

**Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией)** называется испускание электронов веществом под действием электромагнитных излучений. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются *фотоэлектронами*, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется *фототоком*.

**Внутренним фотоэффектом** называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Он проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению *фотопроводимости* или *вентильного фотоэффекта*.  
*Фотопроводимость в примесном п/п возникает при условии, что энергия квантов больше или равна энергии активации примесной проводимости  $DE_a$*

## Законы внешнего фотоэффекта:

- **1- (закон Столетова):** Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения.
- **2-**, максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности
- **3-** для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует граничная частота света, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая длина волны называется красной границей фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

# ЦИФРОВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

- Нужны эффективные заменители электронно-лучевых фотоприёмников как в системах научно-прикладного телевидения так и ТВ.
- Изобретение многоэлементных твердотельных фотоприёмников вызвало революцию в телевидении. Использование десятилетиями отлаженной технологии производства полупроводниковых приборов обеспечило высокую надёжность, стабильность параметров и низкую цену светочувствительных матриц

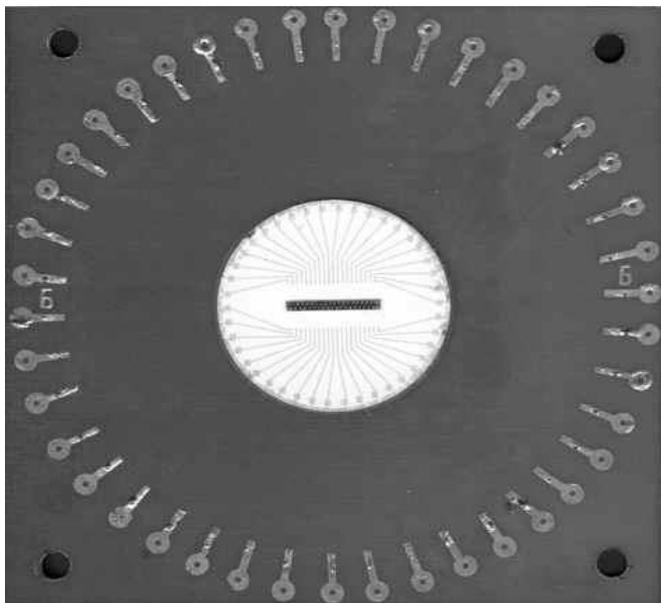


Фото одной из первых советских ПЗС матриц (размер светочувствительной области 20x2 пиксела)

# Фотоэлектрические преобразователи изображений

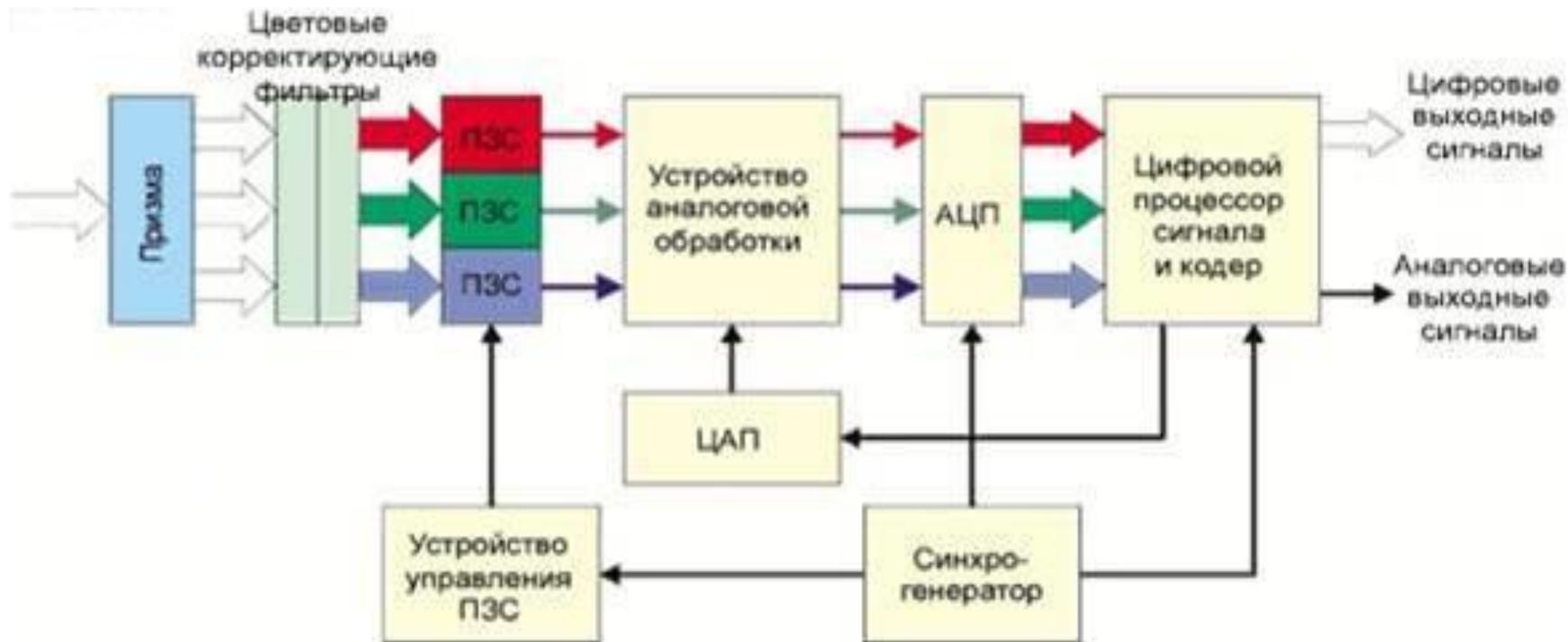


Структурная схема цифровой видеоинформационной системы

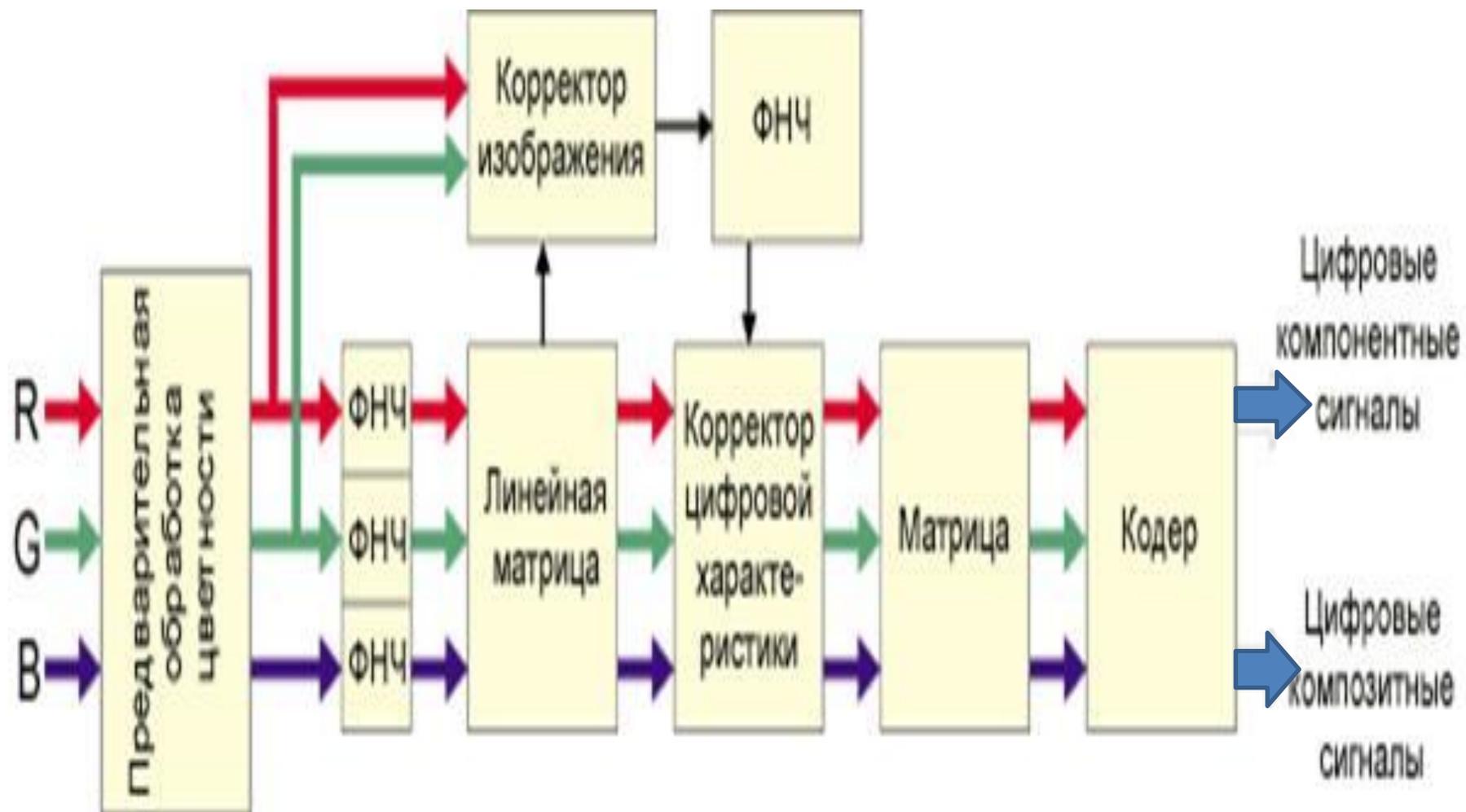
Инфракрасной - с длинами волн от 780 до 10400 нм (0,78 ...10 мкм);

Видимой - с длинами волн от 380 нм до 780 нм:

Ультрафиолетовой - с длинами волн от 10 нм до 380 нм



Камерная головка



Цифровой процессор сигнала



Оптическая часть видеокамеры

- Способность кремния реагировать на видимый спектр излучения была замечена и мысль использовать этот принцип для обработки изображений получила своё развитие
- Аббревиатура ПЗС означает "Приборы с Зарядовой Связью" - этот термин образовался от английского "Charge-Coupled Devices" (CCD).
- Прибор с зарядовой связью можно рассматривать как матрицу близко расположенных МДП-конденсаторов.
- Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структуры) научились получать в конце 50-х годов. Были найдены и развиты технологии, которые обеспечивали низкую плотность дефектов и примесей в поверхностном слое полупроводника. Тем самым уже через 10 лет были заложены предпосылки для изобретения приборов с зарядовой связью.

