

УДК 621.383

## Фотоприемный модуль для сверхмногоканального ФПУ, работающего в спектральном диапазоне 2–3 мкм

П.А. Кузнецов, И.С. Мощев

*Совершенствование оптико-электронных систем космического базирования обусловлено применением новых способов построения фотоприемных устройств (ФПУ): внедрение больших интегральных схем обработки и считывания фотосигналов; изготовление новых фоточувствительных структур на основе материала КРТ, имеющих высокую обнаружительную способность (не менее  $2 \cdot 10^{12}$  Вт·см·Гц<sup>1/2</sup>) в спектральном диапазоне 2–3 мкм и при температурах выше 160 К; снижение шага следования каналов и увеличение формата ФПУ. В данной работе представлен фотоприемный модуль формата 1024x10 для сверхмногоканального ФПУ, работающего в спектральном диапазоне 2–3 мкм при температуре 165–170 К. Достигнутое значение пороговой мощности излучения не превышает  $3 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup> на длине волны 2,8 мкм, что на порядок лучше полученных значений в ФПУ предыдущего поколения.*

PACS: 85.60.Dw

Ключевые слова: БИС считывания, КРТ, ВЗН

### Введение

Фотоприемный модуль (ФПМ) формата 1024x10 применяется в сканирующих оптико-электронных системах пеленгации точечных источников излучения в спектральном диапазоне 2–3 мкм и с пороговой мощностью не более  $3 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>. Основными элементами ФПМ являются матрица КРТ-фотодиодов ( $x = 0,39–0,40$ ) формата 1024x10 и большая интегральная схема считывания (БИС считывания) фотосигналов, работающая в режиме временной задержки и накопления (ВЗН).

КРТ-фотодиоды имеют ряд преимуществ перед фоторезисторами из PbS, применяемыми в ФПУ предыдущего поколения [1]. Конструктивная особенность ФПМ состоит в асимметричном расположении кристалла фотоприемника относительно кристалла БИС считывания, что дает возможность каскадирования ФПМ при построении сверхмногоканального ФПУ. Для улучшения пеленгационной характеристики в ФПМ применяется специальная безззорная топология фоточувствительных элементов, позволяющая получить пространственное разрешение 15 мкм. Ближайшим зарубежным аналогом является ФПМ формата 768x6 средневолнового ИК-диапазона (Lockheed

Martine Imaging Systems) для инфракрасных систем космического базирования (SBIRS) [2].

Целью данной работы является исследование характеристик фотоприемного модуля формата 1024x10 для сверхмногоканального ФПУ, работающего в спектральном диапазоне 2–3 мкм.

### Схемотехника и функционирование БИС считывания

#### Структурная схема БИС считывания и основные параметры

Структурная схема БИС считывания содержит следующие основные узлы (рис.1):

- матрица накопительных ячеек 1024x10, состоящая из 4-х массивов 256x10 с относительным сдвигом 15 мкм;
- реверсивный сдвиговый регистр опроса накопительных ячеек;
- матрица ВЗН-сумматоров 1024x28;
- формирователь фаз ВЗН;
- 16 коммутаторов каналов 64x1, 2 коммутатора 8x1
- 512-разрядный сдвиговый регистр считывания сигналов;
- память кодов деселекции 512x20 бит;
- 512-разрядный сдвиговый регистр адреса кода деселекции;
- 2 мощных выходных буфера.

Основные функции, выполняемые аналоговой частью БИС считывания, можно охарактеризовать следующим образом: сопряжение с фоточувствительным элементом (ФЧЭ) через индиевые микроконтакты и подача на ФЧЭ рабочего напряжения

Кузнецов Петр Александрович, гл. специалист.

Мощев Иван Сергеевич, инженер.

ОАО «НПО «Орион».

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

Тел.: (8499) 374–47–60. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 1 марта 2014 г.

© Кузнецов П.А., Мощев И.С., 2014

смещения; интегрирование входного тока от ФЧЭ по схеме буферной прямой инжекции; вычитание постоянной и низкочастотной составляющих из входного тока, т.е. проведение ВЧ-фильтрации входного сигнала; усиление накопленного заряда; отключение сигнала от любого ФЧЭ при наличии в нем дефекта (деселекция дефектов) с помощью ввода управляющего цифрового кода; временная задержка и накопление сигналов от 10 ФЧЭ в специальных устройствах — сумматорах заряда — и повышение отношения сигнал/шум в  $10^{1/2}$  раз, а также снижение в  $10^{1/2}$  раз разброса вольтовой чувствительности каналов фотоэлектронного модуля (ФЭМ); преобразование суммарного заряда в сигнал напряжения; мультиплексирование каналов на информационные выходы БИС считывания.

