

## **ТЕЛЕКАМЕРЫ НА КМОП ФОТОПРИЁМНИКАХ**

Рассмотрены особенности формирования телевизионного сигнала в телекамерах на КМОП фотоприёмниках. Показана перспективность этого класса видеоинформационных систем.

Одной из ключевых задач «Стратегии развития электронной промышленности России на ближайшие годы», разработанной Управлением радиоэлектронной промышленности и систем управления, является обеспечение массового производства перспективной электронной продукции, в том числе на основе широкого использования функциональной микроэлектроники [1]. Массовая продукция типа аппаратуры цифрового вещательного и прикладного телевидения должна обеспечить рынок для современного микроэлектронного производства. Уже создаются научные, проектные, технические и технологические центры отрасли, включая дизайн-центры по разработке КМОП СБИС и элементов функциональной микроэлектроники «система на кристалле» [2–11]. Это направление микроэлектроники обусловило второй этап твердотельной революции в телевидении и является крайне актуальным направлением развития телевизионной техники [12].

В видимом и ближнем ИК диапазоне осуществлён качественный скачок благодаря переходу от главного типа фотоприёмников на ПЗС к КМОП фотоприёмникам. Принципиальное отличие этих приборов от ПЗС состоит в методе реализации развёртки. Координатная адресация к каждому элементу вместо протаскивания заряда каждого элемента сначала по всему столбцу, а потом по всей строке позволяет избежать искажений, связанных с неэффективностью переноса заряда. Телекамеры нового поколения, основанные на КМОП фотоприёмниках, объединяют в себе фотоприёмник, устройства развёртки, квантования и обработки изображения, и в силу своей структурной сложности переходят в класс видеосистем на кристалле [13–15].

Новая технология создания КМОП фотоприёмников открыла перспективу заметного повышения качества формируемой видеоинформации благодаря возможности многоканального считывания (в пределах – с применением отдельного АЦП для каждого элемента разложения [13–15]) и введения усиления до воздействия шумов считывания. Развитие этих преимуществ КМОП фотоприёмников в будущем может вытеснить из практики формирования телевизионных сигналов не только вакуумные приборы усиления слабых оптических сигналов (электронно-оптические преобразователи, ЭОП), но и ПЗС.

### **Историческая справка**

Цифровые телевизионные камеры, использующие фотоприёмники, изготовленные по технологии комплиментарных структур металл–оксид–полупроводник (КМОП, английский термин CMOS) получили название КМОП сенсоров или КМОП камер. В английской технической литературе наибольшее распространение получила аббревиатура CIS (CMOS Image Sensor). Использование технологии КМОП имеет целый ряд преимуществ по сравнению с давно развивающейся и широко применяемой технологией приборов с зарядовой связью (ПЗС), причем большая часть преимуществ связана с так называемой координатной или XY-адресацией, т. е. возможностью произвольного доступа в произвольном порядке к любому пикселу изображения.

Твердотельные фотоприёмники с координатной адресацией начали своё развитие значительно раньше изобретения Бойлом и Смитом технологии ПЗС в 1969 г. В 60-е годы большие надежды связывались с фото-транзисторными матрицами, имеющими в своем составе сдвиговые регистры, осуществляющие сканирование матрицы фотодиодов по горизонтали и вертикали [16]. Однако недостаточное развитие кремниевой технологии в те годы не позволило получить качественное изображение. Чувствительность фотоприёмников была низкой, а само 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.

Фотоприёмники на основе координатной адресации также пытались построить с использованием технологии приборов с зарядовой инжекцией (ПЗИ, Charge Injection Device, CID). Лидером в этой области на протяжении ряда лет была фирма Hitachi, однако низкая чувствительность, высокие значения флуктуационного и геометрического шума не позволяли этим преобразователям конкурировать с технологией ПЗС, быстро преодолевшей свои «детские» болезни.

В середине и, в особенности, в конце 90-х годов технология ПЗС была благодаря повышению точности изготовления (ультрафиолетовая литография) доведена практически до совершенства. Квантовая эффективность лучших фотоприёмников приблизилась к 100%, темновые заряды и собственные шумы упали до единиц электронов на пиксел даже в относительно недорогих, серийно

выпускающихся приборах. Однако особенность многоуровневой технологии ПЗС не позволяла интегрировать на тот же кристалл, что и фотоприёмник, остальные узлы телевизионной камеры, такие как синхрогенератор, видеопроцессор, схемы управления, АЦП.

Технологией ПЗС владело ограниченное число фирм-производителей электронной техники, в первую очередь активно работающих на рынке видеоприложений. К ним можно отнести фирмы Sony, Sharp, Toshiba, Matsushita (Япония), LG, Samsung (Корея), Philips, Thomson, Texas Instruments, Fairchild, Dalsa, Kodak (Европа и Северная Америка). 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. В этом направлении работали многие технологические гиганты электронной промышленности, такие как Hewlett-Packard, Atmel, Micron (США). Степень интеграции этих, относительно просто организованных интегральных схем превысила миллиард транзисторов на кристалле [2].

Следующим шагом в развитии КМОП-сенсоров была идея об объединении светочувствительной секции, представляющей собой матрицу фотодиодов и набор считывающих шин и управляющих регистров, аналогичных применяемым в микросхемах памяти. Однако ёмкость шин считывания оставалась высокой, что не позволяло говорить о высоких чувствительности и отношении сигнал/шум. Прорыв в этой области произошел в 1993 г. в связи с изобретением Эриком Р. Фоссамом технологии Активный пиксел (APS, Active Pixel Sensor) [23]. Введение усилительного каскада в каждый светочувствительный элемент позволило избавиться от проблем, связанных с ёмкостью считывающих шин и снизить геометрический шум до приемлемых значений.

Дальнейшее развитие КМОП сенсоров было связано с увеличением числа транзисторов в пикселе, интеграции на тот же кристалл аналоговых и цифровых схем управления и обработки видеосигнала, повышением чувствительности и отношения сигнал-шум, увеличения числа элементов разложения и т. п. Всё это стало возможным благодаря тому, что технология КМОП позволяет достаточно просто размещать на том же кристалле, что и фотоприемник, такие сложные узлы, как АЦП. Развитие КМОП сенсоров за последние 15 лет характеризуется несколькими этапами, характеризующимися изменением их структуры.

### Структура телекамер на КМОП фотоприёмниках

Первое поколение КМОП-сенсоров носит название Сенсор с пассивным пикселом (Passive Pixel Sensor, PPS). Их особенностью является наибольшая связь с породившими их микросхемами динамической или статической памяти. Данный вид сенсора, помимо матрицы фотодиодов содержит: регистр, осуществляющий выбор строки; ключевые полевые транзисторы, осуществляющие коммутацию фотодиодов выбранной строки к вертикальным видеопинам; аналоговый мультиплексор, осуществляющий подключение видеосигнала с выбранного фотодиода к выходному усилителю (рис. 1).

