

2.6. Преобразователи свет-сигнал, используемые в передающих камерах

2.6.1. Основные требования к преобразователям свет-сигнал

В телевидении преобразователи свет-сигнал (ПЗС-, КМОП-матрицы) в основном определяют параметры и качество воспроизводимого телевизионного изображения. От типа преобразователя зависит принцип построения передающей камеры, наличие отдельных вспомогательных узлов. Поэтому важнейшим вопросом при построении передающих камер ТВЧ-типа является правильный выбор устройства, преобразующего оптические изображения в видеосигнал.

Специфика построения камер ТВЧ, в которых чаще всего применяются несколько преобразователей свет-сигнал, предъявляет к последним достаточно высокие требования. Рассмотрим более подробно эти требования.

- Высокая идентичность характеристик преобразователей свет-сигнал и независимость этих характеристик от передаваемого сигнала. При различии данного параметра более чем на 2% не удастся обеспечить в камере цветного телевидения динамический баланс белого.

- Возможность получения высокой точности совмещения растров и их эксплуатационной стабильности. Точность совмещения должна быть не хуже долей элемента разложения по всему полю изображения.

- Отсутствие паразитных сигналов и высокая однородность чувствительности по полю раstra.

- Высокая чувствительность во всем видимом спектре, что необходимо из-за больших потерь света в оптической системе камеры цветного телевидения.

- Малая инерционность сигнала и ее идентичность для всех преобразователей, применяемых в передающей камере. Различие в инерционности сигналов, при которой остаточный сигнал в преобразователях отличается более чем на 2%, приводит к разноцветным тянувшимся продолжениям в изображении, что резко снижает его качество.

- Способность работать в широком диапазоне освещенностей передаваемых сцен.

- Высокая разрешающая способность.

- Малый уровень собственных шумов в сигнале на выходе, причем структура шумового рисунка должна быть малозаметной, т.е. мелкой.

- Малые габариты и простота управления.

2.6.2. Физические принципы работы приборов с зарядовой связью

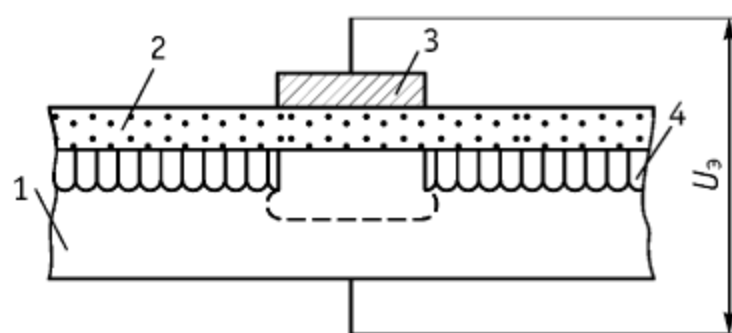
В ПЗС реализуется принцип самосканирования, т.е. направленного перемещения накопленных зарядов вдоль цепочки элементарных накопителей зарядов.

Основой ПЗС является конденсатор со структурой металл-оксид-полупроводник (МОП-конденсатор) [35]. Именно МОП-конденсатор является

элементом, способным хранить информационные пакеты зарядов, сформированные под воздействием света или путем инжекции через р-п переход. Цепочка из МОП-конденсаторов, связанных особым образом друг с другом, обладает способностью передавать зарядовые пакеты под воздействием управляющих напряжений от одного элемента структуры к другому до выхода, где зарядовые пакеты преобразуются в потенциал или ток.

К достоинствам ПЗС-структур следует отнести:

- возможность непосредственного преобразования светового потока в зарядовые пакеты и способность хранить зарядовую информацию;
- способность направленной передачи зарядовой информации и преобразования ее в видеосигнал при достаточно точном построении геометрии точечного раstra (координаты элементов фиксируются с точностью до 0,5 мкм);
- высокое быстродействие;
- возможность реализации обработки информации непосредственно на матрице;
- высокую степень интеграции, малые потребляемую мощность и габаритные размеры;
- высокую механическую прочность, стойкость к вибрациям и электромагнитным воздействиям, надежность и большой срок службы.

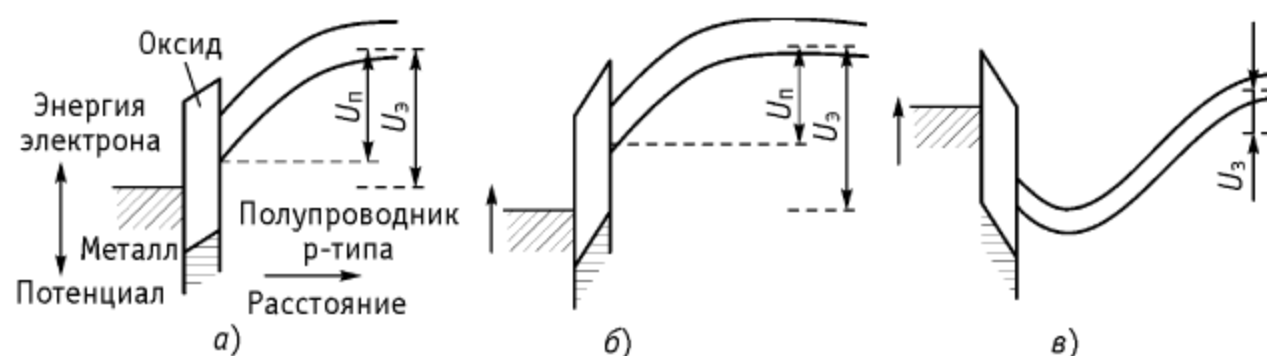


1 – подложка из р-кремния; 2 – оксид;
3 – проводящий электрод; 4 – область стоп-диффузии

Рисунок 2.26. Конструкция МОП-конденсатора

На рисунке 2.26 показана структура МОП-конденсатора, включающая в качестве основы подложку из р-кремния. Путем термического окисления на ее поверхности формируется слой оксида, на который наносится проводящий электрод. Если между электродом и подложкой приложить положительное напряжение U_z , то под действием электрического поля под проводящим электродом будет образована зона, обедненная для основных носителей, в рассматриваемом случае для дырок-зона стоп-диффузии (СД) (указана штриховыми линиями). Электрическая диаграмма МОП-структуры для этого случая приведена на рисунке 2.27, а, где U_{Π} – поверхностный потенциал [35]. В образовавшейся потенциальной яме происходит накопление неосновных носителей заряда (здесь – электронов). Эти заряды могут образовываться за счет фотоэмиссии. Энергетическая диаграмма по мере накопления неосновных носителей изменя-

ется: значение $U_{\text{п}}$ уменьшается, как показано на рисунке 2.27, б. Таким образом, если рассматриваемый элемент освещен, то в полупроводнике около его поверхности образуются пары носителей заряда электрон-дырка. Электроны заполняют потенциальную яму, причем значение заряда, накопленного за дозированное время, оказывается пропорциональным освещенности. Распространение области потенциальной ямы вдоль границы раздела полупроводник-оксид ограничивается формированием областей полупроводника p^+ -типа со степенью легирования на несколько порядков выше, так называемых областей СД (см. рисунок 2.26). В областях СД поверхностный потенциал на границе раздела оксид-кремний близок к нулю. Характер накопления заряда в накопительной ячейке МОП-структуры иллюстрируется рисунком 2.28, где показано, как изменяется поверхностный потенциал $U_{\text{п}}$ (в относительных единицах) по мере накопления заряда Q (в относительных единицах). На том же графике приведена зависимость ширины W_d обедненного слоя от величины накопленного заряда. Характер зависимостей $U_{\text{п}}$ и W_d от Q определяется физическими свойствами материала и конструктивной реализацией МОП-структуры, в частности, концентрацией легирующей примеси и толщиной слоя оксида.



а) энергетическая диаграмма МОП-структуры для случая, когда под действием электрического поля под проводящим электродом образована зона, обедненная для основных носителей;

б) энергетическая диаграмма в случае накопления неосновных носителей заряда;

в) энергетическая диаграмма при распространении области потенциальной ямы вдоль границы раздела полупроводник-оксид

Рисунок 2.27. Энергетические диаграммы МОП-структуры, соответствующие различным ее состояниям

Рассмотрим механизм накопления заряда в ячейке МОП-структуры с учетом динамического характера потенциала $U_{\text{з}}$. Процесс образования потенциальной ямы начинается после подачи на металлический электрод МОП-структуры положительного потенциала достаточно большой амплитуды. Процесс накопления заряда в потенциальной яме происходит и в отсутствии освещения элемента (за счет тепловой генерации неосновных носителей). В зависи-

мости от температуры и свойств материалов МОП-структуры максимальный заряд ячейки под действием тепловых процессов может образовываться за время от сотых долей до единиц секунд и выше. Если ограничить значение заряда, возникающего под действием тепловой генерации (так называемый уровень логического 0), то можно определить максимальное время накопления и хранения заряда в ячейке, т.е. найти нижний предел рабочих частот накопительной ячейки. В реальных приборах при комнатной температуре обычно его устанавливают от единиц до десятков килогерц.

