

“Смешанная” концепция построения схем считывания для фокальных процессоров с ВЗН и деселекцией элементов

Ю. П. Деркач, В. П. Рева

Научно-исследовательский институт микроприборов, Киев, Украина

Ф. Ф. Сизов

Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрена возможность использования “смешанной” технологии n-канальной технологии приборов с зарядовой связью (ПЗС) и технологии комплементарных транзисторов металл—диэлектрик—полупроводник (КМДП) для проектирования и последующего изготовления схемы считывания информации с многоэлементных матриц инфракрасных (ИК) фотодиодов с временной задержкой и накоплением (ВЗН) формата 288×4. Показано, что в этом случае можно применить значительно более “мягкие” конструктивно-технологические ограничения и ввести функцию деселекции. Представлены блок-схема узла считывания информации, а также описание его составных частей. Приведены расчетные параметры спроектированной схемы считывания для ИК-многорядных линеек фотодиодов.

Несмотря на значительный прогресс микроэлектроники, достигшей к настоящему времени уровня проектных норм 0,1 мкм, для изготовления схем считывания и фокальных процессоров, функционирующих в холодной зоне, используются проектные нормы 0,5 мкм и выше. Наиболее распространенной технологией изготовления многоэлементных ИК-фотоприемников остается гибридная технология, сочетающая возможность реализации высокой чувствительности ИК-фотодиодов и обработки сигналов с помощью кремниевых фокальных процессоров в холодной зоне [1, 2]. Прежде всего это относится к приборам на основе соединений кадмий—ртуть—теллур (КРТ), на долю которых приходится порядка 60 % объема выпуска всех фотоприемников ИК-диапазона на мировом рынке [3]. Для производства ИК-фотодиодов на основе КРТ нет необходимости применять технологии с разрешением менее единиц микрон, так как дифракционные огра-

ничения делают нецелесообразным получение размера фотодиода для диапазона 8—12 мкм менее чем 24 мкм. Необходимый уровень технологии изготовления кремниевых схем считывания определяется достигаемыми параметрами фотоприемного устройства (ФПУ) в целом, удобством эксплуатации ФПУ и его стоимостью. Оптимальное сочетание технологий приводит к снижению общей стоимости фотоприемника. Но даже 100%-ное тестирование как фотодиодных матриц, так и схем считывания [4] не позволяет избавиться от основного недостатка гибридной технологии — наличия в конечном изделии определенного количества неработающих элементов. В “смотрящих” ФПУ это приводит к наличию светлых и темных точек, а в многорядных ФПУ (табл. 1) — наличие одного пробитого фотодиода может приводить к выходу из строя всего канала, т. е. строки или столбца.

Таблица 1

КОЛИЧЕСТВО И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОВ МНОГОРЯДНОГО ФПУ 288×4

Электрооптические характеристики	Режимы тестирования	Параметр	Значение
Обнаружительная способность	Фоновое излучение 293 К, полоса RMS шума (1/2000 Ti, 1/2 Ti) Hz	Среднее пиковое значение недефектных каналов	Не менее 1,5 Ех ×11 см(Гц ^{1/2})/Вт

Окончание табл. 1

Электрооптические характеристики	Режимы тестирования	Параметр	Значение
Дефектные каналы	Все каналы	Число дефектов для D^* менее $5 \cdot 10$ см $(\Gamma_{\text{ц}}^{1/2})/\text{Вт}$	Не более 15
		Число "тяжелых" дефектов для D^* менее $2,5 \cdot 10$ см $(\Gamma_{\text{ц}}^{1/2})/\text{Вт}$	Не более 6
	Десять центральных каналов	Число дефектов для D^* менее $5 \cdot 10$ см $(\Gamma_{\text{ц}}^{1/2})/\text{Вт}$	Не более 2
		Число "тяжелых дефектов" для D^* менее $2,5 \cdot 10$ см $(\Gamma_{\text{ц}}^{1/2})/\text{Вт}$	Не более 0
	36 центральных каналов	Число дефектов для D^* менее $5 \cdot 10$ см $(\Gamma_{\text{ц}}^{1/2})/\text{Вт}$	Не более 7
		Число "тяжелых дефектов" для D^* менее $2,5 \cdot 10$ см $(\Gamma_{\text{ц}}^{1/2})/\text{Вт}$	Не более 1

Для примера, в ФПУ формата 288×4 фирмы Sofradir, предназначенных для диапазона 8–12 мкм (как в TL005 — на основе приборов с зарядовой связью, так и в TL015 — на КМДП-транзисторах) допускается до 15 дефектных каналов, имеющих обнаружительную способность в два раза хуже средней, причем до 6 каналов с обнаружительной способностью более чем в четыре раза хуже средней (см. табл. 1) [5].

