

УДК 621.3.049.77:621.383/4

Две концепции реализации аналогового режима ВЗН в сканирующих ИК ФПУ

П.А. Кузнецов, И.С. Мощев, С.С. Хромов

Рассматриваются две основные концепции построения интегральных схем считывания (ИСС) с аналоговым режимом ВЗН. Приводятся сравнительный анализ двух архитектур ИСС и результаты тестирования режима ВЗН.

PACS 85.60 Dw; 85.60 Gz; 07.57 Kp

Ключевые слова: инфракрасное фотоприемное устройство, интегральная схема считывания, временная задержка и накопление, ВЗН.

Введение

Совершенствование тепловизионной техники потребовало развития новых способов обработки сигналов с ИК-фотоприемников. Одним из таких способов является режим временной задержки и накопления (ВЗН). Суть его состоит в запоминании и суммировании сигналов от N фоточувствительных элементов (ФЧЭ), расположенных в направлении сканирования изображения. В матричных фотоприемных устройствах (МФПУ), построенных по этому принципу, появляется ряд следующих преимуществ:

- возрастает отношение сигнал/шум в \sqrt{N} раз независимо от вида шумового спектра ($1/f$ или белый), а также, в условиях ограничения фоном;
- уменьшается в \sqrt{N} раз разброс чувствительности по каналам МФПУ;
- исключаются дефектные ФЧЭ в процессе суммирования сигналов.

В результате многорядные линейки ФЧЭ (субматрицы) вытесняют обычные однорядные линейки и становятся конкурентоспособными в сравнении с матричными МФПУ «смотрящего» типа.

Целью данной работы является анализ двух основных концепций построения интегральных схем считывания (ИСС) с аналоговым режимом ВЗН, в т.ч. путем сравнительного сопоставления двух архитектур ИСС и результатов тестирования режима ВЗН.

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист.

Мощев Иван Сергеевич, инженер.

Хромов Сергей Сергеевич, начальник дизайн-центра.
ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2

Тел.: (499) 374–81–31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2013 г.

© Кузнецов П.А., Мощев И.С., Хромов С.С., 2013

Классическая концепция реализации режима ВЗН

Принцип действия приборов с зарядовой связью (ПЗС) идеально подходит для осуществления режима ВЗН в фокальной плоскости сканирующих МФПУ. Суть этого принципа состоит в строгой синхронизации процессов перемещения изображения по ФЧЭ (сканирования) и движения фотогенерированных зарядовых пакетов по ПЗС-регистру соответствующего канала схемы обработки, в результате чего после каждого такта задержки в ПЗС-ячейках происходит суммирование зарядов от ФЧЭ, расположенных в направлении сканирования. На рис. 1 в общем виде приведена схема такого алгоритма (называемого обычно конвейерным) применительно к одному каналу 4-рядной линейки ФЧЭ.

Стыковка каждого i -го ФЧЭ ($i = 1-4$) с ПЗС-регистром осуществляется через входной каскад (ВК), обычно выполняющий функции смещения ФЧЭ и накопления фототока. Далее накопленный заряд передается в ПЗС-регистр в последователь-

