

# КМОП-фотодиодные СБИС

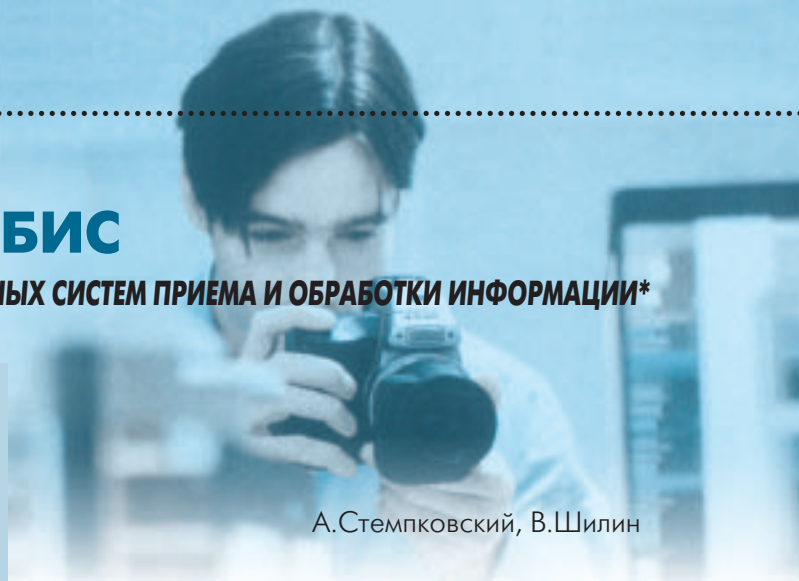
ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ\*

Сегодня фоточувствительные БИС и камеры на их основе можно найти в самом разнообразном электронном оборудовании – автомобильной электронике, компьютерных видеосистемах, бытовых видеокамерах и фотоаппаратах, видеотелефонах, биомедицинских системах, игрушках, считывателях штриховых кодов, системах наблюдения, охраны и безопасности [1,2]. До недавнего времени на рынке фоточувствительных БИС доминировали фоточувствительные ПЗС (ФПЗС). Однако по мере развития КМОП-технологии ФПЗС все активнее вытесняются более дешевыми (благодаря массовой технологии изготовления) КМОП-фотодиодными (КМОП-ФД) микросхемами, позволяющими реализовать однокристальные цифровые камеры. Каковы достоинства и недостатки КМОП-ФД в сравнении с ФПЗС? Каковы наиболее перспективные направления их разработок?

## ВВЕДЕНИЕ

КМОП-ФД микросхемы появились в результате развития фотодиодных матриц, координатная выборка в которых осуществлялась с помощью N-канальных МОП-дешифраторов и регистров, сформированных на том же кристалле. Основной недостаток таких N-канальных МОП-фотодиодных матриц – малая амплитуда выходных сигналов и высокий уровень шумов. Это обусловлено считыванием сигнальных зарядов на шины столбцов, емкость которых велика и пропорциональна числу пикселей в столбце, т.е. пропорциональна формату матрицы. И поскольку МОП-фотодиодные матрицы существенно проигрывали ФПЗС, их разработки были прекращены. В результате к 2002 году появились матричные ФПЗС формата 4096x4096 пикселей, линейные матрицы с несколькими выходами, содержащие 8000–12000 пикселей (фирма Kodak), а также ФПЗС с временной задержкой и накоплением форматом 576x128 пикселей, работающие в широком диапазоне скоростей движения изображения (фирма Dalsa). Вместе с тем, высокий уровень развития и широкое распространение КМОП-технологии позволили, в конце концов, реализовать КМОП-фотодиодные матрицы с активными элементами. И сегодня в области фоточувствительных СБИС помимо дальнейшего совершенствования ФПЗС наблюдаются интенсивные разработки КМОП-ФД матриц с внутрикристалльными схемами управления и обработки изображения.

\*Исследования поддержаны РФФИ, грант №02-01-01076.



А.Стемпковский, В.Шилин

Рынок фоточувствительных БИС постоянно растет. При этом объем выпуска КМОП-ФД практически удваивается каждый год и к 2004 году должен достичь 140 млн. шт., тогда как ФПЗС будут выпускаться лишь в объеме, необходимом для производства высококачественных оптоэлектронных систем, т.е. примерно 50 млн. шт. в год [1].

## ПРИНЦИП РАБОТЫ КМОП-ФД СБИС

Фоточувствительные КМОП-ФД СБИС содержат матрицу активных фоточувствительных элементов (активных пикселей), схемы управления, аналоговые усилители считывания на выходе каждого столбца, АЦП и ряд других цифровых блоков (рис.1). В таких КМОП-ФД матрицах схемы управления могут реализовывать произвольную координатную выборку сигналов, что значительно расширяет возможности фильтрации и обработки (в том числе параллельной) сигналов изображения. Задачи выделения окна интереса (ОИ), в котором расположена цель, и слежения за ней решаются путем считывания сигналов только требуемых элементов. А поскольку обычно ОИ занимает небольшую часть кадра, скорость считывания, по сравнению с ФПЗС, в которых необходимо считывать весь кадр, может быть значительно увеличена.

