

Твёрдотельные телевизионные преобразователи свет/сигнал.

Аннотация. В докладе рассмотрены основные характеристики телевизионных твёрдотельных преобразователей свет сигнал на основе фоточувствительных матриц на приборах с зарядовой связью и на КМОП транзисторах. Показано, что в настоящее время ПЗС технология достигла совершенства. Однако, она не позволяет произвести телевизионные камеры полностью в интегральном исполнении на одном кристалле. Рассмотрены варианты построения фоточувствительных матриц на КМОП. Определена перспектива повсеместного использования датчиков сигнала изображений на основе КМОП технологии.

Электронное телевидение появилось с изобретения передающей телевизионной трубки «иконоскоп», изобретателем которой является основатель кафедры телевидения Московского электротехнического института связи, ныне МТУСИ, д.т.н. профессор С.И. Катаев (авторское свидетельство СССР № 29865, заявлено 24.09. 1931 г., выдано 30.03. 1933 г.). С тех пор электронное телевидение стало развиваться бурными темпами. Телевизионные трубки всё более совершенствовались, увеличивалась светочувствительность, уменьшались габариты, повышались надёжность и качество работы. Но с появлением полупроводников бурными темпами стала развиваться технология интегральных микросхем. В результате чего передающие трубки, не смотря на их совершенство, стали сдерживающим фактором развития телевизионных камер. Хотя в последних разработках телевизионных камер использовались интегральные микросхемы, они всё же имели низкую надёжность и большие габариты.

С совершенствованием технологии производства интегральных схем, у разработчиков ТВ камер появилось желание разработать ТВ преобразователи свет - сигнал в интегральном исполнении. Были попытки разработки подобных сенсоров на основе КМОП технологии ещё в 60-х годах, но они не увенчались успехом из-за низкого качества воспроизводимого изображения (неравномерная чувствительность отдельных пикселей, большой уровень шума).

Из тупика развития твёрдотельных камер вывело изобретение Бойлом Смитом в 1969 г. технологии приборов с зарядовой связью (ПЗС). С этого момента ПЗС технология изготовления фоточувствительных матриц для ТВ камер полностью вытеснила КМОП технологию и, естественно, передающие трубки. В конце 90-х годов технология ПЗС была практически доведена до совершенства.

Основой всех фоточувствительных матриц ПЗС (ФМПЗС) являются вертикальные и горизонтальные регистры сдвига выполненные на приборах с зарядовой связью. ПЗС регистры представляют собой последовательность близко расположенных МОП конденсаторов, благодаря чему, при соответствующем управлении между ними образуется зарядовая связь,

позволяющая переносить заряды в нужном направлении. Производится самосканирование зарядов.

В начале появились ФМПЗС с кадровым переносом. Конструктивно они состоят из секции хранения, секции накопления, горизонтального регистра и выходного устройства, преобразующего зарядовые пакеты в видеосигнал. Секции накопления и хранения представляют собой вертикальные трёхфазные регистры сдвига на ПЗС. Упрощенная структура ФМПЗС с кадровым переносом приведена на рис. 1.

