

УДК 621.383

## Микросхема КМОП-фотоприемника видимого диапазона формата 1280×1024 с размером ячейки 13×13 мкм

Д. В. Бородин, Ю. В. Осипов, В. В. Васильев

*Разработана, изготовлена и исследована матричная микросхема фотоприемника, предназначенная для приема оптического сигнала в диапазоне длин волн 0,4—1,0 мкм, его преобразования в электрический сигнал и вывода в аналоговом виде на 1, 2, 4, 8 или 16 выходов. Основные параметры: зарядовая емкость до 200 тыс. электронов; частота кадров максимального формата более 600 Гц; интегральная чувствительность до 1000 В/(лк·с).*

PACS: 85.60.Gz

*Ключевые слова:* КМОП, матричный фотоприемник, видимый диапазон.

### Введение

Твердотельные фотоприемники за последние 15—20 лет все быстрее эволюционируют от ПЗС-схем со специфической, ограниченной для широкого использования технологией к КМОП-фотоприемникам, производимым по близким к стандартным технологиям на множестве кремниевых фабрик [1—6]. Если в ПЗС-схемах коммутируются пакеты зарядов в теле кристалла и преобразуются в напряжение только на выходном устройстве, то в фотоКМОП-схемах с активной ячейкой такое преобразование заряда в напряжение происходит в каждой ячейке фотоматрицы (т. е. фактически нет переноса заряда), и на выход коммутируются по металлизированным шинам уже напряжения. Управление опросом массива ячеек от встроенного цифрового блока обеспечивает гибкость и многофункциональность процесса вывода информации, адаптацию его под конкретную задачу. Если в схему встроен аналогово-цифровой преобразователь (как правило, столбцовый), то возможна цифровая обработка изображе-

ния. Однако для таких приборов требуются многовыводные (100 и более выводов) корпуса, а для размещения АЦП в столбцах приходится использовать технологию с нормами проектирования не более 0,18 мкм и 6 слоями металлизации [7, 8].

В то же время фотоячейки размером более 9—10 мкм могут быть реализованы по КМОП-технологиям уровня 0,35—0,6 мкм с 3—4 слоями металлизации, что делает такие разработки более экономически доступными [9]. Кроме того, разрядность внешнего АЦП не ограничивается характерными для столбцовых АЦП 10—12 битами, а уменьшение рассеиваемой в кристалле мощности способствует улучшению фотоэлектрических параметров прибора. Поэтому разумно создание матричного КМОП-фотоприемника с аналоговым выходом и ячейкой большого размера. Хотя такая микросхема не столь удобна для массового использования, однако ряд параметров, например, достаточно большая зарядовая емкость ячейки и чувствительность, могут обеспечить ей свою область применения. Вопросам разработки и создания такого матричного КМОП-фотоприемника и посвящена данная работа.

### Конструкция прибора

Прибор состоит из кристалла микросхемы размером 18,2×15,4 мм, установленного на керамическое основание (производство ОАО «ЗПП», г. Йошкар-Ола), закрытое входным оптическим окном. Из 64 выводов основания используется не более 37, из которых, в зависимости от режима

Бородин Дмитрий Владиленович<sup>1,2</sup>, начальник лаборатории.

Осипов Юрий Владимирович<sup>1,2</sup>, ведущий инженер.

Васильев Владимир Викторович<sup>1</sup>, генеральный директор.

<sup>1</sup> ООО «РТК Инпекс».

Россия, 141013, г. Мытищи, Силикатная ул., 39Д.

Тел. 8 (495) 788-27-00. E-mail: rtcinprex@mail.ru

<sup>2</sup> ОАО «НПП «Пульсар».

Россия, 105187, Москва, Окружной пр., 27.

Тел. +7 (903) 719-04-47. E-mail: dvb1@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2016 г.

работы микросхемы, назначены от 1 до 16 аналоговых выходов видеосигнала и от 2 до 6 регулируемых напряжений, позволяющих оптимизировать работу микросхемы. Размер фоточувствительной

области составляет  $16,64 \times 13,31$  мм, диагональ 21,3 мм (4/3").

На рис. 1 приведена функциональная схема прибора, а также (на вставке) — фотография прибора.