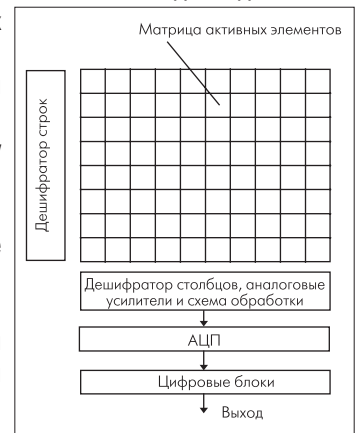


Рис.1. Структурная схема КМОП-ФД СБИС

В отличие от ФПЗС, в которых необходимо считывать весь кадр, скорость считывания, по сравнению с ФПЗС, в которых необходимо считывать весь кадр, может быть значительно увеличена.

Активный элемент образован фотодиодом (ФД) и четырьмя транзисторами (рис.2), которые выполняют функции считывания за-

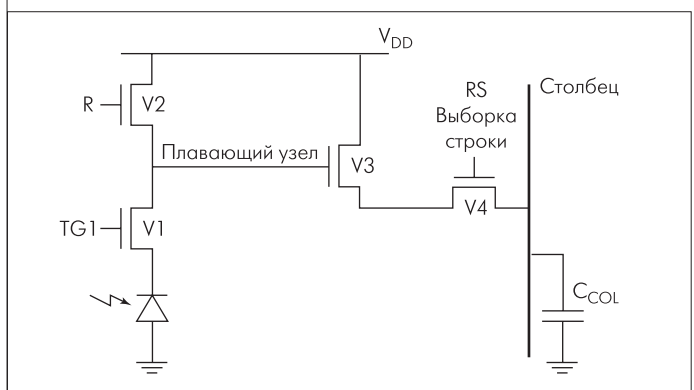


Рис.2. Схема активного пикселя



ряда, накопленного фотодиодом (транзистор V1), восстановления исходного напряжения (V2), входа истокового повторителя (V3) и выборки строк (V4). Исток транзистора V4 подключен к шине столбца [3]. В режиме интегрирования сигналов изображения импульс R, подаваемый на транзистор V2, равен нулю. ФД накапливает фотогенерированные электроны, и по мере их накопления потенциал диода уменьшается. В результате потенциал общего узла соединения транзисторов V1, V2 и V3 оказывается плавающим (плавающий узел). В режиме выборки на транзистор V2 поступает импульс восстановления R = 1, V2 открывается и потенциал плавающего узла восстанавливается до исходного уровня. Затем на все активные элементы выбранной строки подается импульс TG1 = 1, который поступает на затвор транзистора V1, открывая его. Накопленный фотодиодом сигнальный заряд передается в плавающий узел. После прихода импульса выборки строки RS = 1 открывается V4. Транзисторы V3, V4 и общий нагрузочный транзистор столбца (на рисунке не показан) образуют истоковый повторитель, и на шину столбца поступает усиленный по мощности сигнал ФД. Коэффициент передачи по напряжению истокового повторителя близок к единице. На шины столбцов передаются считанные сигналы всех элементов выбранной строки. Дешифратор столбцов последовательно выбирает сигналы шин и передает их на схему аналоговой обработки сигналов отдельных активных элементов матрицы. После окончания режима считывания сигнал RS = 0, и V4 закрывается. Начинается накопление заряда следующего кадра изображения.

Процессы накопления и считывания зарядов ФПЗС и КМОП-ФД различны. В ФПЗС фоточувствительная область занимает большую часть площади активного элемента (в специальных структурах – всю его площадь). Поэтому отношение площади фоточувствительной области к полной площади элемента, или фактор заполнения (Fill Factor – FF), может достигать 100%. В КМОП-ФД фоточувствительная область занимает лишь часть площади фоточувствительного элемента, тогда как остальная площадь занята шинами и КМОП-транзисторами. Поэтому фактор заполнения и фоточувствительность КМОП-ФД значительно ниже (30–35%), чем у ФПЗС. Для повышения фоточувствительности КМОП-ФД используются микролинзы (технология, освоенная ранее для ФПЗС), которые фокусируют большую часть падающего света на ФД. При перпендикулярном направлении падающего света это позволяет повысить FF до 80%. Однако для света, падающего под другими углами, эффективность применения микролинз резко падает, и реальное значение FF составляет лишь 45–50%.

Другая причина низкой фоточувствительности КМОП-ФД – фиксированная, неоптимальная структура ФД. Это связано с тем, что стандартная КМОП-технология позволяет формировать p-n-переход диода на глубине 0,25 мкм. В ФПЗС глубина залегания объемного канала больше, и для обеспечения максимального сбора фотогенерированных носителей ее можно оптимизировать. Проблема увеличения фоточувствительности КМОП-ФД решается путем изготовления структур с увеличенной глубиной залегания обедненного слоя (так называемых "проколотых" – rippled – структур), что, однако, требует проведения дополнительных технологических операций.