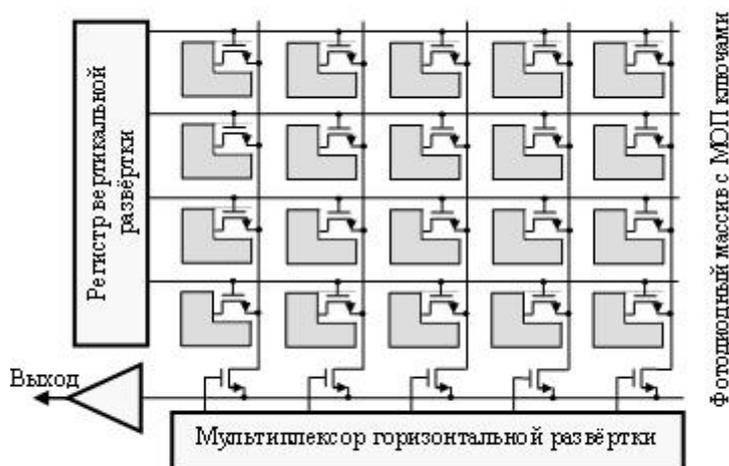


Рис. 1. КМОП сенсор с пассивным пикселом

Высокая ёмкость вертикальной видеопины, суммирующаяся с ёмкостью горизонтальной шины, не позволяла получить приемлемый уровень видеосигнала при ограниченном объёме

зарядового пакета и, как следствие, данный вид сенсора обеспечивает низкое отношение сигнал/шум.

Для снижения влияния емкостей в сенсор с пассивным пикселем были введены усилители видеосигнала на каждый столбец (рис. 2).

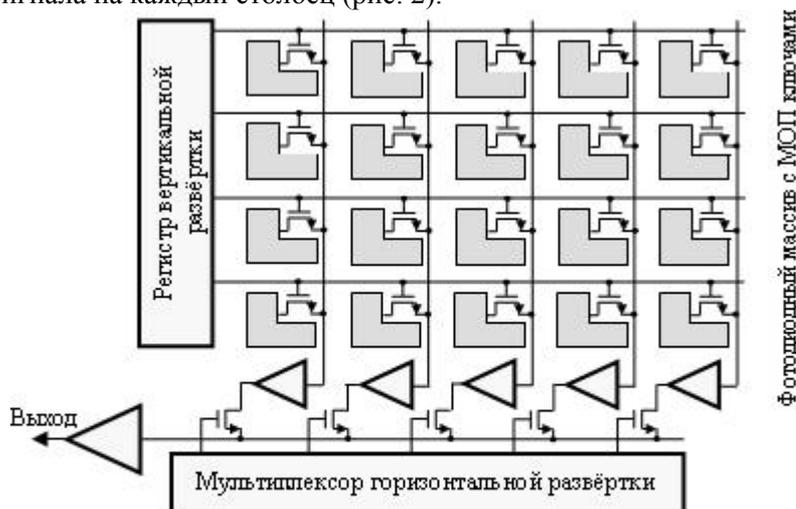


Рис. 2. КМОП сенсор с пассивным пикселем и активным столбцом

Такое решение позволило устранить влияние на амплитуду видеосигнала ёмкости горизонтальной видеошины. Влияние ёмкости вертикальной шины на видеосигнал было преодолено в КМОП сенсоре с активным пикселем (Active Pixel Sensor, APS, рис. 3).

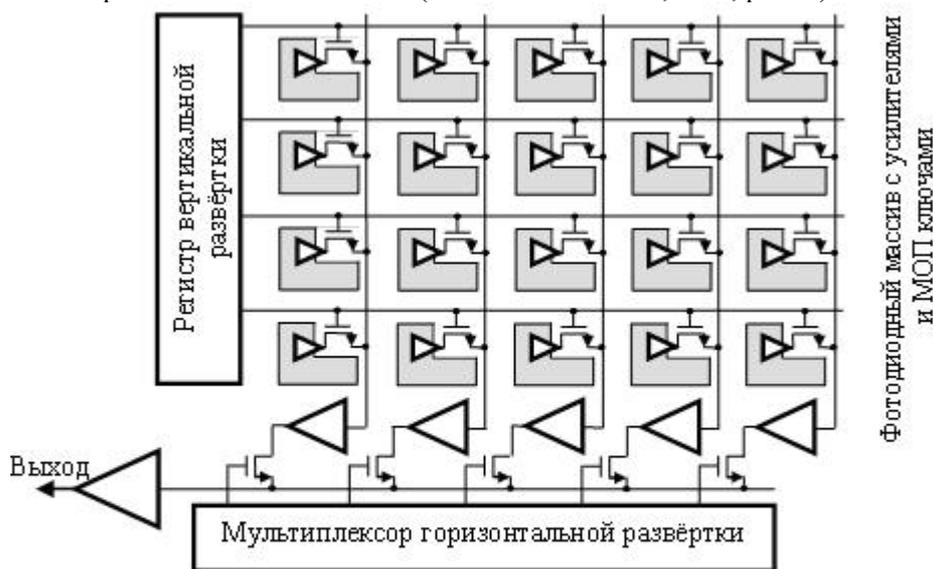


Рис. 3. КМОП сенсор с активным пикселем и активным столбцом

Революционность этой технологии связана с тем, что усилитель (в простейшем случае однотранзисторный истоковый повторитель) размещается непосредственно в каждом пикселе фотоприемника. Тем самым ёмкость считывания и ёмкость вертикальной видеошины оказываются разделенными этим усилителем. При этом ёмкость считывания может иметь тот же порядок, что и в ПЗС – единицы фемтофард [24]. С учётом усилителя коэффициент преобразования заряда в напряжение оказывается не ниже, а даже выше, чем в фотоприемниках на ПЗС. Это в корне решает проблему чувствительности и отношения сигнал/шум. Развитие технологии Активного Пикселя 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 как уже говорилось выше, КМОП технология позволяет интегрировать различные узлы телевизионной

камеры на тот же кристалл и дает разработчику возможность использования очень большого числа полевых транзисторов для реализации тех или иных узлов.

Следующим шагом на этом пути была реализация аналого-цифрового преобразователя на том же кристалле, рис.4.

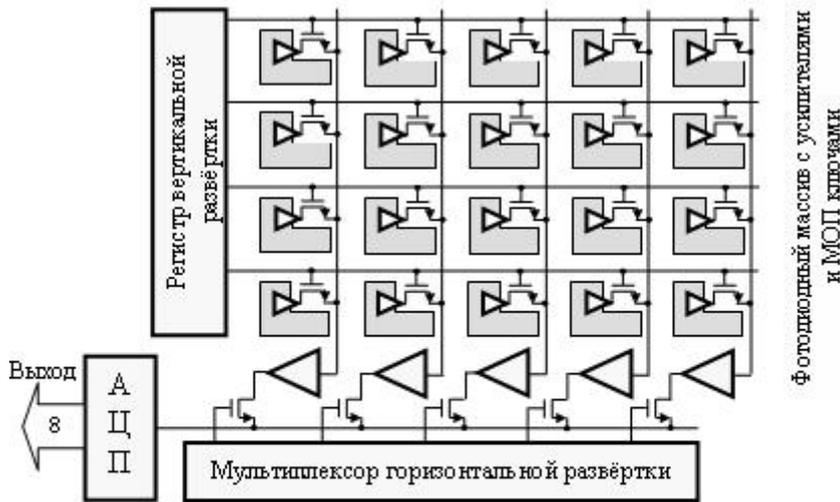


Рис. 4. КМОП сенсор с активным пикселом, активным столбцом и одним АЦП

Одной из особенностей КМОП сенсоров является возможность реализации высокой частоты опроса, превышающей частоту считывания зарядовых пакетов из ПЗС. В связи с этим требования по быстродействию к АЦП, установленном в КМОП сенсоре, оказываются весьма жесткими. Высокая частота считывания приводит к широкой полосе частот видеосигнала и худшим шумовым характеристикам, а большая частота преобразования АЦП – к большому выделению мощности.