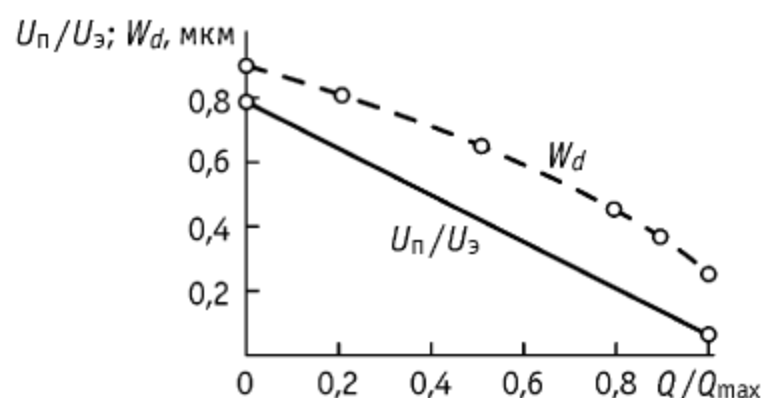


Рисунок 2.28. Характеристики накопления ячейки МОП-структуры

Следует обратить внимание на то, что чувствительность преобразователей на ПЗС снижается за счет поглощения света в электродах (при освещении с рабочей стороны). Для ослабления этого эффекта стремятся к увеличению прозрачности электродов, как правило, за счет уменьшения их толщины (до десятков нанометров). Другим способом является вытравливание в электродах окон так, чтобы светочувствительные области были открыты для воздействующего света. В последнем случае применяют известные из оптики способы просветления за счет нанесения тонких пленок. Вариантом уменьшения нерационального поглощения света является использование освещения со стороны кремниевой подложки. Этот способ технологически весьма сложен, что связано с необходимостью существенного уменьшения толщины подложки (примерно до 10 мкм). Все способы снижения неэффективного поглощения света приводят к повышению чувствительности в коротковолновой части спектра излучения.

2.6.3. Классификация матричных преобразователей свет-сигнал ПЗС - типа

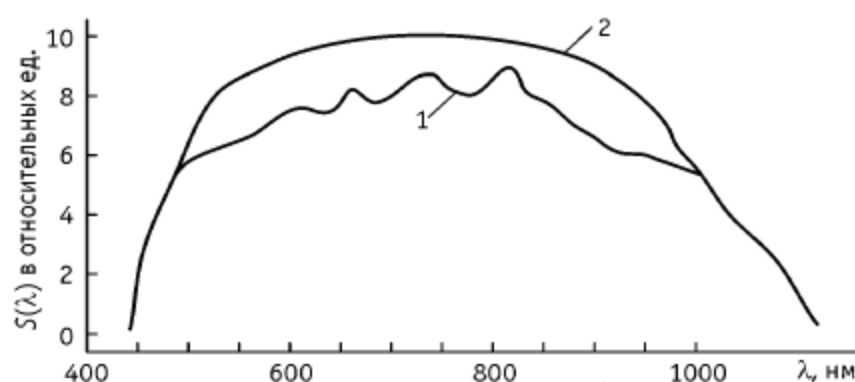
Как теле-, так и видеокамеры требуют использования в них преобразователей свет-сигнал, способных формировать сразу целое изображение, сфокусированное оптической системой на светочувствительной поверхности прибора с зарядовой связью. Для этого используются многие тысячи светочувствительных датчиков, объединенных в матрицу. Такой двумерный массив получают с помощью стоп-каналов, разделяющих электродную структуру ПЗС на столбцы. Стоп-каналы – это узкие области, формируемые специальными технологическими приемами в приповерхностной области, которые препятствуют растека-

нию заряда под соседние столбцы. Аналоговый метод работы сдвигового регистра используется для переноса зарядов, генерируемых светочувствительными датчиками, из этой секции на выходной терминал прибора.

Число элементарных конденсаторов (элементов) по горизонтали определяет горизонтальное разрешение, а число элементов по вертикали жестко привязано к телевизионному стандарту.

Существуют два способа засветки ПЗС: прямая (со стороны электродов) и обратная. Прямая засветка характеризуется низким коэффициентом пропускания из-за непрозрачности электродов. Этот недостаток принципиально неустраним. Широко используемые в технологии ПЗС поликремниевые электроды, хотя и являются полупрозрачными, плохо пропускают излучение синего-голубой области спектра. Вследствие интерференционных эффектов, возникающих в многослойной структуре, на спектральной характеристике появляются пики и провалы.

При обратной засветке излучение проходит через подложку, прозрачность и однородность которой значительно выше. Важной особенностью режима обратной засветки является сильное диффузное расплывание зарядового пакета, так как расстояние, которое должны пройти заряды от зоны фотогенерации до обедненного слоя значительно больше, чем в режиме прямой засветки. Спектральная характеристика при этом имеет вид плавной кривой (рисунок 2.29).

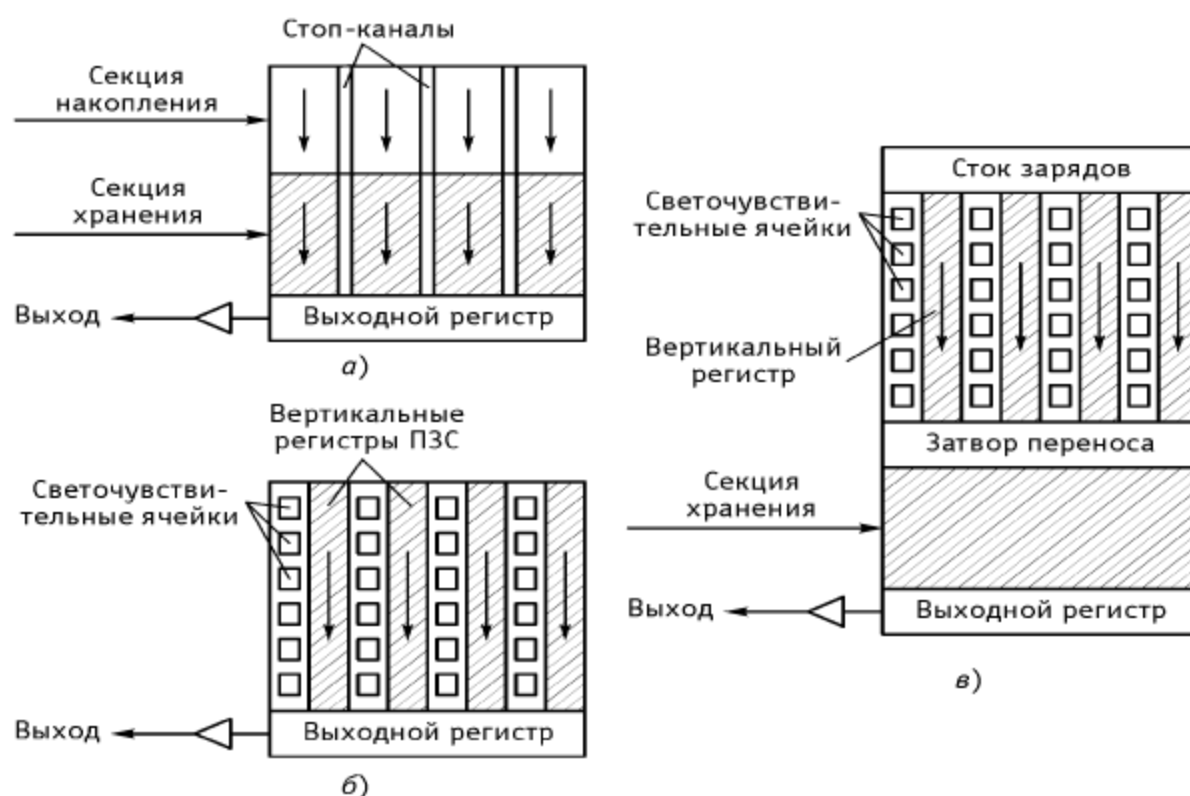


1 — прямая засветка; 2 — обратная засветка

Рисунок 2.29. Зависимости спектральной чувствительности ПЗС от способа засветки

Оптимизация толщины слоев многослойного покрытия позволяет повысить коэффициент пропускания. Другим способом повышения этого коэффициента и, следовательно, улучшения спектральной чувствительности является замена электродов из поликремния на проводящие окислы металлов (олова, индия, сурьмы), характеризующиеся более высокой прозрачностью, в том числе, и в синего-голубой области спектра. При разработке двухкоординатной матрицы решается вопрос организации ее считывания. По способу накопления и переноса зарядовых пакетов матрицы делятся на три вида. Первый — это приборы со строчным переносом зарядов (Interline Transfer — ИТ), второй — с кадровым пе-

переносом или Frame Transfer – FT и, наконец, третий – с кадрово-строчным переносом или Frame Interline Transfer – FIT (рисунок 2.30).