Как уже отмечалось, основное достоинство КМОП-ФД в сравнении с ФПЗС – возможность интеграции на одном кристалле функций приема и обработки изображения, т.е. реализации однокристалльной камеры с цифровым выходом. Правда, в зависимости от предъявляемых требований и стоимости КМОП-ФД камеры могут быть двух- и даже трехкристалльными, и функции приема и обработки изображения выполняться разными КМОП-микросхемами. Другие достоинства КМОП-ФД – низкая потребляемая мощность, воз-

### Сравнительные характеристики ФПЗС и КМОП-ФД [3]

Параметр	ФПЗС	КМОП-ФД
Минимальный размер пиксела, мкм	3–5	6–8
Максимальный формат, пиксели	4080x4080	2000x2000
Минимальный шум считывания на частоте 10 МГц, число электронов	8–10 (устройства для астрономических наблюдений и специального назначения), 20–25 (устройства бытового и промышленного назначения)	20–40
Темновой ток, нА/см <sup>2</sup>	0,01–1	2–5
Фактор заполнения, FF, %	70–90	30–50
Потребляемая мощность при частоте 30 кадров/с, мкВт/пиксел	0,03–0,1	0,6–0,9 (для однокристалльной камеры)
Неоднородность чувствительности, %	2–3	3–5
Динамический диапазон, дБ	60–70	50–60 (90 при логарифмическом выходе)
Произвольная выборка сигналов изображения в требуемых окнах	Отсутствует	Реализуется
Интеграция дополнительных функций на кристалле	Простые аналоговые функции обработки	Программируемые цифровые и аналоговые функции
Внешние управляющие сигналы	Источники питания на 5–12 В и трех-девяти фазовых импульсов	Источники питания на 2,5–5 В и одного синхриимпульса
Технология производства	Специальная	Отлаженная КМОП-технология
Реализация цифровой камеры	ФПЗС, СБИС управления и АЦП	Однокристалльная
Предпочтительные области применения	Научные, космические и медицинские системы	Однокристалльные бытовые (фото- и видеокамеры), автомобильные и охранные системы, видеотелефоны, СТЗ

можность программирования интересующих пользователя окон и высокая скорость считывания данных. Основные недостатки – высокий геометрический шум, обусловленный тем, что активный элемент содержит несколько МОП-транзисторов и несколько шин, низкая фоточувствительность, более высокий темновой ток, большие размеры активного элемента, меньшая, чем у ФПЗС, разрешающая способность (см. таблицу).

**Элемент с фоточувствительным затвором.** Для устранения шума процесса восстановления в КМОП-ФД было предложено заменить фотодиод фоточувствительным затвором, в потенциальной яме которого накапливаются фотогенерированные сигнальные заряды (рис.3). В режиме считывания на затвор транзистора V1 подается отпирающий его импульс восстановления R1. Потенциал плавающего затвора восстанавливается до исходного уровня. По-

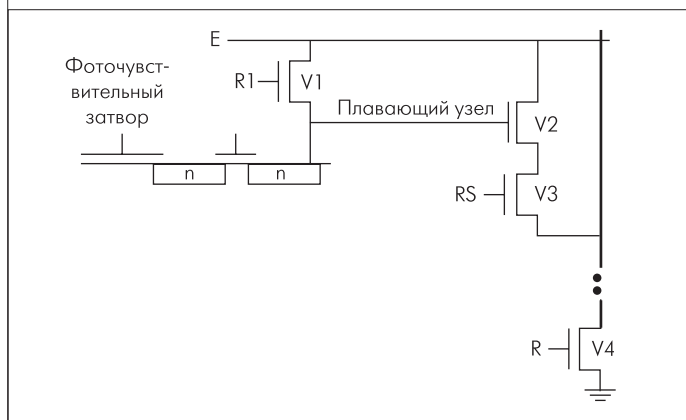


Рис.3. Пиксел с фоточувствительным затвором

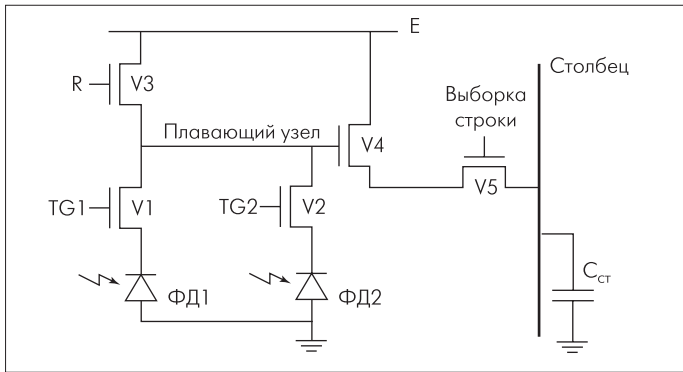


Рис.4. Электрическая схема элемента с совмещенным управлением

следующий импульс передачи открывает дополнительный затвор, накопленный сигнальный заряд перетекает в плавающий узел, и потенциальная яма фоточувствительного затвора освобождается. Потенциал узла понижается на величину заряда. Такая схема позволяет выполнять двойную корреляционную выборку (ДКВ), которая практически и устраняет шум процесса восстановления. В этом случае после восстановления плавающего потенциала узла на затвор транзистора V3 подается открывающий его импульс выборки строки  $RS = 1$ . Начальное напряжение на затворе транзистора V2 (в которое входит и шум восстановления) через истоковый повторитель передается на шину столбца и запоминается на ее выходе. При поступлении на плавающий узел сигнального заряда напряжение на транзисторе V2 понижается на величину поступившего заряда, и это напряжение также передается на выход шины столбца. В результате выходной сигнал представляет собой разность значений напряжения транзистора V2, что и позволяет устранить шум восстановления. Недостаток схемы с фоточувствительным затвором – снижение фоточувствительности из-за меньшей, в сравнении с ФД, прозрачности затвора и, соответственно, коэффициента заполнения FF.