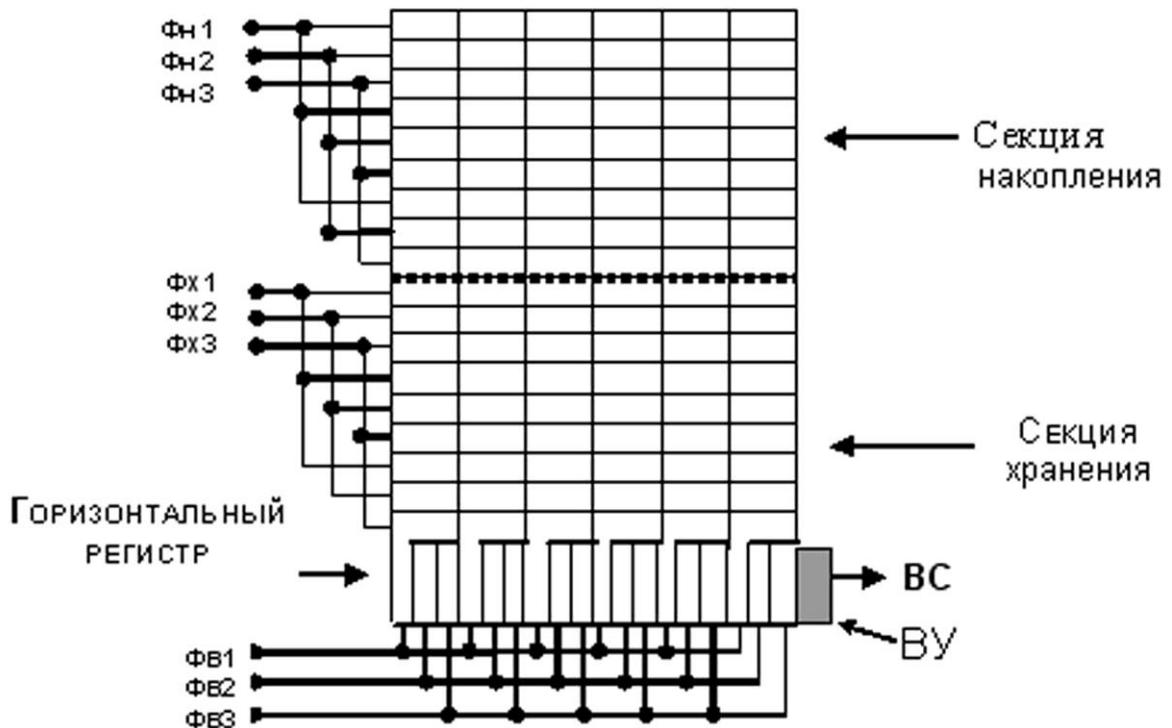


Рис. 1 МФПЗС с кадровым переносом зарядов

Отличие секций состоит только в том, что секция накопления прикрыта прозрачным для света защитным стеклом, предохраняющим эту секцию от механических повреждений и пыли, а секция накопления закрыта непрозрачным для света металлическим экраном, по сути дела, вертикальные регистры обеих секций представляют собой один регистр с возможностью управления каждым в отдельности. Для предотвращения перетекания зарядов из одного регистра в другой, они отделены друг от друга «стоп – каналами»,

Во время прямого хода полевой развертки все регистры секции накопления оставались в статическом состоянии, на одну из его фаз подавалось постоянное напряжение. Под этими фазами образовались потенциальные ямы в которые и «стекались» ближайšie к ним фотоэлектроны. В результате в секции накопления накапливался потенциальный рельеф, пропорциональный световому потоку, попадающему непосредственно на секцию накопления

Во время обратного хода полевой (кадровой) развёртки вертикальные регистры обеих секций объединяются в один регистр и все заряды, во время обратного хода кадровой развёртки, перемещаются из секции накопления в секцию хранения. В следующий период прямого хода кадровой развёртки на другие управляющие электроды секции накопления подавался постоянный потенциал, под которым производился следующий цикл накопления зарядов.

В это время на управляющие электроды секции хранения подаются управляющие импульсы, построчно перенося пакеты зарядов в горизонтальный регистр в интервалах обратного хода строчной развёртки. Во время прямого хода строчной развёртки все заряды из горизонтального регистра с большой скоростью последовательно переносятся в выходное устройство, где зарядовые пакеты преобразуются в видеосигнал. Для исключения влияния света на видеосигнал, секция накопления, горизонтальный регистр и выходное устройство закрыты непрозрачным металлическим экраном.

ФМПЗС с кадровым переносом зарядов обладают большой эффективностью использования светового потока, до 80 % т.к., светочувствительная площадка полностью открыта. Потери света только в металле МОП конденсатора. Поэтому слой металла в МОП конденсаторах вертикальных регистров минимизируют по толщине.

В ФМПЗС с кадровым переносом зарядов, при специально выполненном уменьшении толщины кристалла, световой поток можно подавать со стороны подложки. Это исключает потери света в металлической обкладке МОП конденсатора, обеспечивает высокий квантовый выход – до 98 % и является основным достоинством подобных ФМПЗС.

Светочувствительность в ФМПЗС можно регулировать в больших пределах путём регулировки времени накопления зарядов в секции накопления (электронный затвор). Диапазон регулировки времени накопления в ФМПЗС с кадровым переносом зарядов для ТВ стандарта OIRT (625/50/2:1) составляет порядка 40 дБ.

Однако при переносе зарядовых пакетов из секции накопления в секцию хранения в данном случае имеет место суммирование накопленного изображения с изображением, смещаемым с определённой скоростью в вертикальном по растру направлении. Если в текущий момент проецируемое изображение $E_r(x, y, t) = E(x, y, t) \cdot (1 - \exp \frac{t}{\tau})$, то смещаемое, отстающее от текущего на время T_p , изображение может быть упрощённо представлено с учетом его текущего смещения как $\mathring{A}(x, y - \frac{y_0}{T_0} t, t + T_p)$. Тогда результирующее изображение, которое переносят в секцию хранения с последующим считыванием, с некоторым приближением определяется соотношением:

$$E_r(x, y, t) = E(x, y, t) \cdot (1 - \exp \frac{t}{\tau}) + E(x, y - \frac{y_0}{T_0} t, t + T_p), \quad (1)$$

где первая составляющая отражает накапливаемый во внутрикадровом пространстве раstra светочувствительных элементов матрицы ПЗС потенциальный рельеф распределения зарядовых пакетов телевизионного изображения текущего кадра, а вторая составляющая – изображение предыдущего кадра, смещаемого в секцию хранения. Параметр y_0 – определяет размер кадра, T_0 – время смещения в секцию хранения, τ – постоянная времени накопления зарядового пакета. Представим первую составляющую выражения (1) в следующем виде:

$$E_N(x, y, t) = E(x, y, t) \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{1}{1!} \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \frac{t^2}{\tau^2} - \frac{1}{3!} \frac{t^3}{\tau^3} + \dots\right)\right) = E(x, y, t) \cdot \left(\frac{1}{1!} \frac{t}{\tau} - \frac{1}{2!} \frac{t^2}{\tau^2} + \frac{1}{3!} \frac{t^3}{\tau^3} + \dots\right). \quad (2)$$