Улучшить параметры ФПУ и снизить его стоимость можно путем отключения (деселекции) бракованных фотодиодов на уровне схемы считывания. Это требует введения дополнительных элементов, что входит в противоречие с весьма существенными ограничениями площади кристалла, причем даже не площади кристалла, а площади пикселя. Размеры пикселя составляют обычно порядка 2500 мкм² (56×43 мкм² — распространенный размер пикселя для многорядных фотодиодных линеек КРТ 288×4). В эти размеры входит и площадь контактной площадки размером не менее 10×10 мкм². Здесь же необходимо разместить и транзистор прямой инжекции (использование схемы прямой инжекции для КРТ матриц имеет несомненные преимущества [6, 7]). Для обеспечения повторяемости пороговых напряжений, уменьшения зависимости от напряжения стока, обеспечения протекания достаточных токов в подпороговом режиме размеры транзистора прямой инжекции нежелательно сильно уменьшать [8].

Анализ построения схем считывания для многорядных фотодиодных линеек КРТ формата 288×4 показывает, что применение деселекции требует использования технологии высокого уровня с проектными нормами не менее 0,8 мкм и, следовательно, высокой стоимости. Действительно, схема считывания для ФПУ BD TL015-V3 формата 288×4 с деселекцией элементов, разработанного фирмой Sofradir (Франция), изготов-

ляется по 0,8 мкм КМДП-технологии. Эта технология отличается от стандартной (цифровой КМДП-технологии) наличием специальных операций, позволяющих реализовать как аналоговые, так и цифровые элементы, а также различными конструктивно-технологическими ограничениями для аналоговой и цифровой частей. Данная технология достаточно дорогая и в рамках СНГ практически недоступна. Фирма Rockwell (США) использовала для ФПУ формата 480×5 многокристальную концепцию. Кристалл, содержащий схемы сопряжения типа емкостного преобразующего усилителя (СТИА), перестраиваемую интегрирующую емкость и устройства деселекции изготовлялся с использованием 1,5 мкм КМДП-технологии. Кристалл обработки сигнала, содержащий цепи временной задержки и интегрирования, усиления и обработки заряда, а также формирователи тактовых импульсов ПЗС, изготовлялся с использованием 1,5 мкм *p*-канальной ПЗС-технологии [9].

Схема считывания

В результате проведенных исследований показано, что для реализации ФПУ типа BD TL015-V3 возможен альтернативный вариант: использование "смешанной" технологии *n*-канальных приборов с зарядовой связью (ПЗС) и КМДП-технологии с *n*-карманом. Он позволяет реализовать схему считывания формата 288×4 с деселекцией элементов на базе 2,5 мкм ПЗС-технологии и 2,0 мкм — технологии КМДП. Основные параметры, характеризующие используемую технологию: тип подложки — КДБ 10; тип кармана — *n*; два уровня металлизации; два уровня поликристаллического кремния (четырёхфазная ячейка ПЗС); толщина подзатворного окисла — 350 Å.

Такой технологический маршрут отличается от стандартного КМДП (так называемого "однокарманного") двумя дополнительными операциями:

формирование электродов из поликремния второго уровня;

создание скрытого канала в области переноса заряда ПЗС.

Основные конструктивно-технологические ограничения

Минимальная длина канала <i>n</i> - и <i>p</i> -транзисторов, мкм	2,4
Минимальный зазор между поликремниевыми проводниками, мкм	1,6
Минимальная ширина поликремниевых затворов 2-го уровня, мкм	4,5
Контактное окно, мкм ²	2,0×2,0
Минимальная ширина металлической шины, мкм	4,0
Минимальный зазор между металлическими шинами, мкм	2,0

Разработанная технология характеризуется использованием шести типов МДП-транзисторов:

n-канальный транзистор с затвором из первого уровня поликремния, без подлегирования —

в качестве транзистора прямой инжекции, накопительных ПЗС емкостей, а также электродов ПЗС;

n-канальный транзистор с затвором из второго уровня поликремния, без подлегирования — в качестве электродов ПЗС;

n - и *p*-канальные транзисторы с обеднением, с затвором из первого уровня поликремния с подлегированием канала — в качестве элементной базы цифровых и аналоговых устройств;

n - канальный МДП-транзистор с истощением с затворами из первого и второго уровней поликремния — в качестве электродов ПЗС.