- а) структура матрицы с кадровым переносом зарядов (ПЗС КП);
- б) структура матрицы со строчным переносом зарядов (ПЗС СП);
- в) структура матрицы с кадрово-строчным переносом зарядов (ПЗС КСП)

Рисунок 2.30. Основные разновидности матриц приборов с зарядовой связью

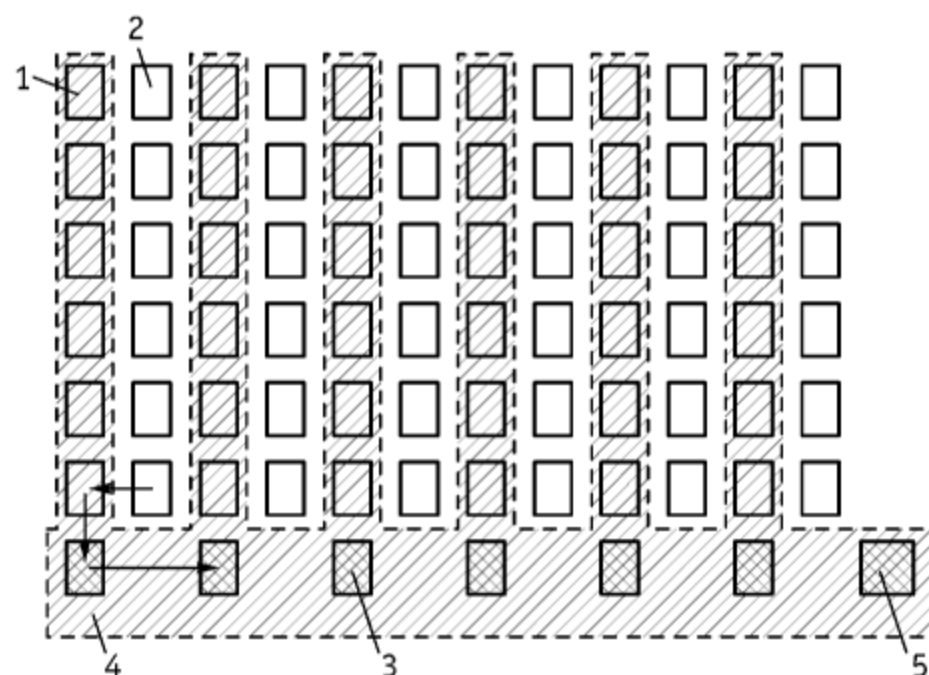
Первые формирователи видеосигнала на ПЗС использовали принцип кадрового переноса зарядов, который является самым простым. Однако серьезным недостатком матриц ПЗС КП является СМАЗ, т.е. появление вертикальных светлых столбцов от ярких участков на изображении. Поэтому в современных передающих камерах ТВЧ-типа матрицы ПЗС КП не используются.

2.6.4. Особенности построения строчного переноса зарядов

В матрицах со строчным переносом зарядов светочувствительные ячейки расположены между вертикальными ПЗС регистрами сдвига, заэкранированной от света алюминиевой маскирующей пленкой (рисунок 2.31) [24,36]. Секция хранения зарядов отсутствует (ее роль выполняют вертикальные регистры), что при заданном оптическом формате изображения приводит к уменьшению площади кристалла.

Во время кадрового гасящего импульса все накопленные в светочувствительных ячейках заряды переносятся за один такт в рядом расположенные потенциальные ямы вертикальных ПЗС регистров, из которых далее построочно переносятся в горизонтальный регистр во время строчного гасящего импульса.

Из горизонтального регистра заряды считываются во время активной части строки и преобразуются в выходное напряжение во встроенном усилителе.



1 — регистр вертикального сдвига; 2 — фотодатчик; 3 — горизонтальный считывающий регистр; 4 — оптическая маска; 5 — выходной терминал

Рисунок 2.31. Конструкция матрицы ПЗС с построчным переносом зарядов

Поскольку в подобной конструкции функции светочувствительных датчиков и регистров сдвига разделены, каждая из этих структур может быть оптимизирована. Рассматриваемый преобразователь обладает высокой эффективностью переноса зарядов, при этом обеспечиваются хороший динамический диапазон видеосигнала и сверхнизкий уровень структурных шумов в изображении.

Для обеспечения чересстрочной развертки в матрицах ПЗС СП могут использоваться два способа накопления и считывания зарядов из светочувствительных ячеек в вертикальные регистры. В первом из них в четных полях считываются заряды из всех четных ячеек, а в нечетных полях — из всех нечетных ячеек. Время накопления зарядов в каждой ячейке в этом случае равно длительности телевизионных кадров (40 мс), что приводит к уменьшению динамического разрешения для движущихся деталей изображения.

Для устранения этого недостатка в последнее время в качестве основного используется второй способ считывания зарядов с двух соседних ячеек одновременно с номерами 1 + 2, 3 + 4, ... в первом поле и 2 + 3, 4 + 5, ... во втором. В результате время накопления зарядов становится равным длительности одного поля телевизионной развертки, т.е. 20 мс (рисунок 2.32). Недостаток второго способа заключается в некотором снижении вертикальной разрешающей способности.

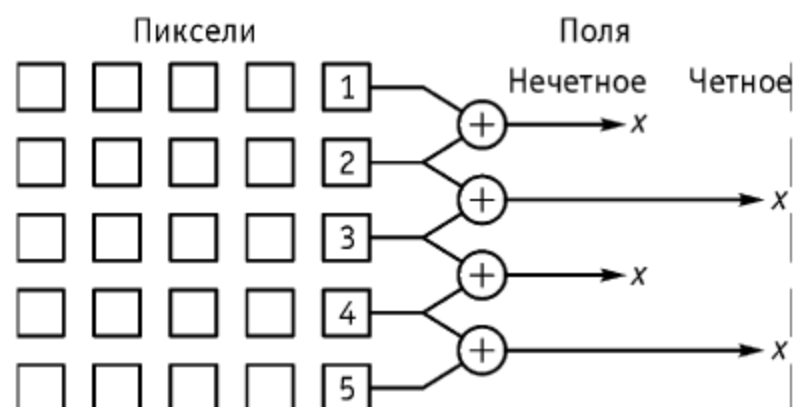
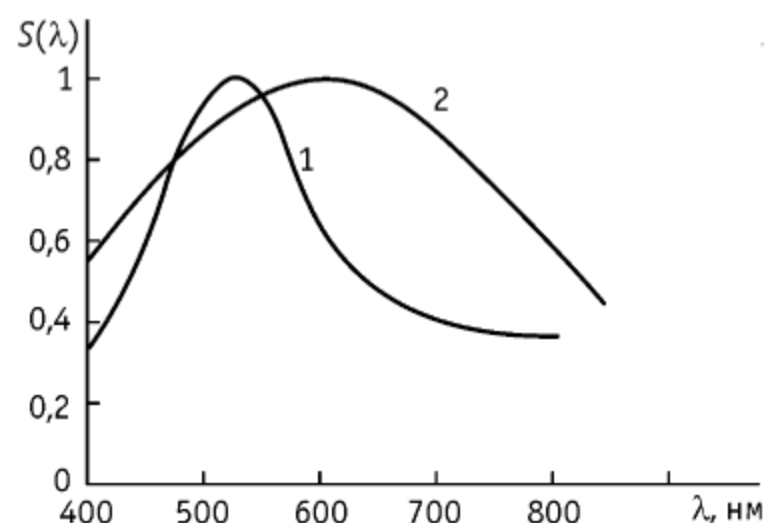


Рисунок 2.32. Иллюстрация принципа накопления заряда в течение телевизионного поля

Отмеченный недостаток можно устранить, если в четных полях считывать заряды из всех четных ячеек, а заряды из нечетных удалять. В нечетных же полях нужно считывать заряды из нечетных ячеек, заряды из четных ячеек во время того же полевого гасящего импульса удалять в специальные стоки. Следует заметить, что в предлагаемом режиме считывания зарядов вдвое снижается чувствительность матрицы.



1 – с МОП-конденсаторами; 2 – с фотодиодами

Рисунок 2.33. Спектральные характеристики матриц ПЗС СП фирмы Sony

Для увеличения чувствительности матриц ПЗС СП в синей части спектра видимого излучения толщину поликремниевых затворов выбирают очень тонкой (50...100 нм) и с таким расчетом, чтобы результирующая спектральная характеристика (с учетом интерференции света, отраженного от границ раздела поликремний-диоксид кремния-кремний) имела максимум излучения в синезеленой части видимого спектра (рисунок 2.33). Однако полученная форма спектральной характеристики МОП-конденсатора не всегда позволяет получить наивысшее качество цветопередачи, требуемое для вещательного телевидения. Кроме того, в матрицах ПЗС СП с МОП-конденсаторами фирмы Sony исполь-

зуются поверхностные стоки для избыточных зарядов при локальных пересветах. В результате активная площадь светочувствительных ячеек оказывается сравнительно небольшой (около 23%). Поэтому в последнее время многие зарубежные фирмы, в том числе и фирма Sony, стали применять в качестве светочувствительных ячеек в матрицах ПЗС СП фотодиоды различной конструкции в совокупности с объемными стоками для удаления избыточных зарядов.

2.6.5. Технология кадрово-строчного переноса зарядов

В трехматричных камерах вещательного телевидения необходимо дальнейшее снижение уровня смаза вплоть до тех пор, пока он не станет существенно меньшим уровня шумов даже при значительных локальных пересветах. Поэтому для повышения качества формируемого изображения в ПЗС был разработан альтернативный способ переноса зарядов. Его назвали принципом кадрово-строчного или гибридного переноса [20,36].

Указанный принцип объединил в себе особенности двух предыдущих методов – построчного и покадрового переноса зарядов (рисунок 2.34).

Верхняя секция преобразователя работает точно так же, как и матрица ПЗС с построчным переносом зарядов. В этом случае заряды от светочувствительных датчиков поступают на вертикальные регистры сдвига во время кадрового гасящего импульса, но затем осуществляется перенос зарядов в секцию хранения и далее к регистру горизонтального сдвига.