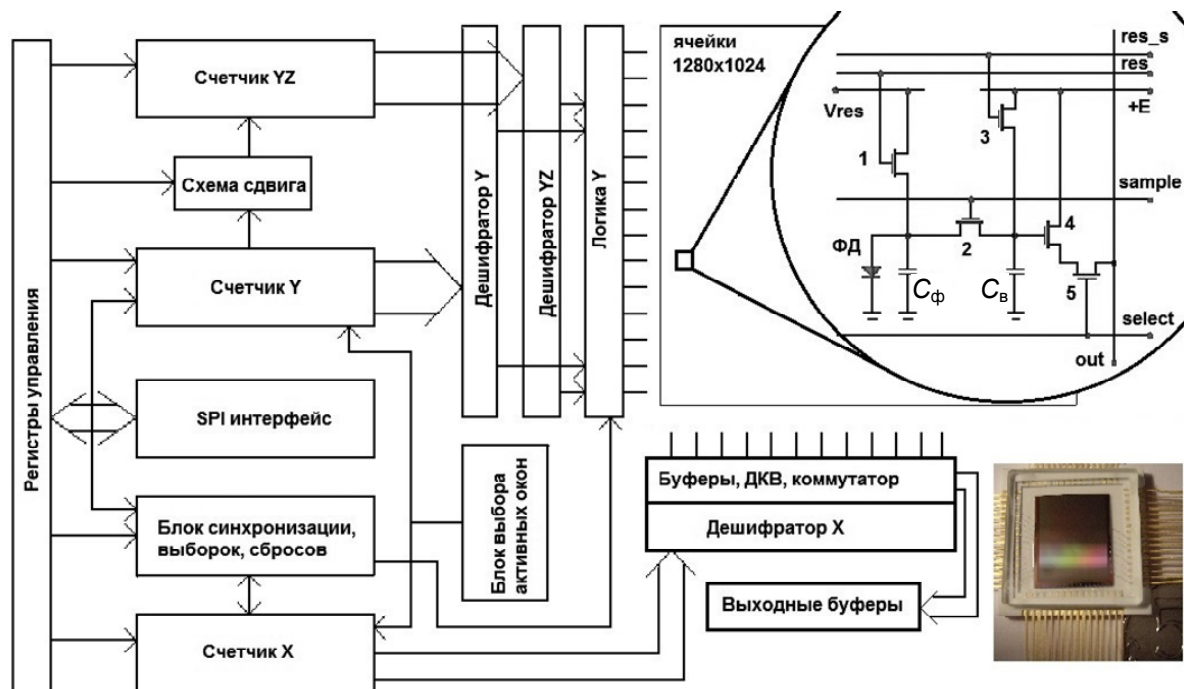


Рис. 1. Функциональная схема матричного КМОП-фотоприемника и его фотография (вставка).

Ячейка фотоприемника разработана по пятитранзисторной схеме, содержащей фотодиод ФД с собственной емкостью  $C_{\phi}$ , два транзистора 1 и 3 сброса, транзистор 2 и емкость  $C_{\psi}$  выборки, буферный 4 и ключевой 5 транзисторы коммутации на столбцовую выходную шину. Такая схема позволяет реализовать как «конвейерный» режим (или «бегущая заслонка»), так и режим «мгновенная фотография» (или «глобальная заслонка») как в варианте «интегрирование, затем считывание» (в т. ч. с увеличенным коэффициентом преобразования заряда в напряжение), так и «интегрирование во время считывания», когда интегрирование следующего кадра происходит одновременно с выводом предыдущего. Расположенные на периферии массива ячеек схемы обеспечивают в режиме мгновенной фотографии компенсацию так называемого «встроенного шума», а в конвейерном режиме — двойную коррелированную выборку (ДКВ).

Использовавшаяся ранее в КМОП-фотоприемнике формата  $1024 \times 1024$  ячеек размером  $15 \times 15$  мкм [10] схема управления массивом фото-ячеек [11] была существенно переработана и дополнена, также как и тракт вывода видеосигнала, что позволило значительно увеличить быстродействие и чувствительность. Функционально схема

управления состоит из счетчика X, дешифратора X, счетчиков Y и YZ, схемы сдвига запуска счетчика YZ, двух дешифраторов Y и YZ, интерфейса SPI с регистрами управления, блока выбора активных окон и блока синхронизации, в котором вырабатываются импульсы выборки и сброса, переключения опроса строк и начала вывода видеосигнала. Схема обеспечивает работу фотоматрицы в конвейерном режиме с заданием времени интегрирования с кратностью времени вывода одной строки, в режиме мгновенная фотография с выводом после или во время интегрирования, или после интегрирования каждого активного «окна интереса» (до 4 прямоугольных окон с произвольными размерами и положениями, кратными 16 ячейкам), или неразрушающее считывание (вывод до 15 кадров в процессе интегрирования без межкадрового сброса). Возможен переворот изображения по X/Y, ДКВ, прогрессивная или чересстрочная развертка с выводом информации параллельно на 1, 2, 4, 8 или 16 выходов. Задание времени интегрирования при мгновенной фотографии возможно не только длительностью внешнего импульса, но и цифровым кодом в интервале от 10 периодов до 2 миллионов периодов тактовой частоты. Управление всеми режимами выполняется через SPI-порт.