Структура кристалла схемы считывания, совпадающая с топологическим размещением блоков, представлена на рис. 1. В этой структуре большинство аналоговых функций (в том числе временная задержка и накопление (ВЗН) — наиболее сложная для реализации функция в КМДП-базисе) выполняются ПЗС-элементами. Усиление выходного сигнала осуществляется КМДП буферным услителем. Функции дешифрирования и запоминания кодов деселекции выполняются цифровыми КМДП-элементами.

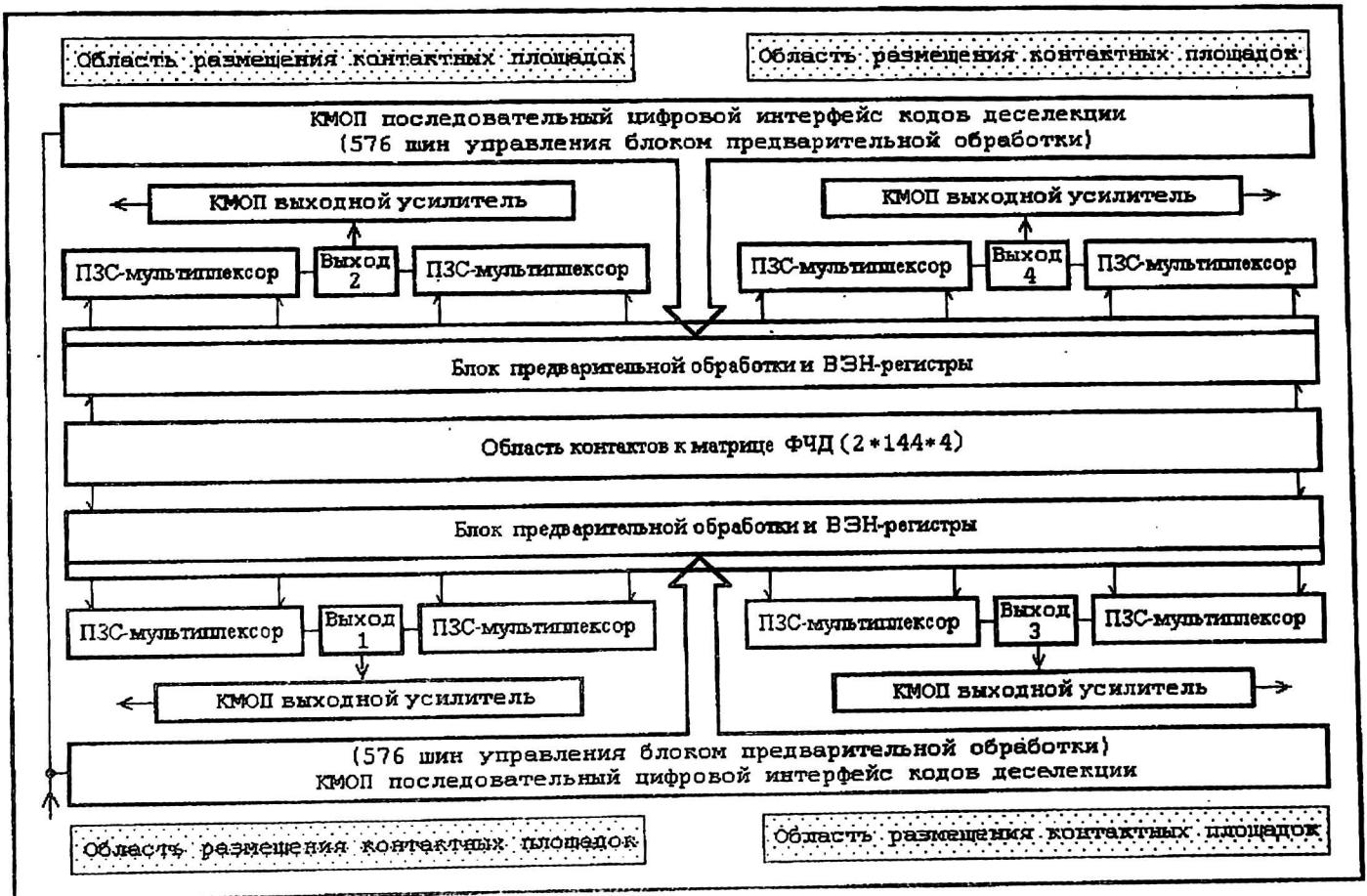


Рис. 1. Структура кристалла схемы считывания 288×4 с деселекцией бракованных элементов