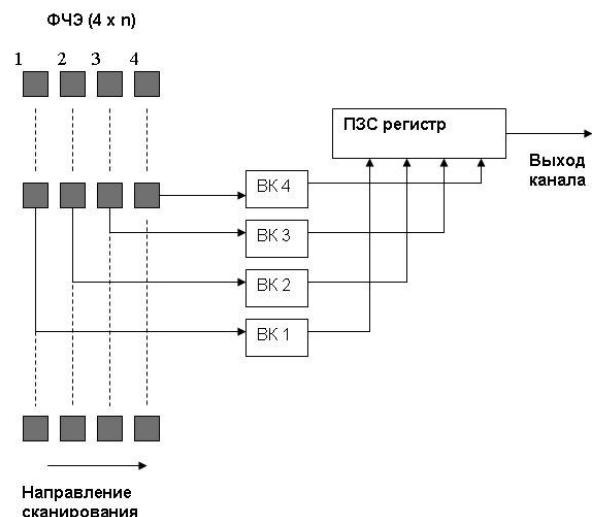


Рис. 1. Классическая организация режима ВЗН на ПЗС

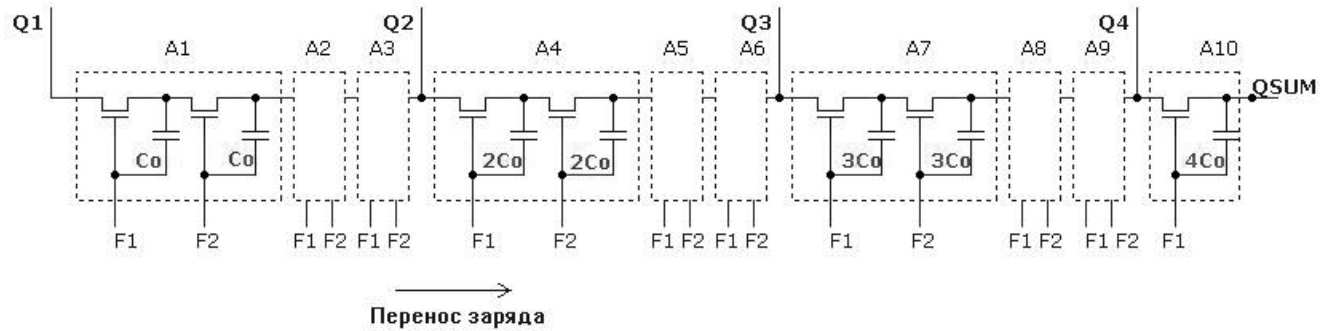


Рис. 2. Упрощенная схема VBD-регистра на n-МОП-транзисторах

ности: заряд от ФЧЭ₁ имеет максимальную временную задержку, а от ФЧЭ₄ — минимальную. Такая концепция реализации режима ВЗН, ставшая классической, получила широкое применение в большинстве зарубежных разработок. Практикуется также «смешанная концепция» ВЗН (термин авторов [1]), сочетающая в себе выполнение различных функций как на базе ПЗС-технологии, так и на КМОП-базисе. Тем не менее, в последнее десятилетие в разработках мировых лидеров в области ИК-фотоэлектроники (Sofradir, SCD и др.) намечилось устойчивое использование КМОП-технологии. Объясняется это следующими причинами:

- стремительное развитие КМОП-технологии, ставшей уже массовой, вытесняет более сложную (прежде всего, по обеспечению качества границы раздела окисел-полупроводник) ПЗС-технологии;
- для управления ПЗС требуются сигналы нецифрового формата, что затрудняет стыковку схем считывания с внешними или внутренними КМОП-схемами управления.

В современных ИСС с реализацией аналогового режима ВЗН наибольшее распространение получили КМОП ВЗН-регистры, обозначаемые в зарубежной литературе аббревиатурой VBD (*bucket brigade device*) [2, 3]. VBD-регистры, сохраняя достоинства ПЗС-регистров, более технологичны и имеют стандартные КМОП-уровни управляющих сигналов.

Упрощенная схема VBD-регистра для 4-каскадного режима ВЗН, приведенная на рис. 2, содержит ячейки переноса A_i ($i = 1-10$) на двух МОП-транзисторах, двух емкостях nC_0 ($n = 1-4$) и с двумя фазами переноса F1, F2. Заряды $Q_1 - Q_4$, накопленные во входных ячейках, поступают в ячейки переноса A_i , где после 3-тактной задержки суммируются. Для увеличения зарядовой емкости ячеек переноса в процессе суммирования заряда выбирают ступенчатое нарастание емкостей C_0 с коэффициентом n . Динамика суммирования заряда выражается формулой (1):

$$Q_{\text{sum}}(t) = Q_1(t - 10T_0) + Q_2(t - 7T_0) + Q_3(t - 4T_0) + Q_4(t - T_0), \quad (1)$$

где T_0 — период каждой из фаз F1, F2.