Для преодоления этого недостатка в КМОП сенсорах АЦП стали располагать из расчета один АЦП на каждый столбец и коммутацию осуществлять в цифровом виде (рис. 5). 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.

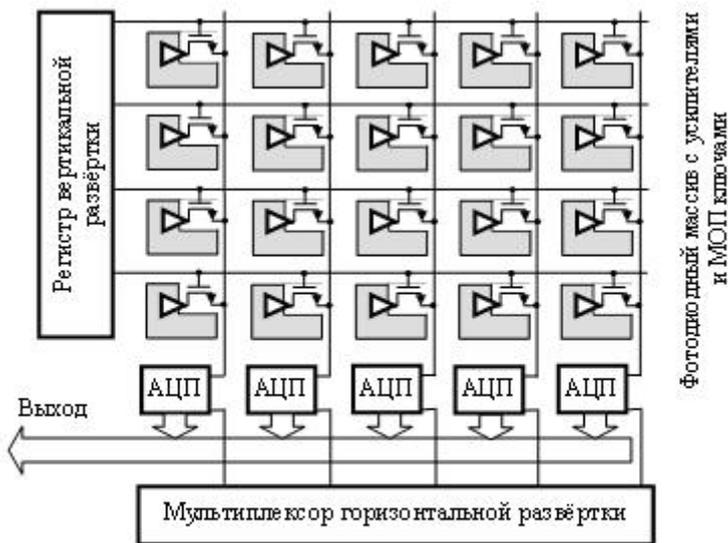


Рис. 5. КМОП сенсор с активным пикселом и АЦП на каждый столбец

Дальнейшее развитие пошло по пути движения к КМОП сенсору с цифровым пикселом (Digital Pixel Sensor, DPS), рис. 6 .

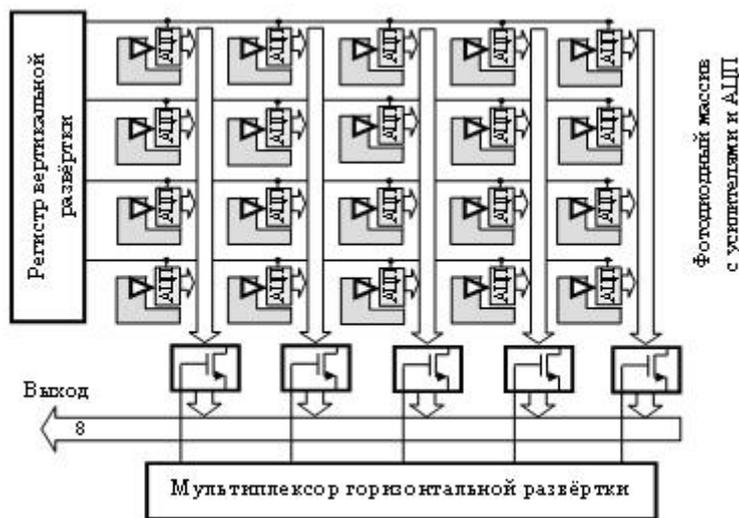


Рис. 6. КМОП сенсор с активным цифровым пикселем

Особенностью этих преобразователей является интеграция в каждый пиксел не только активного усилителя но и непосредственно АЦП. При этом частота преобразования АЦП становится равной кадровой частоте фотоприемника, а полоса частот видеосигнала уменьшается до минимальных значений. В настоящее время известны КМОП сенсоры с цифровым пикселем размером  $9,8 \times 9,8$  мкм, при технологии 0,18 мкм, содержащие в каждом пикселе АЦП, состоящий из 37 транзисторов. Остановимся на реализации наиболее распространенных структур пикселей современных КМОП сенсоров.

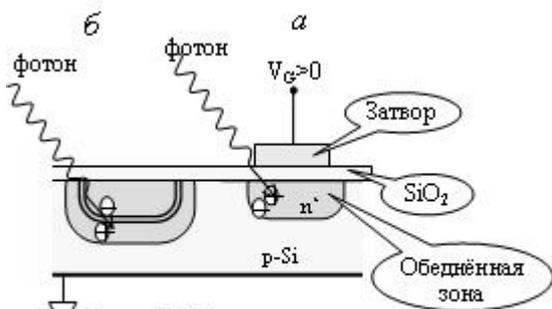


Рис. 7. Структура элемента твердотельного

Как и в матричных ПЗС, светочувствительным пикселем в КМОП сенсоре может являться обедненная область МОП-ёмкости, возникающая при подаче на фазный электрод обедняющего напряжения рис. 7а, либо же обеднённая область обратносмещенного фотодиода, рис. 7б. Светочувствительный элемент второго типа предпочтительнее, хотя бы с той точки зрения, что фотодиодная структура имеет существенно более высокий коэффициент сбора светового потока из-за отсутствия слоёв поликремния, поглощающего световой поток. Простейшей является структура

пассивного пиксела, рис. 8 [19].

Помимо фотодиода она содержит ключевой транзистор VT, который по сигналу RS (Row Select, Выбор столбца), подключается к вертикальной видеошине. Таким образом к этому пикселу подходит две шины – видеошина и шина, по которой подается сигнал считывания RS. Особенностью такого типа пиксела является высокий коэффициент использования площади, т.к. площадь транзистора много меньше площади фотодиода, и высокий уровень шумов, связанный с тем, что фотодиод подключается непосредственно к вертикальной видеошине, имеющей большую емкость.

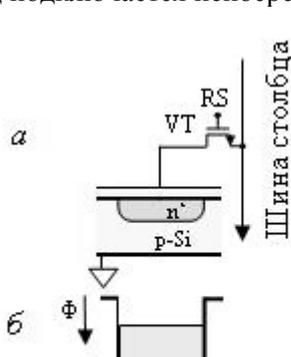


Рис. 8. Структура пассивного пиксела а

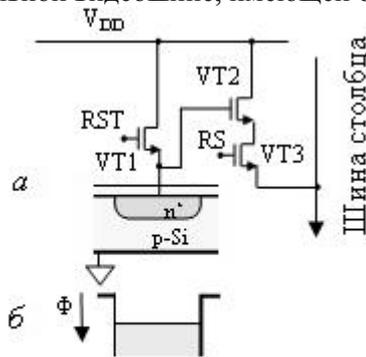


Рис. 9. Структура активного пиксела а

Структура активного пиксела содержит уже как минимум 3 полевых транзистора, рис. 9 и четыре шины – вертикальную видеошину, шины по которым подаются сигналы RS и RST, а также шину питания  $V_{DD}$ .