В области контактов к матрице фотодиодов (т. е. в площади пикселя размером 56×43 мкм) располагаются контактные площадки для формирования индиевых столбиков и входные согласующие устройства. В качестве входной согласующей схемы (рис. 2) избрано традиционное входное устройство, включающее в себя транзистор прямой инжекции, накопительные конденсаторы, дополнительные затворы, обеспечивающие антиблуминг, деление и вычитание.

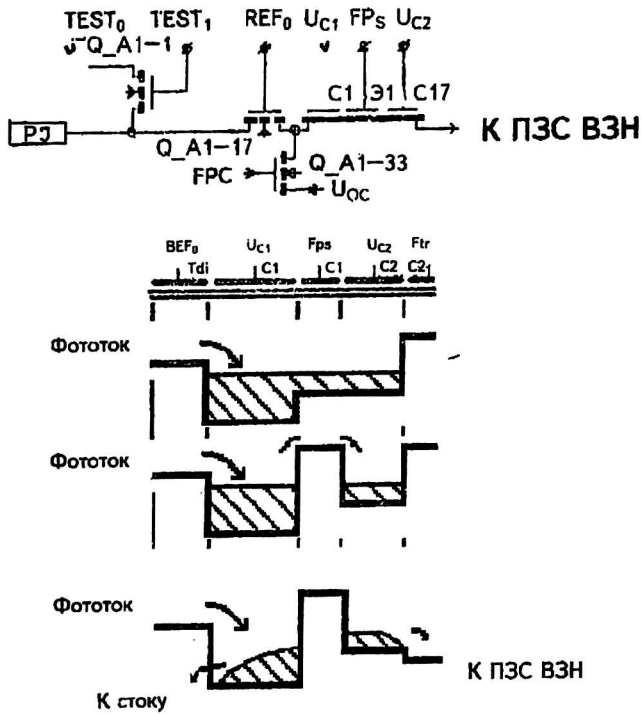


Рис. 2. Схематичный чертеж входной согласующей схемы

Повышенные требования по идентичности для таких каскадов определяют необходимость их изготовления без применения дополнительных подлегирований подзатворных областей. Управление деселекцией осуществляется по электроду C2 — его заземлением или приложением напряжения смещения, амплитудой 5 В.

Существует много возможных вариантов деселекции, однако такой вариант является оптимальным — неработающий фотодиод остается под некоторым смещением, которое обеспечивает затвор антиблуминга, его ток собирается шиной питания, что уменьшает его влияние на соседние элементы. С другой стороны, в такой конструкции нет ни одного дополнительного элемента. Максимальная величина входного заряда может достигать 4 пК.

ВЗН зарядов в канале осуществляются на ПЗС-регистрах. Так как каждый разряд ВЗН ПЗС-регистра должен вмещать суммарный пакет от четырех фотодиодов (при условии двунаправленности сканирования), они вынесены за область контактов к матрице фотодиодов. Площадь, занимаемая ВЗН ПЗС-регистром — 56×600 мкм. Реализация ВЗН-регистра — четырехфазный ПЗС с так называемым “полускрытым каналом” [4], размеры одной ячейки равны 48×16 мкм², что позволяет вместить заряд не менее 2пК. Полускрытый канал создается ионным легированием фосфора. Для ВЗН ПЗС-регистров и ПЗС-мультиплексоров существует общая проблема — снижение эффективности переноса с понижением температуры [4]. Необходимо отметить, что эта проблема существенно не сказывается на конечных характеристиках приборов. При используемой длине ПЗС-регистров низкая эффективность передачи приводит к увеличению взаимосвязи между каналами всего на 0,5–1%. В настоящее время более важным является то, что температурное снижение эффективности переноса еще более значительно для мелких скрытых каналов, созданных легированием мышьяка, как это следует из рис. 3, на котором показаны температурные зависимости неэффективности переноса для каналов, изготовленных по различным технологиям. Это не дает возможности снизить напряжение питания ПЗС-регистров. В спроектированной схеме питание ПЗС-регистров осуществляется тактовыми импульсами с амплитудой 10 В.