Необходимость 3-кратной задержки вызвана тем, что в современных сканирующих МФПУ (288×4 , 480×6 , 576×6 и др.) отношение периода ФЧЭ D_x вдоль сканирования к пространственному разрешению Δ равно трем (рис. 3). Это отношение обычно называют коэффициентом передискретизации или *oversampling*.

В «НПО «Орион» была разработана ИСС формата 576×6 с шагом каналов 56 мкм, реализующая ВЗН конвейерного типа на n-МОП транзисторном регистре. Исследование опытных образцов ИСС, состыкованных с КРТ-фотодиодами (спектральный диапазон 8–10,5 мкм), дало следующие результаты [5]:

- увеличение удельной обнаружительной способности в $\sqrt{6}$ раз;
- ухудшение разрешения для объектов с малыми размерами вдоль направления сканирования, сопоставимыми с размерами ФЧЭ.

Второй результат объясняется невысоким коэффициентом переноса заряда ($\sim 0,99$ на элементарный перенос), что приводит к размытию фронтов зарядового пакета при его движении по VBD-регистру (рис. 4). Для устранения этого недостатка необходимо увеличение эффективности переноса заряда (ЭПЗ) до величины не менее

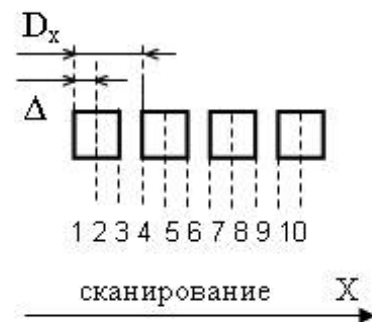


Рис. 3. Фрагмент топологии 4-рядной линейки ФЧЭ

0,999, что ведет к значительному изменению как схемотехники, так и технологии изготовления VBD-регистров.

Исследование зарубежных источников позволило определить наиболее эффективную структуру построения приборов такого типа [4]. В ячейке VBD-регистра для повышения значением ЭПЗ (~ 0,999) используется дополнительный затвор G2 с постоянным смещением VGG и подлегированием подзатворной области (рис. 5). Несмотря на использование КМОП-процесса при изготовлении прибора, некоторые операции (например, обедненное легирование) являются нестандартными для массовой субмикронной КМОП-технологии. Кроме того, значение ЭПЗ сильно зависит от точности установки напряжения VGG.

В результате в «НПО «Орион» было предложено новое и принципиально другое решение по реализации режима ВЗН, основанное на переходе от конвейерной к шинно-адресной обработке фотосигнала [6].

Новая концепция реализации режима ВЗН

Поскольку процесс ВЗН является линейным преобразованием, то его формальное описание можно провести на матричном уровне. Представим совокупность сигналов накопительных ячеек в виде матрицы [X], каждый элемент которой x_{ij} — сигнал (заряд) от j -ой накопительной ячейки, образованный i -ым элементом разрешения Δ_i . Тогда выходные сигналы схемы ВЗН можно представить в виде матрицы [Y]:

$$[Y] = [X] [C], \tag{2}$$

где [C] — 2-битная матрица преобразования, определяющая алгоритм ВЗН.

В соответствии с правилом перемножения матриц, каждый элемент матрицы ВЗН-сигналов представляется выражением

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^4 x_{ik} c_{kj}. \tag{3}$$

Для коэффициента передискретизации $Kos = 3$ размерности матриц [X] и [C] будут, соответ-

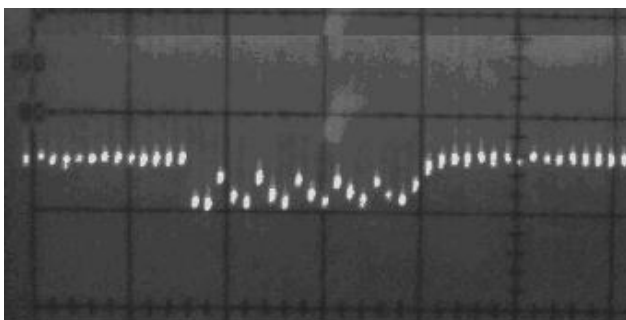


Рис. 4. Ухудшение модуляции импульсного сигнала (размытые фронты) при движении зарядов по ВЗН-регистру

ственно, 10×4 и 4×10 . Тогда размерность матрицы [Y], как следует из (3), будет 10×10 . В табл. 1 приведены выражения для каждого элемента матрицы [Y].