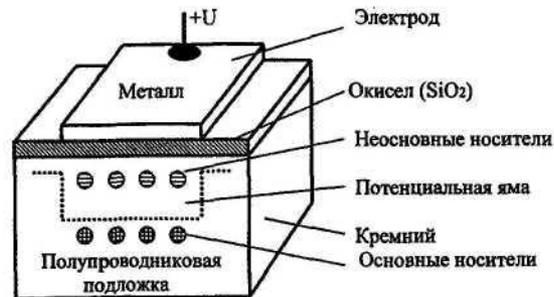
**По принципу действия эти приборы можно разделить на две группы**

*собственно приборы с зарядовой связью ПЗС*

*приборы с зарядовой связью (ПЗС)*

- Непосредственными предшественниками преобразователей на ПЗС - структурах являются матричные фотодиодные преобразователи с координатной выборкой сигналов изображения). Внедрению этих приборов в телевизионную технику затрудняют помехи на изображении, вызванные большой емкостью считывающих Шин и разбросом ее значений для разных участков матрицы.

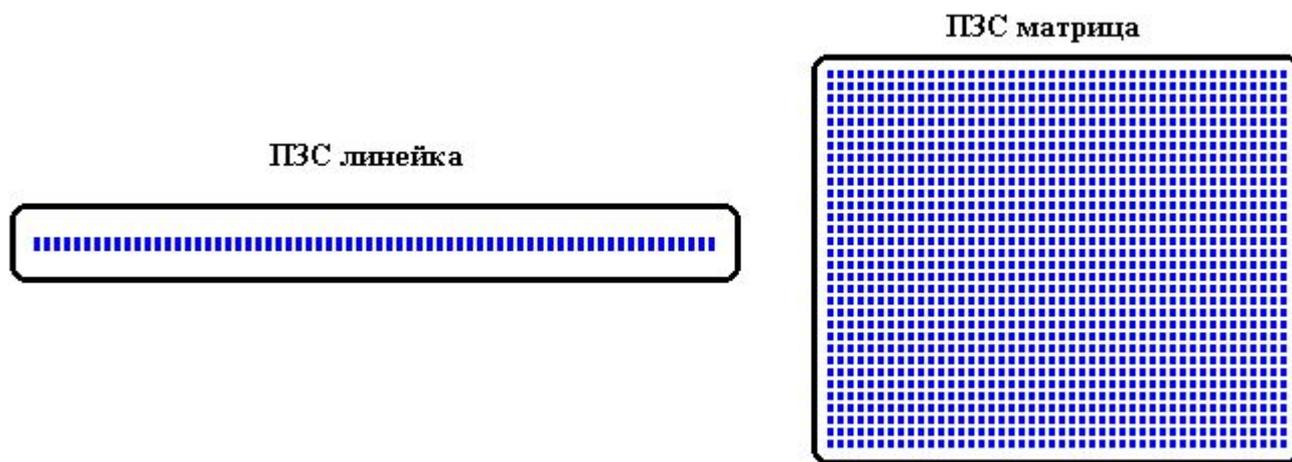
- Принцип действия ПЗС основан на свойствах структуры металл-окисел – полупроводник (МОП-конденсатор), которая способна накапливать и хранить зарядовые пакеты неосновных носителей (электронов) в локализованных потенциальных ямах, образующихся у поверхности полупроводника (кремния) под действием электрического и светового полей.
- Цепочка из МОП-конденсаторов, связанных друг с другом, передает зарядовые пакеты под воздействием управляющих напряжений от одного элемента структуры к другому до выхода, где зарядовые пакеты преобразуются в потенциал или ток.
- ТОК.



# Квантовая эффективность и квантовый выход ПЗС-камеры.

- По квантовой эффективности ПЗС не имеют себе равных.
- **Глаз**, из каждых 100 фотонов, попадающих в зрачок глаза, только один воспринимается сетчаткой (квантовый выход равен 1%),
- **Лучшие фотоэмульсии** имеют квантовую эффективность 2-3%, электровакуумные приборы (например, фотоумножители) — до 20%,
- **ПЗС** этот параметр может достигать 95%, при типичном значении от 4% (низкокачественные ПЗС, используемые, как правило, в дешёвых видеокамерах “желтой” сборки) до 50%

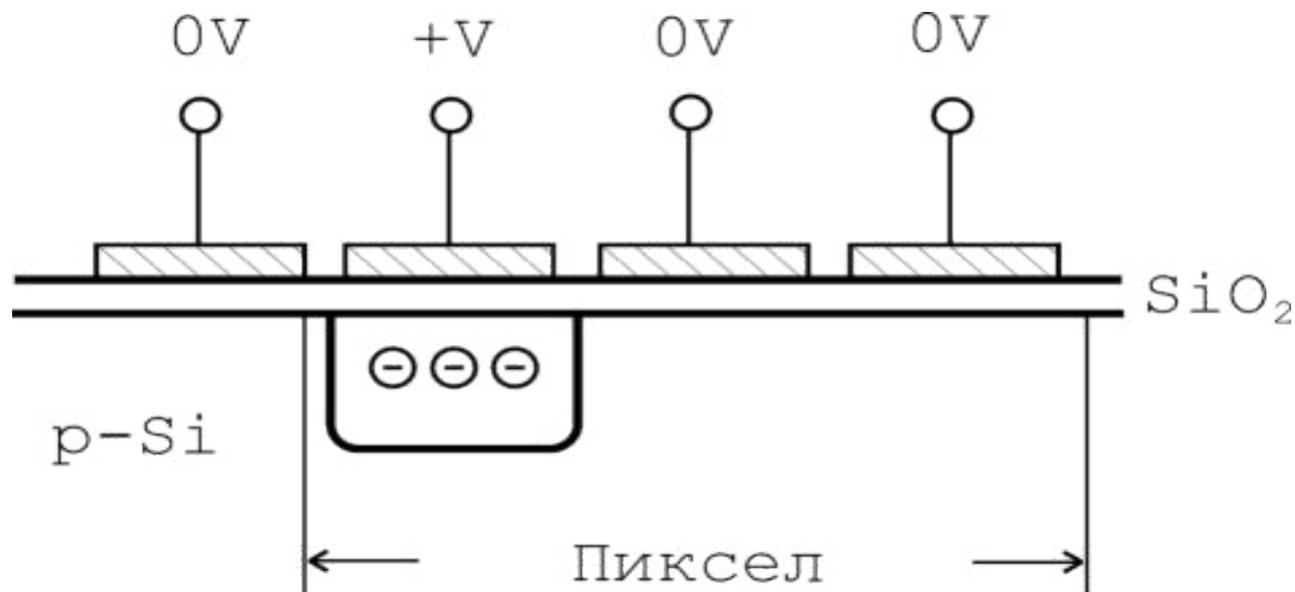
- Сегодня серийное производство ПЗС-матриц осуществляется несколькими фирмами: Texas Instruments, Thompson, Loral Fairchild, Ford Aerospace, SONY, Panasonic, Samsung, Philips, Hitachi Kodak.
- — Научно-производственное предприятие “Силар” (бывший отдел по разработке твердотельных приемников изображения ЦНИИ “Электрон”) из Санкт-Петербурга, которая является производителем ПЗС-матриц, применяемых в научных, охранных и других целях.