**Элемент с совмещенным управлением.** С целью уменьшения числа транзисторов активного элемента и организации прогрессивного процесса считывания специалисты компаний Kodak и Motorola разработали элемент с совмещенным управлением [4]. Он содержит общие на два активных элемента восстанавливающий транзистор V3 и истоковый повторитель на транзисторах V4 и V5, который последовательно передает на шину столбца сигналы двух соседних ФД (рис.4). Два дополнительных транзистора связи – V1 и V2 – выполняют функцию адресации ФД. В режиме интегрирования ФД накапливают сигнальные заряды. При отпирании транзистора связи V1 сигнал первого ФД передается в общую для двух фоточувствительных элементов диффузионную область и затем через истоковый повторитель – на выход шины столбца. Потенциал ФД1 восстанавливается, и V1 закрывается. Отпирается транзистор V2, и на выход поступает сигнал ФД2. Таким образом, элемент с совмещенным управлением содержит пять управляющих транзисторов и два фоточувствительных элемента. Такая схема используется в формате КМОП-ФД форматом 1280x1024 элементов.

**РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА**

Основной параметр активного элемента – фактор заполнения FF, задающий фоточувствительность КМОП-ФД матриц. Он определяется как  $FF = S_{фд}/S_э$ , где  $S_{фд}$  – площадь фотодиода и  $S_э$  – полная площадь активного элемента. Заряд  $Q_{фд}$ , накопленный ФД, зависит от потока фотонов  $\phi$ , площади ФД  $S_{фд}$  и времени интегрирования  $t_{инт}$ , т.е.  $Q_{фд} = q \cdot \phi \cdot t_{инт} \cdot S_{фд}$ , где  $q$  – заряд электрона. Изменение на-

пряжения на плавающем узле зависит от его суммарной емкости  $C_{fn}$ , в которую входят емкость стока транзистора V1, истока V2, затвора V3 и межсоединений:

$$\Delta U_{фд} = \frac{Q_{фд}}{C_{fn}}$$

Время восстановления  $t_{res}$  потенциала плавающего узла определяется из решения обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего процесс заряда емкости плавающего узла током открытого (при подаче импульса  $K = 1$ ) транзистора восстановления V1:

$$t_{res} = C_{fn} \frac{\frac{1}{(E-U_0)(1-\alpha)} - \frac{1}{\Delta U_{фд}(1-\eta)}}{K_2(1-\eta)}, \tag{1}$$

где  $E$  – напряжение питания,  $U_0$  – пороговое напряжение транзистора,  $\Delta U_{фд}$  – изменение потенциала ФД в результате накопления заряда,  $\eta$  – коэффициент влияния подложки,  $\alpha$  – требуемый относительный уровень восстановления плавающего узла,  $K_2$  – крутизна транзистора V2.

Время считывания  $t_{out}$  сигнального напряжения на шину столбца зависит от длительности переходного процесса в истоковом повторителе:

$$t_{out} = \frac{C_c}{\sqrt{I_c K_{34}}} \ln \left[ \frac{2}{1-\beta} \sqrt{\frac{I_c}{K_{34}} - \Delta U_{фд}} \right], \tag{2}$$

где  $C_c$  – емкость шины столбца,  $I_c$  – ток столбца,  $K_{34}$  – эквивалентная крутизна последовательно включенных транзисторов V3 и V4,  $\beta$  – уровень восстановления сигнала при считывании.

Одна из важнейших характеристик фотоприемника, определяющая его разрешающую способность, – функция передачи модуляции (ФПМ). С учетом дискретности расположения элементов и диффузионного расстояния ФПМ может быть выражена как:

$$ФПМ = \frac{L_y}{\pi \cdot L} \sin\left(\pi \frac{L}{L_y}\right) \frac{1 - \frac{e^{-x_\infty \cdot \mu}}{1 + \mu \cdot L_k}}{1 - \frac{e^{-x_\infty \cdot \mu}}{1 + \mu \cdot L_n}}, \tag{3}$$

где  $L$  – длина фоточувствительной области (ФД) активного элемента,  $L_y$  – полупериод входного гармонического пространственного сигнала,  $\mu$  – коэффициент поглощения фотонов,  $x_\infty$  – толщина обедненного слоя,  $L_n$  – диффузионная длина электронов,  $L_k$  – эффективная длина, зависящая от пространственной частоты (если число активных элементов, приходящихся на полупериод входного сигнала, равно  $n_L$ , то  $1/n_L$  – относительная пространственная частота).

Расчет зависимости ФПМ от относительной пространственной частоты проводился для активного элемента квадратной формы 8x8 мкм, выполненного с проектными нормами 0,5 мкм. Длина ФД, определяющего апертуру элемента, по вертикали равна 3,5 мкм, по горизонтали – 7,5 мкм, глубина залегания рп-перехода ФД – 1 мкм. Время интегрирования – 100 мс. Так как размеры апертуры по горизонтали и вертикали различны, то и значения ФПМ в этих направлениях будут различаться (рис.5).