Как следует из табл. 1, каждый элемент десятого столбца $\sum_{k=1}^4 x_{1k}, \dots, \sum_{k=1}^4 x_{10k}$ является выходным ВЗН-сигналом, сдвинутым во времени на один такт T_0 относительно предыдущего. В табл. 2 приведены элементы матрицы преобразования [C].

Представленная формализация процесса ВЗН является основой концепции шинно-адресной обработки фотосигнала. Схемная реализация этой концепции основана на следующих принципах:

- носителем информации является заряд;
- все операции с зарядом производятся через глобальную сигнальную шину;
- динамическая задержка заряда заменяется статической.

Структурная схема реализации 4-каскадного режима ВЗН приведена на рис. 6.

Накопленный в ячейках INT1 — INT4 заряд, через глобальную шину BUS последовательно считывается (адресуется) в сумматоры заряда S1 — S10. Генератор управляющих фаз GEN формирует алгоритм ВЗН в соответствии с табл. 1. Просуммированный от четырех накопительных ячеек заряд последовательно считывается из сумматоров с интервалом T_0 . После преобразования суммарного заряда в напряжение в выходном каскаде Q/V происходит межканальная коммутация сигнала на общий информационный выход ИСС. Схема деселекции дефектных ФЧЭ (DES) блокирует, в случае необходимости, прохождение заряда по шине BUS.

Основным преимуществом такой схемы является отсутствие влияния эффективности переноса заряда на качество ВЗН-сигнала (рис. 7). Практическим подтверждением этого являются результаты тестирования ИСС 576×6 с шагом каналов 28 мкм, которая была разработана в «НПО «Орион» [5]. При подаче тестового импульсного сигнала с длительностью $t_n \leq T_0$, наблюдалась 100%-модуляция шести выходных сигналов, задержанных с интервалом $3T_0$ (рис. 8). Данное преимущество становится особенно значимым в оптико-элек-

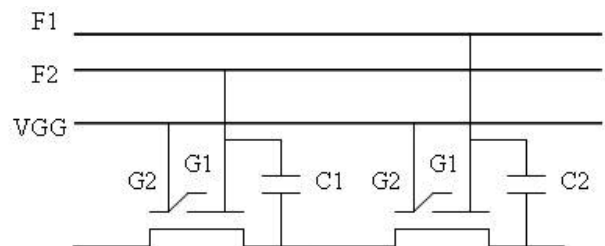


Рис. 5. Усовершенствованная ячейка VBD-регистра с повышенным значением ЭПЗ

Таблица 1

X_{11}	X_{11}	X_{11}	$\sum_{k=1}^2 X_{1k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{1k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{1k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{1k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{1k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{1k}$	$\sum_{k=1}^4 X_{1k}$
X_{21}	X_{21}	X_{21}	$\sum_{k=1}^2 X_{2k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{2k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{2k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{2k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{2k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{2k}$	$\sum_{k=1}^4 X_{2k}$
X_{31}	X_{31}	X_{31}	$\sum_{k=1}^2 X_{3k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{3k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{3k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{3k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{3k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{3k}$	$\sum_{k=1}^4 X_{3k}$
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
X_{101}	X_{101}	X_{101}	$\sum_{k=1}^2 X_{10k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{10k}$	$\sum_{k=1}^2 X_{10k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{10k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{10k}$	$\sum_{k=1}^3 X_{10k}$	$\sum_{k=1}^4 X_{10k}$