Фактически данная составляющая определяет мешающий сигнал, который за время каждого периода последовательного смещения смежных строк, согласно (1), накапливается в виде зарядовых пакетов и аддитивно искажает уровень выводимого в секцию хранения сигнала изображения. Указанный период определяется соотношением:

$$T_{ss} = \frac{T_0}{N_p} = \frac{2T_0}{576}, \quad (3)$$

Здесь N_p - число строк в каждом полукадре. Чем больше T_{ss} , тем больше, в соответствии с соотношениями (1) и (2), при $t = T_{ss}$, амплитуда накопленного мешающего сигнала. И в то же время чрезмерное уменьшение T_{ss} приводит к существенному снижению вертикальной чёткости изображений из-за возрастания неэффективности переноса зарядовых пакетов смежных строк при выводе в секцию хранения сигнала каждого полукадра. Соответственно устанавливают относительно большую величину T_{ss} , что вызывает увеличение уровня мешающей составляющей в считанном сигнале последовательных полукадров. Согласно (2), мешающие составляющие относительно большого уровня сопряжены с наиболее яркими деталями изображений и оставляют наиболее протяжённый след за теми из них, местоположение которых соответствует нижней части раstra на светочувствительной поверхности ПЗС.

На ТВ изображении появляются светлые вертикальные хвосты, ниже ярких элементов изображения. Яркость этих вертикальных полос будет пропорциональной интенсивности элементов светового потока. Смаз изображения можно полностью исключить только путём перекрытия оптического потока на время переноса зарядов из секции накопления в секцию хранения с кадровым переносом.

Таким образом, основным недостатком ФМПЗС с кадровым переносом является вертикальный смаз от ярких деталей изображения, т.к. время переноса зарядов достаточно продолжительное, порядка 0,4 мс., и во время переноса зарядов под воздействием света в ячейках регистров секции накопления регенерируются фотоэлектроны. Это явилось причиной того, что ФМПЗС с

кадровым переносом не нашли широкого практического применения ни в вещательном, ни в прикладном телевидении.

Следующим этапом развития твёрдотельных телевизионных преобразователей свет-сигнал явилось разработка ФМПЗС со строчным переносом зарядов.

Структурная схема ФМПЗС со строчным переносом зарядов приведена на рис. 2. Она состоит из: светочувствительных ячеек Φ (фотодиодов), на которых производится преобразование света в заряды, пропорционально освещенности и накопление этих зарядов, вертикальных регистров, которые переносят заряды в вертикальном направлении; горизонтального регистра сдвига, вносящего заряды каждой строки раstra в выходное устройство ВУ, преобразующее заряды в пропорциональное их количеству напряжение сигнала яркости. Светочувствительные ячейки Φ расположены в непосредственной близости с вертикальными регистрами сдвига, отделены от них фотозатворами. Все регистры и выходное устройство закрыты непрозрачным для света металлическим экраном.

Во время обратного хода кадровой развёртки на фотозатворы подаётся низкий потенциал, обеспечивающий потенциальный барьер между светочувствительными площадками Φ и вертикальными регистрами и происходит накопление на Φ зарядов. Во время обратного хода кадровой развёртки на фотозатворы подаётся положительный потенциал, разрешающий перенос зарядов из ячеек Φ в потенциальные ямы вертикальных регистров. Происходит перенос одновременно всех зарядов в вертикальные регистры. Затем на фотозатворы подаётся опять низкий потенциал и производится накопление зарядов в следующем поле.

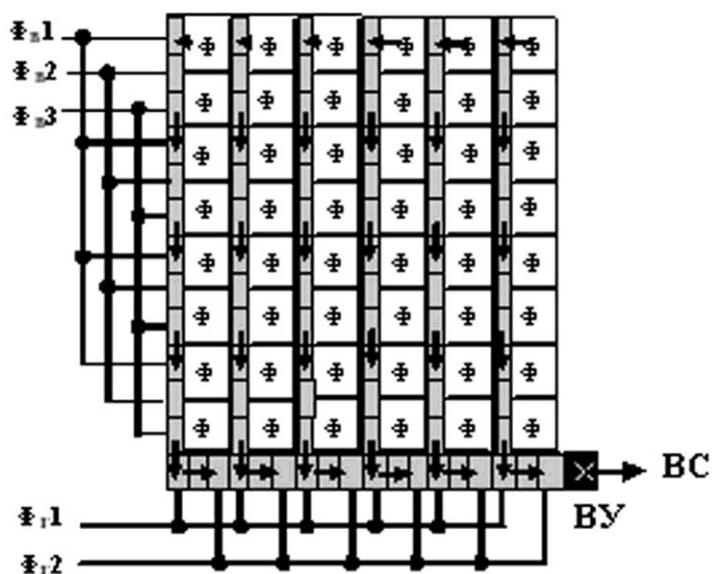


Рис. 2. Ф МПЗС со строчным переносом зарядов

Во время прямого хода кадровой развёртки заряды построчно переносятся в интервалах обратного хода строчной развёртки в горизонтальный ПЗС регистр, которые во время прямого хода строчной развёртки с большой скоростью выносятся в выходное устройство.