*Расположение светоприемных элементов в ПЗС-линейке и ПЗС-матрице.*

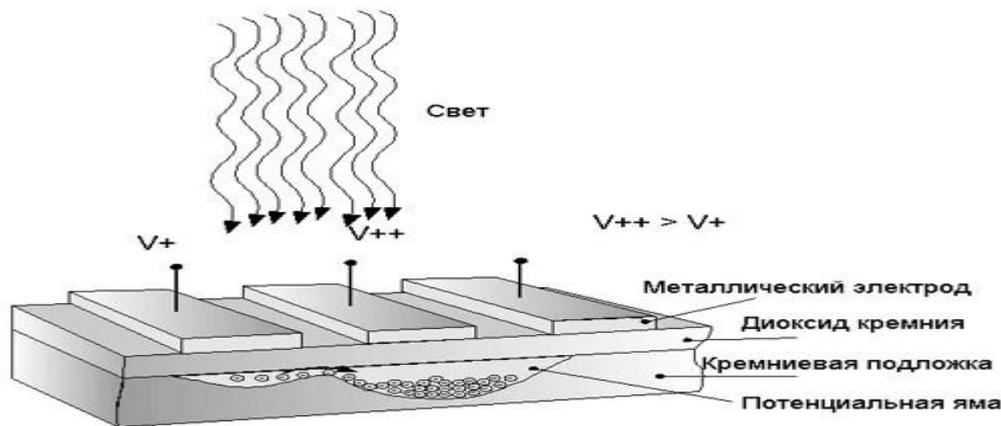
- К ПЗС-приемнику подключается электронная схема, которая позволяет извлекать с каждого светочувствительного элемента электрический сигнал, пропорциональный его засветке. Электроны возникают в пикселях под действием света, пришедшего от источника. В течение заданного интервала времени каждый пиксель постепенно заполняется электронами пропорционально количеству попавшего в него света,
- По окончании этого времени электрические заряды, накопленные каждым пикселем, по очереди передаются на "выход" прибора и измеряются.
- Все это возможно за счет определенной структуры кристалла, где размещаются светочувствительные элементы, и электрической схемы управления.
- ПЗС интересны тем, что электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, как в большинстве других твердотельных приборах, а зарядом.
- При соответствующей последовательности тактовых импульсов напряжения на электродах МДП-конденсаторов зарядовые пакеты можно переносить между соседними элементами прибора. Поэтому такие приборы и названы приборами с переносом заряда или с зарядовой связью.

# Физические принципы работы ПЗС-матрицы.



Элемент трехфазного ПЗС. Пиксел - элемент изображения

В основе работы ПЗС лежит явление внутреннего фотоэффекта. Когда, в кремнии поглощается фотон, то генерируется пара носителей заряда — электрон и дырка. Электростатическое поле в области пиксела “растаскивает” эту пару, вытесняя дырку в глубь кремния. Неосновные носители заряда, электроны, будут накапливаться в потенциальной яме под электродом, к которому подведен положительный потенциал.



Структура одного элемента линейного трехфазного ПЗС

**Заряд, накопленный под одним электродом, в любой момент может быть перенесен под соседний электрод, если его потенциал будет увеличен, в то время как потенциал первого электрода, будет уменьшен**  
**Перенос в трехфазном ПЗС можно выполнить в одном из двух направлений (влево или вправо, по рисункам). Все зарядовые пакеты линейки пикселей будут переноситься в ту же сторону одновременно.**

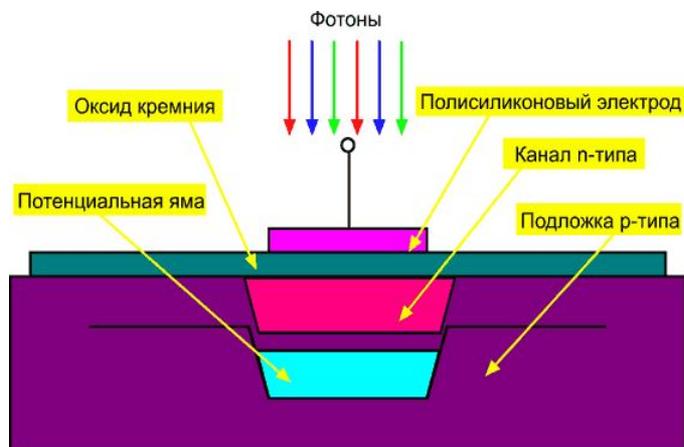
**Двумерный массив (матрицу) пикселей получают с помощью стоп-каналов, разделяющих электродную структуру ПЗС на столбцы. Стоп каналы — это узкие области, формируемые специальными технологическими приемами в приповерхностной области, которые препятствуют растеканию заряда под соседние столбцы.**

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

- В ПЗИ вместо последовательного переноса зарядов к выходу устройства используется единичный перенос заряда от каждого накопительного элемента и параллельное считывание информации в поле изображения.

**Приборы с зарядовой инжекцией существенно отличаются от ПЗС более сложной структурой элементов вывода сигналов изображения, что приводит к большой выходной емкости прибора**

Линейные ПЗС стали основой таких устройств как сканеры, факсимильные аппараты, анализаторы спектра и т.п. Современная астрономия, микроскопия, медицина широко используют ПЗС для визуализации изображений.



## Засветка МПМ структуры

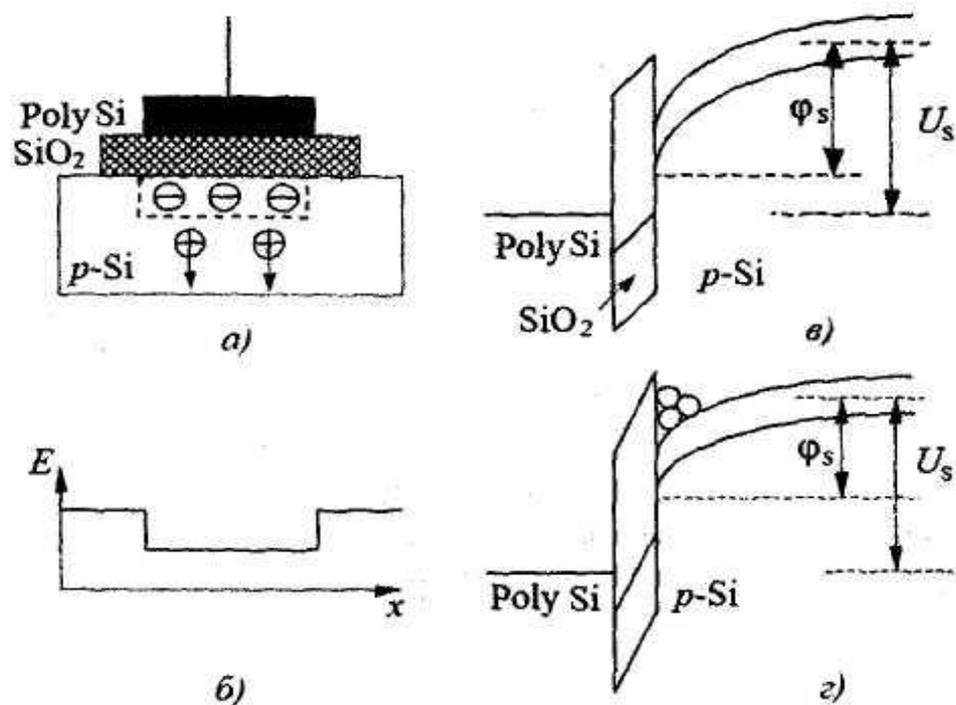
Конструкция ПЗС матрицы – представляет собой регулярную многослойную чередующуюся структуру из полупроводника n – типа, электродов из поликристаллического кремния и изолирующей прослойкой из оксида кремния.

Результатом взаимодействия фотонов с атомами кристаллической решётки на поверхности матрицы полупроводника образуются пары - электрон-дырка (если произошло взаимодействие с атомом кристаллической решётки полупроводника), или же только электрон либо дырка), при взаимодействии фотонов с атомами донорных либо акцепторных примесей.

## Принцип работы МОП - конденсатора

в) – эн. диагр. после подачи пол. смещения  $U_s$

г)- диаграммы, после накопления в потенц. яме зарядового пакета неосновных носителей



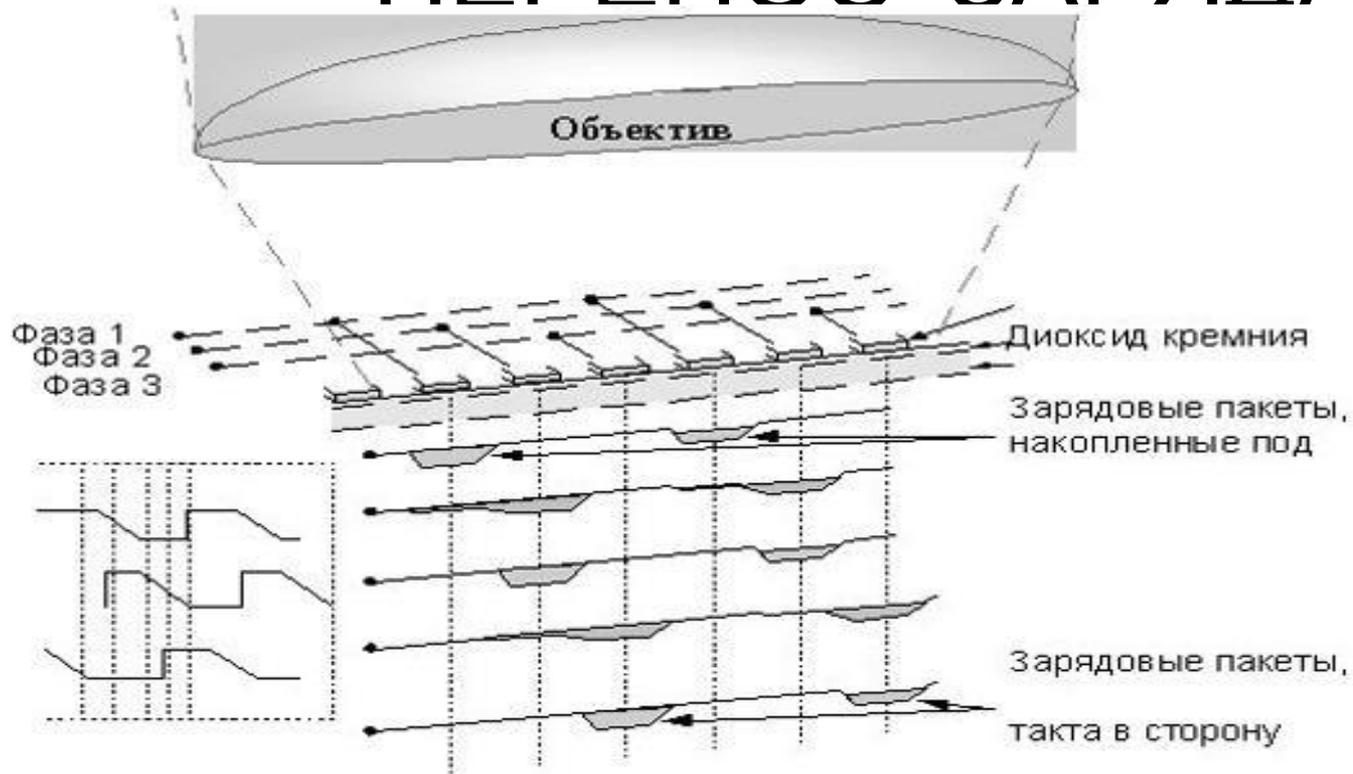
Здесь они могут храниться достаточно длительное время, поскольку дырок в обедненной области нет и электроны не рекомбинируют. Носители, сгенерированные за пределами обедненной области, медленно движутся — диффундируют и, обычно, рекомбинируют с решеткой прежде, чем попадут под действие градиента поля обедненной области.