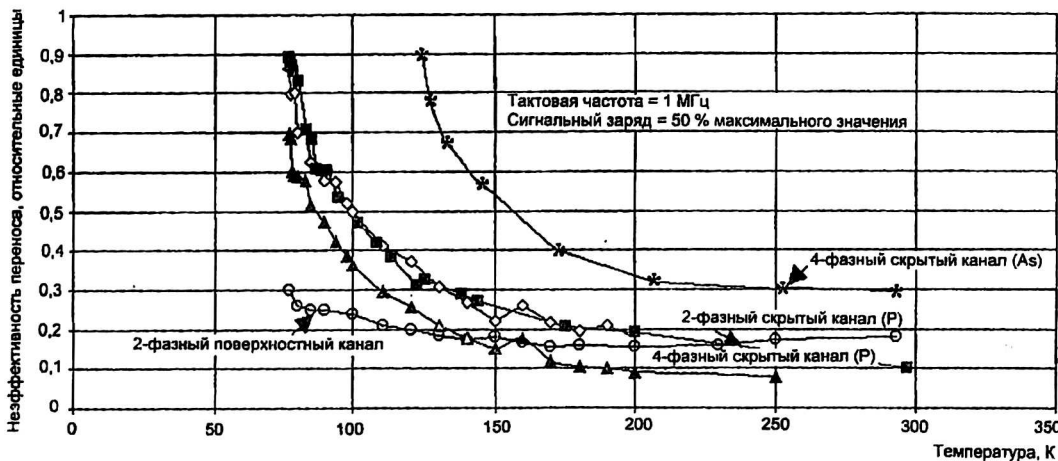


Рис. 3. Зависимость неэффективности переноса в ПЗС от температуры

Для уменьшения числа видеовыходов мультиплексирование информации осуществляется 36-разрядными аналоговыми ПЗС-регистрами, которые по два объединяются с помощью выходных схем (см. рис. 1). Эти ПЗС-регистры выполнены также по технологии четырехфазных ПЗС с двумя уровнями поликристаллического кремния. Для удобства объединения и недопущения снижения соотношения сигнал/шум мультиплексирование сигналов осуществляется в разных направлениях: одним регистром снизу вверх, другим сверху вниз. Это приводит к необходимости перестановки информации, но не занимает дополнительных вычислительных ресурсов при ее дальнейшей обработке, так как перестановки необходимы в силу конструкции ФПУ.

Объединение сигналов от двух мультиплексов осуществляется с помощью специально спроектированного КМДП-усилителя/преобразователя, осуществляющего функции преобразования заряда в напряжение, выборки-хранения, преобразования (сдвига) уровня. На рис. 4 пред-

ставлена характеристика преобразования заряд-напряжение.

Сведение к минимуму нелинейных составляющих выходной преобразующей емкости ПЗС позволяет получить линейность преобразования лучше ± 50 мВ. Это достигается тщательным конструированием топологии выходного узла, исключением нелинейностей выходного повторителя. Для уменьшения количества выводов в усилителе/преобразователе используются только тактовые сигналы ПЗС-мультиплексора. Размах выходного сигнала при заряде 2,4 пК составляет более 3 В.

Сигналы, поступающие от усилителей/преобразователей усиливаются выходным буферным усилителем. Он представляет собой операционный усилитель со 100%-ной обратной связью и корректирующими частотную характеристику цепями. Буферный усилитель не искажает выходной сигнал при работе на максимальной частоте 4 МГц и нагрузке 1 мОм, 30 пФ (рис. 5).