Благодаря наличию в матрицах ПЗС КСП дополнительной секции хранения зарядов на длительность телевизионного поля частота переноса зарядов из вертикальных ПЗС-регистров в секцию хранения может быть выбрана в десятки раз (до 60 раз) больше частоты строк, используемой в матрицах ПЗС с построчным переносом зарядов. В данном случае закрытые непрозрачной маскирующей пленкой пакеты зарядов становятся невосприимчивыми к мощным пересветам. Таким образом, заряды искажаются в 60 раз меньше по сравнению с вариантом, используемым в ПЗС с СП. Это и позволяет во столько же раз уменьшить уровень смаза изображения. Практически уровень смаза снизился до 0,0002% и стал практически незаметным даже при значительных локальных пересветах. В названных четырехфазных матрицах ПЗС КСП фирмы Sony используется электронное регулирование длительности накопления зарядов (электронный фотозатвор) при передаче быстро движущихся изображений с целью повышения динамической разрешающей способности. В этом случае заряды, накопленные в светочувствительных ячейках за выбранную часть длительности поля (1/125, 1/500, 1/1000 или же 1/2000 секунды, например), переносятся в секцию памяти во время полевого гасящего импульса, а все ненужные заряды, накапливаемые в остальное время, предварительно удаляются в специальный сток, расположенный в верхней части матрицы. Могут использоваться и другие способы удаления ненужных зарядов.

Из рисунка 2.35 видно, что часть светочувствительной поверхности секции накопления покрыта непрозрачными для света вертикальными регистрами переноса, что существенно снижает световую чувствительность таких ПЗС по

сравнению с ПЗС с переносом кадра. Преодолеть этот недостаток позволило применение микролинз, которые располагаются перед каждым фотодатчиком и поэтому практически весь свет собирается на них, минуя закрытые от света участки секции накопления. Этим достигается высокая светочувствительность матриц ПЗС [37].

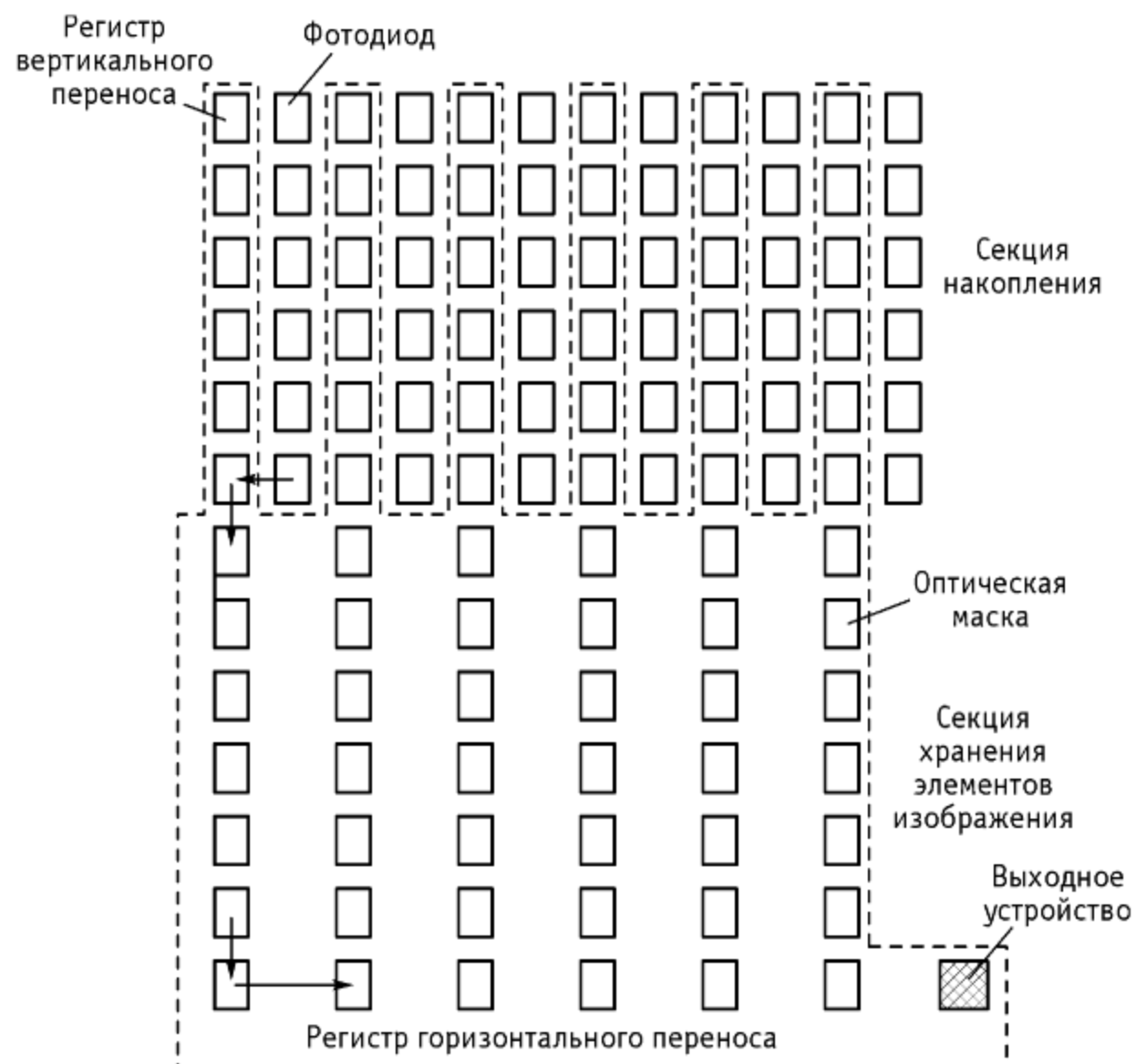


Рисунок 2.34. Конструкция матрицы ПЗС с кадрово-строчным переносом зарядов

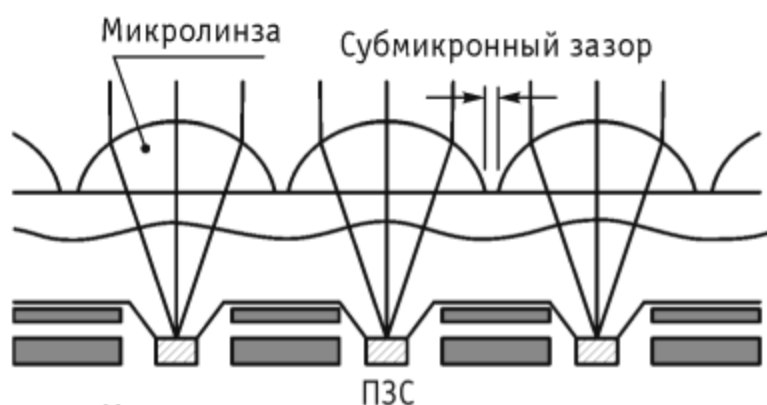


Рисунок 2.35. Конструкция матрицы ПЗС с микролинзами

Первооткрывателем микролинз стала фирма Sony. Теперь матрицы ПЗС с микролинзами используют Panasonic, Ikegami, Toshiba, Hitachi и другие фирмы.

Матрицы ПЗС с кадрово-строчным переносом зарядов устанавливаются в высококачественных и, как следствие, наиболее дорогих теле- и видеокамерах. Эти матрицы обеспечивают наиболее высокое качество формируемых видеосигналов, объединяя все преимущества кадрового и строчного переноса зарядов.

У матриц ПЗС КСП есть и свои недостатки. Поскольку матрица является сложной составной структурой и использует большую площадь интегральной схемы из-за необходимости наличия отдельной секции накопления, она становится более дорогостоящей в процессе производства.

2.6.6. Основные характеристики и параметры матриц ПЗС

Характеристики преобразователей свет-сигнал на основе матриц ПЗС в конечном счете отражают качество формируемого в телевизионной системе изображения. К их числу относятся: характеристика преобразования свет-сигнал, чувствительность, шумы преобразователя, спектральная характеристика, разрешающая способность и другие [35]. Вместе с этими важными свойствами матричных преобразователей достаточно существенными являются эксплуатационные параметры: размеры, масса, ремонтпригодность.

Характеристика преобразования свет-сигнал представляет зависимость выходного видеосигнала от освещенности соответствующего участка изображения. Эта характеристика определяет передачу градаций яркости (освещенности) матрицы ПЗС. Связь между значением выходного сигнала I_c или U_c и освещенностью E может быть линейной или более сложной. Обычно эту характеристику аппроксимируют степенной функцией $I_c = \alpha + \beta E^\gamma$, где α – значение темнового тока; β – коэффициент, определяющий чувствительность преобразователя; γ – коэффициент, характеризующий степень нелинейности характеристики. Для преобразователей на базе ПЗС $\gamma = 1$, т.е. характеристика преобразования линейна (рисунок 2.36). Иногда вводят представление о широте характеристики как диапазоне освещенностей, в котором может работать преобразователь. Минимальное значение $E_{\min}$ этого диапазона определяется допу-

стимым отношением сигнал-шум, а максимальное $E_{\max}$ – заданным значением γ (как правило, с ростом освещенности γ уменьшается) или возникающими искажениями на изображении типа «растекания» изображения ярких деталей (растекания зарядов в ПЗС). Возникновение указанных искажений связано с заполнением потенциальных ям максимальным зарядом. Для ПЗС этот параметр определяется как отношение наибольшего зарядового пакета, который может быть накоплен в пикселе к шуму считывания. Чем больше размер пикселя ПЗС, тем больше электронов может удерживаться в нем. Для разных типов ПЗС эта величина составляет от 75 000 до 500 000 и выше. Большой динамический диапазон особенно важен для регистрации изображения в уличных условиях при ярком солнечном свете или в ночных условиях.