Микросхема изготовлена по стандартной КМОП-технологии с нормами проектирования 0,5 мкм, одним слоем поликремния и тремя слоями металлизации.

### Результаты измерений

Напряжение питания, регулируемые напряжения, цифровые последовательности подавались на микросхему от стандартных источников питания и генераторов при помощи блока коммутации. Выходной сигнал регистрировался осциллографом Tektronix MSO2024B с полосой пропускания 200 МГц или установленной в компьютере платой 14-разрядного АЦП с частотой дискретизации до 10 МГц (входная емкость более 70 пФ) и последующей обработкой результатов в среде MathCad. В ряде случаев между аналоговым выходом микросхемы и регистрирующим прибором устанавливался буферный усилитель с коэффициентом усиления  $K_y = 2$ . Усилитель собирался по неинвертирующей схеме на основе ОУ AD8041, имел входную емкость около 5 пФ, скорость изменения выходного сигнала 150 В/мкс. Исследуемый прибор подсоединялся к макету стенда через прижимное контактное устройство.

Для исследования фотоэлектрических параметров использовался диапроектор с излучателем типа "А", оптическими тест-объектами, нейтральными фильтрами, а при измерении коэффициента передачи модуляции (КПМ) — фильтром СЗС25.

В конвейерном режиме накопление фотозаряда в схеме происходит на максимальной емкости ячейки и интегральная чувствительность составляет 25—50 В/(лк×с). В режиме «интегрирование, затем считывание» возможно накопление фотозаряда на меньшей емкости выборки  $C_b$ , что даёт значительное увеличение коэффициента преобразования фотозаряда в напряжение и чувствительности. На рис. 2 показаны зависимости напряжения на одном из выходов микросхемы  $U_{\text{вых}}$  от времени накопления  $T_{\text{инт}}$  при освещенности 0,15 люкс для напряжений на затворе транзистора 2 (см. рис. 1) 4,8 В; 4,2 В; 4 В и 3,8 В. В первом случае, транзистор 2 полностью открыт и фотозаряд интегрируется на суммарной емкости  $C_{\phi} + C_b$ . Интегральная чувствительность составляет 70 В/(лк×с) (кривая 1).

При уменьшении напряжения на затворе, транзистор 2, работая теперь для емкости  $C_b$  как источник тока, поддерживает напряжение на своём истоке и на емкости фотодиода практически постоянным. Тем самым заряд на емкости  $C_{\phi}$  не изменяется, а весь генерируемый светом фотозаряд суммируется на емкости  $C_b$ . Интегральная

чувствительность достигает 1000 В/(лк×с). С уменьшением напряжения на емкости  $C_b$  транзистор 2 полностью открывается и фотозаряд интегрируется уже на суммарной емкости  $C_{\phi} + C_b$ , чему соответствует переход от высокой чувствительности к чувствительности 70 В/(лк×с) (кривые 2 и 3), то есть получается зависимость с «перегибом». Кривая 4 соответствует смешанному режиму, когда происходит перераспределение фотозаряда между емкостями  $C_{\phi}$  и  $C_b$ . Зависимость с «перегибом» дает высокую чувствительность для ячеек с малой экспозицией и большую зарядовую емкость для ячеек с большой экспозицией. Такие и подобные решения увеличивают динамический диапазон приемника [12, 13]. По оценкам, пороговая экспозиция не превышала  $1 \times 10^{-5}$  лк×с и ограничивалась собственными шумами и наводками макета стенда.

