

УДК 621.383

## Особенности ФПУ с режимом ВЗН формата 1024×10 на основе КРТ

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

*В статье рассмотрены основные принципы работы систем пространственно-временного преобразования информации на примере ФПУ с ВЗН формата 1024×10. Для вычитания неинформативной постоянной составляющей сигналов, во входных ячейках большой интегральной схемы (БИС) считывания ФПУ расположены отключаемые фильтры верхних частот. ВЗН осуществляется внутри БИС и имеет «адресную» реализацию с матрицей аналоговых сумматоров. С целью увеличения пространственного разрешения системы в направлении сканирования, на каждый канал ФПУ (10 чувствительных элементов) приходится 28 ВЗН-сумматоров. Таким образом, имеется возможность осуществлять 3 выборки значений сигналов при перемещении пятна излучения между соседними ФЧЭ в режиме сканирования. Матрица фоточувствительных элементов (ФЧЭ) разделена на 4 субматрицы с целью увеличения пространственного разрешения в направлении, перпендикулярном сканированию. В работе описаны основные схемотехнические решения и представлены необходимые расчетные соотношения.*

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Ключевые слова: ВЗН, МФЧЭ, ФПУ, БИС считывания, нерекурсивный фильтр.

### Введение

Одним из способов обработки сигналов с ИК-фотоприемников является режим временной задержки и накопления (ВЗН) [1–14]. Суть данного режима заключается в суммировании сигналов с  $N$  фоточувствительных элементов, расположенных в направлении сканирования, синхронно со сканированием. Таким образом, возрастают в  $\sqrt{N}$  раз значения шумов фотоприемного устройства (ФПУ) и в  $N$  раз – значения сигналов, что приводит к возрастанию отношения сигнал/шум ( $SNR$ ) в  $\sqrt{N}$  раз.

Целью данной работы являлось определение оптимальных принципов работы систем пространственно-временного преобразования информации на примере ФПУ с ВЗН формата 1024×10.

Объект исследования представлял ФПУ, фоточувствительный слой которого выполнен на основе CdHgTe состава  $x = 0,39$ . Фоточувствительные элементы (ФЧЭ)

состыкованы посредством индиевых столбиков с кремниевой большой интегральной схемой (БИС) считывания. Режим ВЗН реализуется в БИС путем суммирования с задержкой аналоговых сигналов от ФЧЭ [15]. ФПУ имеет формат 1024×10 и разработано для решения задач пеленгации точечных источников излучения. В работе представлено описание ФПУ, а также проведен анализ структуры и некоторых особенностей БИС, позволяющих осуществлять поставленные задачи. Представлена амплитудно-частотная характеристика канала ФПУ.

### Описание ФПУ

В состав рассматриваемого ФПУ входит чувствительный слой, состыкованный с БИС при помощи индиевых микроконтактов. В качестве фоточувствительных элементов (ФЧЭ) используются КРТ-фотодиоды с  $\lambda_{\text{max}} = 2,8$  мкм, являющиеся источниками тока в диапазоне величин  $10^{-12}$ – $10^{-10}$  А (при  $T = 170$  К) [16]. Структура БИС считывания представлена на рис. 1. При равномерном перемещении изображения по матрице ФЧЭ сигналы с чувствительных элементов последовательно поступают во входные ячейки (ВЯ) БИС считывания (блок 2), в которых происходит первичное накопление и высоко-частотная фильтрация на схемах с переключаемыми конденсаторами (ПК). Далее производится коммутация выходных сигналов с ВЯ на каждый из входов (от 1 до 1024) нерекурсивного фильтра (НРФ), реализующего режим ВЗН (блок 3). В нерекурсивном фильтре происходит суммирование слагаемых (сигналов), поступающих в различные моменты времени. С помощью блока 4 производится дальнейшая коммутация и усиление сигналов с нерекурсивного фильтра.

Бочков Владимир Дмитриевич, главный специалист<sup>1</sup>  
 Дрожников Борис Николаевич, и.о. начальника подразделения<sup>1</sup>  
 Кузнецов Петр Александрович, главный специалист<sup>1</sup>  
 Козлов Кирилл Владимирович, инженер<sup>1</sup>,  
 студент магистратуры<sup>2</sup>  
 Соляков Владимир Николаевич, главный научный  
 сотрудник<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион»  
 Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2  
 Телефон: 495-3739400. E-mail: orion@orion-ir.ru  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт.  
 Россия, 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2013 г.