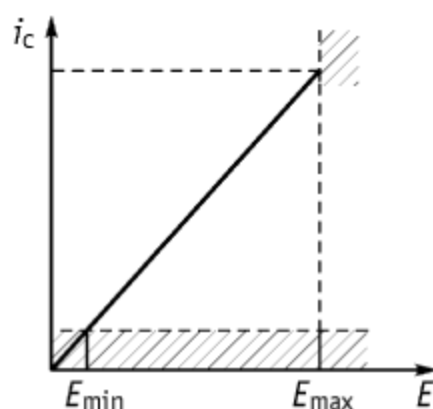


Рисунок 2.36. Характеристика преобразования матрицы ПЗС

Характеристика преобразования вместе с шумовыми параметрами преобразователя определяет число передаваемых градаций яркости (освещенности) изображения. Существенным вопросом при этом является определение начала отсчета сигнала. Темновой ток ПЗС связан с тепловой генерацией электронно-дырочных пар и пропорционален времени накопления заряда, площади элемента, зависит от температуры преобразователя и темпа термической генерации носителей заряда, создаваемых рекомбинационно-генерационными центрами у поверхности и в объеме полупроводниковой подложки.

Характеристики преобразования в различных частях матрицы ПЗС, как правило, различаются, что вызвано рядом технологических факторов (например, неоднородностью толщины электродов элементарных накопителей; различием концентрации примесей в накопительных ячейках, размеров светочувствительных элементов). Это приводит к неравномерности видеосигнала по полю изображения. В промышленных образцах матриц ПЗС неравномерность крутизны характеристики преобразования не превышает 5%.

Чувствительность преобразования свет-сигнал определяется как величина, обратная освещенности, необходимой для формирования на выходе телекамеры сигнала с заданными параметрами. Чаще всего в качестве такого параметра используют заданное отношение сигнал-шум. Следует заметить, что обычно учитывают флуктуационные шумы, возникающие в процессе формирования видеосигнала, его усиления. Однако в качестве шумов, ограничивающих

чувствительность преобразователя, в ряде случаев могут выступать структурные помехи ПЗС, неравномерность сигнала по полю изображения. При отношении сигнал-шум около 50...60 дБ и относительном отверстии объектива 1:1,4 номинальная чувствительность матриц ПЗС составляет 100...200 лк⁻¹.

Отрицательным следствием высокой чувствительности матриц ПЗС в инфракрасном диапазоне является повышенная зависимость шумов преобразователя свет-сигнал от температуры. Основная причина сдвига чувствительности ПЗС-телекамер в инфракрасную область по сравнению с другими полупроводниковыми приемниками излучения связана с тем, что более красные, т.е. инфракрасные, фотоны проникают дальше в кремний, так как прозрачность кремния больше в длинноволновой области и при этом вероятность захвата фотона (преобразования его в фотоэлектрон) стремится к единице.

Для повышения чувствительности в коротковолновом диапазоне в поликремниевых электродах вскрыты окна. Площадь окон составляет примерно 15...20%, что позволило использовать матрицы ПЗС в цветном телевидении.

Шумы преобразователя – флуктуации тока видеосигнала, т.е. отклонение тока сигнала от значения, определяемого освещенностью соответствующего участка поля изображения.

По происхождению шумы делятся на несколько групп. Дробовые шумы являются следствием хаотичности эмиссионных процессов, происходящих в термо-, фотоэлектронных системах. Спектральная плотность таких шумов не зависит от частоты, а эффективное значение их пропорционально корню квадратному из частоты. Зависимость среднего значения квадрата тока флуктуаций $i_{др}^2$, вызванных дробовым эффектом, от тока сигнала I_c , как известно, устанавливается формулой Шотки:

$$i_{др}^2 = 2I_c e \Delta f,$$

где e – заряд электрона; Δf – полоса частот регистрируемого процесса. К дробовым шумам относят также фотонный шум падающего на преобразователь потока фотонов, соответствующих данному участку светового поля, который необходимо учитывать в преобразователях свет-сигнал, имеющих предельную чувствительность. Флуктуации в потоке фотонов в первом приближении подчиняются распределению Пуассона, поэтому среднеквадратическое значение флуктуаций числа фотонов n_s , отнесенное к единице площади, равно $\sigma_{n_s} = \sqrt{n_s}$. В полупроводниках шумом, аналогичным дробовому, является генерационно-рекомбинационный шум.

Тепловой шум, возникающий на резисторе нагрузки преобразователя, в ряде случаев вносит заметный вклад в величину флуктуаций напряжения. Зависимость среднеквадратического значения этой величины от температуры T и сопротивления нагрузки R устанавливается формулой Найквиста:

$$\bar{U}_n^2 = 4kTR\Delta f,$$

где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана.

В спектре шума полупроводника хорошо различимы три характерные области частот. В первой области доминирующим является токовый шум. Начи-

ная с некоторой частоты, токовый шум оказывается меньшим, чем генерационно-рекомбинационный, и последний оказывается определяющим вплоть до частот, при которых он существенно уменьшается. Выше этих частот остается лишь тепловой шум, обычно существенно меньший, чем токовый шум в первой и второй областях. В большинстве случаев в области низких частот наиболее серьезные ограничения использования полупроводников вносит токовый шум.

Токовый шум или, как его иногда называют, $1/f$ шум, шум контактов или избыточный шум имеет несколько источников. Название $1/f$ связано с тем, что спектральная плотность энергии этого шума изменяется в зависимости от частоты как $|f|^{-\alpha}$, где α – обычно колеблется в пределах 0,8...1,2. Эту зависимость наблюдают при понижении частоты до значений порядка 10^{-6} Гц [35].

На работу преобразователей свет-сигнал на ПЗС существенное влияние оказывают специфические шумы ПЗС. К ним относятся шумы, связанные с неоднородностью темнового тока элементов ПЗС, а также флуктуационные шумы. К флуктуационным шумам помимо уже рассмотренных дробовых шумов фотогенерированных носителей заряда, образованных источником сигнала, относятся шумы темнового тока, шумы фонового заряда, минимально необходимого для эффективного переноса зарядов, шумы процесса переноса пакетов заряда, а также шумы входного и выходного устройств ПЗС. Для уменьшения потерь, возникающих в процессе переноса заряда, связанных с захватом носителей на быстрых поверхностных состояниях, в ПЗС часто вводят определенный (порядка 0,1 от сигнального заряда) фоновый заряд оптическим, тепловым или электрическим способом, что приводит к появлению шумов фонового заряда.

Оптический и тепловой ввод фонового заряда приводит к появлению дробовых шумов (оптического и теплового), значения которых можно определить по формулам, аналогичным для расчета фотонного шума источников излучения. Достаточно часто фоновый заряд вводится электрическим способом с помощью р-п перехода. Наличие теплового шума в сопротивлении входной цепи приводит к тому, что инжекция заряда из диффузного потока в потенциальную яму происходит случайным образом. Это вызывает шум электрического ввода фонового заряда. Среднеквадратическое значение этого шума, выраженное числом шумовых электронов, в основном определяется емкостью выходной потенциальной ямы.

Шум выходного устройства включает шум установки потенциала узла детектирования и шумы полевого транзистора первого каскада предварительного усилителя. Уменьшить шумы установки потенциала узла детектирования можно использованием усилителя с плавающим затвором или двойной коррелированной выборки. Темновой ток сопровождается дробовыми шумами, называемыми шумами темнового тока. Темновой ток отдельных ячеек ПЗС существенно неоднороден, что приводит к помехам, проявляющимся в виде пятен на изображении. Они могут быть устранены в процессе обработки сигнала. Процесс переноса заряда в ПЗС сопровождается появлением шумов, мощность которых пропорциональна числу переносов.

Следует отметить, что помимо перечисленных, в ПЗС существуют другие источники шумов, например, шумы генератора тактовых импульсов, но их уровень сравнительно мал, и их вкладом в результирующий шум можно пренебречь. Учитывая перечисленные составляющие шумов ПЗС, которые суммируются как статистически независимые, суммарные шумы на выходе матричного ПЗС, как показывают расчеты, достигают значения $\bar{N}_{ш} = 2500$ электронов. Если максимальное значение накопленного сигнального заряда в ячейках типового ПЗС с поверхностным каналом принять $\bar{N}_c = 10^6$ электронов, то отношение сигнал-шум в элементе матричного ПЗС будет около 400. При этом необходимо иметь в виду, что такое высокое отношение сигнал-шум ПЗС может быть реализовано при условии компенсации темновых токов ПЗС, неравномерность которых по полю изображения может достигать 10% от максимального размаха сигнала.

Особенностью шумов переноса является сильная корреляционная связь между шумами соседних зарядовых пакетов, что приводит к тому, что шумы переноса при суммировании зарядовых каналов на выходе ПЗС не увеличиваются, а остаются такими же, как и в отдельно взятом пакете [35]. Этот факт позволяет эффективно использовать ПЗС с поверхностным каналом для обнаружения малоконтрастных объектов при низких уровнях освещенности.

Спектральная характеристика преобразователя свет-сигнал – это зависимость его выходного сигнала от длины волны монохроматического излучения, падающего на светочувствительную поверхность при одинаковой мощности излучения на каждой длине волны. В цветном телевидении спектральные характеристики определяют верность цветопередачи. Спектральные характеристики в основном определяются свойствами исходного материала ПЗС и оптической частью преобразователя. Определенные трудности формирования спектральной характеристики в коротковолновой части спектра связаны с поглощением света в слое поликремния. Получить требуемую чувствительность в этой области спектра удастся формированием в полупрозрачных электродах специальных окон или использованием засветки (проекции изображения) со стороны подложки. В этом случае подложка делается достаточно тонкой.