Основные параметры БИС:

- шаг каналов — 15мкм;
- тип входа — буферная инжекция (BDI);
- режим работы — snapshot + ВЗН;
- период строки  $T_{стр} = 261$  мкс;
- задержка между ВЗН-суммированиями — 3 периода строки;
- частота опроса каналов  $f_{опр} = 2$  МГц;
- количество информационных выходов — 2;
- рабочая полоса частот: 35Гц — 2 кГц (режим АС), 0 — 2 кГц (режим DC);
- накопительная емкость 0,03 пФ;
- приведенный ко входу шум  $20e$  ( $T_{раб} = 165$  К);
- коэффициент преобразования входного заряда — 40 мкВ/е;
- потребляемая мощность: 30 мВт при  $V_{пит.} = 3,3$  В;
- максимальная емкость нагрузки — 100пФ;

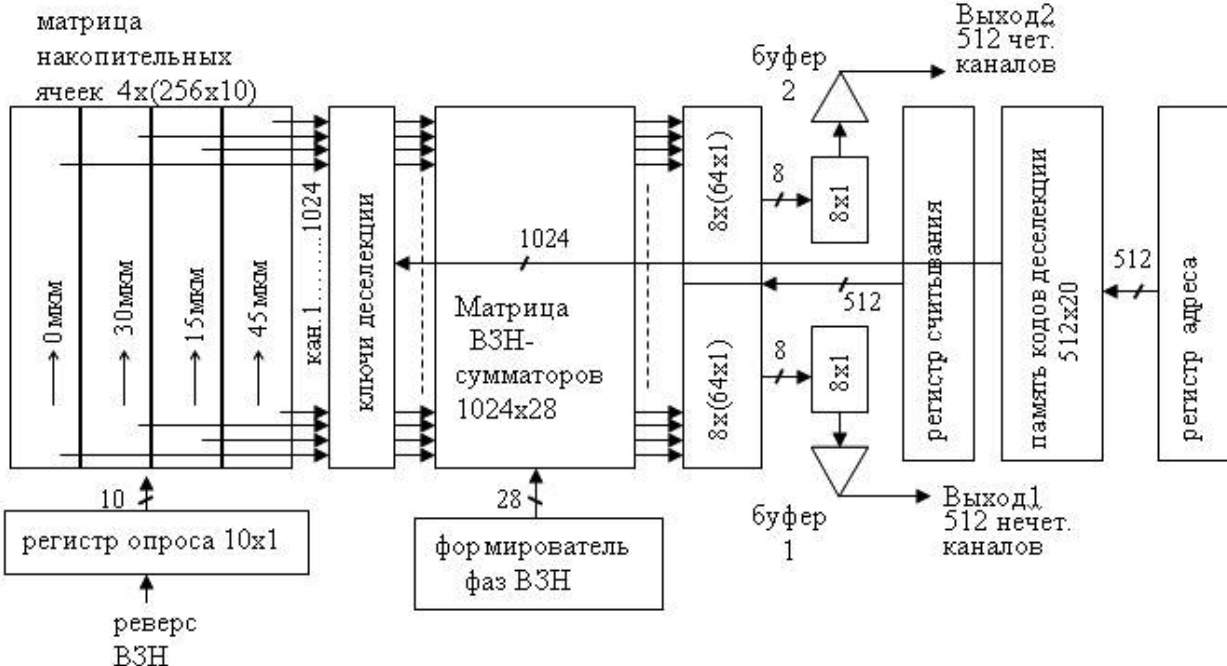


Рис. 1. Структурная схема БИС считывания формата 1024x10

Дополнительные функции: программирование кодов деселекции, реверс ВЗН, переключение в режим по постоянному току (DC).