Проблему максимизации фоточувствительности можно сформулировать в виде задачи нелинейного программирования, для кото-

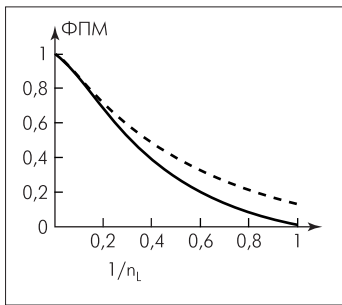


Рис.5. Зависимости ФПМ по горизонтали (—) и вертикали (---)

спад ФПМ в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также на размеры активного элемента, топологически связанные с геометрическими размерами транзисторов и шин элемента.

Топология активного элемента может быть описана геометрической моделью, связывающей размеры активного элемента квадратной формы  $L_3$  с шириной каналов транзисторов, размерами шин и контактных окон (при заданной проектной норме  $l_n$ ). Транзисторы имеют минимальную длину каналов, ширина шин и размеры контактных окон также минимальны и определяются проектной нормой  $l_n$  (рис.6). В этом случае можно сформулировать следующие ограничения на размеры активного элемента  $L_3$  и ФД  $L_v$  по вертикали:

$$L_3 > W2 + 11l_n, \quad L_v < L_3 - (W3 + 8l_n),$$

$$L_v < L_3 - (W4 + 6l_n). \tag{4}$$

Добавив к выражению (4) уравнения расчета значений времени восстановления и считывания и ФПМ (1–3), получим полную систему ограничений для задачи нелинейного программирования.

Оптимизация для частного случая  $W3 = W4$  при проектной норме  $l_n = 0,5$  мкм и размерах активного элемента (пиксела)  $8 \times 8$  мкм и  $l_n = 0,25$  мкм и  $5 \times 5$  мкм, соответственно, показала, что с увеличением значений минимального уровня ФПМ фактор FF резко снижается (рис.7), так как размеры апертуры уменьшаются.

Разрешающая способность  $R$  фотоприемника – это максимальная пространственная частота, при которой ФПМ спадает не ниже заданного уровня. Значение  $R$  измеряется числом пар (светлая/темная) линий на миллиметр длины. С увеличением разрешающей способности FF снижается, а при заданном разрешении

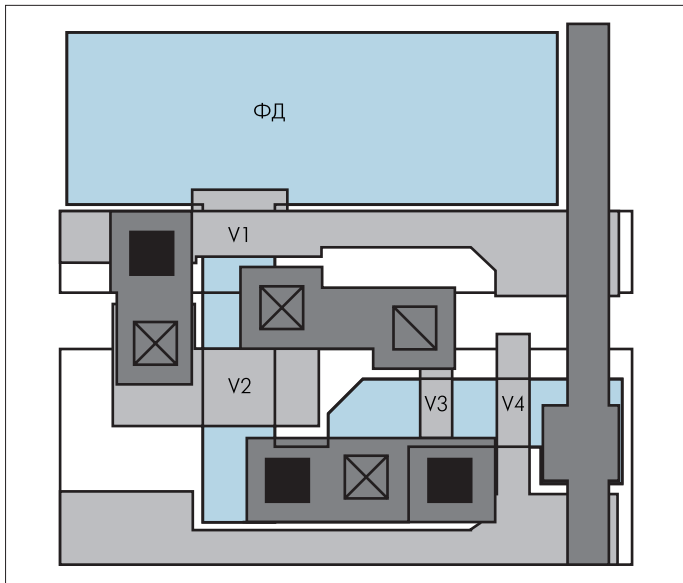


Рис.6. Топология КМОП-ФД активного элемента на четырех транзисторах

рой FF, или фоточувствительность, – максимизируемая целевая функция [5,6]. Параметры оптимизации – размеры транзисторов, переменные – значения ширины каналов  $W1$ ,  $W2$  и  $W3$  транзисторов  $V1$ ,  $V2$  и  $V3$ , соответственно. Ограничения накладываются на значения времени восстановления и считывания сигналов, на отношение сигнал/шум, предельный

FF увеличивается с уменьшением размера активных элементов (рис.8, 9).

### ОДНОКРИСТАЛЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ КМОП-ФД КАМЕРЫ

Для современных систем требуются быстродействующие фотоприемные СБИС, содержащие более  $10^6$  фоточувствительных элементов, с цифровым 8–10-бит выходом и скоростью вывода более 300 кадров/с. Этим требованиям удовлетворяет КМОП-ФД матрица фирмы Photobit, выполненная с проектной нормой 0,5 мкм, двухслойными поликремниевыми затворами и двухслойной металлизацией [7]. Фотоприемник имеет следующие характеристики:

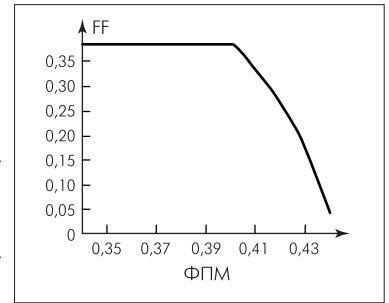


Рис.7. Зависимость оптимального FF от заданного ФПМ для активного элемента  $8 \times 8$  мкм с  $t_{res} = 50$  нс,  $t_{out} = 200$  нс, разрешающей способностью  $R = 50$  лин/мм, эквивалентным шумом 2 мВ