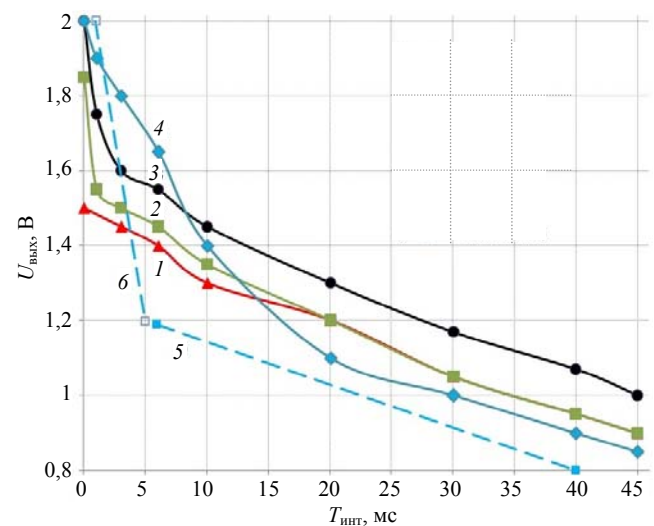


Рис. 2. Зависимости напряжения на видеовыходе микросхемы  $U_{\text{вых}}$  от времени накопления  $T_{\text{инт}}$  при освещенности 0,15 лк для напряжений на затворе транзистора выборки 4,8 В (1); 4,2 В (2); 4 В (3); 3,8 В (4). Отрезки (5) и (6) показывают наклон, соответствующий интегральной чувствительности 70 и 1000 В/(лк×с) соответственно.

Для определения КПМ на поверхность микросхемы фокусировалось тестовое изображение мира, состоящее из чередующихся светлых и темных полос с шириной, близкой к 26 мкм каждая, а также нескольких светлых и темных участков шириной ~1 мм [14]. Осциллограмма выходного сигнала (конвейерный режим, «1 выход», буферный усилитель с  $K_y = 2$ ) при тактовой частоте вывода 20 МГц приведена на рис. 3. Повторяющаяся структура осциллограммы хорошо передает тестовое изображение и КПМ составляет 75 %. Тактовая частота 20 МГц при использовании одного выхода соответствует частоте кадров 15 Гц для формата изображения 1280×1024 ячеек.

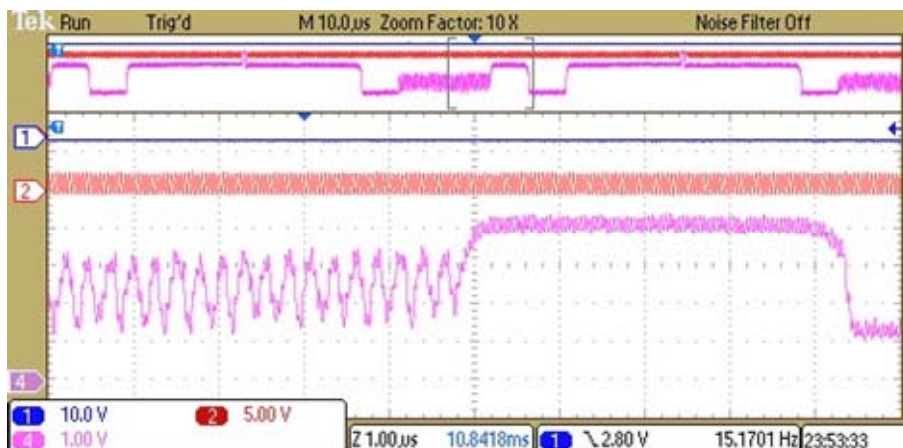


Рис. 3. Осциллограмма микросхемы при тактовой частоте 20 МГц. Луч 4 — выходное напряжение, луч 2 — тактовая частота.

С увеличением числа используемых выходов за счет уменьшения внутренних подключенных емкостей в схеме увеличивается скорость изменения выходного сигнала, что позволяет использовать большую (до 2,5 раз) тактовую частоту. Поэтому при переходе от 1 к 16 выходам частота кадров увеличивается в 40 раз и достигает 600 Гц.

На рис. 4 приведено изображение телевизионной таблицы, полученное после регистрации кадра платой АЦП, подключенной непосредственно к выходу микросхемы, и последующего построения изображения в программе MathCad (конвейерный режим, «1 выход», тактовая частота 10 МГц). Формат изображения 1280×1024 ячеек, частота кадров 7,5 Гц.

В таблице приведены основные параметры разработанного КМОП-фотоприемника, который в целом не уступает аналогичным зарубежным фотоприемникам (например [12]), а по чувствительности, рассеиваемой мощности превосходит их.

