

УДК 621.383.3/4:521.315.5

Исследование многоядных ФПУ формата 1024×10 на основе КРТ

В.Д. Бочков, Б.Н. Дrajжников, П.А. Кузнецов, К.В. Козлов, В.Н. Соляков

В работе представлена методика измерения фотоэлектрических параметров ФПУ с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) без оптико-механического сканирования. Особенностью ФПУ является наличие отключаемых фильтров верхних частот во входных ячейках большой интегральной схемы (БИС), что позволяет производить вычитание неинформативной постоянной составляющей сигналов. В качестве источника оптического сигнала выступало абсолютно черное тело (АЧТ) с модулятором. Критерием выбора частоты модуляции служил период ВЗН и амплитудно-частотная характеристика ФПУ. Для корректного измерения значений сигналов произведен расчет параметров нерекурсивного ВЗН-фильтра. Значения шумов ФПУ получены вычитанием периодической амплитудной модуляции. Произведен расчет зависимости фоновых облученностей на чувствительный элемент, построена зависимость шумов ФПУ от температуры фона. Вычислены внутренние шумы ФПУ. В конце работы представлены численные результаты измерения параметров.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.— Z

Ключевые слова: ВЗН, ФЧЭ, ФПУ, БИС считывания.

Введение

При разработке и изготовлении многоэлементных ИК-фотоприемников возникает необходимость промежуточного контроля фотоэлектрических параметров фотоприемных устройств (ФПУ) [1–4], которые определяют временные и пространственные характеристики конечных устройств. В числе таких параметров обычно подразумевают следующие: пороговая мощность излучения $P_{\text{пор}}$, удельная обнаружительная способность D^* , вольтовая чувствительность S_v .

В данной работе представлена методика измерения фотоэлектрических параметров ФПУ с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) без оптико-механического сканирования.

Описание ФПУ

Объектом исследования в работе является ФПУ, содержащее фоточувствительные элементы на основе CdHgTe, состыкованные посредством индиевых микроконтактов с кремниевой БИС считывания (рис. 1). Фоточувствительные элементы образуют матрицу из 1024 столбцов (каналов), имеющих по 10 чувствительных элементов в каждом, что позволяет производить суммирование сигналов с каждых 10 элементов в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) в процессе сканирования. Накопление и фильтрация сигналов с каждого чувствительного элемента производится во входных ячейках БИС считывания. В эти ячейки встроен отключаемый фильтр верхних частот. Далее сигналы поступают на матрицу сумматоров, где производится суммирование заряда в режиме ВЗН, после чего сигналы коммутируются на 2 выхода для последующей обработки.

Основная концепция измерений

Для определения фотоэлектрических характеристик исследуемого в работе ФПУ в режиме ВЗН применительно к регистрации точечных источников излучения необходимо создание специализированного измерительного стенда. В состав данного стенда должна входить сканирующая система, источник точечного оптического сигнала, система обработки данных и т. д. При этом расчет фотоэлектрических параметров может быть осу-

Бочков Владимир Дмитриевич, главный специалист¹.

Дrajжников Борис Николаевич, и. о. начальника подразделения¹.

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист¹.

Козлов Кирилл Владимирович, инженер¹, студент магистратуры².

Соляков Владимир Николаевич, д. т. н., главный научный сотрудник¹, профессор².

¹ОАО «НПО «Орион».

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

Телефон: 495–3739400. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

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

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2013 г.

© Бочков В.Д., Дrajжников Б.Н., Кузнецов П.А., Козлов К.В., Соляков В.Н., 2014



Рис. 1. Исследуемое в работе ФПУ

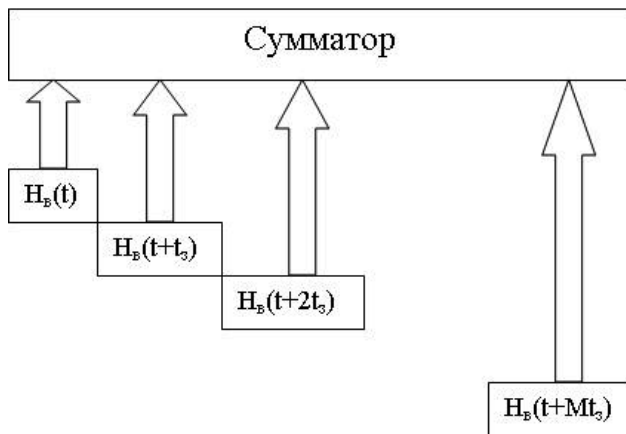


Рис. 2. Схема нерекурсивного фильтра ВЗН на примере одного канала ФПУ.