Формат фоточувствительной секции	1280(г)х720(в)
Организация считывания	Прогрессивная
Размер активного элемента, мкм	7,9х7,9
Фактор FF, %	23
Время накопления, считывания и цифрового преобразования сигналов одной строки, мкс	22,32
Внутрикристалльный АЦП	10-бит, 9-бит выход
Выход	Четыре 10-бит порта
Максимальная частота кадров, кадров/с	60 (при тактовой частоте 74,25 МГц)
Частота считывания сигналов, Мпикс/с	55
Коэффициент преобразования свет-сигнал, мкВ/эл	7
Эквивалентный темновой сигнал, мВ/с	23
Темновой ток, пА/см <sup>2</sup>	860
Напряжение насыщения, В	2,5 (360000 электронов)
Геометрический шум, %	0,4 от уровня насыщения
Энергопотребление, мВт	250 (при напряжении питания 5 В и частоте кадров 60 кадров/с)

Выходы каждого двух столбцов подключены к АЦП с автоматической калибровкой. АЦП занимает область кристалла шириной 15,8 мкм. Всего в микросхеме 640 АЦП, каждый из которых обслуживает два соседних элемента одной строки со скоростью 200 выборок/с. Возможность прерываний АЦП обеспечивает программирование характеристик фотоприемной СБИС, что в свою очередь позволяет расширить ее функциональные возможности. На входе каждого АЦП включена схема подавления геометрического шума, реализующая ДКВ. Каждый раз перед интегрированием очередного кадра происходит настройка

всех АЦП. Генератор выходной последовательности обеспечивает мультиплексирование 160 бит, а также уп-

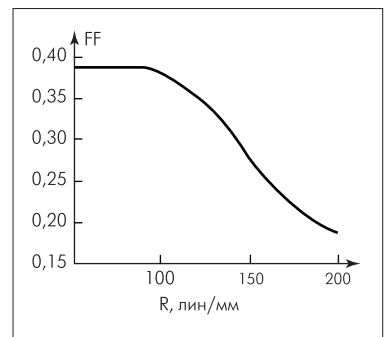
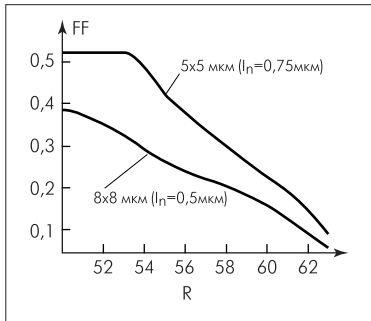


Рис.8. Зависимость оптимального FF от разрешающей способности для ФПМ = 0,2 и параметров активного элемента, указанных на рис.7



**Рис.9. Зависимость оптимального значения FF от разрешения R для активных элементов различных размеров (ФПМ = 0,4)**

равление внутренней шиной и 10-бит портами.

Одна из основных проблем приема изображений природных сцен – изменение освещенности в очень широком динамическом диапазоне. Поэтому усилия разработчиков КМОП-ФД фотоприемников направлены на увеличение их динамического диапазона. Специалистами Института микроэлектроники ФРГ этот параметр КМОП-ФД СБИС

форматом 128x128 пикселей расширен до 90 дБ за счет использования локального управления чувствительностью при неоднородной освещенности. Максимальная частота кадров фотоприемника – 240 в секунду [8].

Как известно, динамический диапазон определяется отношением максимального сигнала, зависящего от зарядовой емкости ФД, к минимальному сигналу, задаваемому шумами. Шумы могут быть снижены с помощью многократной выборки сигнала. Этот метод и был использован в разработанном в Станфордском университете приборе с форматом 640x512 пикселей и динамическим диапазоном более 65000. Особенность прибора – наличие встроенного в каждый активный элемент (пиксел) АЦП (ПАЦП), благодаря чему накопленный в элементе сигнал можно считывать в любой момент времени. Типовое время считывания строки – сотни наносекунд, т.е. сопоставимо с временем считывания ОЗУ. Другое важное достоинство ПАЦП – возможность программирования динамического диапазона без ухудшения отношения сигнал/шум. КМОП-ФД микросхема изготовлена с 0,35-мкм проектной нормой, четырехслойной металлизацией и однослойными поликремниевыми затворами. Фотодиод выполнен в виде *n*-кармана в подложке *p*-типа. На каждый активный элемент приходится 5,5 транзисторов (22 транзистора на четыре элемента). Фотоприемник расположен на кристалле размером 6,72x5 мм, монтируемом в 180-выводной корпус. КМОП-ФД имеет следующие характеристики:

Размер активного элемента (пикселя), мкм	10,5x10,5
Фактор FF, %	29
Напряжение питания, В	3,3
Уровень выходного сигнала, В	0,5–2, 5
Чувствительность устройства преобразования, мкВ/эл	4,1
Максимальная частота кадров, кадров/с	250
Темновой ток, нА/см <sup>2</sup>	1,65 (1,3 мВ/с) при температуре 25°C

По-видимому, одной из самых сложных КМОП-ФД СБИС можно считать созданную совместными усилиями специалистов фирмы Hyundai Electronics Industries и Гарвардского университета однокристалльную камеру форматом 800x600 пикселей [9]. Кристалл размером 7,6x8,6 мм содержит фоточувствительную секцию, 800 параллельных 8-бит АЦП, буферное ДОЗУ емкостью 3,2 Кбит, схемы ДКВ и управления. КМОП-ФД приемник выполнен по модифицированной технологии ДОЗУ, обеспечивающей низкий уровень темнового тока (25 нА/см<sup>2</sup>), с проектной нормой 0,5 мкм, трехслойной металлизацией и светозащитным экраном. Каждый активный элемент размером 8x8 мм содержит четыре транзистора и RGB-фильтр. Общее число транзисторов в СБИС – 2,2·10<sup>6</sup>.