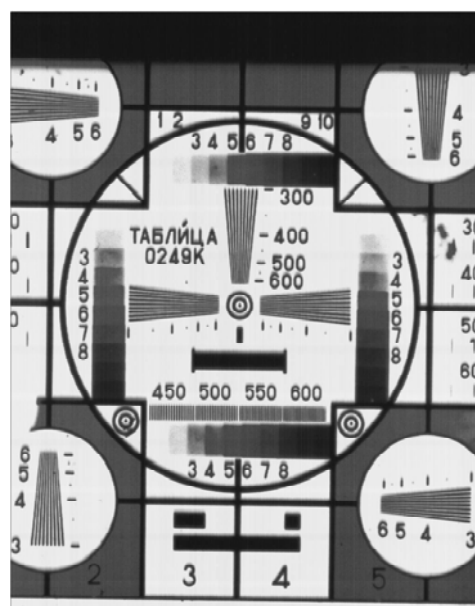


Рис. 4. Изображение телевизионной таблицы. Формат изображения 1280×1024 ячеек, один выход, частота кадров 7,5 Гц.

Таблица

**Основные параметры матричного КМОП-фотоприемника**

Наименование параметра, единица измерения	Значение	
Формат фоточувствительной области, строк×столбцов	1280×1024	
Размер ячейки, мкм×мкм	13×13	
Спектральный диапазон, мкм	0,4—1,0	
Филл-фактор, %	45	
Максимальная зарядовая емкость, тысяч электронов	200	
Напряжение насыщения выходного сигнала, В, не менее	1,0	
Интегральная чувствительность, В/(лк×с)	От 25 до 1000	
Коэффициент передачи модуляции, %, не менее	75	
Частота кадров формата 1280×1024, Гц	16 выходов	600
	4 выхода	80
	1 выход	15
Частота кадров для "окна интереса" 768×1024 (3:4; 1"), 16 выходов, Гц	1000	
Темновой сигнал, мВ/с (20 °С)	150	
Технологическая неравномерность темнового сигнала относительно напряжения насыщения, %	6—9	
Пороговая экспозиция, лк×с, не более	1×10 <sup>-5</sup>	
Рассеиваемая мощность, мВт, при частоте вывода информации	10 МГц	65
	15 МГц	75
	20 МГц	85

### Заключение

Разработанная матричная КМОП-микросхема обеспечивает широкий динамический диапазон как за счет большой максимальной зарядовой емкости (для большой освещенности), так и благодаря большой чувствительности (для малой освещенности), также позволяет регулировать время экспозиции на 5 порядков, а именно, от долей микросекунд до времени вывода кадра. За счет большой кадровой частоты динамический диапазон может быть дополнительно увеличен неразрушающим считыванием нескольких кадров, изменением времени накопления для каждого выводимого кадра.

Фотоприемник может найти применение в видеосистемах, работающих в расширенном диапазоне освещенностей, а также может быть использован для регистрации быстрых процессов.

Авторы выражают благодарность Ю. М. Черемскому за фотометрическую аттестацию диапроектора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Meynants G., Dierickx B., and Scheffer D. // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3410. P. 68.
2. Magnan P. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2003. Vol. A 504. P. 199. doi: 10.1016/S0168-9002(03)00792-7.

3. Janesick J., Andrews J., Tower J., Grygon M., Elliott T., Cheng J., Lesser M., Pinter J. // Proc. SPIE. 2007. 6690. P. 3.
4. Bogaerts J., Dierickx B., Meynants G., Uwaerts D. // Special Issue of IEEE Trans. on Electron Devices On Solid-State Image Sensors. 2003. Vol. 50, No. 1. P. 84.
5. Dierickx B., Bellis S., Witvrouwen N., Dupont B., Defernez A., Jackson C. // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7826. P. 78261Q.
6. Downing M., Kolb J., Balard Ph., Dierickx B., Defernez A., Feautrier Ph., Finger G., Fryer M., Gach J.-L., Guillaume C., Hubin N., Jerram P., Jorden P., Meyer M., Payne A., Pike A., Reyes J., Simpson R., Stadler E., Stent J., Swift N. // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9154. P. 91540Q.
7. Meynants G., Bogaerts J., Wolfs B., Ceulemans B., De Ridder T., Gvozdenović A., Gillisjans E., Salmon X. and Van de Velde G. / 2013 International Image Sensor Workshop, 12-16 Jun 2013, Snowbird Resort (UT), USA.
8. Krymski A. / 2015 International Image Sensor Workshop [http://imagesensors.org/2015-paper/14-01\\_Krymski\\_paper\\_IISW15-updated.pdf](http://imagesensors.org/2015-paper/14-01_Krymski_paper_IISW15-updated.pdf)
9. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Скрялёв А. С., Васильев В. В. // Научно-технический сборник "Электронная техника, серия 2, Полупроводниковые приборы". 2009. Вып. 1 (222). С. 93.
10. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Анисимова Т. И., Ельников Д. С., Костюков Е. В., Маклаков А. М., Ноженко В. Ю., Пугачёв А. А., Рощина Н. И., Скрялёв А. С., Трунов С. В., Черемский Ю. М. / Материалы XIII научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», ОАО «НПП «Пульсар», 2014 г. С. 141.
11. Осипов Ю. В., Бородин Д. В., Васильев В. В. / Материалы X научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли», МНТОРЭС им. А. С. Попова, Москва, 2013 г. С. 292.
12. <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=LUPA1300-2>. High speed CMOS image sensor Lupa1300-2.
13. <https://www.photonis.com/en/product/lynx-cmos>
14. ГОСТ 28953. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров.