Транзистор VT3, управляемый сигналом RS, выполняет ту же функцию, что и в пассивном пикселе. Транзистор VT1, управляемый сигналом RST (Reset, сброс) служит для сброса накопленного заряда, а гальванометрический транзистор VT2 выполняет роль истокового повторителя, осуществляющего усиление видеосигнала по току. Нагрузкой данного транзистора является источник тока, расположенный на конце столбца за пределами фоточувствительной секции. Коэффициент использования площади у такого Пиксела значительно ниже за счет большего числа транзисторов, однако шумовые характеристики значительно лучше, чем в пассивном пикселе.

Дальнейшим развитием активного пиксела было введение в него плавающей диффузионной области, рис. 10. В данном виде пиксела накопленный заряд переносится из фотодиода в плавающую диффузионную область подачей положительного смещения на затвор переноса TX. Возможность реализации плавающей диффузионной области с очень малой емкостью позволяет увеличить коэффициент преобразования заряда в напряжение. И разделить процессы накопления и считывания по пространству. С учетом затвора переноса такой пиксел содержит четыре транзистора и пять шин. По сравнению с предыдущим пикселем в данном случае возникает необходимость в шине управления затвором переноса. Такой пиксел имеет малый коэффициент использования полезной площади, однако обеспечивает малый уровень флуктуационных и геометрических шумов.

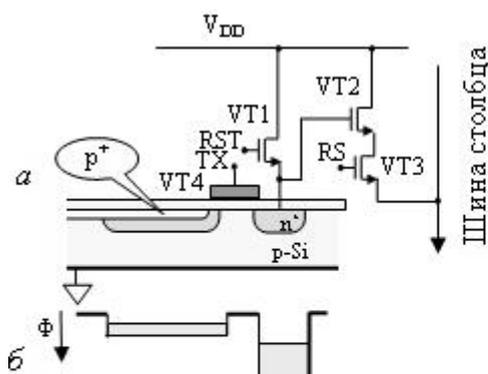


Рис. 10. Структура активного пиксела с дополнительным затвором  $\alpha$

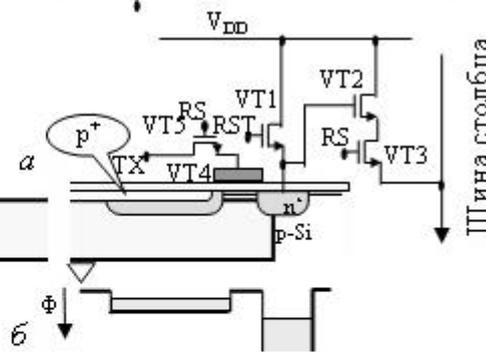


Рис. 11. Структура активного пиксела с дополнительным затвором  $\alpha$  и усилителем в цепи затвора  $\alpha$

С целью уменьшения числа шин управления и увеличения коэффициента использования полезной площади сигналы RS и TX можно объединить, рис. 11. Для структур пиксела с плавающей диффузионной областью формируемый видеосигнал имеет трёхуровневую форму, характерную для фотоприёмников на основе ПЗС. Наличие попиксельного сброса приводит к появлению шума установки узла детектирования заряда, так называемого KTC-шума. Как следствие, для обработки такого видеосигнала в структуру КМОП сенсора необходимо интегрировать схему двойной коррелированной выборки (ДКВ), т. е. узел, характерный практически для всех линейных и матричных ПЗС.

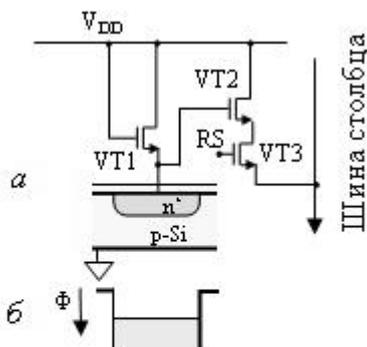


Рис. 12. Структура активного пиксела с логарифмической шкалой  $a$ , и соответствующая

Особый интерес представляют пиксели с логарифмической характеристикой накопления, рис. 12. При указанном на рис. 11 включении полевого транзистора соотношение между током и напряжением на затворе носит логарифмический характер. Указанное свойство позволяет получить фотоприемник с расширенным динамическим диапазоном по свету и со свет-сигнальной характеристикой, приближающейся к характеристике зрительного анализатора человека.

В настоящее время производство КМОП сенсоров освоило большое число производителей. В таблице приведены сведения о целом ряде сенсоров с большим числом пикселей, ориентированных в первую очередь на применение в цифровой фотографии.

Наименование сенсора	Кол-во пикселей	Тип, размер	Эффективные пиксели (HxV)	Частота кадров, Гц	Размер пиксела, мкм
<b>Sony</b>					
IMX006	1.33M	1/3.2	1,296×985	15	3.45×3.45
IMX011	2.13M	1/3	1,656×1,249	15	2.925×2.925
IMX007AQ	12.4M	1.8	4,288×2,848	5	5.49×5.49
<b>Sharp</b>					
PJ24P3BA0ET	3.27M	1/3.2	2,096×1,560	3	2.2×2.2
PJ23R3BA0ET	4.06M	1/2.5	2,332×1,740		2.5×2.5
RJ23T3BA0ET	6.20M	1/2.5	2,872×2,160		2.05×2.05
RJ23U3BA0ET	7.40M	1/2.5	3,096×2,328		1.9×1.9
PJ21V3BA0ET	8.50M	1/1.8	3,320×2,496	5	2.2×2.2
PJ21W3BA0ET	10.6M	1/1.7	3,696×2,776		2.05×2.05
<b>Panasonic</b>					
MN39960	7.38M	4/3	3,136×2,352	3	5.6×5.6
<b>Samsung</b>					
S5K4AAF	1.31M	1/4	1,280×1,024		2.8×2.8
S5K3C1FX	3.15M	1/3	2,048×1,536		2.25×2.25
S5K2E1FX	5.16M	1/2.5	2,616×1,960	10	2.2×2.2
<b>Micron</b>					
MT9M112	1.31M	1/4	1,280×1,024	15	2.8×2.8
MT9M413	1.31M	20mm	1280×1024	500	12×12
MT9T012	3.17M	1/3,2	2,056×1,544	15	2.2×2.2
MT9E001	7.99M	1/2.5	3,264×2,448		1.75×1.75
<b>Philips</b>					
FXA1012	2.09M	2/3	1,616×1,296	5	5.1×5.1
<b>Canon</b>					
EOS 10D(704F)	6.29M	22.7x15.1	3,072×2,048	3	7.4×7.4
EOS 350D	8.00M	22.2x14.8	3,456×2,304	3	6.4×6.4
EOS 5D(706P)	12.8M	35mm	4,368×2,912	3	8.2×8.2
EOS 1DsII	16.6M	35mm	4,992×3,328	4	7.2×7.2
<b>Kodak</b>					
KAS-3100	3.15M	1/2.7	2,048×1,536	12	2.7×2.7
KAS-5000	5.04M	1/1.8	2,592×1,944	6	2.7×2.7
<b>Nikon</b>					
D2H	4.02M	23.7x15.5	2,464×1,632	8	9.6×9.6
<b>Atmel</b>					
AT71200M	8.05M	35mm	3,500×2,300	2.8	10×106
<b>Foveon</b>					
FO18-50-F19	1.50M	1/1.8	1,420×1,060	7	5×5
F7X3-C9110	3.40M	20.7x13.8	2,268×1,512	4.4	9.12×9.12
Fx17-78-F13	4.82M	20.7x13.8	2,652×1,768	5	7.8×7.8
<b>Cypress</b>					
CYIHDSC9000AA	9.03M	1.8	3,710×2,434	5	6.4×6.4