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

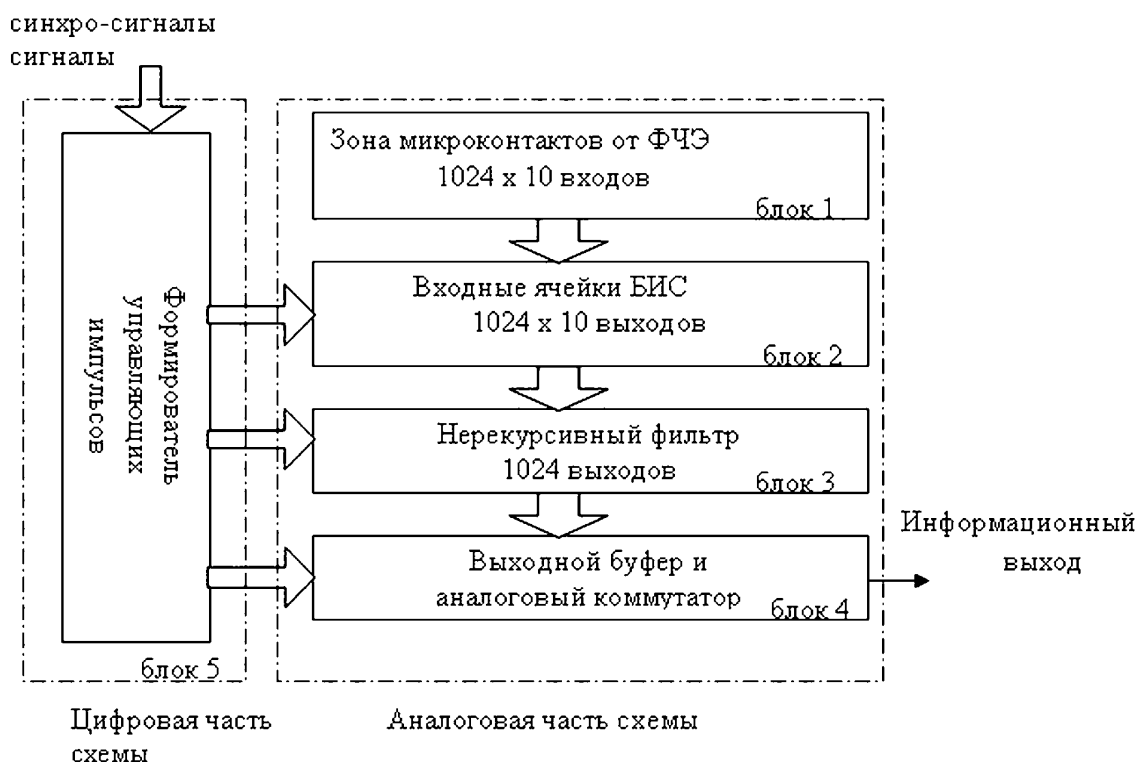


Рис. 1. Структура БИС считывания.