Следует отметить, что вертикальные регистры занимают достаточно большую площадь окна ФМПЗС и эффективность использования светового потока снижается. Это является одним из недостатков ФМПЗС со строчным переносом. Для преодоления этого недостатка была реализована технология нанесения на поверхность кристалла микролинз, которые собирают световой поток на светочувствительные площадки. В результате эффективность светового потока доводится до 80 %.

Время переноса всего потенциального рельефа ФМПЗС со строчным переносом равно времени прямого хода кадровой развёртки, что на порядок больше чем в ФМПЗС с кадровым переносом. В результате вертикальные регистры оказываются более чувствительными к свету. Несмотря на то, что вертикальные регистры закрыты светонепроницаемыми экранами, но, из-за высокой светочувствительности регистров, на них оказывает влияние даже рассеянный в кристалле свет. Это приводит к возникновению вертикального смаза изображения, значительно меньшего, чем в ФМПЗС с кадровым переносом. В некоторых случаях, где смаз изображения не допустим, например в вещательном телевидении, были разработаны ФМПЗС со строчно-кадровым переносом зарядов.

ФППЗС со строчно-кадровым переносом зарядов представляет собой ФМПЗС со строчным переносом зарядов, в которой дополнительно имеется секция хранения, наподобии ФМПЗС с кадровым переносом зарядов. В этой ФМПЗС все заряды, накопленные в светочувствительных ячейках одновременно, во время обратного хода кадровой развёртки, переносятся в вертикальные регистры и после чего последовательно, ускоренно, как в ФМПЗС с кадровым переносом, переносятся в секцию хранения. В результате смаз изображения существенно уменьшается благодаря покрытию вертикальных регистров светонепроницаемым экраном и быстрого переноса этих зарядов из вертикальных регистров в секцию хранения. Секция хранения достаточно удалена от светочувствительных ячеек и её сравнительно просто изолировать от светового потока светонепроницаемым экраном.

В настоящее время чаще всего используются ФМПЗС со строчным переносом из-за их небольшой стоимости при относительно высоком качестве ТВ сигнала. ФМПЗС со строчно-кадровым переносом зарядов из-за их высокой стоимости используются только в студийных высококачественных ТВ камерах.

Технология их производства близка к совершенству, они отличаются простотой конструкции. Однако всем ФМПЗС присущи недостатки:

1. Низкий процент выхода годных ФМПЗС при их производстве – если на пути переноса зарядов имеются какие – либо неоднородности, особенно генерирующие заряды, эти регистры вносят большую неоднородность в выходной видеосигнал и такие ФМПЗС выбраковываются.

2. Эффективность переноса – потеря части зарядов в процессе их переноса. Чем дальше переносятся заряды, тем больше потерь зарядов, что приводит к потере контраста мелких деталей изображения. Контраст неравномерен как по кадру, так и по строке, в начале кадра (строки) больше, в конце меньше. Эффективность переноса зависит от количества переносов и скорости переноса (частоты переноса). Например, для современной ФМПЗС со строчным переносом типа ICX415AL производства фирмы Sony эффективность одного переноса равно $\mathcal{E}_1 = 0,9995$ при частоте переноса 29,5 МГц. [1]. При количестве пиксел по горизонтали $N = 782$ и 3-х фазном горизонтальном регистре максимальное число переносов составит $N_{\text{пер}} = 2346$, эффективность всех переносов равно $\mathcal{E}_{2346} = \mathcal{E}_1^{2346} = 0,309$. Этот пример показывает, что до выходного каскада дойдёт только 31% электронов, следовательно, разница в размахе выходного видеосигнала, при всех прочих равных условиях между крайним левым и крайним правым пикселями составит 31%.

Отмеченные недостатки компенсируются усложнением схемы обработки видеосигнала и совершенствованием технологии изготовления. В тоже время технология изготовления больших интегральных схем (БИС) настолько совершенствовалась, что на одном кристалле уже можно разместить сотни миллионов транзисторов. Особенностью технологии изготовления приборов на ПЗС является многоуровневая технология, которая не позволяет совместить на одном кристалле ПЗС и транзисторы.

В 60-е годы большие надежды связывались с фототранзисторными матрицами, имеющими в своём составе сдвиговые регистры, осуществляющие сканирование матрицы фотодиодов по горизонтали и вертикали [2].

С другой стороны, в это же время бурно развивалась технология производства микросхем статической и динамической памяти для персональных компьютеров на основе технологии КМОП, обычно имеющих организацию с произвольным координатным доступом.

Следующим шагом в развитии КМОП сенсоров была идея объединения светочувствительной секции, представляющей собой матрицу фотодиодов и набора считывающих шин и управляющих регистров, аналогичных применяемым в микросхемах (БИС) памяти.

Подобные БИС имеют достаточно простую структуру и, поэтому степень их интеграции превышает 10^9 транзисторов на одном кристалле. Разработчиками подобных БИС было предложено на основании таких ЗУ с произвольной выборкой изготавливать матричные преобразователи свет/сигнал. На первом этапе просто заменили элементы памяти на светочувствительные сенсоры – фотодиоды (ФД).

