения ширины импульсов и формы обратных выбросов. Из данного наблюдения следует, что существует неучтенный в модели элемент ФПУ, изменяющий спектральный состав входных

сигналов. Дополним математическую модель, введя описание дополнительного блока, отмеченного на рис. 3 знаком “X”:

$$Q_{out}[n] = \beta(q_{int}[n])(q_{int}[n] + Q_1[n]) \quad (15)$$

$$Q_1[n] = (1 - \beta(q_{int}[n]))(q_{int}[n] + Q_1[n-1]), \quad (16)$$

где  $q_{int}[n]$  — сигнал с интегратора,  $Q_{out}[n]$  — сигнал на выходе блока “X”,  $\beta$  — параметр, зависящий от величины накопленного заряда,  $n$  — номер цикла накопления. Таблица значений параметра  $\beta$  была составлена с помощью экспериментальной характеристики, показанной на рис. 9.

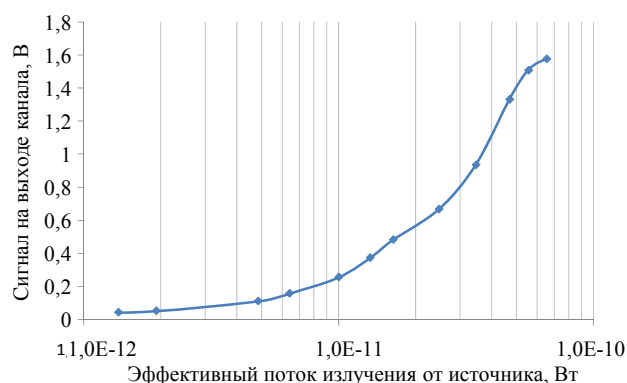


Рис. 9. Функция передачи сигнала канала ВЗН, измеренная по малоразмерному источнику излучения

После добавления элемента “X” в блок-схему модели было получено соответствие экспериментальных и теоретических результатов. На рис. 10, а показана выходная характеристика модели ФПУ с учетом влияния блока “X”, а на рис. 10, б — без его влияния. Следует отметить, что амплитуды

сигналов отличаются в  $\approx 1,8$  раза. Поскольку по своей сути блок ‘X’ является дискретно-аналоговым фильтром нижних частот с автоподстройкой параметров, то влияния на амплитуду широкого импульса он практически не оказывает (что проявляется при измерениях по модулированному излучению черного тела).

Таким образом, различие результатов экспериментов, проведенных по двум рассматриваемым методикам, складывается в первую очередь из следующих факторов: влияния блока ‘X’ (на  $\approx 50\%$ ), на  $\approx 30\%$  — из-за провалов пеленгационной характеристики, неточности юстировки системы, отклонения скорости сканирования от заданного значения. Потери энергии пятна за счет попадания его частей за чувствительную область ФЧЭ компенсируется различием результатов свертки функции сигнального излучения и функции чувствительности ФЧЭ. Итоговый коэффициент пересчета результатов получен равным  $\approx 3$  (т. е. значение поро-

гового потока, полученное в эксперименте ‘по модулированному излучению’, необходимо умножить на 3 для получения соответствующего значения по ‘точечному источнику’). Данная величина согласуется с результатами экспериментальных исследований.

На рис. 10, б представлена частотно-контрастная характеристика ФПУ в направлении сканирования, полученная экспериментально на основе усредненной ступенчатой функции, отраженной на рис. 11, а. Существенное ухудшение пространственного разрешения вызвано наличием блока ‘X’. На рис. 11, а показаны выходные сигналы модели прибора без учета блока ‘X’. Пунктиром показаны ЧКХ, полученные с помощью Фурье-преобразования импульсной характеристики тракта оптическая система — ФЧЭ. На рис. 11, б представлена теоретически рассчитанная ЧКХ с учетом блока ‘X’. Наблюдается совпадение экспериментальных и теоретических результатов (рис. 11 и 12).