Носители, сгенерированные вблизи обедненной области, могут диффундировать в стороны и могут попасть под соседний электрод. В красном и инфракрасном диапазонах длин волн ПЗС имеют разрешение хуже, чем в видимом диапазоне, так как красные фотоны проникают глубже в кристалл кремния и зарядовый пакет размывается.

- На энергетических диаграммах полупроводника эта потенциальная яма отображается как изгиб формы энергетических диаграмм полупроводника в приповерхностном слое
- Считывание фототоков ПЗС- элементов осуществляется так называемыми *последовательными регистрами сдвига*, которые преобразовывают строку зарядов на входе в серию импульсов тока на выходе. Данная серия представляет собой аналоговый сигнал, который в дальнейшем поступает на усилитель

- По окончании процесса накопления зарядов на разрешающий затвор подаётся смещение, вследствие чего зарядовые пакеты всех элементов одновременно переходят в сдвиговой регистр, из которого через выходное устройство осуществляется считывание импульсов видеосигнала с тактовой частотой.
- С помощью всего трех электродов возможно параллельное управление большим количеством зарядовых пакетов, т.е. в ПЗС нет необходимости иметь для управления каждой ячейкой отдельный электрод. Использование трех электродов обеспечивает преимущественное направление движения зарядового пакета, причем обмен импульсных последовательностей на любой их паре изменяет это направление на противоположное.
- Цепочка из МОП-конденсаторов, связанных друг с другом, передает зарядовые пакеты под воздействием управляющих напряжений от одного элемента структуры к другому до выхода, где зарядовые пакеты преобразуются в потенциал

# ПЕРЕНОС ЗАРЯДА



## Перенос заряда в приборе с зарядовой связью

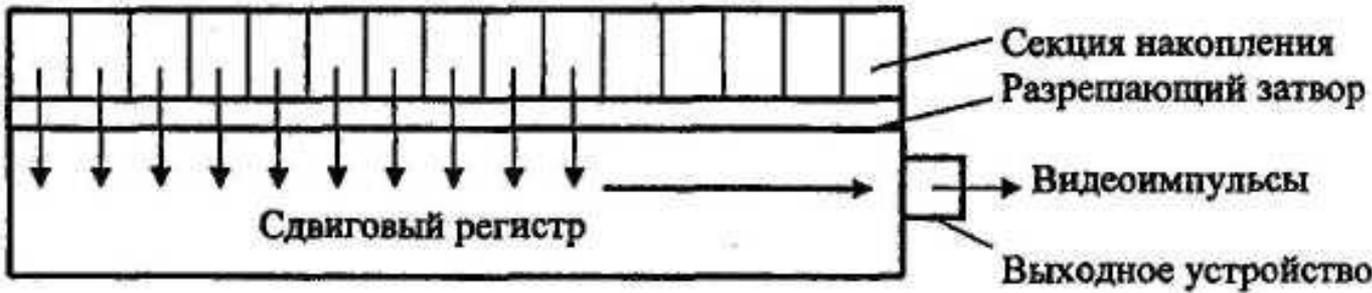
Заряд, накопленный под одним электродом, в любой момент может быть перенесен под соседний электрод, если его потенциал будет увеличен, в то время как потенциал первого электрода будет уменьшен.

Если все три электрода элемента ПЗС находятся под нулевым потенциалом, то накопление генерированных светом электронов не происходит.

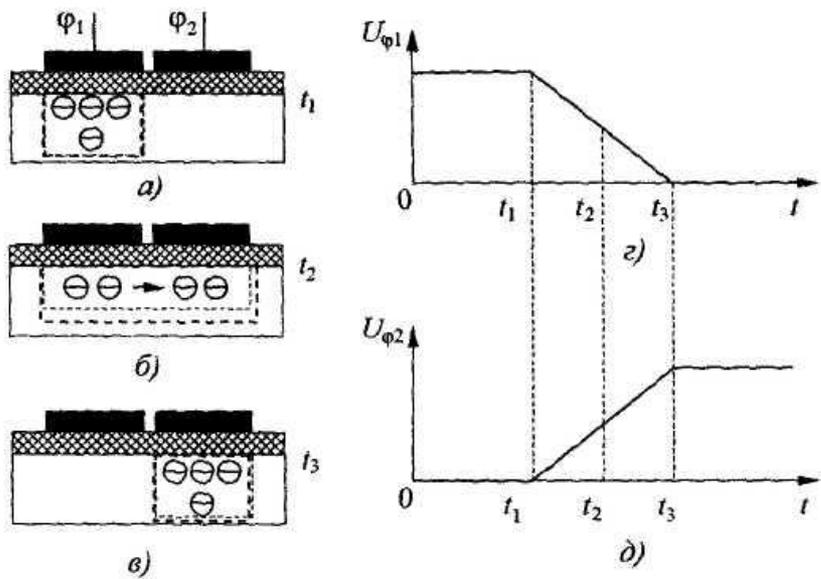
- Генерирование зарядов в фотоприёмнике происходит не только под воздействием света, но и вследствие воздействия температуры.
- Темновой ток в полупроводниковых фотоприёмниках экспоненциально зависит от температуры и при большом времени накопления для его подавления требуется понижение температуры кристалла.
- Современный уровень технологии ПЗС позволяет реализовать в телевизионных системах время накопления до секунды (без охлаждения).

- Последовательный регистр сдвига в ПЗС- матрицах реализуется с помощью тех же самых ПЗС- элементов, объединённых в строку. Базируется на способности *приборов с зарядовой связью* обмениваться зарядами своих потенциальных ям.
- Обмен осуществляется благодаря наличию специальных *электродов переноса* (transfer gate), расположенных между соседними ПЗС- элементами.
- При подаче на ближайший электрод повышенного потенциала заряд «перетекает» под него из потенциальной ямы. Между ПЗС- элементами могут располагаться от двух до четырёх электродов переноса, от их количества зависит «фазность» регистра сдвига, который может называться двухфазным, трёхфазным либо четырёхфазным.
- перемещение зарядов потенциальных ям всех ПЗС-элементов регистра происходит одновременно.
- Последовательный регистр сдвига является устройством с параллельным входом и последовательным выходом.
- ПЗС- матрица для нормальной работы обязательно должна быть подключена к микросхеме (или их набору), подающей потенциалы на электроды как последовательного, так и параллельного регистров .

Считывание фототоков ПЗС- элементов осуществляется так называемыми **последовательными регистрами сдвига**, которые преобразовывают строку зарядов на входе в серию импульсов тока на выходе. Функции накопления зарядов и их считывания в ПЗС разделены