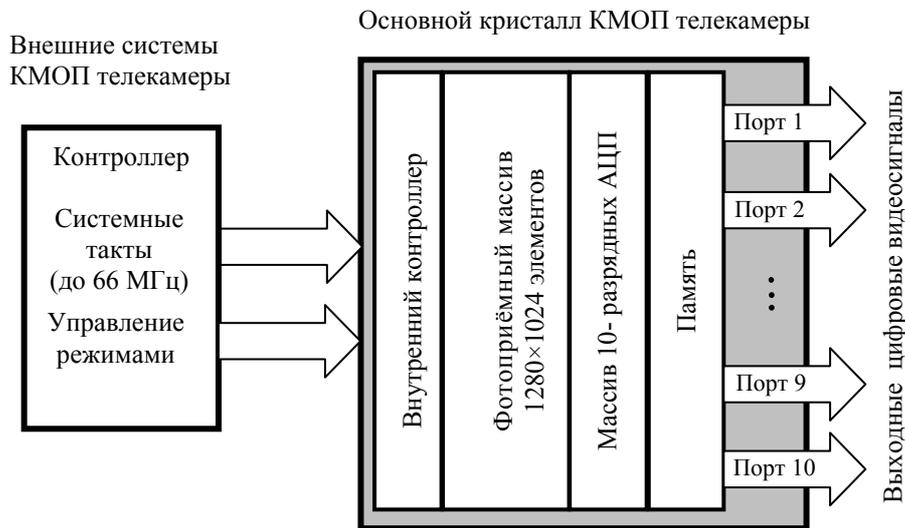


Рис. 13. Структура КМОП сенсора МТ9М413 фирмы Мисоп с активным пикселом и АЦП на каждый столбец, размещаемой в 280-выводном керамическом корпусе

Типичная структура КМОП сенсора приведена на рис. 13. Фотодиодная матрица с усилителями и КМОП-ключами (соответствует рис. 5) управляется регистром вертикальной развертки.

Видеосигнал со всех пикселей строки поступает на столбцовые усилители и при необходимости обрабатывается схемой ДКВ. Далее сигнал при помощи аналогового мультиплексора горизонтальной развертки подается на видеопроцессор и встроенный АЦП. Оцифрованный видеосигнал обрабатывается цифровым процессором, в котором могут быть осуществлены такие преобразования видеосигнала, как гамма-коррекция и апертурная коррекция, баланс черного и белого, формирование цветодельных или яркостного и цветоразностных сигналов и т. п. В общем случае в КМОП сенсоре (как и во многих других системах на кристалле) могут присутствовать выходные ЦАП, формирующие аналоговый выходной сигнал или же кодер системы NTSC или PAL. Большинство сенсоров формируют выходной видеосигнал в цифровой форме. Внешнее управление сенсором осуществляется обычно при помощи какого-либо стандартного интерфейса – I<sup>2</sup>C, SPI и т. д. При помощи данного интерфейса можно задать такие параметры, как размер окна считывания, коэффициент усиления видеопроцессора, время накопления, значение гамма-характеристики и т. п. В состав КМОП сенсора могут входить оперативные и постоянные запоминающие устройства, необходимые, например, для коррекции дефектных пикселей.

Таким образом, развитие технологии КМОП сенсоров реально привело к созданию однокристалльной цифровой телевизионной камеры, реализующей функции цифровой и аналоговой обработки. Эта технология в англоязычной литературе получила название camera-on-chip [13].

### Характеристики телекамер на КМОП фотоприёмниках

**Разрешающая способность** фотоприёмника в первую очередь определяется числом светочувствительных элементов и их геометрическим размером. В отличие от технологии ПЗС, КМОП технология позволяет достаточно простыми средствами организовать фотоприёмник, содержащий очень большое число пикселей – десятки миллионов, и имеющий очень большую площадь кристалла, например, совпадающую с размером кадра стандартной фотоплёнки. Это объясняется тем, что при увеличении размера кристалла ПЗС-преобразователя вероятность захватить фатальный дефект быстро возрастает. В КМОП сенсоре такой дефект вызовет поражение одного единственного пиксела, значение видеосигнала которого может быть интерполировано по соседним элементам, в том числе непосредственно в самом сенсоре. В матричных ПЗС такой дефект очень часто приводит к неработоспособности всего преобразователя в целом. Тем самым, выход годных фотоприёмников, выполненных по КМОП технологии, особенно при большой площади кристалла, существенно выше, нежели для ПЗС технологии.

**Чувствительность** фотоприёмника определяется коэффициентом сбора светового потока, квантовой эффективностью и собственными шумами. Наличие большого числа транзисторов в каждом пикселе приводит к снижению коэффициента использования светового потока в КМОП

сенсорах, однако применение хорошо отработанной в матричных ПЗС со строчным переносом технологии микролинз, расположенных над фотодиодом (on-chip-microlenses) позволяет добиться очень высоких значений коэффициента сбора, приближающихся в перспективе к 100%. Использование оптимизированных структур современных фотодиодов в качестве светочувствительного элемента, максимизирует квантовый выход, а наличие встроенного в пиксел активного усилителя теоретически позволяет достичь меньшего уровня шумов, чем в ПЗС структурах. Также благотворным фактором, влияющим на снижение собственного шума является уменьшение полосы частот обработки видеосигнал при применении параллельной обработки видеосигналов всех пикселов строки или же всего фотоприемника. Уже в существующих КМОП сенсорах с активным пикселом коэффициент преобразования заряда в напряжение может составлять сотни мкВ на электрон по сравнению с десятками мкВ на электрон в лучших фотоприемниках на ПЗС.

Однако, недостаточная отработанность технологии, проявляющаяся в том числе в невозможности создания мегапиксельного массива малошумящих транзисторов приводит к тому, что шумы КМОП фотоприемников пока превышают шумы ПЗС преобразователей и пока их чувствительность при равенстве таких факторов как время накопления и размер светочувствительного элемента пока уступает (примерно на порядок) чувствительности матричных ПЗС.