ществлен непосредственно в режиме сканирования при известных характеристиках падающего на каждый чувствительный элемент излучения. Данный способ измерений сопряжен со значительными трудностями: синхронизация, формирование точечного оптического сигнала и т.д. В представленной работе предлагается метод измерения параметров ФПУ в режиме без сканирования, что существенно снижает сложность используемой измерительной системы. Суть метода заключается в исследовании реакции ФПУ на модулированный оптический сигнал, формируемый абсолютно черным телом (АЧТ) и равномерно засвечивающий матрицу фоточувствительных элементов (ФЧЭ).

Измерение значений сигналов ФПУ

Для расчета фотоэлектрических параметров ФПУ необходимо измерение значений сигналов $U_c^i[k]$ с каждого канала, где i — номер канала ($1 \leq i \leq 1024$), k — номер измерения ($1 \leq k \leq N$), $N \geq 1000$. Под значением сигнала $U_c^i[k]$ подразуме-

вается амплитуда выходного сигнала $U_{c_amp}^i[k]$ с соответствующего канала ФПУ, деленная на коэффициент ослабления h , при равномерной засветке МФЧЭ модулированным излучением абсолютно черного тела с частотой модулятора 20 Гц, т.е. имеем следующее соотношение:

$$U_c^i[k] = U_{c_amp}^i[k] \times \frac{1}{h} \quad (1)$$

Коэффициент ослабления h характеризует ослабление амплитуды входного сигнала в результате воздействия нерекурсивного фильтра ВЗН. Данный фильтр образуется в результате наличия в каждой из входных ячеек мультиплексора фильтра верхних частот и суммирования сигналов с каждого из M элементов канала с задержкой t_3 . Блок-схема фильтра представлена на рис. 2.

Пусть в момент времени $t = 0$ на все чувствительные элементы ФПУ подается одинаковый оптический сигнал. Будем считать фронт нарастания сигнала резким. Тогда в момент времени t значение сигнала на выходе ячейки БИС $U_{\text{вых}}(t)$ вычисляется в соответствии со следующим соотношением:

$$U_{\text{вых}}(t) = KU_{\text{вх}}(0) \cdot e^{-2\pi t f_{\text{тр}}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{тр}}$ — граничная частота ФПУ, равная 35,5 Гц при частоте тактирования ФПУ 1 МГц, $U_{\text{вх}}(0)$ — напряжение на емкости накопления входных ячеек мультиплексора сразу после подачи входного сигнала, K — константа, одинаковая для всех ячеек.

Тогда просуммированный с M входных ячеек сигнал $U_{\text{нр}}$ вычисляется по формуле:

$$U_{\text{нр}} = U_{\text{вых}}(0) + U_{\text{вых}}(t_3) + U_{\text{вых}}(2t_3) + \dots + U_{\text{вых}}((M-1)t_3), \quad (3)$$

где t_3 — время задержки, равное трем периодам опроса матрицы ФЧЭ.

В результате расчетов значение $U_{\text{нр}}$ получено равным $4,99 \cdot KU_{\text{вх}}(0)$.

Значение сигнала при суммировании с ВЗН без учета фильтров верхних частот во входных ячейках вычисляется по формуле:

$$U_{\text{полн}} = MU_{\text{вых}}(0). \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент ослабления h вычисляется как

$$h = \frac{U_{\text{нр}}}{U_{\text{полн}}}, \quad (5)$$

и h в соответствии с соотношением (5) равен в данном случае 0,5.