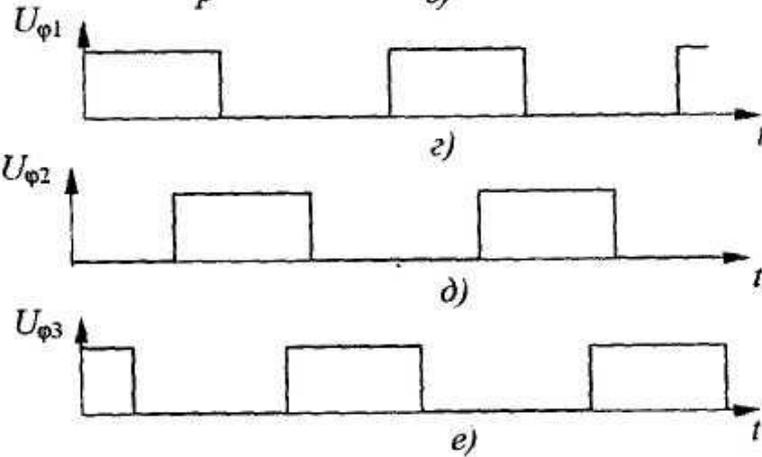
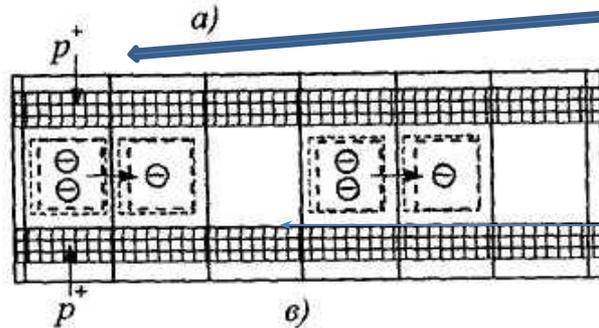
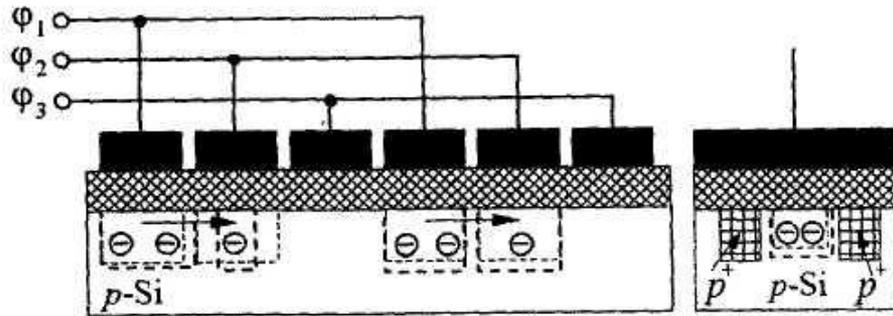
**Сдвигающий регистр в линейной ПЗС**



В линейном ПЗС, по окончании процесса накопления зарядов на разрешающий затвор подаётся смещение, вследствие чего зарядовые пакеты всех элементов одновременно переходят в сдвиговый регистр, из которого через выходное устройство осуществляется считывание импульсов .

**Перенос зарядового пакета (организация регистра сдвига)**

# ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЧИТЫВАНИЕМ



Трехфазный ПЗС-регистр

С помощью всего трех электродов возможно параллельное управление большим количеством зарядовых пакетов, Использование трех электродов обеспечивает преимущественное направление движения зарядового пакета, причем обмен импульсных последовательностей на любой их паре изменяет это направление на противоположное.

• Для того чтобы ограничить растекание зарядового пакета вдоль поверхности в направлении, перпендикулярном направлению переноса, используются так называемые **стоп-каналы**.

• Они реализуются путем сильного ( $p^+$ ) легирования узких областей полупроводника вдоль направления переноса.

• Таким образом, в регистре ПЗС осуществляется накопление и хранение зарядовых пакетов при статических потенциалах на управляющих электродах, а также их направленный перенос при подаче на электроды соответствующих импульсных последовательностей



## Достоинства светочувствительных ПЗС-структур

- возможность непосредственного преобразования светового потока в зарядовые пакеты и способность хранить зарядовую информацию;
- дискретная форма выходного видеосигнала;
- линейная характеристика свет-сигнал;
- отсутствие геометрических (координатных) искажений изображения;
- способность направленной передачи зарядовой информации и преобразования ее в сигнал изображения при точном соблюдении геометрии точечного раstra (координаты элементов фиксируются с точностью, превышающей десятые доли элемента изображения);
- высокое быстродействие;
- возможность обработки информации непосредственно на матрице;
- высокая степень интеграции, малая потребляемая мощность и габариты;
- высокая механическая прочность, стойкость к вибрациям и электромагнитным воздействиям, надежность и большой срок службы.

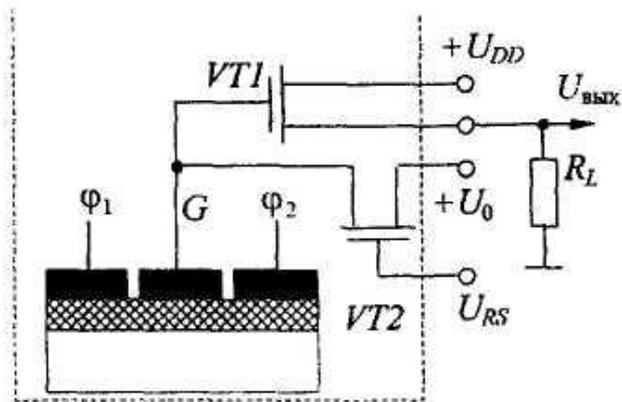
# ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА

Процесс переноса накопленных зарядов связан с явлением, называемым неэффективностью переноса. Дело в том, что накопленный заряд переносится из под одного электрода под другой не без потерь.

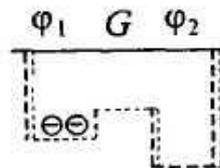
Неэффективность переноса  $\epsilon = 1 - Q_0/Q$

Эффективность переноса  $\eta = 1 - \epsilon$

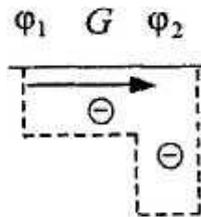
$$C_{\text{ВЫХ}} \quad U_{\text{ВЫХ}} = Q_0 / C_{\text{ВЫХ}}$$



а)



б)



в)

Оптимальные значения  $C_{\text{ВЫХ}}$  удастся достичь в выходном устройстве с плавающей диффузионной областью.

Выходное устройство с плавающей диффузионной областью располагается в конце ПЗС-регистра и содержит разделительный затвор и диффузионную область n-типа, образующую обратносмещенный переход.

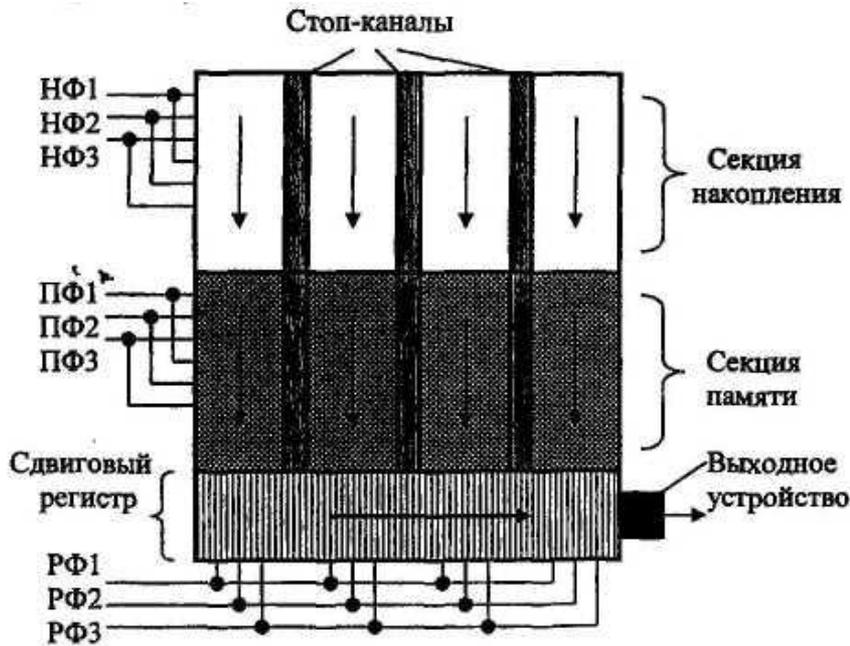
**Выходной узел ПЗС с плавающим затвором**

Линейные ПЗС используют в сканерах, факсимильных аппаратах, анализаторах спектра и т. п.

Несмотря на широкое распространение линейных ПЗС в современной астрономии, микроскопии, медицине и в других областях, для телевидения и видеоинформационных систем особый интерес представляют матричные ПЗС, позволяющие формировать видеосигнал от плоских изображений.

- **МАТРИЧНЫЕ ПЗС**
- Матричные ПЗС с кадровым переносом (КП), FT (Frame Transfer),
- Матричный ПЗС со строчным переносом (СП), IT (Interline Transfer)
- Матричный ПЗС со строчно-кадровым переносом (СКП), FIT (Frame-Interline Transfer).
- 
- Многосигнальные матричные ПЗС

## Матричные ПЗС с кадровым переносом

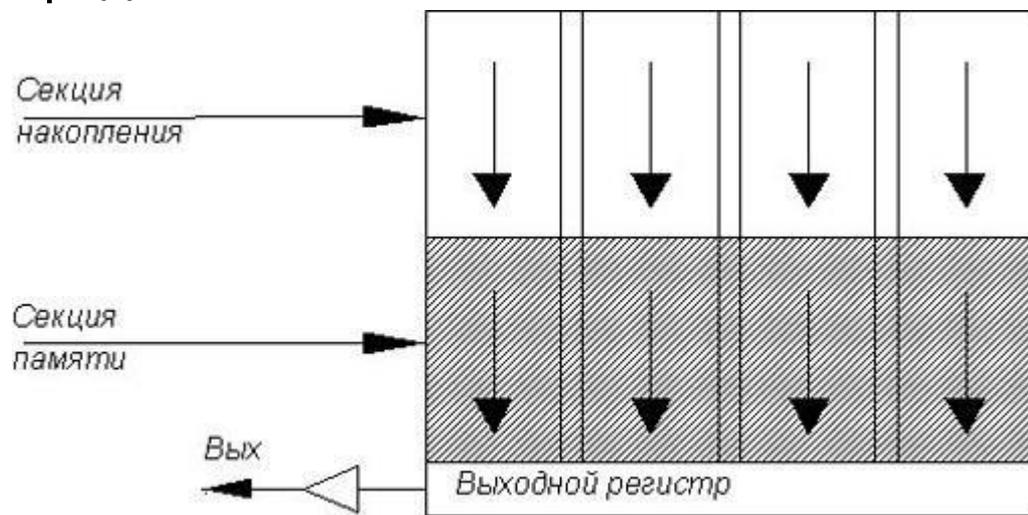


## **Матричный ПЗС с кадровым переносом**

**Матричный ПЗС с кадровым переносом в своём составе содержит :**  
**светочувствительную секцию накопления, состоящую из вертикальных ПЗС-регистров, разделённых друг от друга стоп-каналами, секцию памяти, с аналогичной с секцией накопления структурой и в нижней части - сдвиговый регистр с выходным устройством**

По окончании времени накопления во время обратного хода по кадру на фазные электроды секции накопления и секции памяти подаются импульсы переноса. Накопленный двумерный массив зарядовых пакетов за время переноса параллельно сдвигается из секции накопления в секцию памяти.