Параметры прибора следующие: фактор FF – 28%, динамический диапазон – 48 дБ, уровень искажения сигналов – ниже 5%, потребляемая мощность при частоте 30 кадров/с – 100 мВт, напряжение питания камеры – 3,3 В. Однокристалльная камера смонтирована в стандартном 20-выводном корпусе DIP.

### КМОП-ФД СБИС ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ И ВОЕННОЙ АППАРАТУРЫ

Возможность совмещения на одном кристалле функций приема и обработки изображений позволяет создавать новую элементную базу для специальных применений. Видеосистема на основе цифрового КМОП-ФД приемника впервые была установлена в 1997 году на космическом аппарате Ariane 502 Европейского космического агентства, где успешно использовалась для наблюдения за процессом разделения спутников. Сейчас она дорабатывается для космического аппарата, который в 2003 году должен полететь на Марс.

По заказу Европейского космического центра фирмой FillFactory был разработан специальный КМОП-ФД приемник для космической аппаратуры [10]. Структура активного элемента приемника обеспечивает сбор фотогенерированных электронов со всей его площади, а не только с площади ФД. Это достигается за счет формирования электрических полей, обеспечивающих поток фотогенерированных электронов к области ФД. Транзисторы формируются в кармане *p*<sup>+</sup>-типа, изолированном от ФД потенциальным барьером. Фотогенерируемые по всей площади электроны собираются в кармане *p*-типа. Благодаря этому FF возрастает практически до 100% и фоточувствительность прибора значительно повышается.

Помимо фотоприемной секции на кристалле сформированы 10-бит АЦП, усилители, схемы ДКВ, схема поиска требуемого фрагмента изображения и гамма-корректор. Данные вводятся последовательно. Формат приемника – 1280x1024 пикселей (1,3 Мпикс) размером 7x7 мкм, частота кадров – 10 в секунду, динамический диапазон – 76 дБ, напряжение питания – 5 В. Приемник может воспринимать как черно-белое, так и цветное изображение. Он характеризуется повышенной радиационной стойкостью и отвечает требованиям класса жесткости для космических применений.

КМОП-ФД приемники нашли применение в системе космической ориентации и звездных датчиках со следующими характеристиками:

Частота считывания кадров, Гц	10
Угловая точность измерения, угл.мин	1
Эквивалентный шум измерения угла, угл.мин	1
Угол обзора, град.	20x20
Апертура	f/26
Порядок звезд	Пятизвездная величина
Потребляемая мощность	3,3 Вт
Охлаждение	Пассивное
Габариты, мм	78x57x57
Масса, г	310

Фирмой также создан быстродействующий КМОП-ФД приемник LUPA1300 с прогрессивной разверткой и 16 аналоговых выходами, что позволяет получить максимальную частоту кадров – 450 в секунду. Формат матрицы – 1280x1024 пикселей размером 14x14 мкм. Камера сформирована на кристалле размером 19,2x16,2 мм, монтируемом в 145-выводной корпус.

В США в рамках программы DARPA компания Xibion Electronic Systems разрабатывает комплексную систему наблюдения военного назначения, выполненную на базе КМОП-ФД приемников [11]. Изображения, принимаемые цифровыми камерами, установленными на борту космических аппаратов, беспилотных самолетов-разведчиков и на наземных станциях, через тактический центр переда-

ются на поле военных действий непосредственно солдату с носимым компьютером, который может видеть на нашлемном дисплее нужное ему изображение части поля боя. На командный пункт передается полная картина поля боя. В автономной бортовой аппаратуре будут использованы КМОП-ФД приемники форматом 1280x1024 пикселей, реализующие функции выбора, увеличения и слежения за интересующим фрагментом изображения.

США в следующем десятилетии планируют поставить на вооружение многокамерные системы, позволяющие получать полный круговой обзор и синтезировать изображение интересующих объектов с высоким разрешением. Планируется также использовать многоспектральные системы видимого и ИК-диапазонов, построенные на КМОП-ФД приемниках с узкополосными оптическими фильтрами. Эти системы особенно перспективны для поиска минных полей и замаскированных объектов.

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КМОП-ФД

КМОП-ФД этого класса можно разделить на два типа: приемники с внутрикристалльным процессором, позволяющим программировать различные задачи обработки изображения, и приемники с обработкой сигналов в каждом активном элементе. Примеры КМОП-ФД первого типа – фотоприемные СБИС фирм Siemens и Photobit. Процессор фотоприемника фирмы Siemens, содержащего 720x576 активных элементов, позволяет задавать размеры и расположение принимаемого ОИ, частоту кадров, время экспозиции, коэффициент усиления выходного сигнала. Процессор может реализовать полную цифровую обработку изображения с коррекцией геометрического шума, гамма-коррекцией и коррекцией данных дефектных элементов.