## CMOS image sensor with 1280×1024 pixels and 13×13 μm pitch

D. V. Borodin<sup>1,2</sup>, Yu. V. Osipov<sup>1,2</sup>, and V. V. Vasil'ev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RTC Inpex, Ltd  
39D Silikatnaya str., Mytischy, 141013, Russia  
E-mail: rtcinpex@mail.ru

<sup>2</sup> Pulsar S&P Enterprise, JSC  
27 Okrushnoy pr., Moscow, 105187, Russia  
E-mail: dvb1@inbox.ru

Received February 11, 2016

**CMOS photodetectors for the visible range of light has been developed and investigated. The CIS converts light into charge and readout signals in analog form to 1, 2, 4, 8 or 16 outputs. Main parameters: the charge capacity up to 200 ke; the maximum frame rate to 600 fps for full resolution; the sensitivity up to 1000 V/(Lux×sec).**

PACS: 85.60.Gz

Keywords: CMOS, CIS, visible light.

## REFERENCES

1. G. Meynants, B. Dierickx, and D. Scheffer, Proc. SPIE **3410**, 68 (1998).
2. P. Magnan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A 504**, 1992 (2003). doi: 10.1016/S0168-9002(03)00792-7.
3. J. Janesick, J. Andrews, J. Tower, M. Grygon, T. Elliott, J. Cheng, M. Lesser, and J. Pinter, Proc. SPIE **6690**, 3 (2007).
4. J. Bogaerts, B. Dierickx, G. Meynants, D. Uwaerts, Special Issue of IEEE Trans. on Electron Devices On Solid-State Image Sensors **50**, 84 (2003).
5. B. Dierickx, S. Bellis, N. Witvrouwen, B. Dupont, A. Defernez, and C. Jackson, Proceedings of SPIE **7826**, 78261Q (2010).
6. M. Downing, J. Kolb, Ph. Balard, B. Dierickx, A. Defernez, Ph. Feautrier, G. Finger, M. Fryer, J.-L. Gach, C. Guillaume, N. Hubin, P. Jerram, P. Jorden, M. Meyer, A. Payne, A. Pike, J. Reyes, R. Simpson, E. Stadler, J. Stent, and N. Swift, Proceedings of SPIE **9154**, 91540Q (2014).
7. G. Meynants, J. Bogaerts, B. Wolfs, B. Ceulemans, T. De Ridder, A. Gvozdenović, E. Gillisjans, X. Salmon and G. Van de Velde, in Proc. 2013 International Image Sensor Workshop, (Jun 12–16, 2013, Snowbird Resort (UT), USA).
8. A. Krymski, in Proc. 2015 International Image Sensor Workshop ([http://imagesensors.org/2015-paper/14-01\\_Krymski\\_paper\\_IISW15-updated.pdf](http://imagesensors.org/2015-paper/14-01_Krymski_paper_IISW15-updated.pdf))
9. D. V. Borodin, Yu. V. Osipov, A. S. Skrylev, V. V. Vasil'ev, Elektronnaya Tekhnika, Ser. 2 – Polupr. Prib., No. 1(222), 93 (2009).
10. D. V. Borodin, Yu. V. Osipov, T. I. Anisimova, et al., in Proc. XIII Conf. "Pulsar-2014", p. 141.
11. Yu. V. Osipov, D. V. Borodin, and V. V. Vasil'ev, in Proc. X Conf. "Systems of DZZ-2013", p. 292.
12. <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=LUPA1300-2>. High speed CMOS image sensor Lupa1300-2.
13. <https://www.photonis.com/en/product/lynx-cmos>
14. GOST-28953. PhotoCCD. Methods for the measurement of parameters [in Russian].