Упрощенная схема, фоточувствительной матрицы на КМОП транзисторах (ФМКМОП) приведена на рис. 3.

Данная БИС содержит матрицу светочувствительных сенсоров (фотодиодных), электронных ключей, синхрогенератора и генераторов вертикальной (ГВР) и горизонтальной развёртки (ГГР). При проецировании с помощью объектива светового потока на матрицу светочувствительных сенсоров, в каждом сенсоре под воздействием фотонов образуются электронные заряды, количество которых пропорционально освещённости ФД и времени накопления зарядов. В результате на матрице ФД образуется потенциальный рельеф.

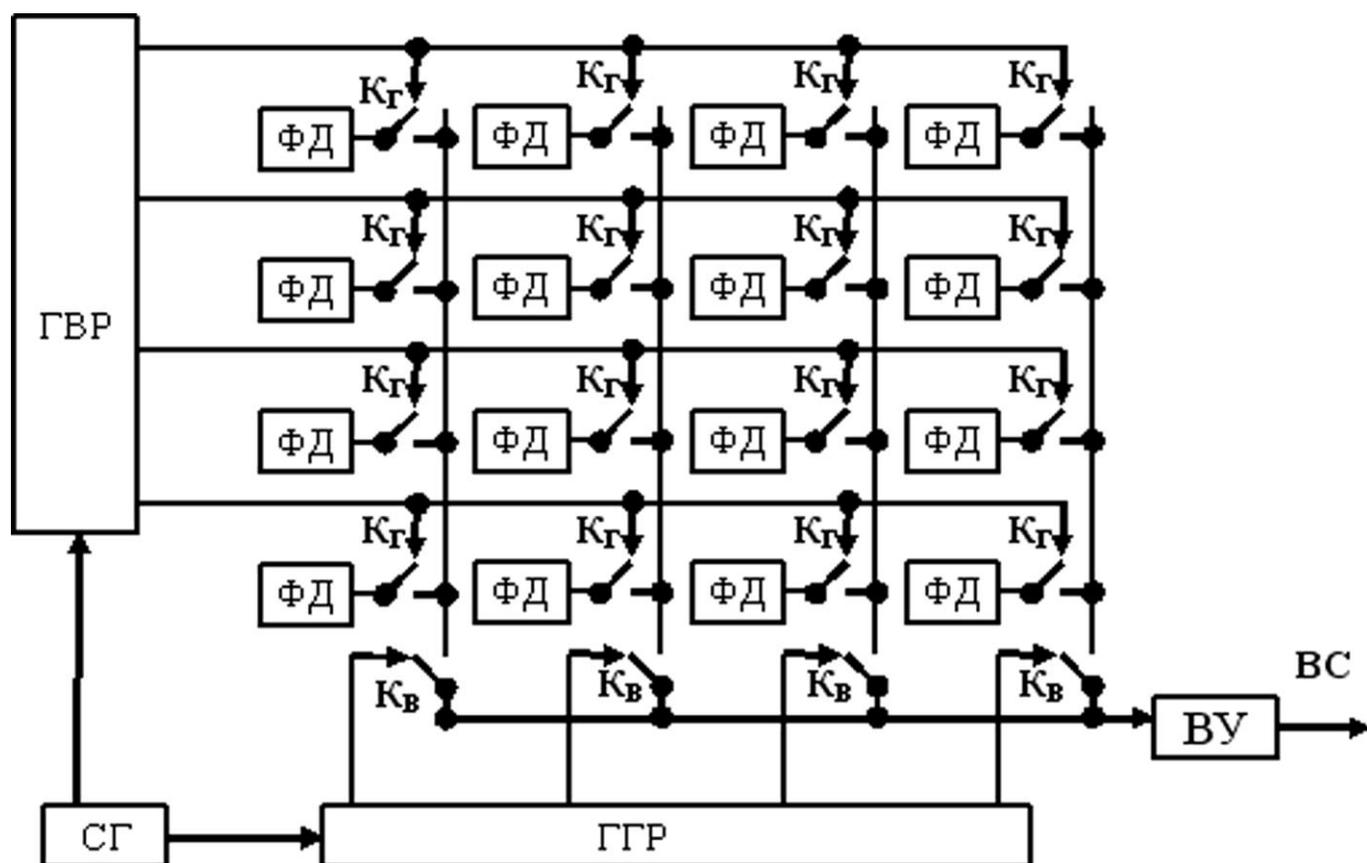


Рис. 3. ФМКМОП матрица с пассивной фоточувствительной ячейкой.

Ключи K_G по очереди подключают горизонтальные ряды ФД к вертикальным шинам. Ключи K_B по очереди подключают вертикальные шины к выходной шине, далее пакеты зарядов поступают на выходное устройство (ВУ), который преобразует заряды в выходной видеосигнал (ВС). Подобное устройство назвали ФМКМОП с пассивным сенсором (Passive Pixel Sensor)

В данной ФМКМОП заряды от фотосенсоров ФД поступают в выходное устройство по не чувствительным к свету шинам, в результате полностью исключён такой, присущий фоточувствительным матрицам ПЗС дефект, как «смаз изображения».