Разрешающая способность является одной из важнейших характеристик преобразователя свет-сигнал, определяющей качество работы всей телевизионной системы. Под разрешающей способностью светозлектрического преобразователя понимается его способность передавать мелкие детали изображения с заданным контрастом.

Разрешающая способность приборов с зарядовой связью определяется числом элементов накопления в матрице ПЗС. Из практического опыта становится очевидным, что для воспроизведения всех мелких деталей изображения необходимо иметь в матрице ПЗС максимально возможное число светочувствительных датчиков. Увеличению числа элементов препятствуют технологические трудности, а также ухудшение параметров сигнала изображения, связанное с неэффективностью переноса зарядов.

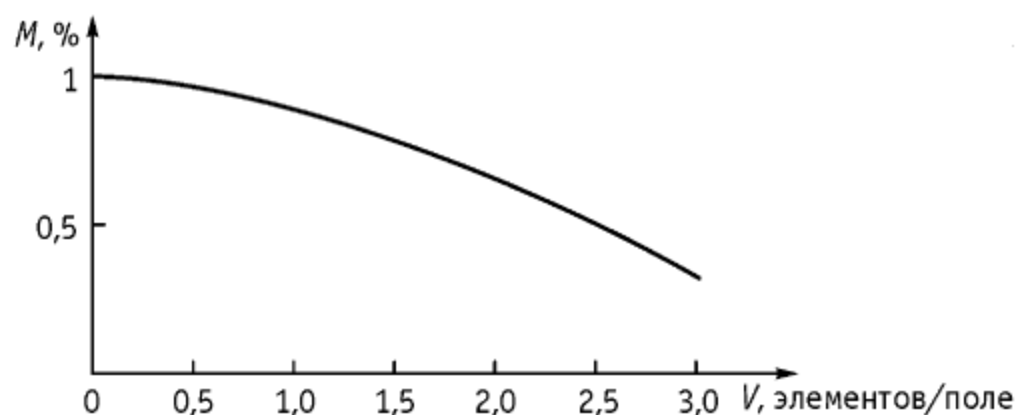


Рисунок 2.37. Зависимость глубины модуляции видеосигнала от скорости перемещения объектов

С помощью следующего эмпирического соотношения можно связать значение разрешающей способности в телевизионных линиях с числом элементов накопления: разрешающая способность в твл = $3/4$ числа элементов накопления.

При восприятии движущихся объектов, а в общем случае при передаче динамических сцен приходится считаться с инерционностью светозлектрических преобразователей. Существует достаточно сложная аналитическая зависимость глубины модуляции высокочастотных составляющих видеосигнала от инерционности матричного ПЗС преобразователя. В качестве примера на рисунке 2.37 приведены результаты расчетов зависимости глубины модуляции M видеосигнала от скорости перемещения по светочувствительному слою матрицы ПЗС изображения синусоидальных штрихов (скорость V выражена количеством элементов разложения, на которое смещается испытательное изображение за время одного телевизионного поля).

2.6.7. Конструктивные особенности современных матриц ПЗС

Постоянное стремление технических специалистов фирмы Sony к разработке новых усовершенствованных преобразователей изображения на матрицах ПЗС и улучшению их качественных показателей привело к тому, что в 1990 г. был сконструирован прибор с зарядовой связью, получившей название Нурег HAD [36].

На рисунке 2.38 представлена в разрезе секция матрицы Нурег HAD, в которой в качестве нижнего слоя подложки, использован слой n-типа и эпитаксиальный слой p-типа в совокупности с несколькими диффузными слоями и фотодиодными датчиками. В основе формируется вертикальный заполняющий сток зарядов, замещающий горизонтальные отводящие стоки, применяемые в матрицах ПЗС предыдущих моделей. Область p-типа с большим количеством присадок формирует слой накопления дырок, соединенный с канальными ограничителями. Отсюда было принято и название новой матрицы – HAD (Hole Accumulated Diode – диодный накопитель дырок).

Все матрицы ПЗС для размещения активных светочувствительных датчиков используют свою поверхность не полностью. Остальная часть прибора служит для накопления и переноса зарядов, регистров сдвига. В результате для приема падающего светового потока используется только часть поверхности матрицы. Мало того, нерабочая (несветочувствительная) область создает ряд трудностей, приводящих к специфическим искажениям изображения, например, вертикальный смаз, хотя правильное маскирование способно оптимизировать эти паразитные помехи.

В матрице Нурег HAD используется оригинальный и достаточно простой метод устранения специфических искажений изображения, заключающийся в установке миниатюрной прецизионной собирающей линзы точно на каждый светочувствительный датчик, что позволяет сконцентрировать световой поток без лишнего его рассеивания (см. рисунок 2.38). В результате практически вдвое возрастает чувствительность матрицы ПЗС, а, следовательно, всей передающей телевизионной камеры.

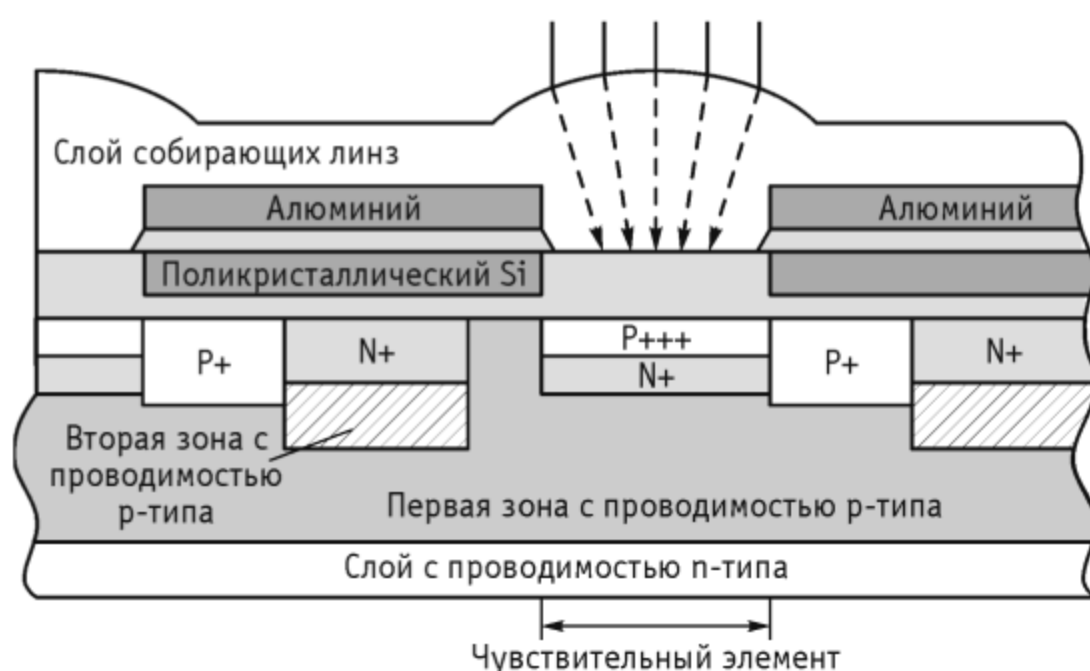


Рисунок 2.38. Структура одного элемента матрицы ПЗС типа Нурег HAD

Улучшенные показатели позволяют съемочным группам работать не только в условиях низкой освещенности, при которых прежде отснятые видеоматериалы имели бы неприемлемое качество, но и в процессе студийного производства, когда экономия за счет использования маломощных источников света и уменьшения числа единиц вентиляционного оборудования и кондиционеров воздуха становится весьма ощутимой.

Так как световой поток концентрируется непосредственно на светочувствительных датчиках, рассеивается и отражается в пространстве гораздо меньшее количество света. Значительно снижены утечки и уровень вертикального смаза даже при использовании данной технологии в матрицах с построочным переносом зарядов.

Практически установлено, что вертикальный смаз при работе с матрицами ПЗС с построчным переносом типа Nureg HAD имеет такой же незначительный уровень, как и в матрицах с построчно-кадровым переносом зарядов. Матрица ПЗС фактически любого типа, снабженная внешними микролинзами на поверхности кристалла, обладает достаточно слабым «смазом» (–125 дБ).

Дальнейшее усовершенствование матрицы ПЗС модели Nureg HAD заключается в дополнительном введении внутренних микролинз, которые еще сильнее концентрируют падающий свет на светочувствительные детекторы (рисунок 2.39). В этом случае уровень вертикальной тянучки («смаза») становится исчезающе малым (–140 дБ). Светоэлектрические преобразователи подобного типа обозначаются как матрицы ПЗС типа Power HAD. К важнейшим достоинствам подобных матриц следует также отнести их очень высокую чувствительность и низкий уровень шумов.