Число ячеек в секции памяти равно числу ячеек в секции накопления. И каждый накопленный в секции накопления зарядовый пакет займет соответствующее место в секции памяти. После того как все зарядовые пакеты перенесены в секцию памяти, процесс накопления зарядовых пакетов возобновляется.



Матричный ПЗС  
с кадровым переносом

Одновременно с этим в секции памяти во время обратного хода по строке зарядовые пакеты построчно переносятся в горизонтальный выходной регистр. Для этого на один из электродов горизонтального регистра подается положительный потенциал, соответствующий образованию под ним потенциальной ямы

При этом на электроды секции памяти подаются импульсы, соответствующие параллельному сдвигу массива зарядовых пакетов на один трехфазный элемент по направлению к горизонтальному регистру. Таким образом очередная строка зарядовых пакетов оказывается в горизонтальном регистре, а следующая за ней, располагается в той строке секции памяти, которая непосредственно прилегает к регистру. Далее, во время прямого хода по строке, зарядовые пакеты считываются из горизонтального регистра через выходное устройство, для чего на электроды этого регистра подаются импульсы переноса. По окончании считывания строки зарядовых пакетов из секции памяти, выставляется следующая строка и процесс повторяется

К достоинствам матричных ПЗС с кадровым переносом следует отнести:

- простоту конструкции,
- возможность реализации освещения со стороны подложки и полное использование светочувствительной секции, что в совокупности обеспечивает рекордный квантовый выход ? до 98%.
- высокую чувствительность в ближней ИК-области спектра
- В ПЗС ПК организации легко осуществляется чересстрочное разложение изображения, также упрощена электродная структура, что позволяет компактно расположить ячейки матрицы

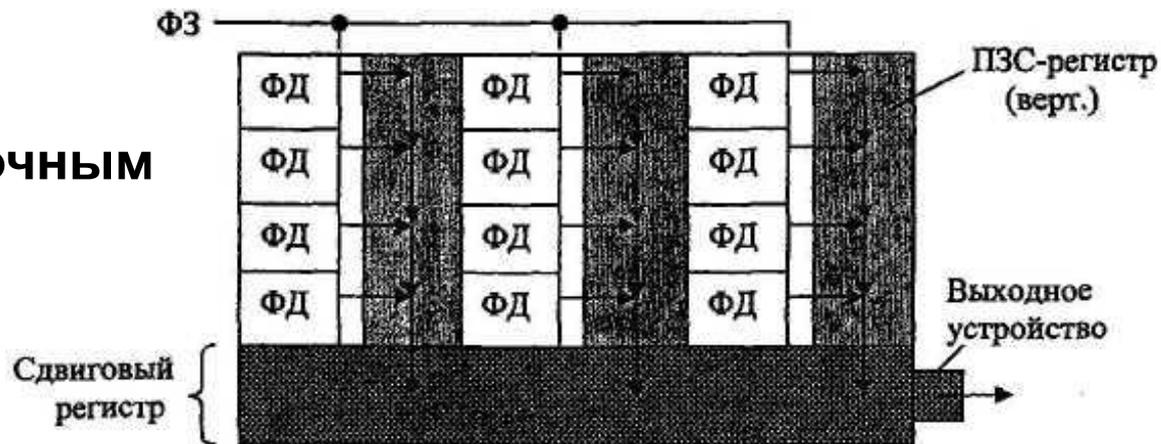
Существенными недостатками являются:

- увеличенная большая площадь кристалла, обусловленная наличием секции памяти,
- вертикальный **смаз** от ярких деталей изображения.
- Возникновение **смаза** происходит от того, что во время переноса массива зарядовых пакетов из секции накопления в секцию памяти световой поток продолжает генерировать носители сигнала.
- И так как каждая потенциальная яма перемещается через весь столбец, то в ней неминуемо накапливаются заряды от других элементов столбца.
- Достаточно высокая стоимость

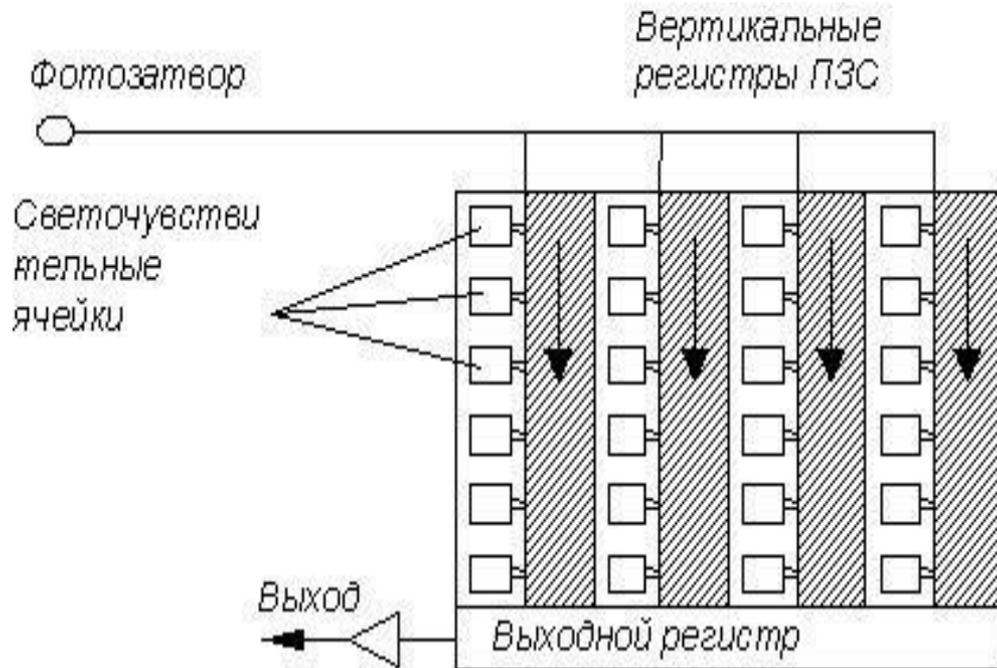
## Матричные ПЗС со строчным переносом.

В видеоинформационных системах и в прикладном телевидении достаточно широкое распространение получили матричные ПЗС со строчным переносом. Для накопления зарядовых пакетов в них применяют столбцы фотодиодов р-типа и вертикальные ПЗС-регистры, отделённые от столбцов фотодиодов ФД фотозатворами ФЗ. Внизу вертикальных ПЗС-регистров расположен горизонтальный сдвиговый регистр с выходным устройством.

### Матричный ПЗС со строчным переносом



Все регистры ПЗС - вертикальные и горизонтальный - выполняются экранированными от падающего света.



Матричный ПЗС со строчным переносом

При покадровой организации легко осуществляется чересстрочное разложение изображения, также проста электродная структура, что позволяет компактно расположить ячейки матрицы

Во время накопления зарядовых пакетов в фотодиодах на фотозатвор подается низкий потенциал, обеспечивающий потенциальный барьер между фотодиодами и вертикальным ПЗС-регистром.

По окончании накопления на фотозатвор кратковременно подается положительный потенциал, разрешающий перенос зарядовых пакетов из фотодиодов в потенциальные ямы, образованные в вертикальных ПЗС-регистрах. Затем с фотозатвора снимается положительное смещение и накопление зарядовых пакетов в фотодиодах возобновляется

- Зарядовые пакеты из вертикальных ПЗС-регистров построчно переносятся в горизонтальный ПЗС-регистр, из которого поэлементно считываются через выходное устройство.
- Перенос из светочувствительных фотодиодов в вертикальные регистры осуществляется во время обратного хода по кадру, а перенос зарядовых пакетов из вертикальных регистров в горизонтальный регистр - во время обратного хода по строке.
- После того как все строки зарядовых пакетов будут считаны, возможен перенос следующего двухмерного массива зарядовых пакетов из фотодиодов.

**К достоинствам матричных ПЗС со строчным переносом следует отнести:**

- малую площадь кристалла, так как отсутствует секция памяти,
- малый уровень смаза, поскольку перенос зарядов в ПЗС-регистры происходит кратковременно .