**Особенности функционирования накопительной ячейки в условиях сверхнизкого фона**

Фоточувствительные элементы (КРТ-фотодиоды с  $x = 0,39-0,40$ ), работающие в спектральном диапазоне 2,6—2,9 мкм, являются источниками сверхнизкого фонового тока (включая темновой ток) порядка  $(1-5) \cdot 10^{-12}$  А при  $T_{раб} = 165$  К. Применение схемы прямой инжекции (DI) при таких токах является крайне неэффективным из-за низкого динамического коэффициента инжекции [3] схемы DI, который определяется как отношение приращения тока, проинтегрированного накопительной емкостью в течение времени  $t_{int}$ , к приращению тока фотоприемника:

$$\eta(t) = \Delta I_{int} / \Delta I_{pd}$$

Ток перезаряда накопительной емкости  $\Delta I_{int}$  зависит от тока перезаряда входной емкости схемы DI, в основном, емкости  $C_{pd}$  p-n-перехода КРТ-фотодиода, и равен:

$$\Delta I_{int} = \Delta I_{pd} (1 - \exp[-t/\tau]),$$

где  $\tau$  — постоянная времени перезаряда цепи. При этом входная емкость — входное сопротивление DI. Поскольку входной МОП-транзистор находится в глубоком подпороговом режиме, его входное дифференциальное сопротивление определяется как [3]:

$$r_{in} = 1/g_m \approx 2\phi_1/I_s$$

где  $g_m$  — крутизна МОП-транзистора,  $\phi_T = kT/q$  — температурный потенциал,  $I_s$  — ток истока, равный постоянной (фоновой) составляющей фототока. Тогда динамический коэффициент инжекции равен:

$$\eta(t) = 1 - \exp[-t/\tau] = 1 - \exp[-tI_s/2\phi_T C_{pd}].$$

Принимая  $C_{pd} = 0,05$  пФ (типичное значение для элемента с эффективной площадью  $30 \times 30$  мкм<sup>2</sup> [10, 11]),  $I_s = 3$  пА,  $t = t_{int} = 250$  мкс,  $T_{paб} = 165$  К, получим  $\eta(t_{int}) = 0,15 \ll 1$ . При работе в спектральном диапазоне 2–3 мкм КРТ-фотодиоды имеют очень высокое [4], порядка  $10^{11}$  Ом, динамическое сопротивление, поэтому коэффициент инжекции по постоянному току  $\eta_0 = R_{pd} / (1 + g_m R_{pd})$  близок к единице и в расчетах не учитывался.

В связи с крайне низкой эффективностью инжекции схемы DI при малых временах накопления, в схеме накопительной ячейки (рис. 2)

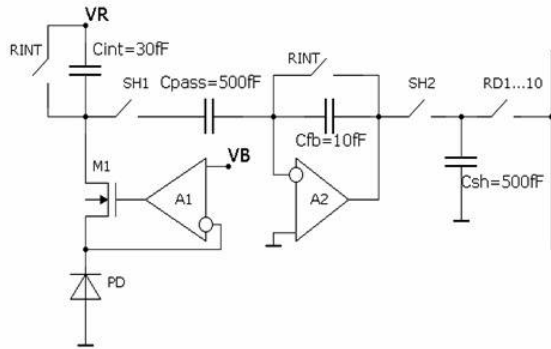


Рис. 2. Структурная схема накопительной ячейки с BDI входом.

применен входной каскад с буферной прямой инжекцией (BDI), включающей дополнительный дифференциальный усилитель A1. Проведено сравнительное моделирование работы 2-х типов ячеек (рис. 3), подтвердившее значительное увеличение эффективности инжекции в схеме BDI при имитации на входе пары коротких импульсов фототока с длительностью 300 мкс (по уровню 0,5) и амплитудой 3 пА.

Увеличение эффективности инжекции фототока не решает полностью проблему малого заряда, собираемого накопительной емкостью в течении времени  $t_{int}$ . В отличие от «смотрящих» матриц, в сканирующих системах максимальное время накопления имеет принципиальное ограничение [5]:

$$t_{int} \leq \delta_x / V_{sc},$$

где  $V_{sc}$  — скорость сканирования,  $\delta_x$  — пространственное разрешение вдоль сканирования.