Особенностью ФМКМОП с пассивным сенсором является то, что вертикальные и горизонтальные шины обладают ёмкостью, сравнимой с ёмкостью сенсора ФД.

Эквивалентная схема подключения ФД к вертикальной шине приведена на рис. 4, где $C_{\text{ФД}}$ – ёмкость площадки фотодиода, $C_{\text{ВШ}}$ – ёмкость вертикальной и горизонтальной шин, K_{Γ} – ключ подключения ФД к вертикальной шине.

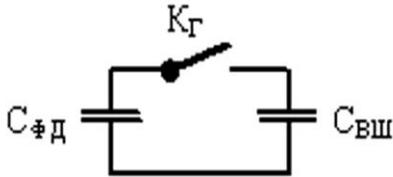


Рис. 4 Эквивалентная схема подключения ФД к вертикальной шине.

При разомкнутом положении ключа K_{Γ} на конденсаторе $C_{\text{ФД}}$ происходит накопление фотозарядов на конденсаторе $C_{\text{ФД}}$, при замыкании ключа K_{Γ} происходит перетекание фотозарядов из $C_{\text{ФД}}$ в $C_{\text{ВШ}}$, потенциалы на конденсаторах выравниваются. При размыкании ключа на конденсаторах остаются заряды, величина которых пропорционально ёмкости конденсаторов. На $C_{\text{ФД}}$ остаётся остаточный потенциал, являющийся помехой при следующей его подзарядке, наиболее заметно проявляющийся при динамическом характере световой картинке, подвижном изображении. С площадок ФД принципиально невозможно полностью считать заряд в вертикальные шины. Это не позволяет получить приемлемый уровень видеосигнала при ограниченном объёме зарядового пакета и, как следствие, данный вид сенсора обеспечивает низкое отношение сигнал/шум.

Однако недостаточное развитие кремниевой технологии в те годы не позволило получить качественное изображение. Чувствительность фотоприёмников была низкой, и не однородной, поэтому изображение было поражено так называемым геометрическим шумом, проявляющимся в виде полосатой структуры на изображении. Данная структура была в первую очередь связана с неравномерностью чувствительности и темнового тока столбцов, строк и пикселей фотоприёмника. Это является основной причиной того, почему рассмотренные ФМКМОП не нашли практического применения в ТВ камерах.

Для исключения влияния ёмкости вертикального регистра стали использовать усилители для каждого фоточувствительного элемента (ФД), получившего название ФМКМОП с активным сенсором (Active Pixel Sensor). В результате ёмкость ФД и ёмкость вертикальной шины оказались разделёнными усилителем. В простейшем случае в качестве усилителей в начале использовались истоковые повторители. Упрощенная схема ФМКМОП с активным пикселем приведена на рис. 5.

С учётом усилителя коэффициент преобразования "заряда" в напряжение оказывается не ниже, а даже выше, чем в фотоприёмниках на ПЗС. В современных матричных ПЗС ёмкость плавающей диффузионной области, в которой осуществляется считывание заряда, составляет величину порядка 0,01 пФ, что соответствует коэффициенту преобразования в 15 - 25 мкВ/е.