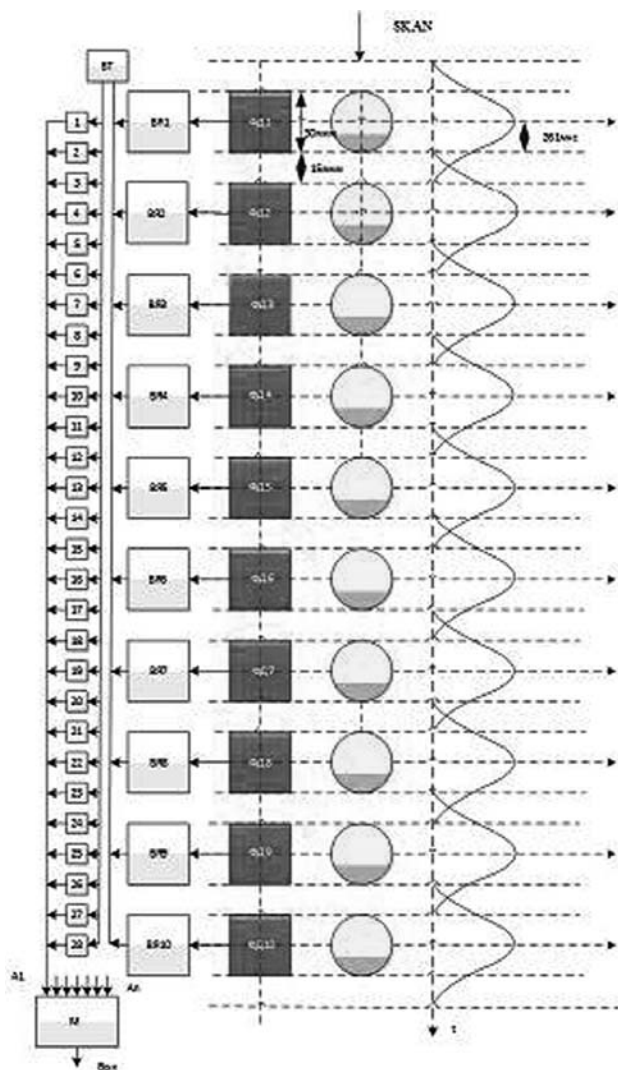


Рис. 2. Функциональная схема пространственно-временного ВЗН-преобразования.

Для улучшения пространственного разрешения вдоль сканирования и удовлетворения условиям теоремы Котельникова для дискретно-аналоговых схем необходимо делать несколько выборок за время перемещения элемента изображения между соседними ФЧЭ в направлении сканирования [9, 10]. В рассматриваемом ФПУ реализуется 3 выборки. Соответственно, количество аналоговых сумматоров для реализации 10-кратного ВЗН-суммирования будет равно  $3 \times (10 - 1) + 1 = 28$ . На рис. 2 представлена функциональная схема пространственно-временного ВЗН-преобразования на примере одного из каналов ФПУ. Сигналы с 10 фотодиодов (ФД) поступают на входы 10 входных ячеек (ВЯ), после чего распределяются между 28 сумматорами. Считывание сигналов на выходе каждого сумматора производится в 28 раз реже, чем подача сигналов на его вход.

Для улучшения пространственного разрешения сканирующих систем в направлении, перпендикулярном сканированию, может использоваться микросканирование. В таком случае сканирование одного и того же объекта производится при смещении матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на различные расстояния относительно этого объекта в направлении, перпендикулярном сканированию. Однако у данного метода имеется ряд важных недостатков, главным из которых являются существенное усложнение сканирующей системы. Иным способом улучшения пространственного разрешения в направлении, перпендикулярном сканированию, является создание некоторой «избыточности» в топологии МФЧЭ. На рис. 3 представлена топология чувствительных элементов рассматриваемого в работе ФПУ. Весь массив разбит на 4 столбца (субматрицы) по 256 каналов с 10 элементами ВЗН со «сдвигом» на элемент и на пол-элемента. Таким образом, достигается улучшение пространственного разрешения в 4 раза по сравнению с тем разрешением, которое обеспечивает каждая из субматрицы по отдельности.

Одной из важных особенностей рассматриваемого ФПУ является высокочастотная фильтрация входных сигналов с МФЧЭ. Вычитание фоновой составляющей, производимое в аналоговом виде, существенно упрощает задачу пеленгации точечной цели в процессе сканирования. Данная особенность позволяет не использовать коррекции по постоянному смещению в процессе эксплуатации изделия.

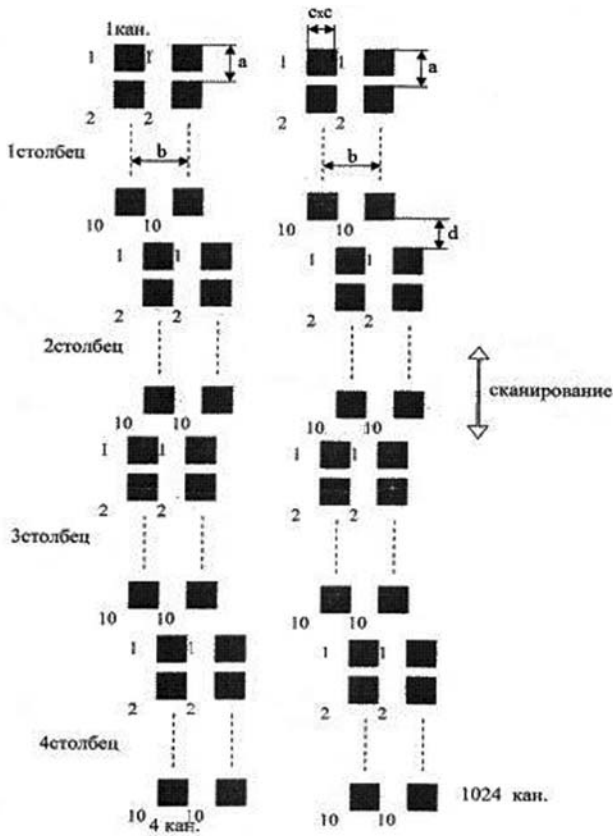


Рис. 3. Топология фоточувствительных элементов ФПУ.