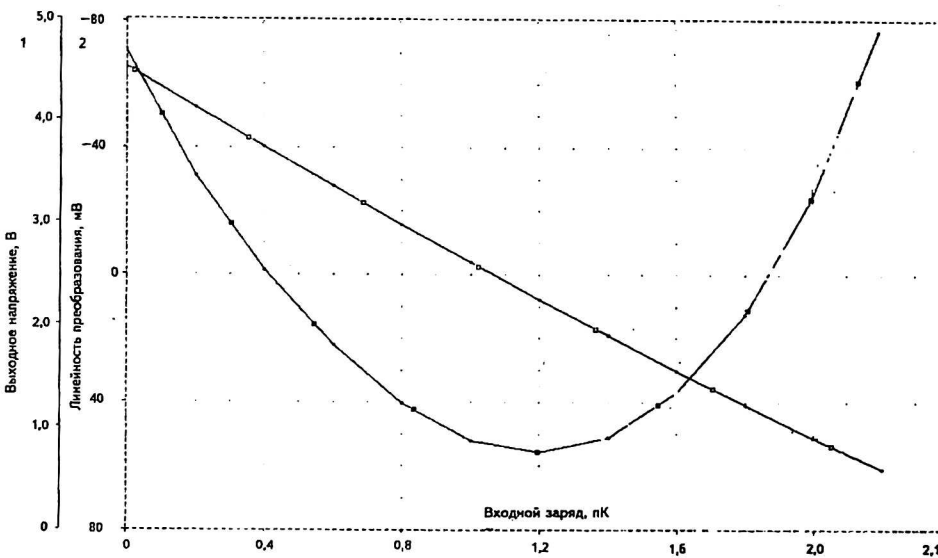


Рис. 4. Характеристика преобразования заряд-напряжение КМДП-усилителя/преобразователя

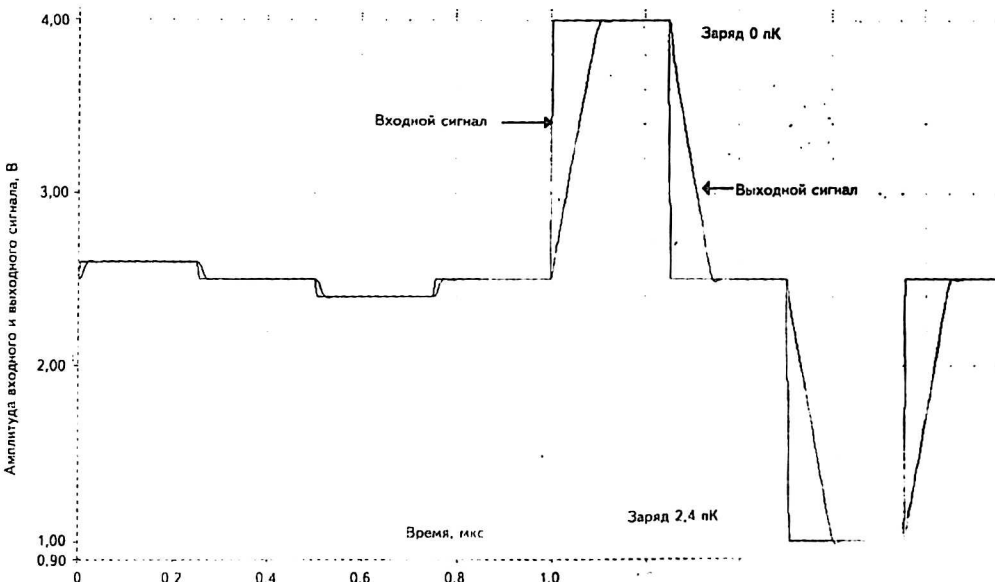


Рис. 5. Вид сигнала на входе и на выходе буферного усилителя

Один из важнейших параметров схемы считывания — это потребляемая мощность. Ограничения, по которым проектировались выходные устройства, составляют 10 мВт на один выход. Расчеты показывают, что максимальное значение тока потребления при любых разбросах технологических параметров не превышает 2 мА (т. е. при 5В питания мощность не более 10 мВт).

Управление отключением (деселекцией) фотодиодов осуществляет последовательный бифазный регистр с защелками. Структурная схема одного разряда регистра включает ячейку регистра сдвига, ячейку запоминающего устройства коэффициентов и ячейку преобразователя уровня. При использовании для деселекции напряжения 5 В ячейку преобразователя уровня можно исключить. Все ячейки построены на D-триггерах, имеющих один информационный вход D и один синхронизирующий вход. Для управления регистром деселекции необходимы три вывода (дополнительные выводы из холодной зоны) — вывод для ввода информации, синхронизирующий вывод и вход загрузки запоминающего устройства деселекции.

Для сравнения в табл. 2 приведены основные параметры спроектированной и известных схем считывания.

стоимостным характеристикам превосходит известные.