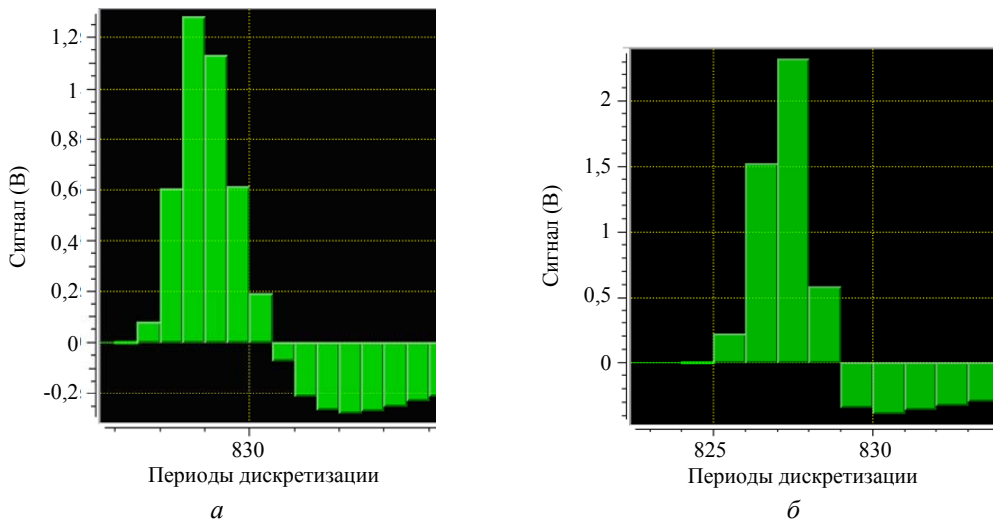


Рис. 10. Выходные характеристики модели при наличии блока ‘X’ (а) и без него (б)

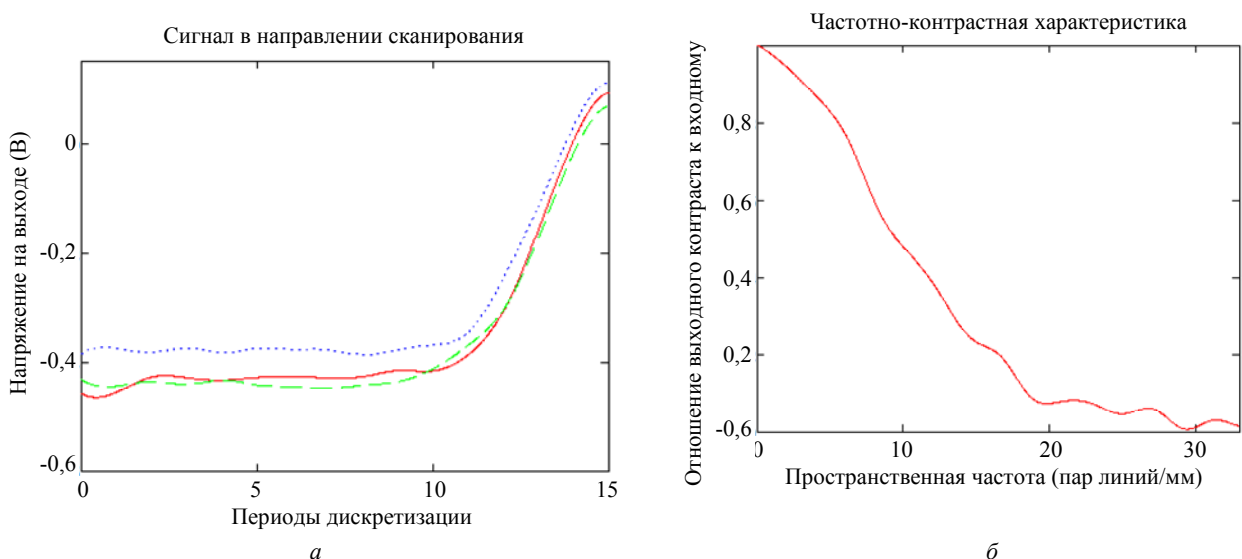


Рис. 11. Экспериментально полученные реакции системы на сигнал от широкой щели (а) и рассчитанная по ним ЧКХ (б)