Измерение шумов ФПУ

В качестве источника оптического сигнала при измерении шумов ФПУ выступает круглая засвеченная заслонка, закрывающая входное окно криостата с ФПУ, и засвечивающая матрицу ФЧЭ

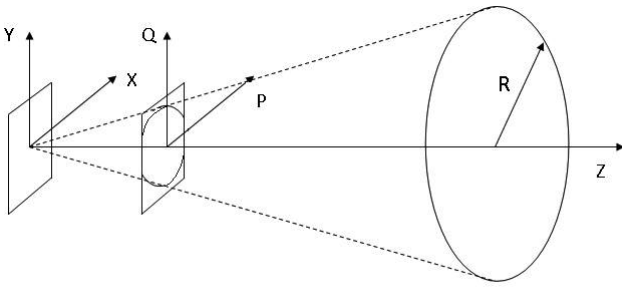


Рис. 3. Система в режиме измерения шумов.

$$U_{ш}^i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} ((U_c^i[k] - U_{c_мод}^i[k]) - \frac{1}{N} \sum_{p=1}^{N-1} (U_c^i[p] - U_{c_мод}^i[p]))^2} \quad (6)$$

где $U_c^i[k]$ — значение сигнала с i -го канала ФПУ, N — количество выборок ($1 \leq N \leq 1000$), $U_{c_мод}^i[p]$ — периодическая функция амплитудной модуляции.

Таким образом вычисляется усредненное по времени значение временных шумов ФПУ с заданного канала. Периодическая функция амплитудной модуляции вводится для компенсации разбросов постоянных составляющих на выходах отдельных сумматоров мультиплексора. Вычисление значений данной функции для каждого из каналов ФПУ производится методом одноточечной коррекции следующим образом: время накопления оптического сигнала входной ячейкой устанавливается минимальным, что имитирует темновую засветку матрицы ФЧЭ. Затем производится многократное считывание значений сигналов с каждого из каналов и усреднение выходных сигналов БИС считывания за большое (более 1000) число периодов опроса матрицы.

После измерения значений шумов был произведен расчет токов фотодиодов матрицы ФЧЭ, при которых данные измерения производились. Ток фотодиода $i_{ФД}$ состоит из темнового тока i_T и тока $i_{Ф}$, возникающего за счет фоновой облученности. Ток $i_{Ф}$ включает в себя две компоненты: $i_{Ф3}$ — ток, вызванный потоком от заслонки, и $i_{Фвн}$ — ток, вызванный облученностью от внутренних частей криостата, т.е. имеем:

$$i_{ФД} = i_{Ф3} + i_{Фвн} + i_T \quad (7)$$

Для дальнейших расчетов был использован коэффициент передачи ФПУ $K_{ФМ}$, (отношение выходного напряжения сигнала к входному току), полученный экспериментально и равный $62 \cdot 10^9$ Ом. Сумма $i_{Фвн} + i_{Ф3}$ была измерена в режиме DC ФПУ (с отключенными фильтрами верхних частот во входных ячейках) при охлаждении заслонки до температур, близких к азотным, и эта сумма оказалась равной 8,1 нА. Затем теоретически были рассчитаны значения облученностей чувствительных элементов от заслонки при различных значениях ее температуры, используя выражения из [17]:

$$P(x, y, L) = AK_{trans}(x, y, L) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)R(\lambda, T)d\lambda \quad (8)$$

$$K_{trans}(x, y, L) = \iint_{S_1} \frac{L^2 dpdq}{\pi[L^2 + (p-x)^2 + (q-y)^2]^2} \quad (9)$$

где A — площадь чувствительного элемента, K_{trans} — коэффициент пропускания диафрагмы, рассчитываемый в соответствии с (9), L — расстояние от плоскости ФЧЭ до диафрагмы, $S(\lambda)$ — спектральная характеристика чувствительности ФЧЭ в относительных единицах, $R(\lambda, T)$ — спектральная плотность потока излучения АЧТ.