Величина накопленного заряда при токе фотоприемника  $I_{pd} = 3$  пА и времени накопления  $t_{int} = 250$  мкс равна  $N_q = I_{pd} t_{int} = 7,5 \cdot 10^{-16}$  Кл  $\approx 5 \cdot 10^3 e$ . Полученная величина на 3 порядка ниже типового значения накопленного заряда в «смотрящих» матрицах средне- и длинноволнового ИК-диапазонов. Последующее ВЗН-суммирование увеличивает заряд в 10 раз до  $50 \cdot 10^3 e$ , но не является достаточным. Поэтому в каждой накопительной ячейке проводится дополнительное усиление заряда, причем только его переменной (сигнальной) составляющей. Для этого в схему ячейки вводятся следующие элементы: трансимпедансный усилитель A2 с емкостью преобразования  $C_{fb} =$

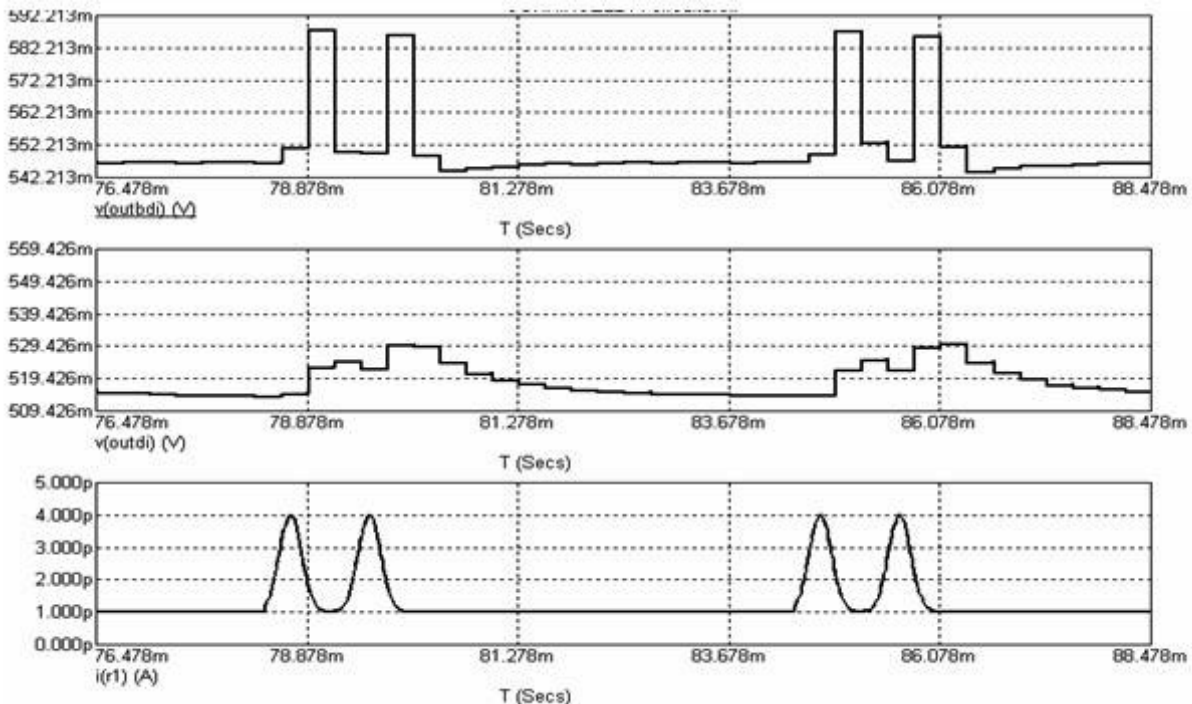


Рис. 3. Выходной сигнал накопительной ячейки: с BDI (верхняя диаграмма), с DI (средняя диаграмма); входной фототок (нижняя диаграмма).

10 фФ, фильтр высоких частот на переключаемом конденсаторе  $C_{\text{pass}} = 0,5$  пФ и ключе SH1, схема усиления и хранения заряда на конденсаторе  $C_{\text{sh}} = 0,5$  пФ и ключе SH2. Коэффициент усиления переменного заряда определяется из соотношения

$$K_q = C_{\text{sh}} / [C_{\text{fb}} (1 + C_{\text{int}} / C_{\text{pass}})] \approx \approx C_{\text{sh}} / C_{\text{fb}} \quad (\text{при } C_{\text{int}} \ll C_{\text{pass}})$$