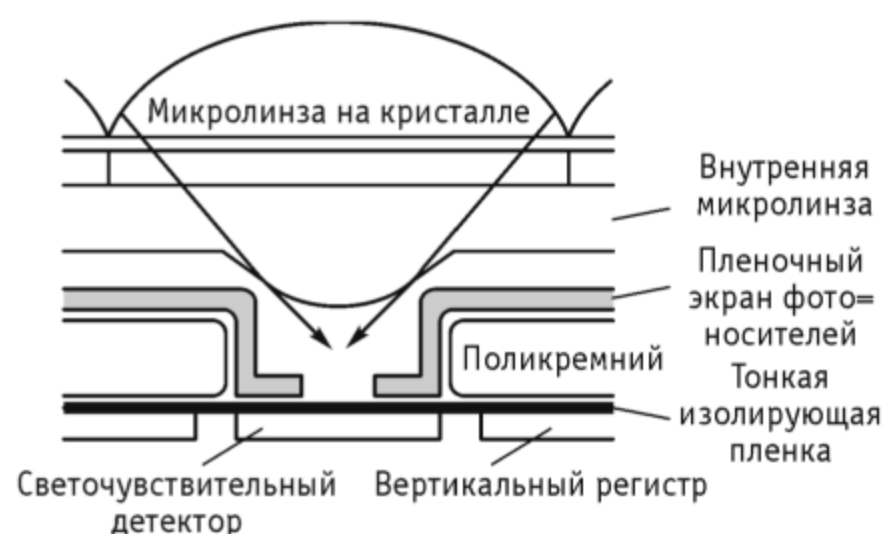


Рисунок 2.39. Структура одного элемента матрицы ПЗС типа Power HAD

2.6.8. Применение электронного затвора в матрицах ПЗС

Электронный затвор является неотъемлемой частью матрицы ПЗС и, когда говорят о скорости электронного затвора, являющейся одной из основных характеристик видеокамеры, подразумевают соответствующий режим работы матрицы ПЗС. Если сканирование элементов матрицы ПЗС производится 50 раз в секунду, то это будет стандартной («нормальной») скоростью электронного затвора для видеокамеры. Однако изображение быстро движущегося перед камерой объекта при такой скорости затвора будет смазано, так как во время сканирования в течение 1/50 секунды изображение объекта будет перемещаться по матрице. Уменьшение времени сканирования матрицы (эквивалентно уменьшению времени экспозиции электронного затвора при уменьшении его скорости) за счёт снижения длительности считывающего импульса улучшает разрешение изображений, быстро движущихся объектов и особенно полезно, когда нужен замедленный повтор спортивных событий. Но это сокращение длительности сканирующего импульса приводит к уменьшению количества света, по-

падающего на светочувствительные элементы матрицы ПЗС во время их сканирования. Таким образом, увеличение скорости электронного затвора требует и увеличения апертуры для компенсации потерь света.

В современных телекамерах скорость электронного затвора (длительность импульса сканирования матрицы ПЗС) меняется ступенчато: 1/60; 1/125; 1/500; 1/1000; 1/2000 с. В некоторых передающих камерах частота сканирования (1/длительность импульса сканирования) меняется с одинаковыми ступенями по 0,5Гц.

Для примера следует отметить, что при съёмках с экрана монитора компьютера на телевизионном изображении часто появляются черты или горизонтальные полосы. Это вызвано рассогласованием частоты развёртки дисплея компьютера и рабочей частоты телевизионной системы. Меняя скорость затвора, можно добиться уменьшения или даже пропадания этих горизонтальных полос.

2.6.9. Устройство фотоприёмных матриц КМОП-типа

Современной альтернативой ФПМ ПЗС-типа является КМОП-матрица, представляющая собой СБИС (сверхбольшую интегральную схему) с внутрикристалльными схемами управления и обработки изображения. Причем, термин КМОП относится, в основном, к технологии изготовления матриц (чипов), а не к конкретному типу светочувствительного датчика. Например, для изготовления КМОП-матриц используется стандартная (конвейерная) кремниевая технология производства чипов. По такой технологии изготавливается большинство микропроцессоров. Все это в значительной степени удешевляет процесс изготовления КМОП-матриц. По данным фирмы Ikegami КМОП-кристалл стоит в 26 раз меньше, чем аналогичная по разрешающей способности ПЗС-матрица.

Типовая архитектура ФПМ КМОП-типа показана на рисунке 2.40. Непосредственно датчик видеосигнала состоит из матрицы активных фотоприёмных ячеек (активных пикселей, которые обычно разделяются на строки), схемы выбора строк, например, сдвигового регистра, процессоров аналогового сигнала (аналоговых усилителей считывания на выходе каждого столбца), АЦП, схемы выбора столбцов, а также схемы синхронизации и управления. Процессоры аналогового сигнала, наряду с усилением выполняют функции накопления зарядов, т.е. хранения, и двойной коррелированной выборки. Каждый столбец пикселей имеет свой собственный АЦП. Причем, цифровой выход АЦП выбирается для считывания столбца логической схемой выбора.

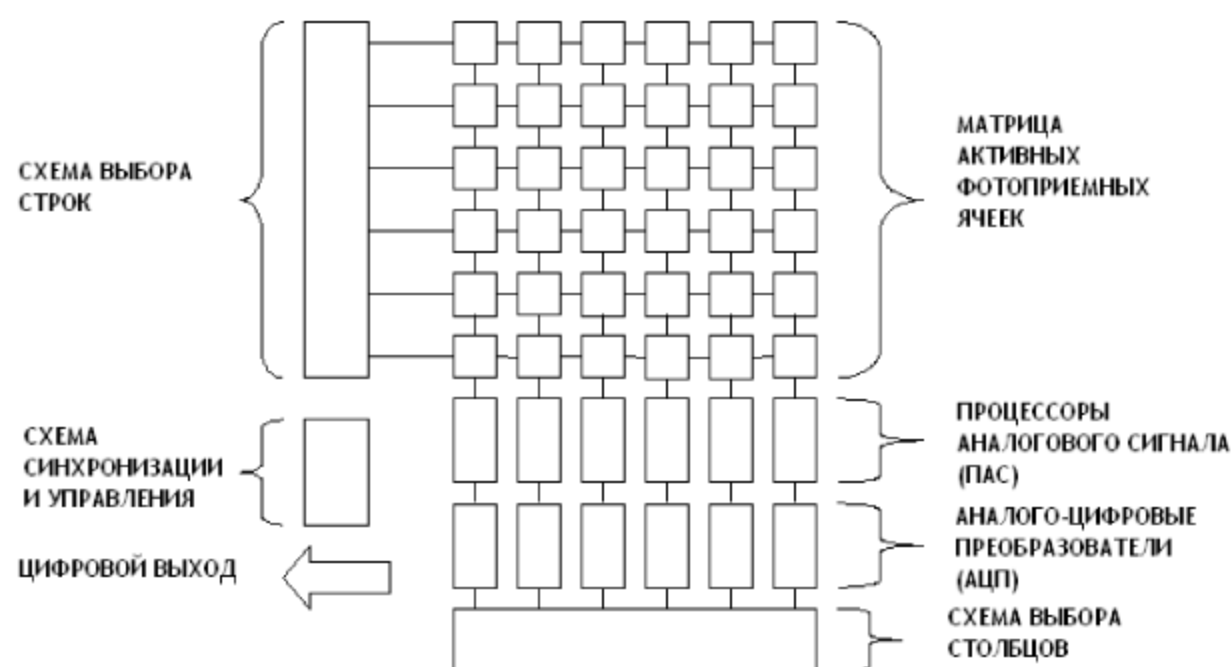


Рисунок 2.40. Функциональная схема ФПМ КМОП-типа

Активный элемент ФПМ КМОП-типа образован фотодиодом (ФД) и четырьмя транзисторами, которые выполняют функции считывания заряда, накопленного фотодиодом (рисунок 2.41) [38].

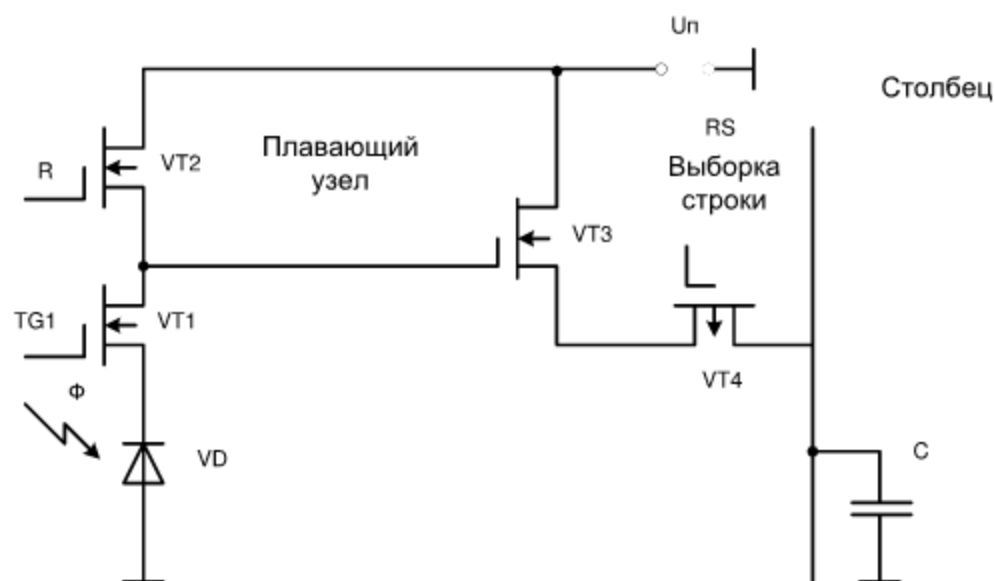


Рисунок 2.41. Электрическая схема активного пикселя ФПМ КМОП-типа

На транзисторе VT3 активного пикселя выполнен нетоковый повторитель, транзистор VT4 является элементом выборки строк. В режиме интегрирования видеосигналов, соответствующих проецируемому изображению объекта, импульс R, подаваемый на транзистор VT2, равен 0. Фотодиод накапливает фотогенерируемые электроны. По мере их накопления потенциал диода уменьшается. В результате потенциал общего узла, т.е. соединения транзисторов VT1,

VT2, VT3, оказывается плавающим. В режиме выборки на транзистор VT2 поступает импульс восстановления $R=1$, в результате чего транзистор VT2 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 VT1, открывая его. Накопленный фотодиодом сигнальный заряд поступает на плавающий узел. После прихода импульса выборки строки $RS=1$ открывается транзистор VT4. Транзисторы VT3, VT4 и общий нагрузочный транзистор столбца образуют истоковый накопитель, и на шину столбца поступает усиленный по мощности сигнал фотодиода. Коэффициент передачи по напряжению истокового повторителя близок к единице. На шины столбцов подаются 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 сигнала $RS=0$ и транзистор VT4 закрывается. Начинается процесс накопления зарядов следующего кадра изображения.