Таблица 2

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

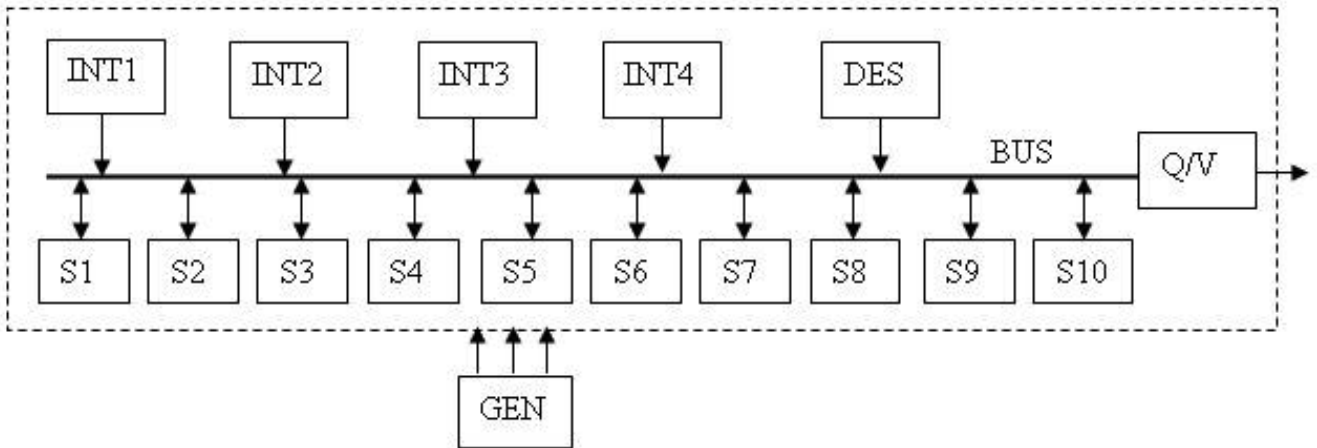


Рис. 6. Структурная схема реализации режима ВЗН с шинно-адресной организацией

тронных системах детектирования точечных тепловых целей (теплореленгаторах).

Еще одним преимуществом шинно-адресной архитектуры канала ИСС является возможность наращивания числа каскадов ВЗН при одновре-

менном уменьшении шага следования каналов. Например, одна из последних разработок «НПО «Орион», а именно, ИСС формата 10×1024 с шагом следования каналов, равным 15 мкм. Здесь высокая плотность каналов продиктована необхо-

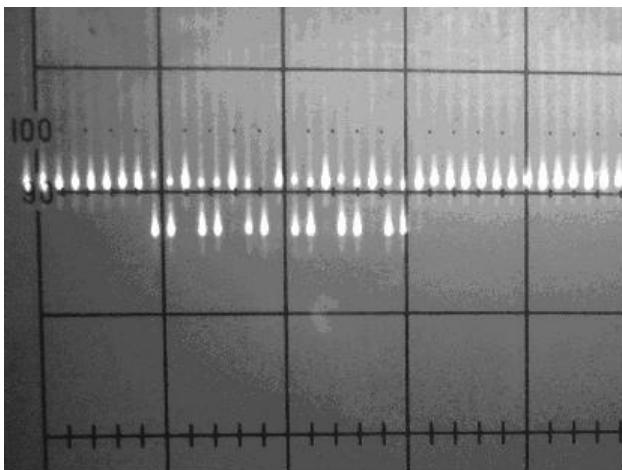


Рис. 7. Отсутствие влияния времени задержки на глубину модуляции короткого импульсного сигнала