и при выбранных номиналах составляет  $\approx 50$ . Полученный заряд последовательно считывается ключами RD1... RD10 в матрицу ВЗН-сумматоров, где происходит его десятикратное увеличение. В результате, усиление сигнального заряда после его первичного накопления составляет 500, при этом усиление шумового заряда, ввиду его случайного характера, будет  $50 \cdot 10^{1/2} = 160$ . Величина шумового заряда после первичного накопления фототока составляет  $n_{\text{pd}} = N_q^{1/2} = 70 e$ , и, с учетом  $kTC$ -шума накопительной емкости  $n_{\text{кТС}} = 50 e$  (при  $T = 165$  К), полный шум накопительной ячейки равен  $n_{\text{tot}} = 85 e$ . Выходное напряжение шума (СКО-шума) схемы ВЗН на суммирующей емкости 2 пФ составляет  $(85 e) \cdot 160 / (2 \text{ пФ}) = 1,1$  мВ. Данный уровень СКО-шума позволяет проводить подключение выходов БИС к АЦП с разрядностью не менее 12 бит без дополнительного блока сопряжения.

### Реализация режима ВЗН

Режим ВЗН является эффективным способом увеличения времени накопления без ухудшения пространственно-временного разрешения ФПУ. Суть его состоит в запоминании и суммировании сигналов от  $n$  фотоприемников, расположенных в направлении сканирования изображения [6, 7]. В фотоприемных устройствах, реализованных по этому принципу, появляется ряд преимуществ:

- возрастает отношение сигнал/шум в  $n^{1/2}$  раз независимо от вида шумового спектра, а также в условиях ограничения фоном;
- уменьшается в  $n^{1/2}$  раз разброс чувствительности по каналам ФПУ;

- производится исключение дефектных фотоприемников в процессе суммирования сигналов.

При разработке БИС считывания 1024x10 применялась схема ВЗН шинно-адресного типа (рис. 4), которая дает следующие преимущества [8]:

- возможность построения каналов ВЗН с малым шагом — 15мкм;
- отсутствие «размытия» коротких импульсов сигнала.

Для улучшения пространственного разрешения производится суммирование сигналов от накопительных ячеек INT1... INT10 с коэффициентом передискретизации 3. Это означает, что для реализации ВЗН необходимо использовать 28 сумматоров заряда S1... S28 ( $9 \times 3 + 1 = 28$ ). Для значительного снижения количества сигнальных шин, и, следовательно, снижения ширины каналов, используется последовательное считывание сигналов накопительных ячеек через шины 10x1, 1x28 и буфер тока BI. Буфер тока также служит для динамической деселекции сигналов накопительных ячеек с дефектными ФЧЭ, т.е. цифровые импульсы из памяти кодов деселекции DES приходят синхронно с сигналами накопительных ячеек таким образом, что при низком логическом уровне импульса DES происходит закрытие буфера тока, а при высоком — открытие. Заряды, просуммированные в течении 28 периодов строчных тактов, считываются преобразователем заряд-напряжение  $V/Q$  через шину 28x1 и далее мультиплексируются на выходы БИС считывания.

### Результаты исследования ФПМ формата 1024x10

Разработанный ФПМ формата 1024x10 был исследован по следующим направлениям:

- измерение пороговой мощности излучения с  $\lambda_{\text{max}} = 2,8$  мкм при различных температурах фона;
- формирование ВЗН-сигнала от импульсного источника оптического излучения;
- деселекция дефектных ФЧЭ.

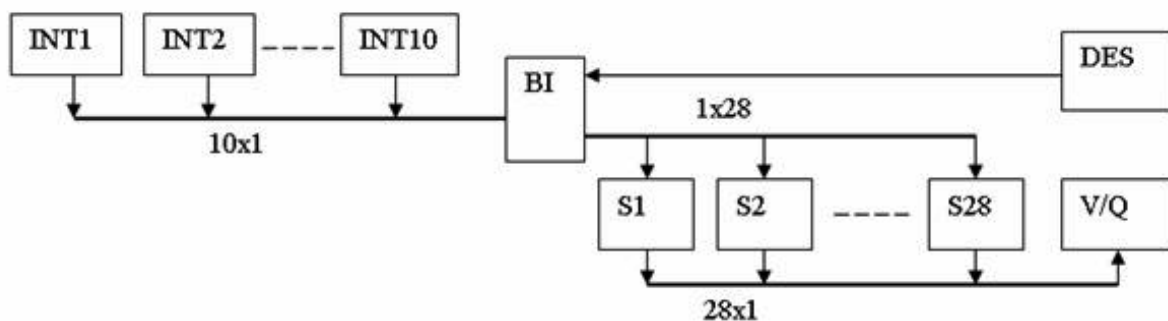


Рис. 4. Структурная схема аналогового канала с ВЗН.