Основное достоинство КМОП-матрицы по сравнению с матрицей ПЗС-типа заключается в возможности интеграции на одном кристалле функций приема и обработки видеосигналов (например, возможна реализация однокристалльной камеры с цифровым выходом).

Это объясняется тем, что в матрице КМОП-типа каждый активный фотоприемный элемент снабжен своим индивидуальным усилителем, преобразующим электрические заряды в электрические сигналы (видеосигналы) поэтому перенос зарядов в горизонтальном направлении не нужен и возможно высокоскоростное считывание видеоданных.

Вследствие этого фотоприемные элементы не требуют высокого управляющего напряжения и могут быть смонтированы в одной микросхеме совместно с многочисленными периферийными цепями.

Другими достоинствами КМОП-матриц являются низкая потребляемая мощность (например, передающая камера на КМОП-датчике потребляет примерно 20% мощности, необходимой для аналогичной камеры на ПЗС-матрице), возможность программирования интересующих пользователя окон в плоскости анализируемого изображения, высокая скорость считывания видеоданных, отсутствие шумов излучения.

К основным недостаткам КМОП-матриц следует отнести высокий уровень шума, обусловленный тем, что каждый активный элемент содержит несколько МОП-транзисторов и несколько шин, относительно низкая чувствительность, приводящая к снижению качества преобразования изображения в видеосигнал в условиях низкой освещенности, более высокие значения темнового тока, большие по сравнению с ПЗС-матрицами геометрические размеры активного элемента, следовательно, меньшая разрешающая способность.

Меньшая фоточувствительность активных пикселей КМОП-матрицы обусловлена тем, что часть площади каждой фотоячейки занята схемой управления и обработки видеосигналов, например, отфильтровывает шум. Отношение площади фотоприемной ячейки, открытой свету, ко всей площади пикселя

называется коэффициентом заполнения. ПЗС-датчики имеют коэффициент заполнения, фактически равный 100%, а КМОП-матрицы имеют гораздо меньший по значению коэффициент заполнения. Чем ниже коэффициент заполнения, тем менее чувствительным является фотодатчик, и тем большая по длительности требуется экспозиция. Слишком низкий по значению коэффициент заполнения делает съемку внутри помещения без ламп-вспышки фактически невозможной. Чтобы компенсировать небольшое значение коэффициента заполнения, к каждому активному пикселю может быть добавлена микролинза, которая будет собирать световой поток со всей площади фотоприемной ячейки и фокусировать его в область, открытую для света.

Теоретически КМОП-матрица может работать в любом стандарте разложения, так как индивидуально считывается каждый элемент матрицы. Однако при этом возникает проблема структурного шума. Поскольку такой шум «фиксированный», то его относительно легко можно удалить с помощью последующей цифровой обработки. Например, фирма Agt1 использует специальные алгоритмы для подавления практически любых видов структурного шума.

Для устранения шумовой составляющей процесса восстановления в КМОП-матрице было предложено заменить фотодиод фоточувствительным затвором, в потенциальной яме которого накапливаются фотогенерируемые сигнальные заряды (рисунок 2.42) [38].

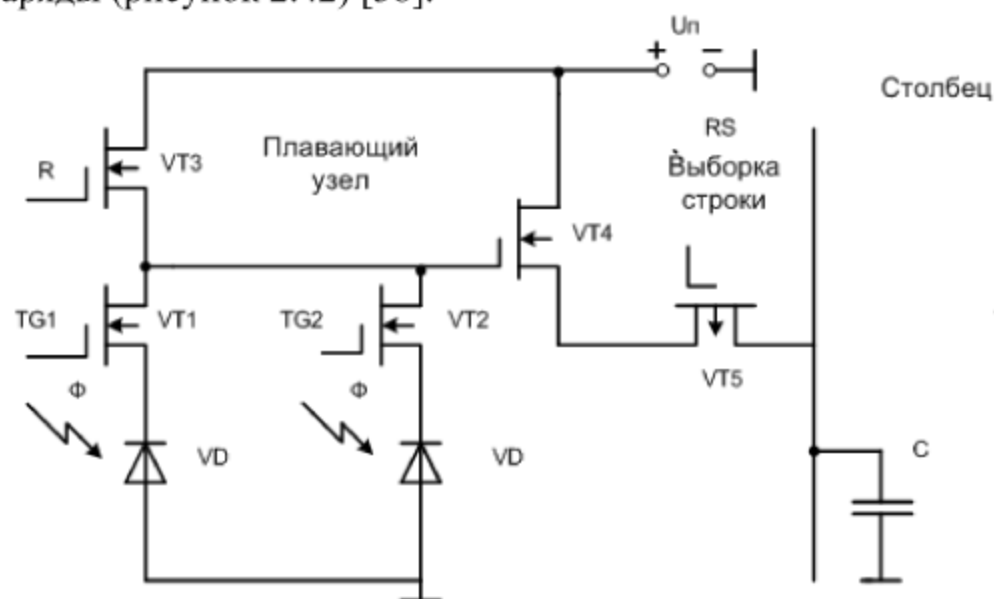


Рисунок 2.42. Электрическая схема светочувствительного элемента с фотозатвором

В этом случае в режиме считывания на затвор транзистора $VT1$ подается его импульс восстановления $R1$, что приводит к восстановлению до исходного уровня потенциала плавающего затвора.

По мнению специалистов ведущих фирм в области конструирования и изготовления передающих камер (Ikegami, JVC) КМОП-структуры быстро совершенствуются по таким параметрам, как отношение сигнал-шум, чувствительность, разрешающая способность. Поэтому ожидается, что в ближайшие

годы на смену ПЗС-матрицам придут КМОП-датчики, которые обеспечат значительное снижение стоимости передающих камер при одновременном повышении их надежности, а также воспроизведение в приемных устройствах изображений более высокого качества и с большим разрешением.

2.7. Технические возможности современных передающих телевизионных камер

Большинство телевизионных и видеокамер, используемых в телевизионном производстве, выпускаются несколькими ведущими фирмами-производителями, к которым, в первую очередь, относятся: Sony, Panasonic, JVC, Ikegami и Hitachi (Япония), Thomson (Франция), Agri (Германия).

С целью оценки современного мирового уровня развития телевидения рассмотрим основные технические возможности наиболее известных моделей теле- и видеокамер, в том числе и ТВЧ-типа, выпускаемых различными фирмами.

Телекамеры компании Sony. Модельный ряд ТВЧ-камер Sony достаточно обширен. В основном, это конструкции самого различного назначения, использующие в качестве светового датчика фотоприемное устройство, состоящее из трех ПЗС-матриц размером 1/3". Примером могут служить следующие типы камер: HDR-FX1, HDC-X310, HDC-900, HDC-950, HDC-1000, HDC-1500, HDW-F900, HDW-F950. Одной из новейших конструкций является передающая камера HVR-A1U, созданная на базе КМОП-матрицы размером 1/3" с разрешением около трех мегапикселей. Причем разработчикам удалось улучшить характеристики данной камеры относительно аналогичных по классу устройств, использующих КМОП-технологии, благодаря применению нового улучшенного процессора обработки сигнала изображения EIP (Enhanced Imaging Processor). Новейший процессор обеспечивает высокоскоростную обработку сигналов изображений высокого разрешения. Новые электронные компоненты передающей камеры потребляют меньше электроэнергии, что продлевает время работы, уменьшает размеры аккумулятора, снижая тем самым общую массу камеры. Запись видеоинформации камерой осуществляется в формате 1080i.

Телекамеры фирмы Panasonic. Являясь одной из ведущих фирм-производителей телевизионного оборудования, фирма Panasonic выпустила несколько конструкций ТВЧ-камер. Например, в передающей камере АК-НС930 применяется трехматричная система новейших ПЗС с улучшенной цветокоррекцией в области синего цвета, с кадрово-строчным переносом зарядов, разрешение которых достигает 2,2 мегапикселей. В камере АК-НС905 используются матрицы ПЗС с нанесенными на их светочувствительную поверхность микролинзами, что обеспечивает возможность съемки при минимальной освещенности в 0,03 лк. Повышению качественных показателей передающей камеры способствует 38-разрядная внутренняя обработка сигналов.

Характерной особенностью ТВЧ-камеры AG-HVX200 является запись видеоинформации на карты твердотельной памяти P2. В режиме ТВЧ запись ведется со скоростью потока данных 100 Мбит/с. Информация записывается на