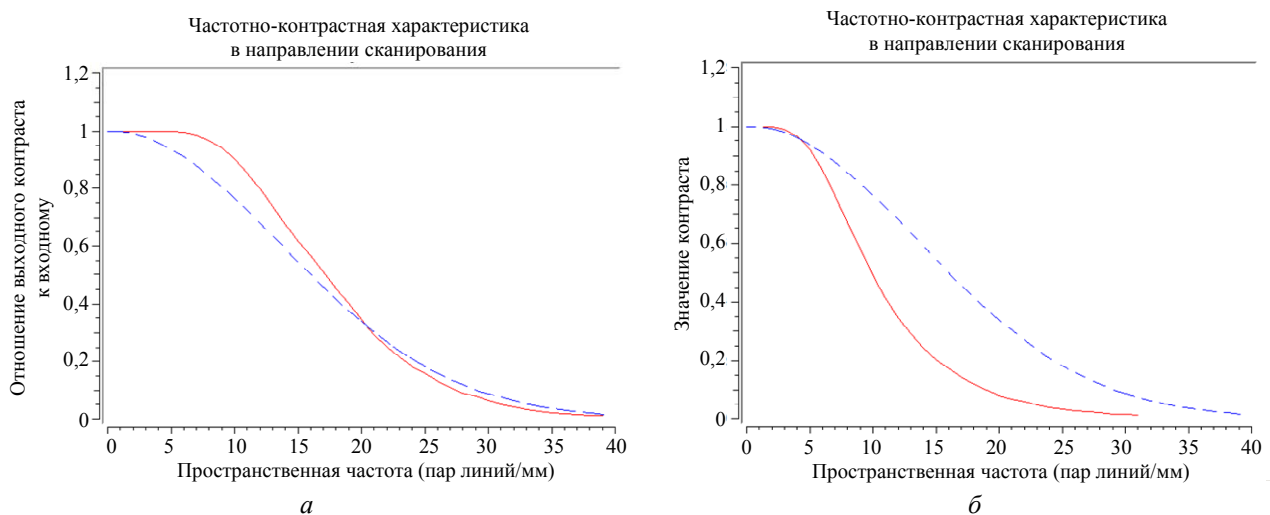


Рис. 12. Частотно-контрастные характеристики, полученные теоретически для системы с учетом блока "X" (б) и без его учета (а)

### Заключение

В данной работе представлены два метода исследования многорядного матричного фотоприемного устройства с ВЗН, а именно, в режиме сканирования с имитатором малоразмерного целевого источника излучения и при равномерной засветке МФЧЭ модулированным излучением черного тела (модулятор и ВЗН асинхронны). Показано, что несоответствие результатов, полученных по точечному источнику и равномерной засветке устраняются при учете реального распределения чувствительности по площади ФЧЭ и нелинейной передаточной характеристики тракта БИС, определен корректирующий коэффициент ( $\approx 3$ ), что позволяет адекватно оценить параметры МФПУ по измерениям при равномерной засветке. Проведен расчет и моделирование частотно-контрастных характеристик прибора.

Для минимизации различия результатов экспериментальных исследований планируется проводить измерения порогового потока при равномерной засветке МФЧЭ в синхронном с ВЗН режиме, причем при продолжительности входных воздействий, соответствующей продолжительности сигналов от малоразмерного источника в режиме сканирования. Это позволит исключить влияние электронного тракта БИС на различие результатов измерений, проводимых по двум методам.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2011.
3. Козлов К. В., Соляков В. Н., Кузнецов П. А. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 55.
4. Соляков В. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 54.
5. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Хромов С. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
6. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 71.
7. Бочков В. Д., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 53.
8. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. Пер. с франц. — М.: Мир, 1988.
9. Кузнецов П. А., Хромов С. С., Зайцев А. А. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95—97.
10. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38.
11. 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.
12. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М. и др. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61.

## A comparative analysis of methods for measuring the parameters of photodetectors with the regime of time-delay and accumulation

V. N. Vasil'ev<sup>2</sup>, I. Yu. Dmitriev<sup>2</sup>, B. N. Drazhnikov<sup>1</sup>, K. V. Kozlov<sup>1,3</sup>,  
P. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, V. N. Solyakov<sup>1,3</sup>, and V. P. Ponomarenko<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association. Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>OEP Research Institute  
Posting Box 23, Sosnovyi Bor, Leningrad Region, 188540, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskii al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>4</sup>Shvabe-Photopribor  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

Received October 19, 2015

**Consideration is given to two methods of investigation of a multirow photodetector with a regime of time-delay and accumulation. The photodetector is intended for registration of the point sources of optical radiation. The methods have been studied experimentally and theoretically. It is shown that values of the threshold characteristics calculated on each method coincide.**

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

**Keywords:** photodetector, time-delay and accumulation, FPA, point source.

### REFERENCES

1. M. A. Trishenkov, *Photoreceiver Devices and CCD* (Radio Svyaz', Moscow, 1992) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. K. V. Kozlov, V. N. Solyakov, P. A. Kuznetsov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 55 (2014).
4. V. N. Solyakov, K. V. Kozlov, and P. A. Kuznetsov, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 54 (2014).
5. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, and S. S. Khromov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 606 (2013).
6. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **3**, 71 (2015).
7. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 53 (2014).
8. Gilbert Gaussorgues. *La Thermographie Infrarouge*. (Lavoisier, Paris; Mir, Moscow, 1988).
9. P. A. Kuznetsov, S. S. Khromov, and Zaitsev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 95 (2012).
10. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 38 (2014).
11. A. I. Patrashin, in *Proc. XX Intern. Conf. Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, 2008), A02.
12. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 61 (2012).

\* \* \*