Измерение пороговой мощности излучения проводилось с помощью абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 1000 К и  $\lambda_{\max} = 2,8$  мкм по приведенной в [9] методике. Получено поканальное распределение удельной обнаружительной способности  $D^*$  в виде гистограммы (рис. 5) с максимумом  $5 \cdot 10^{12}$  Вт $^{-1}$ ·см·Гц $^{1/2}$  и рассчитано среднее значение пороговой мощности  $P_{\text{пор}} = 2,6 \cdot 10^{-14}$  Вт/элемент при температуре фона 290 К и апертуре 40°.

Отмечено снижение пороговой мощности при температурах фона 255–260 К с последующим насыщением на уровне  $P_{\text{пор}} = 1,5 \cdot 10^{-14}$  Вт/элемент, что объяснялось собственными шумами БИС считывания, а именно,  $kTC$ -шумом накопительной емкости 0,03 пФ и шумом мультиплексирующих буферов [10].

Формирование импульсного ВЗН-сигнала проводилось от источника оптического излучения на основе ИК-светодиода LED29-PR с  $\lambda_{\max} = 2,84$  мкм и длительностью прямоугольного импульса  $t_0 = 12$  мс (рис. 6). При этом входные ячейки

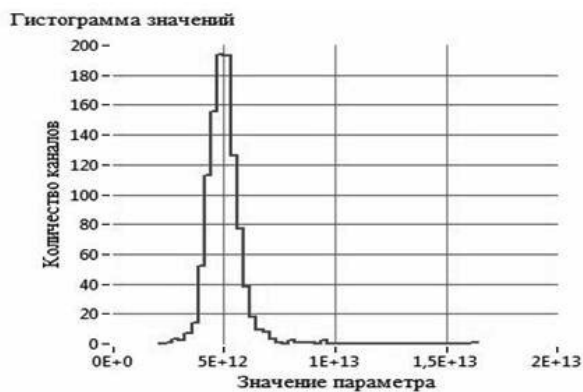


Рис. 5. Гистограмма значений удельной обнаружительной способности  $D^*$  (Вт $^{-1}$ ·см·Гц $^{1/2}$ ) исследуемого фотомодуля.

БИС считывания переключались в режим по постоянному току (DC). Динамика формирования ВЗН-сигнала выражена девятью ступеньками напряжения с трехкратной выборкой и десятой, заключительной ступенькой, соответствующей суммарному сигналу. Отмечена линейная аппроксимация фронта нарастания ВЗН-сигнала, что указывает на отсутствие «размытия» заряда в процессе его задержки и суммирования.

Деселекция дефектных (шумящих) каналов проводилась в два этапа: выявление каналов с пороговой мощностью более  $3 \cdot 10^{-14}$  Вт/элемент; исключение сигналов накопительных ячеек с шумящими ФЧЭ за счет применения кодов деселекции. Большинство деселектируемых каналов ( $\approx 85\%$ ) содержало по одному отключаемому ФЧЭ. Результаты деселекции дефектных каналов в одном из исследуемых ФПМ 1024x10 приведены на рис. 7. Отмечены целесообразность применения схемы деселекции и высокая эффективность ее работы.

### Заключение

Представлены результаты исследования фотоприемного модуля формата 1024x10 для сверхмногоканального ФПУ, работающего в спектральном диапазоне 2–3 мкм. Проанализированы особенности накопления импульсного фототока при сверхнизких значениях фона и обосновано применение в накопительной ячейке комбинированной схемы ВДИ–СТИА. Приведены структурные схемы основных узлов аналогового тракта: накопительных ячеек и схемы ВЗН. Отмечена целесообразность применения схемы ВЗН шинно-адресного типа, позволяющей получить шаг каналов  $\sim 15$  мкм. Применение режима ВЗН по 10 элементам