КМОП-ФД приемник фирмы Photobit содержит фотоприемную матрицу форматом 352x288 активных элементов, АЦП, аналоговый и цифровой сигнальные процессоры [12]. Аналоговый процессор производит выборку и хранение сигналов, ДКВ, программируемое усиление, аналоговую обработку изображения, цифровой – управление работой приемника, обработку цветных сигналов, сжатие изображения.

Обработка сигналов в каждом активном элементе позволяет получать высокое отношение сигнал/шум, малую потребляемую мощность и обрабатывать изображение в процессе его интегрирования. Однако достигается это за счет увеличения числа транзисторов в элементе и, следовательно, занимаемой ими площади. В результате уменьшается FF и снижается фоточувствительность приемника [13, 14]. Для такой обработки сигналов в каждом активном элементе приемника необходимо размещать АЦП и процессорный элемент с памятью. Сегодня на фирме Silicon Architects (США) уже реализованы опытные образцы КМОП-ФД второго типа с форматом 640x512 элементов и последовательным многоканальным АЦП в каждом элементе [15]. Анализ показывает, что практическая реализация таких устройств оправдана при проектной норме не выше 0,13 мкм. Ожидается, что с достижением в 2006 году проектной нормы 0,1 мкм в каждом активном элементе удастся сформировать до 40 транзисторов, а при 0,05-мкм норме число транзисторов в элементе возрастет до 256!

Интерес представляет и аналоговая обработка сигналов в каждом активном элементе или их группе, позволяющая выполнять в реальном времени классические методы обработки изображения: сжатие, выделение контуров, точечных целей и т.п. [15]. Возможно и создание однокристалльных нейроподобных сетей с оптическим входом, обрабатывающих двухмерные изображения и реализующих функции технического зрения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение КМОП-ФД и ФПЗС показывает, что КМОП-ФД уступают ФПЗС по разрешающей способности, фоточувствительности, однородности и динамическому диапазону. Поэтому космическую оптоэлектронную аппаратуру дистанционного зондирования Земли, высокоточные системы технического зрения, астрономическое, медицинское и биологическое оборудование следует строить на основе ФПЗС. КМОП-ФД приемники же нашли широкое применение не только в бытовой аппаратуре (цифровые камеры и фотоаппараты, видеотелефоны, системы безопасности транспорта), но и в промышленных, космических и оборонных системах (астронавигации, астроориентации, техническом зрении, системах наблюдения и контроля и т.п.). Основное достоинство КМОП-ФД – возможность создания однокристалльных цифровых камер с устройствами аналоговой, цифровой и нейроподобной обработки изображения. Поэтому наиболее перспективные направления разработок – создание интеллектуальных камер, которые в ближайшее десятилетие позволят реализовать системы технического и искусственного зрения, сопоставимые по характеристикам с биологическим зрением. Вот почему КМОП-ФД БИС следует отнести к технологии федерального уровня, способной обеспечить современной элементной базой научный, промышленный и оборонный комплексы России.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Titus H. Imaging Sensors that Capture Your Attention.– Sensors, 2001, Feb.
2. FillFactory CMOS APS Space Applications/ www.fillfactory.com
3. Hogan H. Imaging is Everything.– Photonics Spectra, 1998, p.82–84.
4. Agvany S., Domer S., Rubacha R., Stanley S. High Performance, VGA Resolution Digital Color CMOS Imager.– IS&T/SPIE Conference on Sensors, Cameras and Systems. – Proc. of SPIE, v.3649, p.154–164.
5. Shilin V.A., Skrylev P.A., Stempkovsky A.L. Analytical Models of CMOS APS.– Second Conference on Photonics for Transportation, Proc. of SPIE, v.4761, p. 176–187 (2001).
6. Shilin V.A., Skrylev P.A., Stempkovsky A.L. Optimum Design of CMOS APS. – Fourth Conference on Photonics, Prague, Proc. of SPIE, v.4761, p.176–187 (2002).
7. Mansoorian B., Yee H-Y., Huang S., Fossum E. A 250mW, 60 frames/s 1280x720 pixel 9b CMOS digital image sensor. – IEEE Int. Solid-State Circuit Conference, 1999.
8. Schrey O., Hauschild R., Hosticka B.J., Iurgel U., Schwarz M. Locally Adaptive CMOS Image Sensor with 90 dB Dynamic Range. – IEEE Int. Solid-State Circuit Conference, 1999.
9. Fossum E. Pushing the Envelope. – OE Magazine, №1, 2001.
10. FillFactory–CMOS Space Applications, www.fillfactory.com
11. Durso C. Surveillance Gives the Big Picture.– OE Magazine, April, 2002, p.24–26.
12. Ramacher U. et al. Single-Chip Video Camera with Multiple Integrated Functions.– IEEE Int. Solid-State Circuit Conference, 1999.
13. Gamal A.E., Yang D., Fowler B. Pixel Level Processing – Why, What, and How? Stanford University, 2001.
14. Aizava K. et al. On Sensor Image Compression. – IEEE Tran. on Circuit and Systems for Video technology, pp. 543 – 548, 1997.
15. Yang D., Gamal A.E., Fowler B., Tian H. A 640x512 CMOS Image Sensor with Ultra Wide Dynamic Range Floating-point ADC. – IEEE Int. Solid-State Circuit Conference, 1999.