Характеристики спектральной чувствительности в целом идентичным характеристикам матричных ПЗС и в первую очередь определяются типом и особенностями примененного кремниевого светочувствительного элемента – МОП емкости или фотодиода. В то же время известны КМОП сенсоры, в которых схемы считывания выполнены по кремниевой технологии, а в качестве фоточувствительных элементов использованы специальные слои. Такая структура позволяет создавать КМОП фотоприемники ИК диапазона.

**Ложные сигналы**, возникающие в процессе фотоэлектрического преобразования и считывания видеосигнала, в КМОП сенсорах связаны с темновым током и разбросом чувствительности. С точки зрения темнового тока фотодиод КМОП сенсора может быть оптимизирован также как и в матричных ПЗС со строчным переносом. Однако наличие активных усилителей, схем усиления и обработки, в том числе расположенных непосредственно в пикселе, приводит к тому, что тепло выделяется непосредственно в том месте, где накапливаются фотоэлектроны, что, естественно, вызывает рост темнового тока за счет увеличения температуры. Одной из основных проблем современных КМОП сенсоров является наличие так называемого геометрического шума (Fixed Pattern Noise) – детерминированной компоненты, вызванной неравномерностью видеосигнал соседних столбцов и строк. На изображении геометрический шум проявляется обычно в виде вертикальной структуры, особенно проявляющейся на черном при малых уровнях освещенности. В настоящее время фактором, ограничивающим пороговую чувствительность КМОП фотоприемников в первую очередь является именно геометрический, а не флуктуационный шум. Данное ограничение носит технологический характер и будет преодолено по мере совершенствования технологии и увеличении вычислительной мощности цифрового процессора, расположенного на кристалле. В то же время в КМОП сенсорах полностью отсутствуют артефакты, вызванные неэффективностью переноса и так называемый вертикальный смаз (вертикальный столб на изображении от ярких деталей), присущие матричным ПЗС. Это объясняется тем, что заряд считывается в том же месте, где и формируется и механизмы образования смаза и неэффективности отсутствуют. Проблемы блуминга, возникающего при пересветках, решаются теми же способами, которые отработаны в матричных ПЗС. Наблюдению объектов при малых освещенностях препятствует свечение полевых транзисторов. В матричных ПЗС свечение обычно связано с транзисторами выходного узла и проявляется в виде фона, плавно уменьшающегося от левого верхнего угла изображения [32]. В КМОП сенсорах транзисторы расположены непосредственно в пикселе и их свечение может привести к образованию паразитного заряда, вносящего к тому же свои дробовые шумы.

**Динамический диапазон** КМОП сенсоров определяется максимальным зарядовым пакетом, накопленным в светочувствительном элементе и шумами считывания или же геометрическим шумом. С этой точки зрения динамический диапазон КМОП сенсора соизмерим с динамическим диапазоном матричного ПЗС с аналогичным размером пиксела. Однако, возможность варьирования характеристик светочувствительного элемента и схем считывания позволяет построить КМОП сенсор с логарифмической зависимостью выходного сигнала от освещенности и довести рабочий динамический диапазон до 132 дБ [29]. Известным методом расширения динамического диапазона в матричных ПЗС является суммирование зарядовых пакетов соседних пикселов по горизонтали и

вертикали непосредственно на преобразователе до момента считывания [35]. В КМОП сенсорах с координатной адресацией такое суммирование (binning) затруднительно, однако известны сенсоры, в которых может быть организовано суммирование произвольного числа зарядовых пакетов соседних элементов [25].

В современных матричных ПЗС зарядовый пакет при своем движении к выходному устройству может проходить макрорасстояния, составляющие десятки миллиметров. При этом скорость переноса обычно ограничена частотой тактирования фазных электродов выходного регистра и редко превышает 40 МГц. Дальнейшее увеличение частоты переноса приводит к повышению неэффективности, увеличению потребляемой мощности, снижению управляющей способности и т. п. Такое ограничение частоты считывания приводит к соответствующим ограничениям достижимой кадровой частоты и требует для увеличения методов параллельного считывания и последующей сшивки изображения. В КМОП сенсорах частоты опроса пикселей в 50 МГц являются типичными, и в лучших образцах данная частота превышает 100 МГц. С учётом того, что распараллеливание выходов в КМОП сенсорах реализуется даже проще, чем в матричных ПЗС, достижение высоких кадровых частот и, соответственно, лучших динамических характеристик, для КМОП сенсоров является более простой задачей. В настоящее время на рынке быстродействующих камер представлен целый ряд фирм, реализующих кадровые частоты выше 1 кГц [36, 37].

**Эксплуатационные характеристики** КМОП сенсоров существенно лучше, чем у матричных ПЗС. Выход годных при использовании технологии КМОП существенно выше, чем при использовании ПЗС технологии. Этим обусловлена малая стоимость КМОП сенсоров по сравнению с матричными ПЗС, особенно при большой площади кристалла. В отличие от матричных ПЗС, которым требуется несколько, причем достаточно высоких, питающих напряжений, для КМОП требуется одно низковольтное напряжение питания. Обычно это +5 или +3,3 вольта. Потребляемая мощность также оказывается во много раз меньше, чем для камеры на матричном ПЗС. Габаритные размеры и масса для КМОП сенсоров также во много раз меньше, чем для ПЗС камеры, что объясняется интеграцией всех основных узлов камеры на одном кристалле. Для камеры на матричном ПЗС требуется по крайней мере две-три дополнительных микросхемы плюс большое число дополнительных элементов. Интеграция всех функций на одном кристалле благоприятно сказывается и на надежности камеры. Высокие значения эксплуатационных параметров и характеристик позволяют активно использовать КМОП сенсоры в мобильных телефонах, где габаритные размеры, масса и потребляемая мощность весьма критичны.

КМОП сенсоры успешно завоевывают такую перспективную область телевизионных систем наблюдения, как сетевые телекамеры. Цифровая по своей сути структура КМОП сенсора хорошо согласуется с IP-технологиями и в настоящее время целый ряд фирм выпускает камеры на основе КМОП технологии для построения видеосетей [33, 34].

**Новые функциональные возможности** КМОП сенсоров связаны с возможностью адаптации КМОП телекамер к изменениям не только уровня освещённости, но других свойств сюжета – динамике наблюдаемых объектов и их числу. Так, одной из самых востребованных функций является задание размера и положение фрагмента изображения, с которого производится считывание видеосигнала (Region of interest). При этом реализуется обмен поля зрения и числа элементов фотоприемника на частоту кадров, т. е. при уменьшении размеров фрагмента в соответствующее число раз возрастает кадровая частота. Многие современные КМОП сенсоры позволяют задать размеры и положение фрагмента с точностью до четырех пикселей. Гипотетически нет никаких ограничений на задание нескольких фрагментов с соответствующей кадровой частотой для каждого. Координатное считывание позволяет комбинировать режимы чересстрочного/прогрессивного считывания. Так, в видеокамере, при видеозаписи КМОП сенсор может работать в чересстрочном режиме со стандартным разложением, а при считывании разложение может изменяться на прогрессивное.