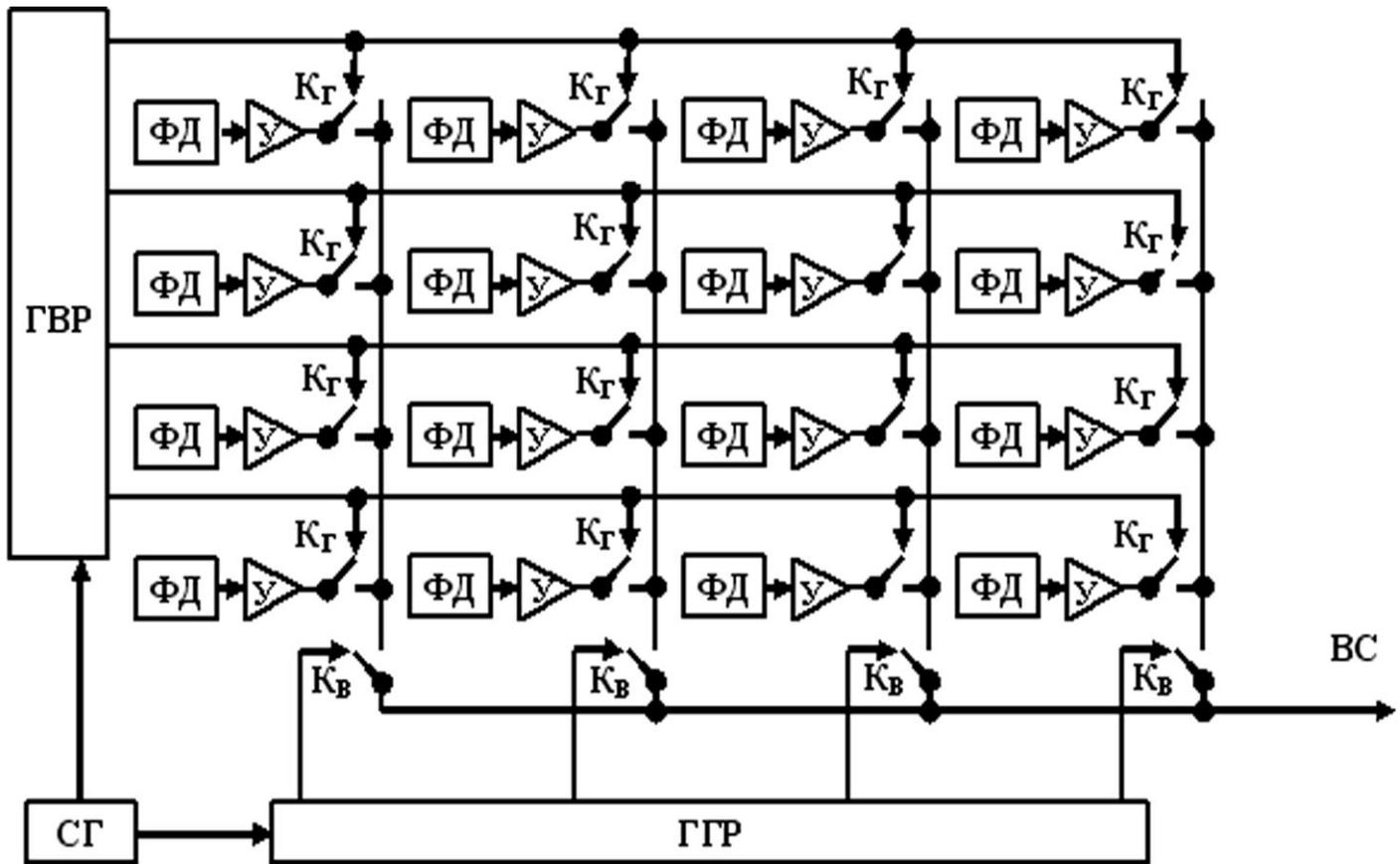


Рис. 5. Ф МКМОП матрица с активной фоточувствительной ячейкой

В КМОП фотоприёмнике ёмкость считывания обычно того же порядка, однако применение активного усилителя (докоммутиационного усиления) позволяет добиться эквивалентного коэффициента преобразования на порядок большего, чем у ПЗС - до 250 мкВ/е, что положительно сказывается на шумовых характеристиках фотоприёмника. Это в корне решает проблему чувствительности и отношения сигнал/шум. Развитие технологии «активного пиксела» в дальнейшем шло по пути улучшения качественных характеристик фотодиодов и транзисторов, а также по пути увеличения транзисторов в каждом пикселе.

Другое важное направление развития КМОП сенсоров было связано с тем, что КМОП технология позволяет интегрировать различные узлы телевизионной камеры на тот же кристалл и даёт разработчику возможность использования очень большого числа полевых транзисторов для реализации тех или иных узлов, т.е. сделать ТВ камеру полностью на одном кристалле. Это существенно повышает надёжность работы ТВ камеры и резко снижает её стоимость. В отличие от ПЗС технологии отличающейся многоуровневым управлением, для питания ФМПЗС требуется несколько различных напряжений питания, КМОП технология позволяет обходиться одним напряжением питания, порядка 1,5 – 3,0 В, что является большим достоинством этих БИС.

Использование в каждой фоточувствительной ячейке дополнительных транзисторов уменьшает площадь светочувствительной области, но использование освоенной ПЗС технологией микролинз, позволяет компенсировать этот недостаток.

Тенденцией развития современной техники, в том числе и телевизионной, это полный переход на цифровую технику, формирования и обработки сигналов. К этому подтолкнуло бурное развитие вычислительной техники. В соответствии с этим требованием времени производители телевизионной техники стремятся производить и ТВ камеры на цифровой схмотехнике, с максимально возможной степенью интеграции. Поэтому следующим шагом на этом пути была реализация аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на том же кристалле.

Сформированный ФМКМОП аналоговый сигнал подаётся на размещённом на этом же кристалле БИС АЦП. Частота дискретизации, стандартная для ТВ сигнала, равна 13,5 МГц. Цифровой поток с выхода 10-ти разрядного АЦП соответственно равен 135 Мбит. При такой высокой частоте элементы АЦП потребляют относительно большую мощность, разогревающую кристалл, что приводит к росту шумов. Поэтому в дальнейшем АЦП стали ставить на каждый столбец. Это позволило снизить частоту преобразования каждого из АЦП в число раз, равное числу столбцов в фоточувствительной секции, а также в соответствующее число раз уменьшить полосу частот видеосигнала и , следовательно, существенно снизить рассеиваемую АЦП мощность.

Упрощенная структурная схема ФМПЗС с АЦП в каждом столбце приведена на рис. 6. Цифровые потоки с каждой АЦП подаются на мультиплексор, который формирует общий цифровой поток.