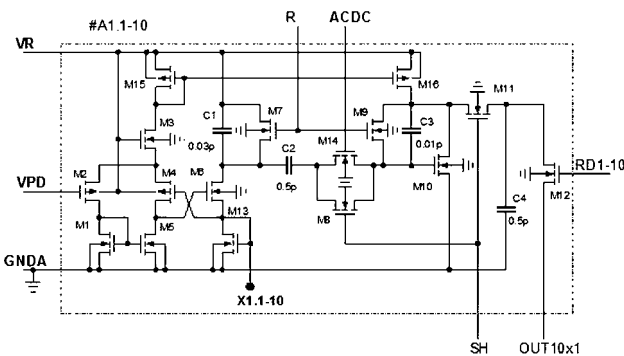


Рис. 4. Электрическая схема входной ячейки.

### Схема входной ячейки БИС

На рис. 4 представлена схема электрическая входной ячейки БИС считывания. На входе ВЯ реализован буфер тока с дифференциальным КМОП-усилителем в цепи обратной связи для повышения линейности интегрирования малых фототоков и стабилизации рабочей точки. Емкость  $C1$  выполняет роль накопительной и сбрасывается периодически до напряжения  $VR$ :

$$V_{C1}(t) = \frac{1}{C1} \int_0^{T_{int}} I(t) dt, \quad (1)$$

где  $T_{int}$  – время от момента сброса ( $t = 0$ ) конденсатора  $C1$  до момента считывания текущего значения напряжения  $V_{C1}$ . Считывание напряжения  $V_{C1}(t) = V_{C1}(T_{int})$  происходит через разделительный конденсатор  $C2$  при подаче импульса  $SH$  на ключ  $M8$ . При подаче на вход AC/DC низкого уровня ячейки переходят в режим по переменному току с ненулевой нижней частотой. В дальнейших расчетах будем считать, что ФПУ работает именно в этом режиме, т.к. он является основным при дальнейшем использовании. Выходной инвертирующий усилитель на транзисторах  $M9, M10, M16$  усиливает входной сигнал с коэффициентом усиления, равным  $C1/C3$  [17]. Таким образом, выходной заряд ячейки на емкости  $C4$  вычисляется в соответствии с следующим соотношением:

$$Q_{вых} = V_{C1}(t) \frac{C1}{C3} C4. \quad (2)$$

Граничную частоту фильтра верхних частот входной ячейки можно рассчитать по формуле из [5]:

$$f_{zp} = \frac{f_{cmp}}{2\pi} \frac{C1}{C1 + C2}, \quad (3)$$

где  $f_{cmp} = 1/T_{cmp}$  – частота опроса сигналов входной ячейки.

Значение  $f_{zp}$  входных ячеек в рассмотренном устройстве равно 28 Гц.

Напряжение смещения буфера тока сумматора  $VBI$  (рис. 5) определяет величину заряда, считанного с выходной емкости  $C4$ . Таким образом, производится выбор рабочей точки ФПУ.

### Схема сумматора БИС

При проектировании электрической схемы БИС с целью минимизации количества МОП транзисторов в схеме ВЗН функции коммутирования, суммирования и хранения информации были совмещены в одном узле – сумматоре заряда (рис. 5). Схема ячейки суммирования заряда (или ячейки ВЗН) содержит усилительные элементы  $M1, M3, M4$ , ключ  $M2$  и суммирующий конденсатор  $C1$ . Работа сумматора основана на принципе функционирования приборов с переносом заряда, но с использованием не ПЗС-структур, а  $n$ -МОП-транзисторов. Почти 100%-перенос заряда осуществляется за счет подключения конденсатора  $C1$  не на общий вывод, как в устройствах выборки-хранения, а на фазу суммирования  $FS1-28$ . Считывание заряда с выхода каждой из 10 входных ячеек производится через вывод  $INBUS$ , подключенный к шине  $10 \times 1$ , при подаче фазы  $FS1-28$ . Считывание суммарного заряда производится ключом  $M2$  через вывод  $OUTBUS$  на шину  $28 \times 1$  при подаче фазы  $RDS1-28$ . Выборки заряда от каждой из 10 входных ячеек накапливаются (задерживаются во времени) в емкости  $C1$ , образуя единый зарядовый пакет (суммируются). Для устранения влияния пороговых напряжений МОП-транзисторов на сигнал в схему ячейки ВЗН введен компенсирующий транзистор  $M3$ , топологически очень близко расположенный к транзистору  $M1$  и с такой же конфигурацией, что обеспечивает равенство пороговых напряжений  $V_{nop}$  этих транзисторов. Перед каждым считыванием заряда из  $i$ -ой входной ячейки подается фаза  $PRj$  на транзистор  $M3$ , в результате чего паразитная емкость шины  $10 \times 1$  заранее подзарядается током этого транзистора до напряжения