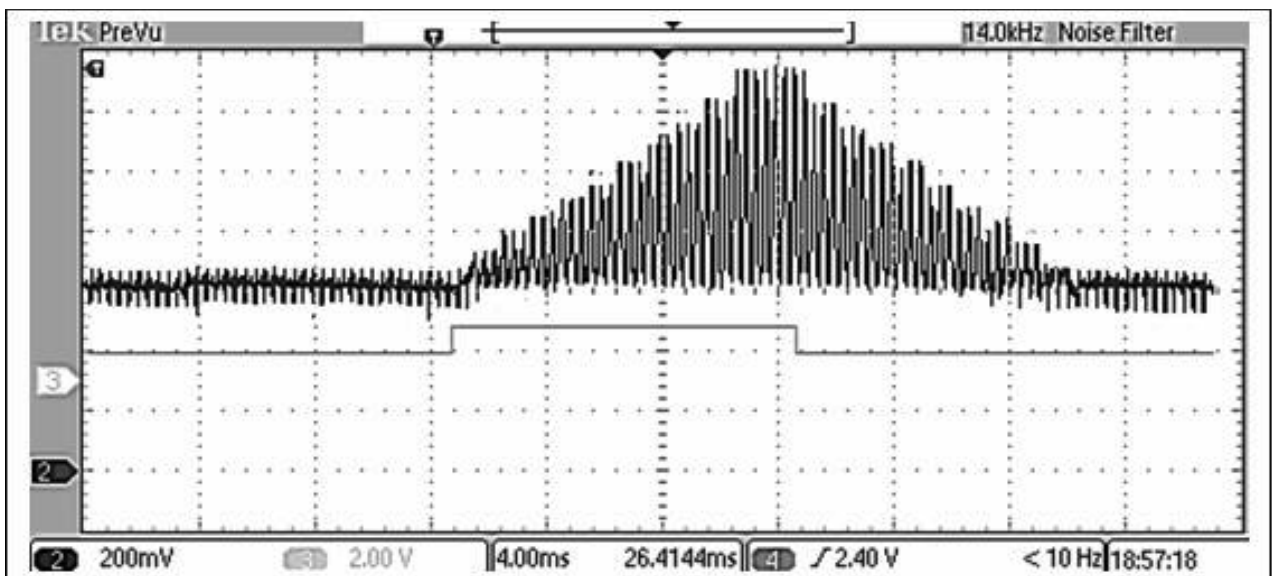


Рис. 6. Осциллограмма ВЗН сигнала на выходе фотомодуля при импульсной засветке фотоприемника с длительностью импульса более  $28 T_{\text{сп}}$ .