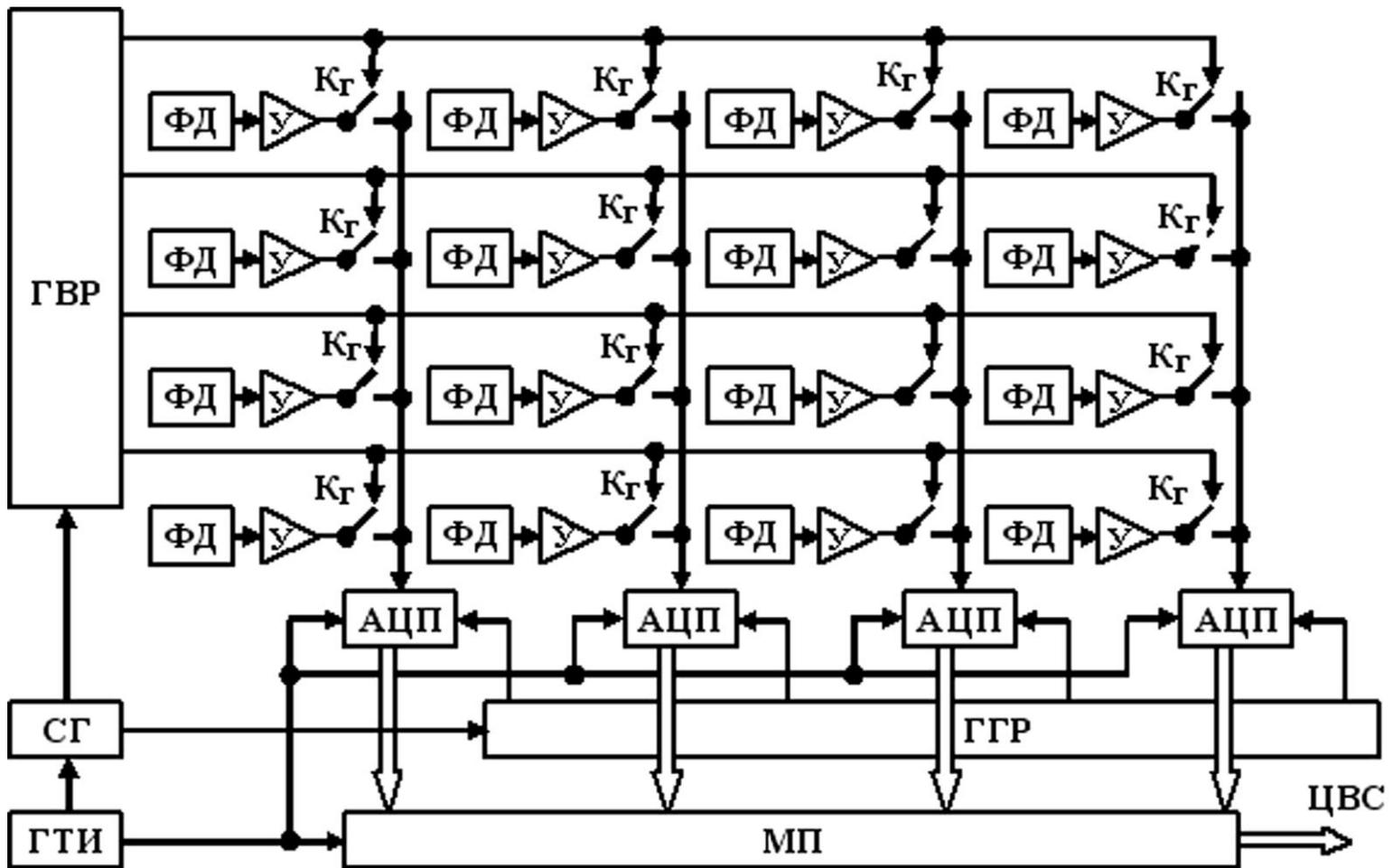


Рис. 6. ФМКМОП матрица с активной фоточувствительной ячейкой и АЦП

Некоторые разработчики производят ФМКМОП с установкой АЦП в каждом пикселе, что существенно снижает площадь светочувствительного элемента и, тем самым общую светочувствительность. Здесь, однако, удастся в ещё большей степени снизить рассеиваемую мощность.

Литература.

1. Твердотельная революция в телевидении. Под редакцией А.А. Умбиталиева и А.К. Цицулина. Изд-во Радио и связь, 2006 г., 310 стр.
2. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. М. Техносфера, 2004 г., 416 стр.
3. Игнатов Ф.М. Фоточувствительные матрицы ПЗС. Тезисы докладов. Юбилейная научно-техническая конференция проф.-преподав., научного и инж.-технич. состава. МТУСИ, М., 2001 г.
4. Игнатов Ф.М. Специфика искажений в твёрдотельных ТВ камерах и их коррекция. Тезисы конференции. Научно-технич. конференц. проф. - преподав., научного и инж.-технич. состава. Материалы конференции, МТУСИ, 2006 г.
5. Игнатов Ф.М., Джумаа Хассан. Искажения в фоточувствительных матрицах ПЗС. Тезисы конференции. Московская отраслевая научно-техническая конференция, М. 2007 г.