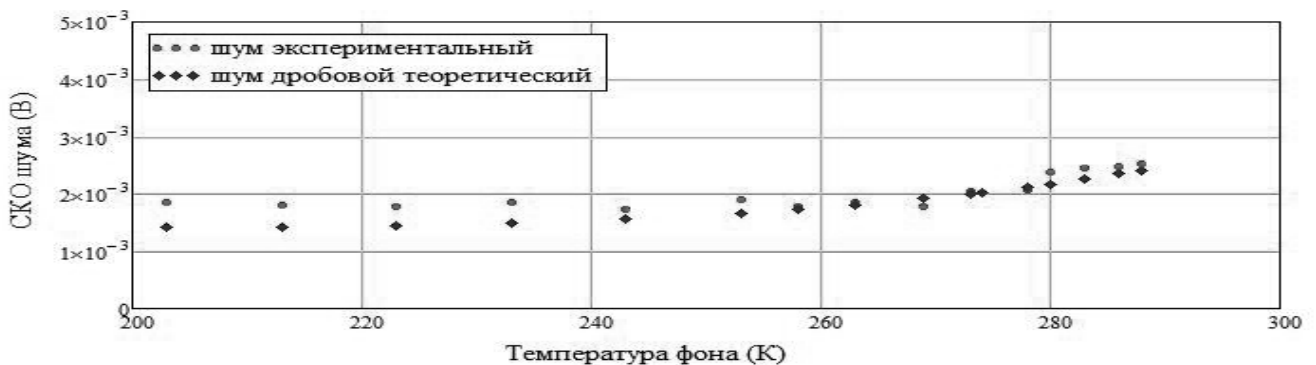


Рис. 4. Зависимости усредненного по каналам значения шума и теоретические расчеты дробового шума на выходе БИС считывания от температуры заслонки.

С помощью этих данных были вычислены и построены зависимости для шумов ФПУ от температуры заслонки (рис. 4).

Измерение параметров С/Ш (SNR), P_{por} , D_i^* , S_V

Параметр сигнал/шум для i — го канала вычисляется из соотношения [18]:

$$SNR_i = \frac{U_c^i}{U_{ш}^i}, \tag{10}$$

где U_c^i — усредненное по количеству выборок значение сигнала, $U_{ш}^i$ — значение шума i — го канала ФПУ.

Параметр P_{por} определяет то значение потока излучения АЧТ на чувствительный элемент, при котором значение параметра SNR системы становится равным 1. Значение порогового потока на чувствительный элемент P_{pori} для i — го канала модуля вычисляется из соотношения:

$$P_{pori} = \frac{\Phi_{э}}{SNR_i} \tag{11}$$

где $\Phi_{э}$ — эффективное значение потока на чувствительный элемент.

Эффективное значение потока на чувствительный элемент имеет размерность Вт/элемент и вычисляется в соответствии с соотношениями:

$$\Phi_{э} = \Phi \times \varphi, \tag{12}$$

$$\Phi = \frac{\sigma(\epsilon_1 T_1^4 - \epsilon_0 T_0^4) \cdot F \cdot A}{\pi \cdot L^2}, \tag{13}$$

$$\varphi = \frac{\int_0^{\infty} S_{отн}(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda}, \tag{14}$$

где Φ — полный поток излучения, падающий на один фоточувствительный элемент ФПУ от АЧТ, определяемый по выражению (13), φ — коэффициент использования излучения, вычисляемый из соотношения (14). Остальные значения определяются следующим образом:

$R(\lambda)$ — спектральная плотность потока излучения, [Вт·см⁻²·мкм⁻¹];

σ — постоянная Стефана-Больцмана, равная 5,669×10⁻⁸ Вт·м⁻²·К⁻⁴;

$S(\lambda)$ — спектральная характеристика ФЧЭ в относительных единицах;

ϵ_1, ϵ_0 — коэффициенты излучения полости АЧТ и диска модулятора, соответственно;

T_1, T_0 — температуры полости АЧТ и диска модулятора, соответственно, [К];

F — площадь отверстия диафрагмы АЧТ, [м²];

A — эффективная фоточувствительная площадь ФЧЭ, [м²];

L — расстояние между диафрагмой АЧТ и плоскостью ФЧЭ, [м²];

$t_{изм}$ — температура модуля, при которой проводились измерения, [°С].