Выводы

Использование предложенной “смешанной” концепции построения схем считывания для фокальных процессоров с ВЗН и деселекцией элементов позволяет на базе ПЗС-технологии с проектными нормами 2,5 мкм и КМДП-технологии с проектными нормами 2,0 мкм реализовать на кристалле размером 9,5×7,5 мкм² схему считывания формата 288×4, с четырьмя информационными выходами, максимальной частотой вывода информации 4 МГц, максимальной тактовой частотой ПЗС 2 МГц, с ВЗН по четырем элементам, максимальной зарядовой емкостью по каждому входу 4,0 пК, максимальной зарядовой емкостью на входе мультиплексо-ра 2,0 пК, с количеством выводов 28, т. е. с параметрами, реализуемыми для схемы считывания, используемой в ФПУ ВД TL015-V3 формата 288×4.

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СХЕМ СЧИТЫВАНИЯ ФОРМАТА 288×4

Параметры	Значение		
	TL005	TL015	Проект
Характеристика технологии изготовления	1,6 мкм ПЗС	0,8 мкм КМОП	2,0 КМОП 2,5 ПЗС
Формат	2×4×144	2×4×144	2×4×144
Тип сопряжения	Прямая инжекция		
Регулировка напряжения транзистора прямой инжекции, В	0—2	0—2	0—2
Наличие возможности деселекции	Нет	Есть	Есть
Наличие изменения коэффициента усиления	"	"	Нет
Зарядовая емкость по входу, пК:			
линейный режим	0,3	2,8	2,0
режим деления	1,3	—	4,0
режим деления/вычитания	2,4	—	—
Число видеовыходов	16	4	4
Номинальная частота вывода информации, МГц	1	4	4
Размах выходного напряжения, В	4,0—5,0	2,5	3,0
Динамический диапазон, дБ	65	80	70(80)
Число выводов	41	28	28
Питающие напряжения, В	15; 13; 13,7	5	5; 10

Из табл. 2 видно, что по основным параметрам спроектированная схема не уступает известным, но требует значительно более простой технологии изготовления и, следовательно, по

Литература

1. *Tribolet P., Chatard J.-P.* From research to production: 10 years of success//Proc. SPIE. 2000. V. 4130.
2. *Hewitt M. J., Vampola J. L., Black S. H., Nielsen C. J.* Infrared readout electronics: a historical perspective//Ibid. 1994. V. 2226.

3. Пономаренко В. П., Филачев А. М. Фотоприемники и фотоприемные модули нового поколения//Прикладная физика. 2001. № 6. С. 20—37.

4. Sizov F. F., Derkach Yu. P., Reva V. P., Kononenko Yu. G. MCT sensor readout devices with charge current injection and preliminary signal treatment//Opto-Electronics Review. 1999. V. 7. P. 327—338.

5. Sofradir Data Sheet, 2001.

6. Kozłowski L. J., Kosonoki W. F. Infrared detector arrays, in Handbook of Optics, edited by M. Boss, W. Van Stryland, D. R. Williams and W. L. Wolf, McGraw-Hill, New York, 1995.

7. Рева В. П., Сизов Ф. Ф. Устройства считывания для многоэлементных ИК-фотодиодов// Прикладная физика. 2002. № 1. С. 81—99.

8. Sizov F. F., Reva V. P., Derkach Yu. P., Kononenko Yu. G., Golenkov A. G., Korinets S. V., Darchuk S. D., Filenko D. A. IR sensor readout devices with source input. Semiconductor Physics//Quantum Electronics and Optoelectronics, 1999. V. 2. P. 102—110.

9. Kozłowski L. J., Vural K., Tennant W. E., Kleinhaus W. E., Gergis I. S. Progress toward high-performance infrared imaging systems-on-a-chip// Proc. SPIE. 2000. V. 4130. P. 245—253.

“Mixed” concept of creation of readout circuits for focal processors with TDI and deselection

Yu. P. Derkach, V. P. Reva

Scientific and Research Institute of Microdevices, Kiev, Ukraine

F. F. Sizov

Institute of Semiconductor Physics of the Ukrainian Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

It is considered the possibility to use the “mixed” technology (the n-channel charge-coupled devices (CCD) technology and the complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) technology) for designing and manufacturing of the read-out devices to be used for information readout from multielement infrared (IR) 288×4 diode matrices with time delay and integration function. It is shown that in this case the much more “soft” design rules can be used. The read-out structure chart and some of its parts description are presented. The calculated parameters of the designed read-out circuit for IR multi-row linear photodiode arrays are listed.