**Основными недостатками ПЗС СП являются :**

- невозможность освещения со стороны подложки и неполное использование светового потока из-за того, что экранированные от света вертикальные ПЗС-регистры занимают часть кристалла
- Для преодоления этого недостатка была реализована технология нанесения на поверхность кристалла микролинз

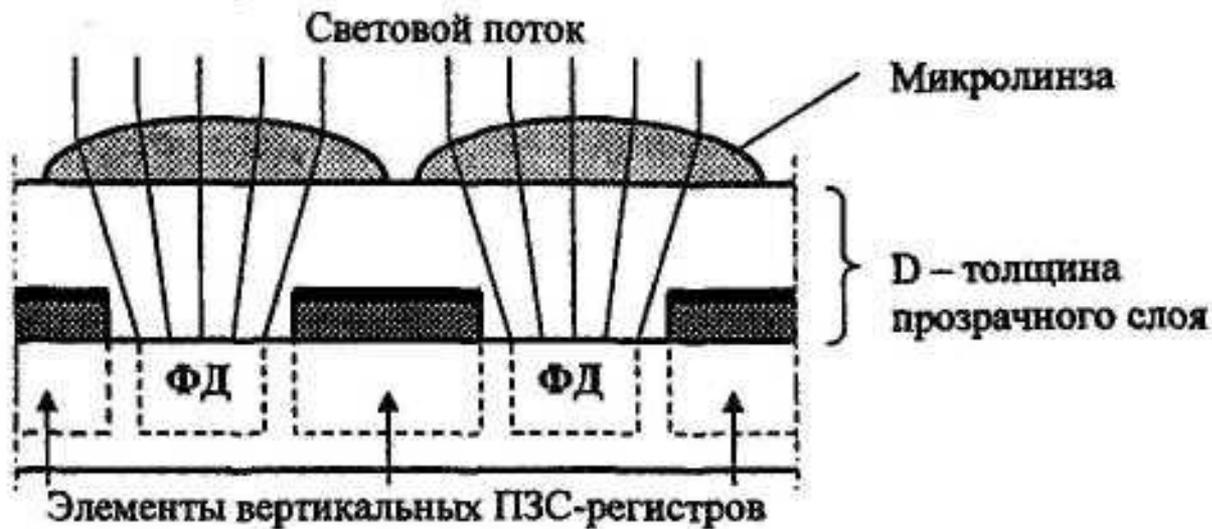
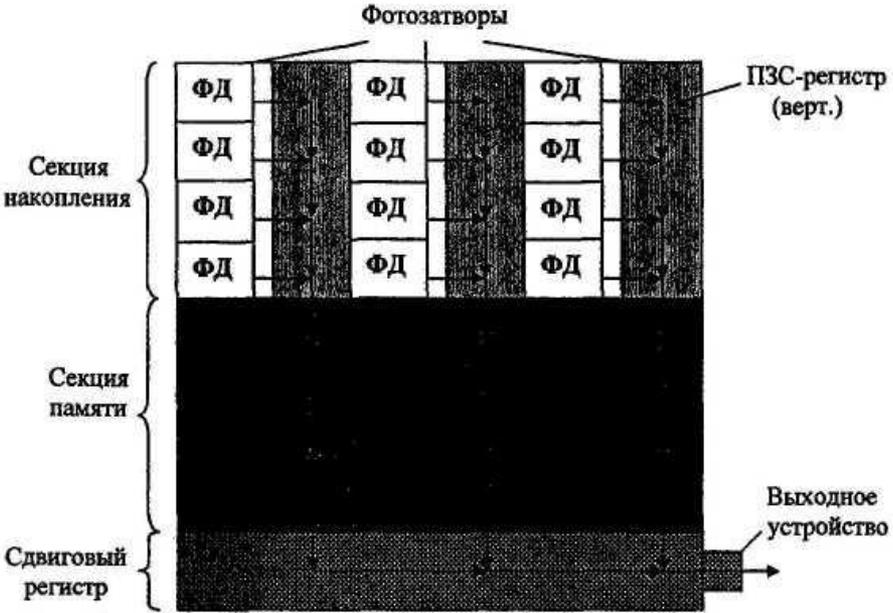


Иллюстрация фрагмента ПЗС с микролинзами

Таким образом, уменьшение размеров светочувствительной площади в матрицах со строчным переносом косвенно ухудшает световую чувствительность матрицы. Эта проблема может быть разрешена очень просто (хотя технологически это очень сложно) – поверх каждого пикселя (фотодиода) помещается микролинза. Микролинза концентрирует весь падающий свет на маленькую область, на сам пиксель (фотодиод), собирает в него весь световой поток, и этим самым эффективно увеличивает минимальную освещенность фотодиода

- Величина смаза изображения в матрицах ПЗС СП существенно меньше, чем в ПЗС КП. Однако при наличии на объекте ярко освещенной детали, уровень смаза оказывается заметен
- **Матричный ПЗС со строчно-кадровым переносом**
- Смаз в матричных ПЗС со строчным переносом вызывается двумя основными причинами:
- Первой причиной смаза является переотражение света на электродах, в результате чего часть фотонов светового потока проникает в вертикальный ПЗС- регистр, вызывая ложный сигнал смаза
- Вторая причина, кроется в том, что часть фотонов проникает глубоко в полупроводник, откуда велика вероятность диффузии образованных электронов в вертикальный ПЗС-регистр

Обе причины по существу связаны с тем, что зарядовые пакеты в столбцах вертикального регистра находятся в непосредственной близости от фотодиодов. И поэтому при высокой освещенности отдельных элементов они дают добавку к полезному сигналу, проявляющуюся в виде смаза. Это приводит к образованию светлого вертикального столбца, являющегося продолжением яркой детали, - вертикальному смазу.



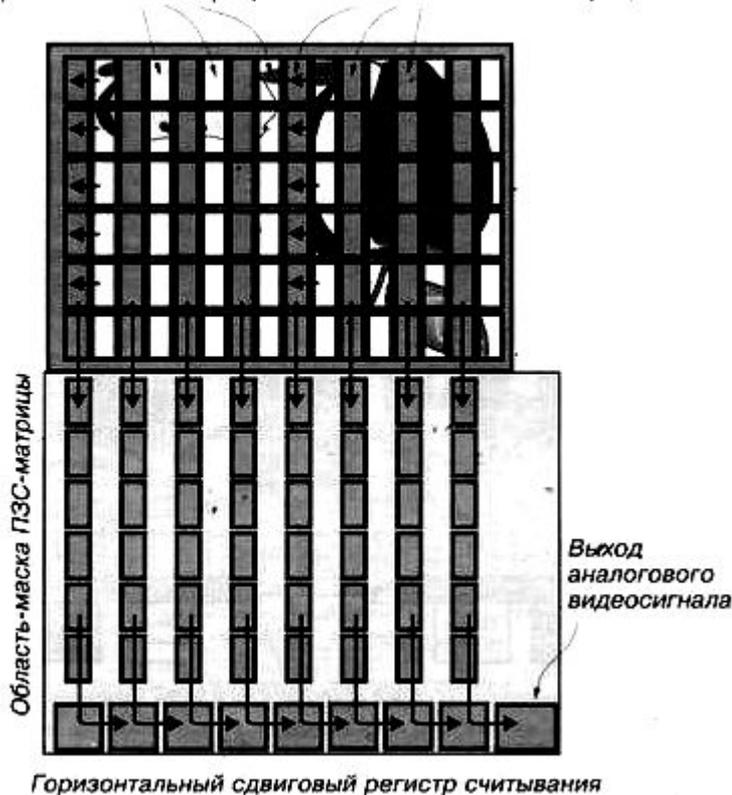
**Матричный ПЗС со строчно-кадровым переносом**

# Считывание потенциального рельефа с матрицы ПЗС

В камерах вещательного назначения необходимо дальнейшее снижение уровня смаза изображения. Для обеспечения этого требования были разработаны гибридные матрицы ПЗС со строчно-кадровым переносом заряда (СКП).

Матрицы ПЗС СКП отличаются от матриц ПЗС СП наличием в них дополнительной секции хранения зарядов на длительность поля.

Светочувствительные пиксели, область изображения ПЗС-матрицы      Регистры вертикального сдвига, область-маска ПЗС-матрицы



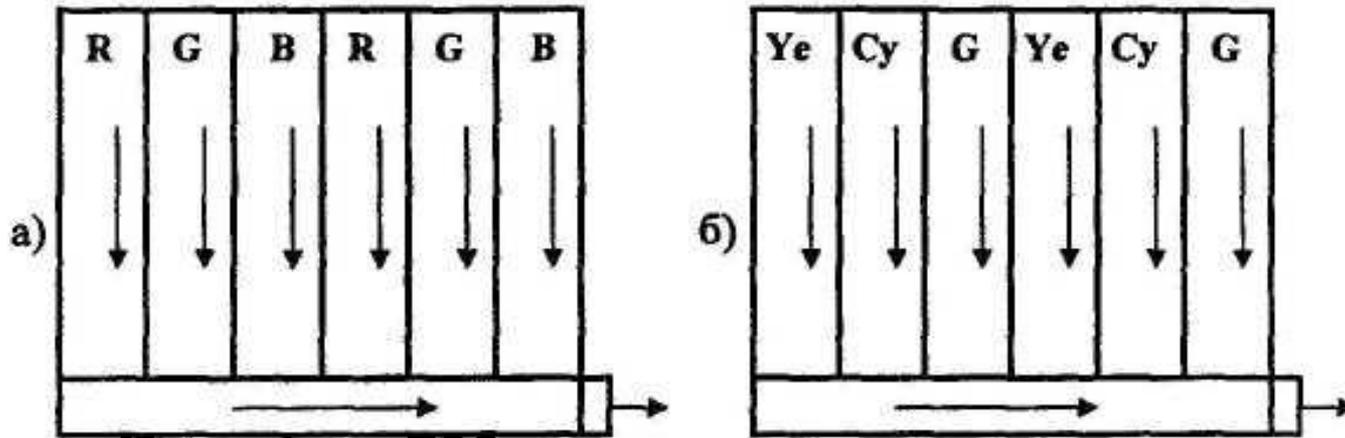
Концепция строчно-кадрового переноса

- Недостатки матриц ПЗС СКП заключаются в относительной сложности изготовления и высокой стоимости производства
- Особенностью данного типа фотоприёмников является то, что во время считывания зарядовые пакеты хранятся не в непосредственной близости от фотодиодов, а в секции памяти, и, таким образом, переотражение света и диффузия из глубины полупроводника искажают сигнал только во время переноса зарядовых пакетов в секцию памяти. Тем самым уровень смаза по сравнению с матричным ПЗС со строчным переносом уменьшается в 20-50 раз.