Удельная обнаружительная способность D_i^* i -го канала ФПУ вычисляется из соотношения

$$D_i^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{NEP_i}, \tag{15}$$

где Δf — рабочая полоса частот ФПУ. Следующее соотношение связывает рабочую полосу частот с временем накопления T_H :

$$\Delta f = \frac{1}{2 \cdot T_H}, \tag{16}$$

Вольтовая чувствительность для i -го канала ФПУ вычисляется следующим образом:

$$S_V = \frac{U_c^i}{\Phi_{э}}, \tag{17}$$

Результаты измерений

Параметры измеряемого объекта, а также измерительной системы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры установки и измеряемого модуля

Параметр	Значение
ϵ_1	1
ϵ_0	1
T_1	1000 К
T_0	300 К
F	0,07 мм ²
Φ	900 мкВт
L	26,5 см
φ	0,2
T_H	256 мкс
$t_{изм}$	-103 °С

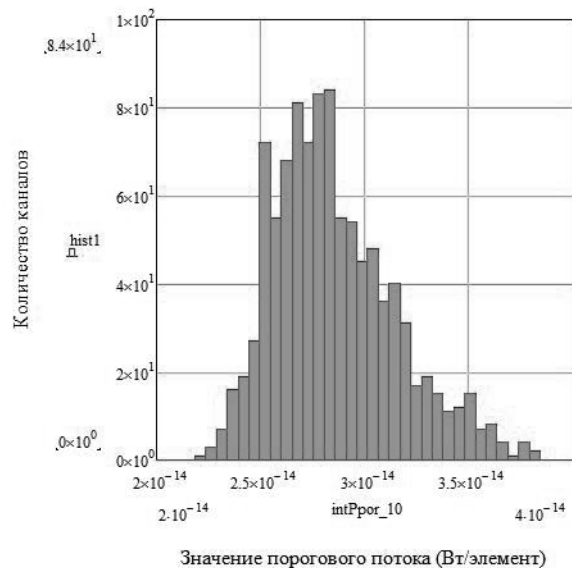


Рис. 5. Гистограмма значений порогового потока.

На рис. 5 представлена гистограмма распределения значений порогового потока в расчете на чувствительный элемент. В таб. 2 приведены усредненные значения фотоэлектрических параметров. Измерение шумов производилось при температуре шторки $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2

Усредненные по каналам значения параметров

Сигнал, В	267,22E-3
$U_{ш_ср}$, В	1,86E-3
$P_{пор}$, Вт/эл	28,84E-15
D^* , Jones	4,67E+12
SNR	144,60E+0
S_p , В/Вт	65,05E+9

Заключение

В данной работе представлен метод и результаты измерения параметров ФПУ с ВЗН с встроенным фильтром верхних частот применительно к регистрации точечных источников излучения без оптико-механического сканирования. В качестве источника тестового сигнала было использовано модулированное излучение АЧТ, интенсивность излучения которого равномерно распределена по площади матрицы ФЧЭ. Влияние фильтра верхних частот учтено расчетным путем. Измерения значений шумов производились при закрытом шторкой входном окне криостата, при этом паразитная амплитудная модуляция выходного сигнала вычиталась по результатам односточечной коррекции. Проведен расчет темновых токов системы, которые составляли 13 пА при температуре фона $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проведена оценка значения дробовых шумов темнового и фонового облучения, которые составляют 1,8 мВ (СКО) в рабочей полосе частот. Вклад внутренних шумов БИС считывания в значения измеряемых параметров составлял не более 8%. В исследованных образцах значение порогового потока составляло менее $3 \cdot 10^{-14}$ Вт/эл при температуре фона $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельная обнаружительная способность D^* составила $4,67 \cdot 10^{12}$ Jones.