$(V_{FSUMj} - V_{пор.M3})$  и не участвует в дальнейшем считывании зарядового сигнала при активации фазы FSUM1-28. Погрешность суммирования заряда уменьшается до уровня

$$\Delta Q = C1 \cdot (V_{пор.M3} - V_{пор.M1}).$$

Таким образом, в ячейке ВЗН кроме суммирования осуществляется еще и двойная коррелированная выборка.

Считанный на фазе RDSUM суммарный заряд по шине OBUS28x1 поступает в зарядочувствительный усилитель на транзисторах M1, M2, M3 и емкости C1, образуя выходной сигнал напряжения канала OUTSUMn ( $n = 1 \dots 1024$ ). Импульс RSUM периодически сбрасывает считанный в текущей строке суммарный заряд на потенциал VRS, очищая емкость C1 для приема нового суммарного заряда следующей строки. Сигнал ВУР увеличивает в 10 раз коэффициент преобразования в тестовом режиме.

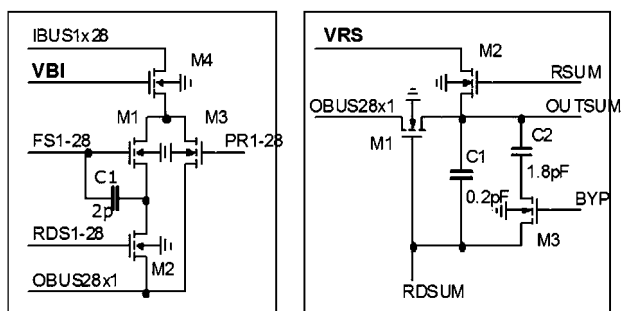


Рис. 5. Схема сумматора (слева) и преобразователь заряд-напряжение (справа).

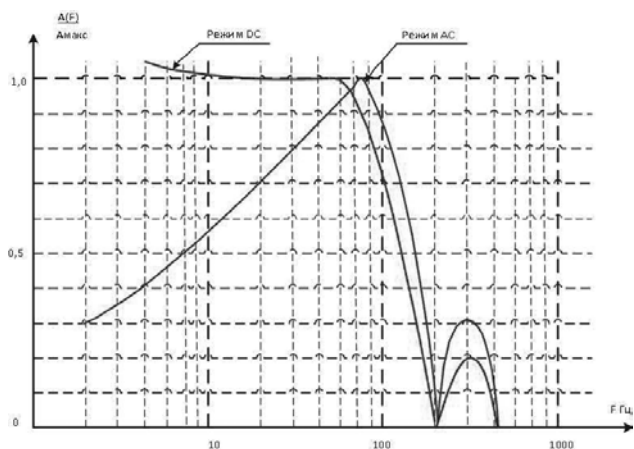


Рис. 6. Сквозная амплитудно-частотная характеристика канала ФПУ.

### Исследование амплитудно-частотной характеристики канала ФПУ

Для измерения сквозной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) канала ФПУ (рис. 6) производилась подача синусоидального сигнала (с двойной амплитудой 200 мВ) на контакт VPD (см. рис. 4). При этом менялось напряжение на стоке тестового транзистора M13, выполняющего роль источника тока. Значение сигнала с определенного канала считывалось с помощью внешней аналоговой схемы выборки и хранения (СВХ). В процессе измерений значение частоты тактового сигнала было

равно 1,5 МГц, а время строки – 174 мкс. В качестве характеристики выходного сигнала использовалось его средне-квадратичное отклонение (СКО). СКО выходного сигнала измерялось с помощью мультиметра. Измерения проводились в двух режимах: с фильтрами верхних частот во входных ячейках (АС) и без них (DC). Таким образом, результаты измерений полностью согласуются с теоретическим значением, вычисленным из соотношения (3) с погрешностью в 5%.