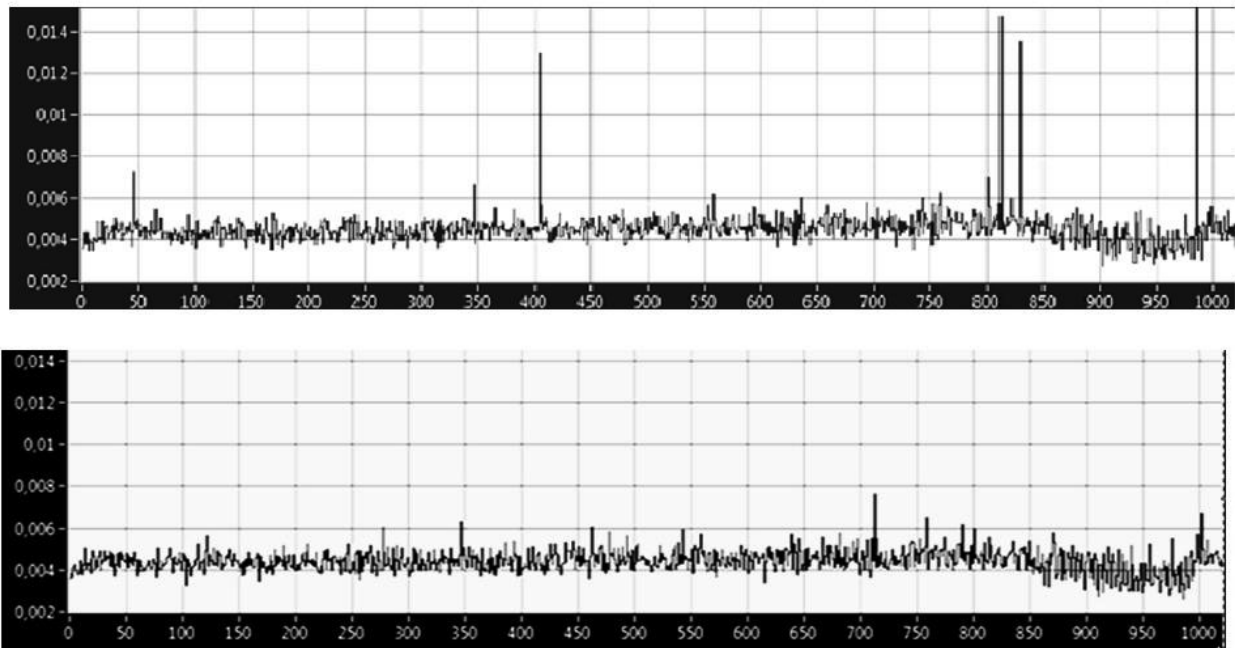


Рис. 7. Поканальное распределение СКО напряжения шума: до деселекции (верхняя диаграмма), после деселекции (нижняя диаграмма).

позволяет получить значение порогового потока в пределах  $P_{\text{пор}} = (1,5\text{--}2,6) \cdot 10^{-14}$  Вт/элемент (менее  $3 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>) в зависимости от температуры фона, при этом нижний уровень  $P_{\text{пор}}$  ограничен  $kTC$ -шумом накопительной ячейки.

## Литература

1. Rogalski A. // Proc. SPIE. 2000. V. 4413. P. 307
2. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фото-диоды. — М.: Физматкнига, 2011.
3. Johnson J.F. // Proc. SPIE. 1994. V. 2226. P. 121.
4. Каракозов Ю.С., Болтарь К.О., Моисеев А.Н., Чилисов А.В., Степанов Б.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 601.
5. Бочков В.Д., Дразжников Б.Н., Кузнецов П.А., Козлов К.В., Соляков В.Н. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 71.
6. Зайцев А.А., Болтарь К.О., Кузнецов П.А., Хромов С.С. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 92.
7. Зайцев А.А., Кузнецов П.А., Хромов С.С. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95.
8. Кузнецов П.А., Моцев И.С., Хромов С.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
9. Бочков В.Д., Дразжников Б.Н., Кузнецов П.А., Козлов К.В., Соляков В.Н. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 65.
10. Fieque B., Sanson E. et al. Infrared ROIC for very low flux and low noise applications. Sofradir, <http://www.irfu.cea.fr>.
11. Gravand O., Mollard L. et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. doi:10.1117/12.921859

## A photo receiver module for the multi-channels FPA to be used in 2–3 $\mu\text{m}$ spectral range

P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev

Orion R&P Association  
46/2 Enthusiasts shosse, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru  
Received March 1, 2014

*The space based opto-electronic evolution required new ways of FPAs design: adoption of readout integration circuits (ROIC); fabrication of new photo detectors based on MCT material having high detectivity  $D^*$  (not be smaller  $2E12\text{Jones}$ ) in spectral range 2–3microns and operate temperature above160K; decrease channels pitch and increase FPA size. Photo receiver module with 1024x10 size are presented in this paper. Achieved value of NEP is less  $3E-14\text{W/pixel}$  at 165–170K operate temperature. This result is ten times better in compared previous generation FPA.*

PACs: 85.60 Dw

Keywords: ROIC, MCT, TDI

### References

1. A. Rogalski, Proc. SPIE **4413**, 307 (2000)
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. J. F. Johnson, Proc. SPIE **2226**, 121 (1994).
4. Yu. S. Karakozov, K. O. Boltar, A. N. Moiseev, et al., Uspekhi Prikladnou Fiziki **1**, 601 (2013).
5. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2**, 71 (2014).
6. A. A. Zaitsev, K. O. Boltar, P. A. Kuznetsov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 5, 92 (2011).
7. A. A. Zaitsev, P. A. Kuznetsov, and S. S. Khromov, Prikladnaya Fizika, No. 5, 95 (2012).
8. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, and S. S. Khromov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 606 (2013).
9. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2**, 65 (2014).
10. B. Fieque, E. Sanson, et al., *Infrared ROIC for very low flux and low noise applications* (Sofradir, <http://www.irfu.cea.fr>).
11. O. Gravand, L. Mollard, et al., Proc. SPIE **8353**, (2012). doi:10.1117/12.921859.