Литература

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение.— М.: Мир, 1988.
2. Хадсон Р. Инфракрасные системы.— М.: Мир, 1972.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения.— М.: Мир, 1978.
4. Патрашин А.И., Бурлаков И.Д., Лопухин А.А., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 91
5. Бовина Л.А. и др. // Прикладная физика. 1999. № 4. С. 31
6. Акимов В.М. и др. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 7
7. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы.— М.: Физматкнига, 2005.
8. Бурлаков И.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2007. № 2 С.43.
9. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Филачев А.М., Яковлева Н.И. // Прикладная физика, 2012. № 3. С. 61
10. Кузнецов П.А., Моцев И.С., Хромов С.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
11. Кузнецов П.А., Хромов С.С., Зайцев А.А. // Прикладная физика, 2012. № 5. С. 95
12. Соляков В.Н., Дразников Б.Н., Хамидуллин К.А. и др. // Прикладная физика, 2013. № 6. С. 21
13. Филачев А.М., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О. и др. Фотоприемный модуль формата 1024×10 для приборов космического применения на основе КРТ на область спектра 1–3 мкм. Труды 22 Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22–25 мая 2012 г., Москва, ФГУП «НПО «Орион», с. 22–24
14. Соляков В.Н., Дразников Б.Н., Хамидуллин К.А., Лазарев П.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 506.
15. Martin R.J., Riley G.E. // Proc. of SPIE. 1988. V. 930. P. 26
16. Мазин М.Г., Лазарев П.С., Деева Г.Г., и др. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 98
17. 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.
18. Бочков В.Д., Бычковский Я.С., Дразников Б.Н. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1, № 2. С.231

Investigation of 10x1024 MCT SWIR TDI FPA

V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, K. V. Kozlov, and V.N. Solyakov

Orion Research-and-Production Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111132, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

Received December 10, 2013

This article contains the method of calculating the main parameters of TDI FPA without using a scanning system. The main feature of this FPA is a high pass filter in each readout cell which subtracts informative constant part of a signal. Test optical radiation was formed by the black body with modulator. The modulation frequency in our measurement system was 20Hz. The criterion of choosing the modulation frequency was the TDI period and the amplitude-frequency characteristics of the FPA. In order the measurements were made correctly, the characteristics of nonrecursive filter were used. The values of noise were obtained by subtraction the periodical amplitude modulation. All parts of radiation have been calculated, and the photodiodes currents, which corresponds them are showed. The value of shot noise, which is caused by the dark photodiode current and the internal radiation is 1.8 mV in our system. The internal FPAs' noise has been measured. The value of it was 0.75 mV (RMS) and the physical nature — mainly kTC. The main parameters of the FPA have been calculated. The mean value of the noise equivalent photocurrent is $2.8 \cdot 10^{-14}$ W/pixel.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.— Z

Keywords: TDI, FPA, photodetector, multiplexer

References

1. Gilbert Gaussorgues. *La Thermographie Infrarouge*. (Lavoisier, Paris; Mir, Moscow, 1988).
2. Richard D. Hudson, *Infrared System Engineering* (Wiley-Interscience, 1969; Mir, Moscow, 1972).
3. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
4. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 91 (2012)
5. L. A. Bovina et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 31 (1999)
6. V. M. Akimov et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 7 (2005)
7. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physiqal Base* (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
8. I. D. Burlakov, V. P. Ponovarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 43 (2007)
9. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev., et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 61 (2012)
10. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1** (5), 606 (2013)
11. P. A. Kuznetsov, S. S. Khromov, and A. A. Zaitsev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 95 (2012)
12. V. N. Solyakov, B. N. Deazhnikov, K. A. Khamidullin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 21 (2013)
13. A. M. Filachev, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, et al. in *Proc. 22nd Intern. Conf. Photoelectronics* (Orion R&P Association, Moscow, May22–25, 2012), pp. 22–24.
14. V. N. Solyakov, B. N. Deazhnikov, K. A. Khamidullin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 506 (2013)
15. R. J. Martin and G. E. Riley, *Proc. SPIE* **930**, 26 (1988).
16. M. G. Mazin, P. S. Lazarev, G. G. Deeva, ey al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 98 (2012)
17. A. I. Patrashin, in *Proc. XX International Conference on Photoelectronics* (Orion R&P Association, Moscow, 2008), A02.
18. V. D. Bochkov, Ya. S. Bychkovskii, B. N. Drazhnikov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 231 (2013)