### Заключение

В работе проведен анализ одной из систем пространственно-временного преобразования информации в ФПУ с режимом ВЗН, содержащим встроенный в ячейку считывания входного фототока фильтр верхних частот. Представлено описание структуры и особенностей данной системы, приведены наиболее значимые расчетные соотношения. Описаны схемотехнические особенности БИС. Измеренная амплитудно-частотная характеристика канала ФПУ с хорошей точностью соответствует расчетным данным. Работа может быть полезна для разработчиков оптоэлектронной аппаратуры, использующих концепцию ВЗН.

### Литература

1. Бовина Л.А. и др. // Прикладная физика. 1999. № 4. С. 31.
2. Акимов В.М. и др. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 7.
3. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
4. Бурлаков И.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
5. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Филачев А.М., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61
6. Кузнецов П.А., Моцев И.С., Хромов С.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
7. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
8. 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.
9. Патрашин А.И. Бурлаков И.Д. Лопухин А.А. Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 91
10. Кузнецов П.А., Хромов С.С., Зайцев А.А. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95.
11. Соляков В.Н., Дрожников Б.Н., Хамидуллин К.А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 21.
12. Филачев А.М., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О. и др. Фотоприемный модуль формата 1024Ч10 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.
13. Соляков В.Н., Дрожников Б.Н., Хамидуллин К.А., Лазарев П.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 506.
14. Martin R.J., Riley G.E. // Proc. SPIE. 1988. V. 930. P. 26.
15. Мазин М.Г., Лазарев П.С., Деева Г.Г., и др. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 98.
16. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. — М.: Мир, 1988.
17. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.

## Temporal and dimensional data conversion of TDI infrared photodetector

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

Orion Research-and-Production Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received December 15, 2013

*The article contains the main features of TDI FPA with high pass filter in readout cell. This technique helps to avoid 2-point correction during exploitation, because the informative constant part of signal is subtracted. The next feature is the TDI structure of the FPA: it uses "address" TDI structure (with the matrix of summators) in spite of widely used «conveyor» structure (using tdi registers). Each channel of FPA has 10 elements and 28 summators. This allows doing 3 signal samples during the moving of target image between the neighbor pixels which increases the resolution in the scanning direction. Despite of using microscanning technology which imposes additional requirements to mechanical scanner, our system uses a kind of redundancy by dividing one matrix of elements to 4 in order to increase the resolution. The schematic details and main equations are showed. The input cell of every pixel has the storage capacitance, high pass filter and the output transimpedance amplifier. This amplifier is made using only 3 MOS transistors (key, current source and amplifier). This article can be very useful for optoelectronic engineers who use the TDI conception.*

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Keywords: TDI, FPA, photodetector, multiplexer, no recursive filter.

### References

1. L. A. Bovina et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 31 (1999).
2. V. M. Akimov et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 7 (2005).
3. Filachev A. M., I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base.* (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
4. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 43 (2007).
5. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 61 (2012).
6. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, S. S. Khromov, et al., *Uspekhi prikladnoi Fiziki* **1**, 606 (2013).
7. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
8. A. I. Patrashin, in *Proc. XX International Conference on Photoelectronics* (Orion R&P Association, Moscow, 2008), p. A02.
9. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, A. A. Iopukhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 91 (2012).
10. P. A. Kuznetsov, S. S. Khromov, and A. A. Zaitsev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 95 (2012).
11. V. N. Solyakov, B. N. Drazhnikov, K. A. Khamidullin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 21 (2013).
12. A. M. Filachev, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, et al., in *Proc. XX Intern. Conf. Photoelectronics* (Orion R&P Association, Moscow, 2012), pp.22-24.
13. V. N. Solyakov, B. N. Drazhnikov, K. A. Khamidullin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 506 (2013).
14. R. J. Martin and G. E. Riley, in *Proc. SPIE* **930**, 26 (1988).
15. M. G. Mazin, P. S. Lazarev, G. G. Deeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 98 (2012).
16. Gilbert Gaussorgues, *La Thermographie Infrarouge* (Lavoisier, Paris, 1986; Mir, Moscow, 1988).
17. Richard D. Hudson, *Infrared System Engineering* (Wiley-Interscience, 1969; Mir, Moscow, 1972).