Новая технология формирования цветного изображения Foveon [ff], основана на различной глубине проникновения видимого излучения в глубину кремния. Так, фотоны синего излучения поглощаются в поверхностном слое, зеленого излучения глубже, а красного в глубине кремния [Йесперс]. В КМОП сенсоре существует возможность расположить три фотодиода друг над другом и, тем самым, осуществить цветоделение. Каждый из фотодиодов поглощает свою часть спектрального диапазона. При этом достигается целый ряд преимуществ по сравнению с известными методами цветоделения, такими как использование цветоделительных призм или кодирующих светофильтров. Технология Foveon обеспечивает 100%-е использование светового потока, т.к. каждый из фотонов

видимого диапазона поглощается в одном из фотодиодов, а также полную разрешающую способность в красном, зеленом и синем.

В КМОП сенсорах, также как и в матричных ПЗС может быть реализован режим электронного затвора для улучшения качества передачи динамических изображений. Однако в большинстве КМОП сенсоров реализуется так называемый бегущий электронный затвор (Roller shutter). Его особенностью является то, что считывание в КМОП сенсоре осуществляется построчно. При этом время накопление в различных строках хоть и одинаково по длительности, но смещено друг относительно друга. Это приводит к тому, что движущиеся объекты хоть и не испытывают динамического смаза, однако искажаются геометрически. Так, если круглый объект движется по изображению сверху вниз, по направлению считывания строк, то его изображение превратится в эллипс, вытянутый по вертикали. Вертикальные линии, двигающиеся в горизонтальном направлении, оказываются наклонными и т. п. Наличие таких искажений особенно заметно при уменьшенном времени накопления и является еще одно проблемой применения КМОП сенсоров, ожидающей своего решения.

Одной из новых особенностей видеосистем на кристалле является возможность реализации разнообразных алгоритмов считывания. Именно такое разнообразие возводит этап развёртки изображений в видеосистемах на кристалле в ранг микропрограммирования эксперимента. Реализация всевозможных видов развёртки открывает путь существенной экономии ёмкости памяти оперативных запоминающих устройств, необходимых при фильтрации изображений с помощью так называемых «многоэлементных апертур». Кроме того, сложная форма развёртки может существенно упростить операцию увеличения площади зоны накопления, необходимую для обмена разрешающей способности системы на чувствительность. В частности, для дополнительной пространственной обработки, например, усреднения нескольких элементов изображения или медианной фильтрации, при традиционной прогрессивной развёртке требуются дополнительные элементы аналоговой или цифровой памяти. Так называемая развёртка Z-сканирования позволяет проводить пространственное усреднение групп элементов 2×2, 4×4, 8×8 без применения дополнительных запоминающих устройств.

В настоящее время рынок телевизионных камер на КМОП сенсорах стремительно догоняет и обгоняет рынок камер на матричных ПЗС – мобильные телефоны, цифровые фотоаппараты, видеокamеры, системы видеонаблюдения, быстродействующие телевизионные камеры – вот неполный перечень областей, где КМОП сенсоры находят всё большее применение. На рис 14 а приведена фотография телевизионной камеры фирмы ArecontVision (США), выполненной на двухмегапиксельном сенсоре фирмы Micron и предназначенной для работы в IP сетях. На рис. 14 б представлен внешний вид камеры производства фирмы «OVT»; на рис. 14 в приведен внешний вид телевизионной камеры, разработанной НПК «ЕС Экспертс» на основе трех мегапиксельного КМОП сенсора фирмы Micron и имеющей интерфейс USB2.0 и программное обеспечение для ввода изображений в компьютер.



Рис. 14. Телекамеры на КМОП фотоприёмниках

### Перспективы телекамер на КМОП фотоприёмниках – видеосистемы на кристалле

С позиций теории связи телекамера – это кодер, сочетающий в себе кодер источника и кодер канала. Главная задача кодера источника, выполняемая телекамерой – фотоэлектрическое преобразование, накопление и усиление сигналов. Главная задача кодера канала – согласование параллельного (многомерного) потока фотонов с одномерным каналом, в котором сигнал является функцией одной переменной – времени и формирование минимального количества информации при заданном уровне её качества.

Перспективы телекамер на КМОП фотоприёмниках связаны с тем, что именно этот тип приборов будет наиболее ярко олицетворять объединение связи и рукотворных кристаллов.

Перспективы телекамер на КМОП фотоприёмниках объясняются их двумя принципиальными особенностями реализации кодирования источника и кодирования канала. Во-первых, это реализация непосредственно в кристалле докоммутиационного усиления изображений, ранее осуществлявшегося только с помощью электронно-оптического преобразования в вакуумных приборах с использованием высоких напряжений. Но свойства, влияющие на надёжность прибора – необходимость обеспечения вакуума и поддержки работы прибора киловольтами – не главные недостатки электронно-оптических преобразователей (ЭОП, в англоязычной литературе называемых усилителями изображений, Image Intensifier, II). Гораздо важнее их информационные характеристики, принципиально отличающиеся от характеристик твердотельных фотоприёмников: потенциальная чувствительность и разрешающая способность. Потенциальная чувствительность телекамер на КМОП фотоприёмниках выше, чем у ПЗС или видеоконвекторов, не только благодаря докоммутиационному усилению, но и потому, что в КМОП удаётся реализовать многоканальное считывание с увеличением числа каналов от одного до числа столбцов и даже до числа элементов в матрице. Это позволяет резко сократить полосу частот в каждом парциальном канале считывания и уменьшить влияние собственных шумов прибора. Низкая квантовая эффективность электронно-оптических преобразователей по сравнению с твердотельными фотоприёмниками связана с различием используемого вида фотоэлектрического эффекта: в твердотельных приборах используется внутренний фотоэффект, в ЭОП – внешний фотоэффект. Разрешающая способность электронно-оптических преобразователей в лучшем случае достигает 30 линий на миллиметр, что в несколько раз уступает возможностям твердотельных матриц.

Во-вторых, КМОП телекамеры быстро эволюционируют в сторону видеосистем на кристалле, в которых осуществляется различная обработка видеoinформации – и кодирование источника, и кодирование канала – непосредственно на том же кристалле, на котором расположен фотоприёмный массив элементов. Новая топология прибора наглядно иллюстрирует новые проблемы синтеза видеосистем на кристалле, проявляющиеся в задаче распределения площади кристалла между фотоприёмником и устройством обработки сигналов и в задаче проектирования множества параллельных быстродействующих каналов связи фотоприёмного массива с вычислителями (последние для увеличения производительности давно строятся с использованием метода распараллеливания вычислений). Уже существуют видеосистемы на кристалле, осуществляющие преобразование потока фотонов в поток координат объектов в задаче измерения динамических искажений волнового фронта (предметно ориентированный кодер источника). На пороге появления видеосистем на кристалле, объединяющих фотоприёмную матрицу большого формата (телевидение высокой чёткости) и кодер источника (т. е. устройство сжатия изображения) в одном из перспективных стандартов. Сейчас наиболее популярны MPEG-2 и MPEG-4, но будут и более эффективные. Так же существуют видеосистемы на кристалле, сочетающие в себе первый этап кодирования источника (накопление и усиление сигналов) с кодированием канала, ориентированным на компьютерные сети – USB, Ethernet (пока эти элементы в КМОП телекамерах выполняются на отдельных БИС, рис. 14). Поэтому можно прогнозировать эволюцию КМОП телекамер к новому типу СБИС – видеосистемам на кристалле высокой системной интеграции, включающей в себя и фотоприёмный массив, и все виды кодирования – кодирование источника и кодирование канала, обеспечивая равновесное согласование источника с каналом, когда выравниваются скорость создания информации источником и скорость её передачи через канал связи, и реализуется принцип минимума информации при назначенном качестве информации.