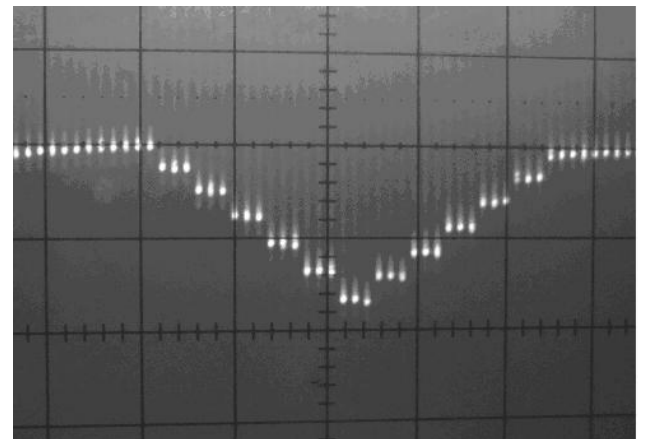


Рис. 8. Динамика формирования ВЗН-сигнала с 3-тактной задержкой при подаче на тестовый вход широкоимпульсного сигнала

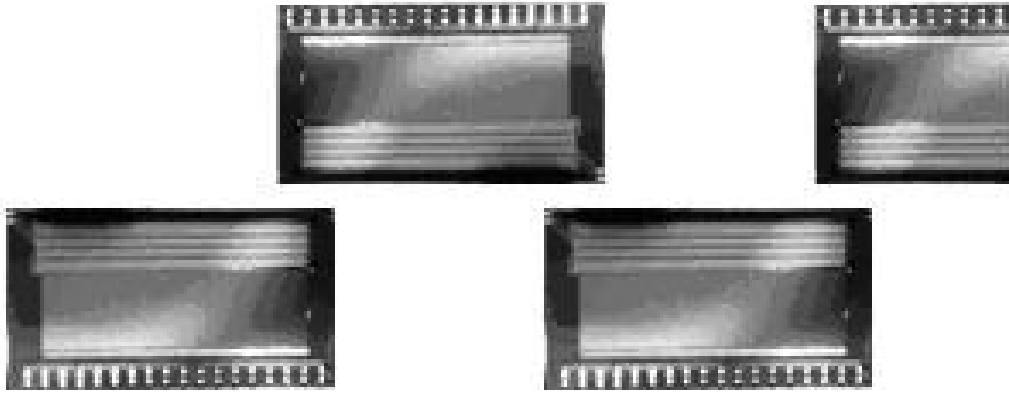


Рис. 9. Каскадирование ИСС формата 10×1024

димостью асимметричного расположения ФЧЭ относительно кристалла ИСС, что дает возможность построения сверхмногоканального ФПУ (рис. 9).

Заключение

Проведенный анализ и экспериментальные данные показали, что схемотехника режима ВЗН конвейерного типа, основанная на использовании приборов с переносом заряда, имеет следующие недостатки:

– эффективность переноса заряда всегда ниже 100%;

– требуется специальный технологический процесс, несовместимый со стандартной КМОП-технологией.

Режим ВЗН шинно-адресного типа лишен этих недостатков, а также позволяет наращивать коли-

чество каскадов ВЗН с меньшим шагом следования каналов.

Литература

1. Derkach Yu.P., Reva V.P., Sizov F.F. // Applied Physics. 2003. No. 3.
2. Hynecsek J. Bucket Brigade TDI Photodiode Sensor. Oct.1, 2002. US Patent No. 6459077B1.
3. Sizov F.F., Reva V.P., Golenkov A.G. et al. // Opto-Electronics Review. 2005. V.14. No. 1. P.79
4. Itoh M. Bucket Brigade Charge Transfer Device with Auxiliary Gate Electrode. Nov.24, 1987. US Patent No. US 4709380
5. Кузнецов П.А., Хромов С.С., Зайцев А.А. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95
6. Зайцев А.А., Хромов С.С., Болтарь К.О., Кузнецов П.А. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 92

Two concepts of analog TDI mode in the scanning IR FPA

P.A. Kuznetsov, I.S. Moschev, and S.S. Khromov

Orion R&P Association
46/2 Enthuziastov sh., Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Two concepts of TDI ROIC design are considered. Comparative analyze and testing results are showed.

PACS 85.60 Dw; 85.60 Gz; 07.57 Kp
Keywords: IR FPA, ROIC, TDI

Bibliography — 6 references

Received September 25, 2013