### **Выводы**

1. КМОП телекамеры обладают потенциальными характеристиками чувствительности, разрешающей способности, динамического диапазона, быстродействия, надёжности и компактности, позволяющими им как высшей форме рукотворных кристаллов стать главными видеoinформационными приборами.

2. КМОП телекамеры имеют целый ряд качественно новых функциональных возможностей, не реализуемых не только в электронно-лучевых приборах, но и в матричных ПЗС.

3. КМОП телекамеры, эволюционируя к видеосистемам на кристалле, определяют наиболее перспективное направление видеoinформатики – создание интеллектуальных телевизионно-компьютерных систем, которые позволят реализовать системы технического и искусственного зрения реального времени, сопоставимые по характеристикам с биологическим зрением и существенно превосходящие его по быстродействию.

## Литература

1. Концепция и стратегия развития электроники России. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2006. № 3. С. 4–17.
2. Авдонин Б. Н., Мартынов В. В. Электроника. Вчера... Сегодня. Завтра?: Очерки по истории, технологии, экономике. М.: ИКП «Дека», 2005 – 600 с.
3. Алфёров Ж. И. Перспективы электроники в России. Гетероструктурная электроника и акустоэлектроника/Электроника: наука, технология, бизнес. 2004, №6, с. 90 – 93.
4. Борисов Ю. И. Отечественная электронная промышленность и компонентная база. Перспективы развития. /Электроника: Наука, технология, бизнес. 2006, №2 (68), с. 6–9.
5. Борисов Ю. И. Первая отечественная система на кристалле с быстро-действующими ЦАП/АЦП 600 Мвыборок/с по двум квадратурным каналам // Электроника: наука, технология, бизнес. 2004. № 2. С. 36–42.
6. Борисов Ю. И., Шабанов Б. М. Одно из направлений развития САПР для создания сложных технических систем // Информационные технологии. 2003. № 10. С. 2–17.
7. Борисов Ю. И. Новый шаг отечественной микроэлектроники//Наука и технологии в промышленности. 2003, №12, с. 3 – 11.
8. Немудров В. Г., Мартин Г. Системы на кристалле. Проблемы проектирования и развития. М.: Техносфера, 2004. – 216 с.
9. Немудров В. Г. «Прогресс» в проектировании отечественных СБИС. Электроника: наука, технология, бизнес. 2002, №6, с. 5 – 9.
10. Бухтев А., Немудров В. Системы на кристалле. Новые тенденции //Электроника: наука, технология, бизнес. 2004, №3, с. 52 – 56.
11. Фомин Д. «Кремний на бумаге» или FABLESS? Электронные компоненты. «Живая электроника России – 2001», с.19 – 21.
12. Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К. Основные направления развития телевизионной техники. Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2006, №1, с. 3 – 12.
13. Ракович Н. Н. CameraChip: полная видеосистема на кристалле//Компоненты и технологии. 2004, №1, с. 128 – 130.
14. Стемповский А., Шилин В. КМОП-фотодиодные СБИС. Перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки информации// Электроника: наука, технология, бизнес. 2003. №2. С. 14 – 20.
15. Березин В. В. Видеосистемы на кристалле: новые системные возможности. Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения, 2006, вып. 1, с. 63 – 71.
16. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений. Т. 3. Под ред. Б. Кейзана. М. Мир, 1980. – 312 с.
17. Ермаков О. Н. Прикладная оптоэлектроника. М. Техносфера, 2004. – 416 с.
18. Котов Б. А. Матричные преобразователи оптической информации в видимой области спектра/Фотоприёмники и фотопреобразователи. Сб. научн. Трудов под ред. Ж.И.Алфёрова и Ю.В.Шмарцева. Л.: Наука, 1986., с. 131–147.
19. [www.Dalsa.Com](http://www.Dalsa.Com)
20. [www.OmniVision.com](http://www.OmniVision.com)
21. [www.micron.com/products/imaging/products/mt9m413.html](http://www.micron.com/products/imaging/products/mt9m413.html).
22. Ракович Н. Н. CameraChip: полная видеосистема на кристалле//Компоненты и технологии. 2004, №1, с. 128 – 130.
23. E. R. Fossum. «Active pixel sensors – Are CCD's dinosaurs?» Charge-Coupled Devices and Optical Sensors III, Proc. SPIE, vol. 1900, pp. 2–14, 1993.
24. Статья редактор Иванов В.Г.
25. Morton (Z) Scan Based Real-Time Variable Resolution CMOS Image Sensor // E. Artyomov, Y. Rivenson, G. Levi, O. Yadid-Pecht / IEEE transactions on circuits and systems for video technology, V. 15, № 7, pp. 947 – 952.
26. Active-Pixel Image Sensors With Programmable Resolution" (NPO-19510), NASA Tech Briefs, Vol. 20, No. 5, (May 1996), page 26.
27. Nirmaier T, Droste D., Bille J. Hartmann-Shack sensor ASIC's for real-time adaptive optics in biomedical physics. IIIS Congress on systemics, cybernetics and informatics, v. XIII, Orlando, 2002, p. 1 – 5.
28. Evgeny Artyomov, Orly Yadid-Pecht. Adaptive multiple resolution CMOS active pixel sensor, IEEE ISCAS, Vancouver, BC, Canada, pp. III-786-789, May 2004.
29. Novel CMOS image sensor with a 132-dB dynamic range / D. Stoppa, A. Simoni, L. Gonzo M. Gottardi // IEEE journal of solid-state circuits, vol. 37, N 12, dec 2002, pp 1846–1852.
30. Березин В. В., Фахми Ш. С. Проектирование устройств обработки сигналов на основе технологии «система на кристалле». СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – 148 с.
31. Передовая технология компании Pixim. «ССТV Фокус», №4, 2003, с. 12 – 15.
32. Манцетов А. А. Потенциальные характеристики матричных ПЗС. Материалы 59-й конф, Апрель 2004, СПб, 2004.
33. [www.axis.com](http://www.axis.com)
34. [www.arecontvision.com](http://www.arecontvision.com)
35. Манцетов А. А., Михайлов В. А., Эйссенгардт Г. А. Характеристики матричных ФППЗ в режиме суммирования зарядовых пакетов. Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1990.– Вып. 2. С. 26-33.