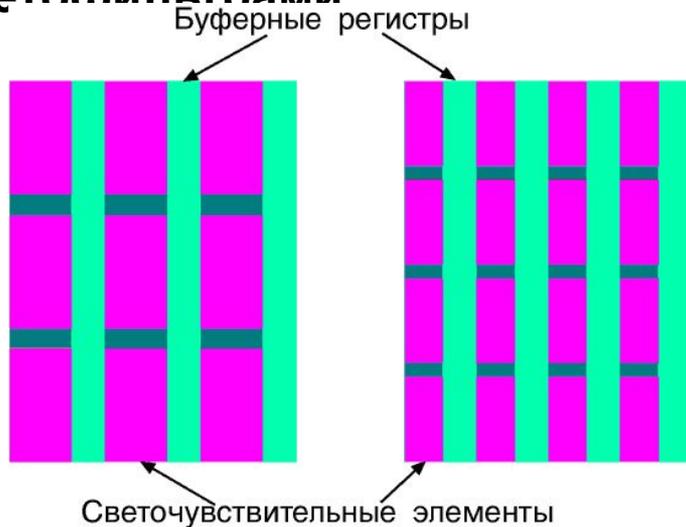
- Величина смаза изображения в матрицах ПЗС СП существенно меньше, чем в ПЗС КП. Однако при наличии на объекте ярко освещенной детали, уровень смаза оказывается заметен
- В матрицах ПЗС СП он обусловлен попаданием части наклонно падающего света под алюминиевый экран над вертикальным ПЗС регистром. Это паразитная засветка значительно меньше, чем в матрицах ПЗС КП, но время ее действия существенно больше и равно длительности поля. Количество ячеек в секции памяти равно половине количества фотодиодов. Зарядовые пакеты, накопленные в фотодиодах, переносятся в вертикальные ПЗС-регистры, после чего на повышенной частоте передвигаются в вертикальные ПЗС-регистры секции памяти. В дальнейшем они считываются через горизонтальный ПЗС-регистр так же, как и в матричном ПЗС со строчным переносом.

## Многосигнальные матричные ПЗС.

Появление многосигнальных матричных ПЗС обязано интенсивному развитию бытовой видеозаписи в стандартах VHS (Video Home System) и Super-VHS.

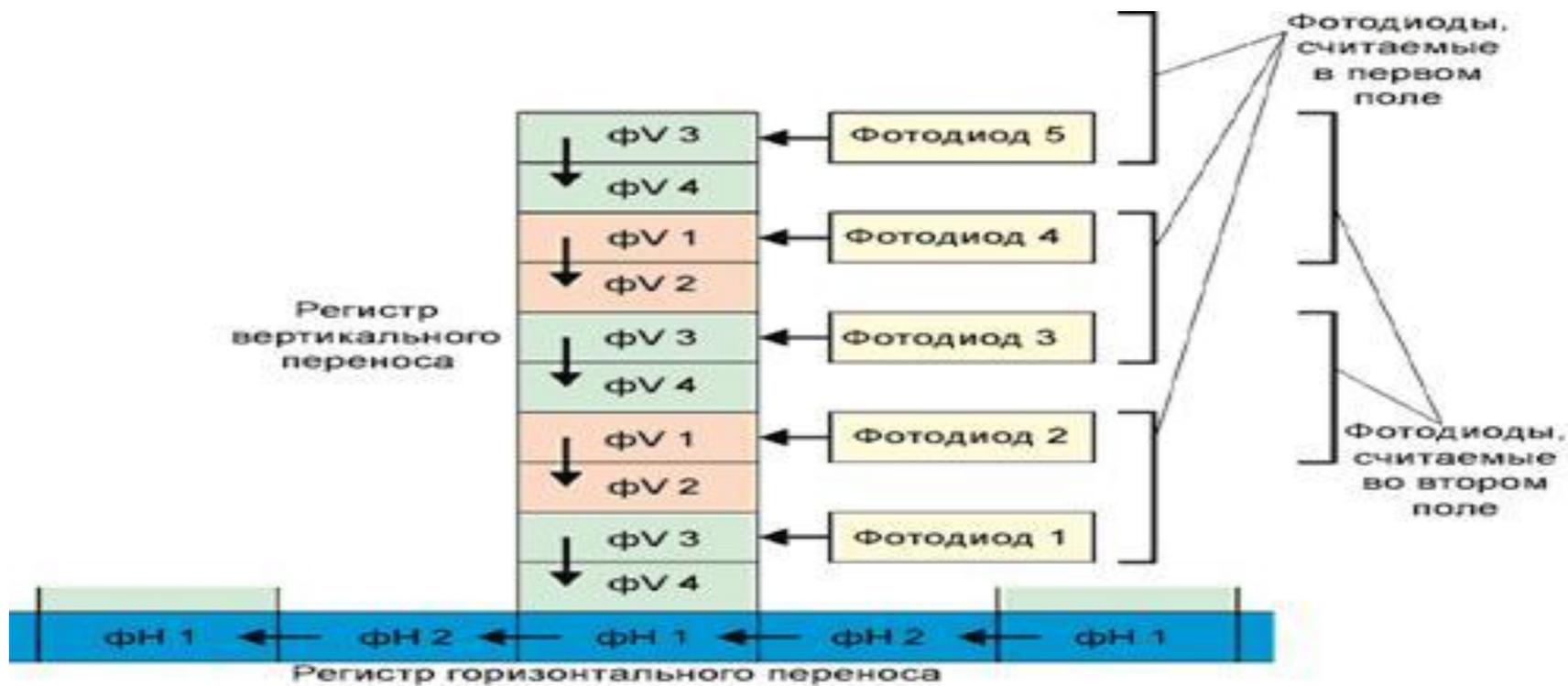


Матричные ПЗС с полосковыми светочувствительными элементами



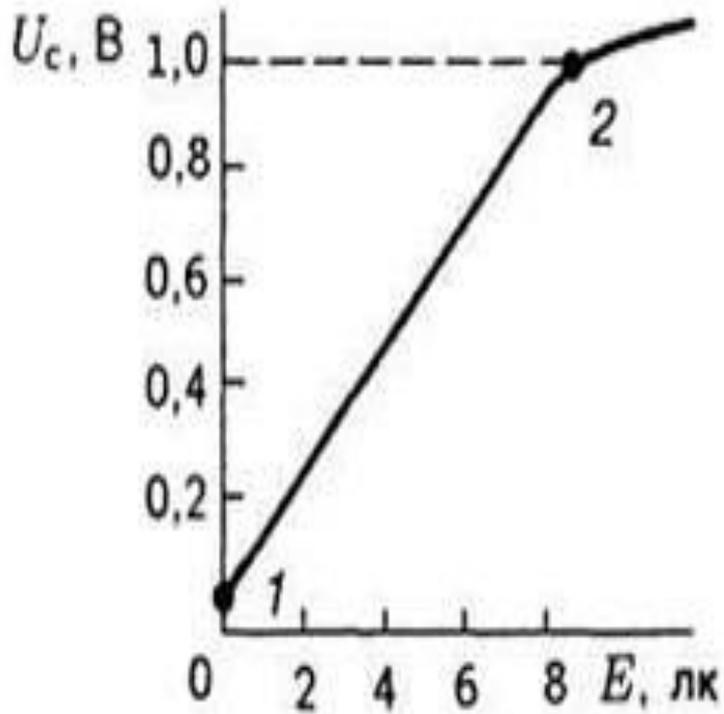
Уменьшение светочувствительной области ПЗС-матрицы при росте разрешения.

- Для камер цветного телевидения матрицы ПЗС с кадровым переносом непригодны из-за недостаточной чувствительности в синей области видимого спектра излучения,
- ПЗС КП имеют избыточную чувствительность в ближней ИК-области и для получения приемлемого качества цветопередачи требуют использования светофильтров с отсечкой ИК-области спектра.
- Поэтому в системах безопасности наибольшее распространение получили одноматричные цветные камеры на базе ПЗС со строчным переносом зарядов.
- Для выделения информации о цвете наблюдаемых объектов на светочувствительную поверхность ПЗС наносят мозаику из кодирующих светофильтров, имеющих прозрачность К.

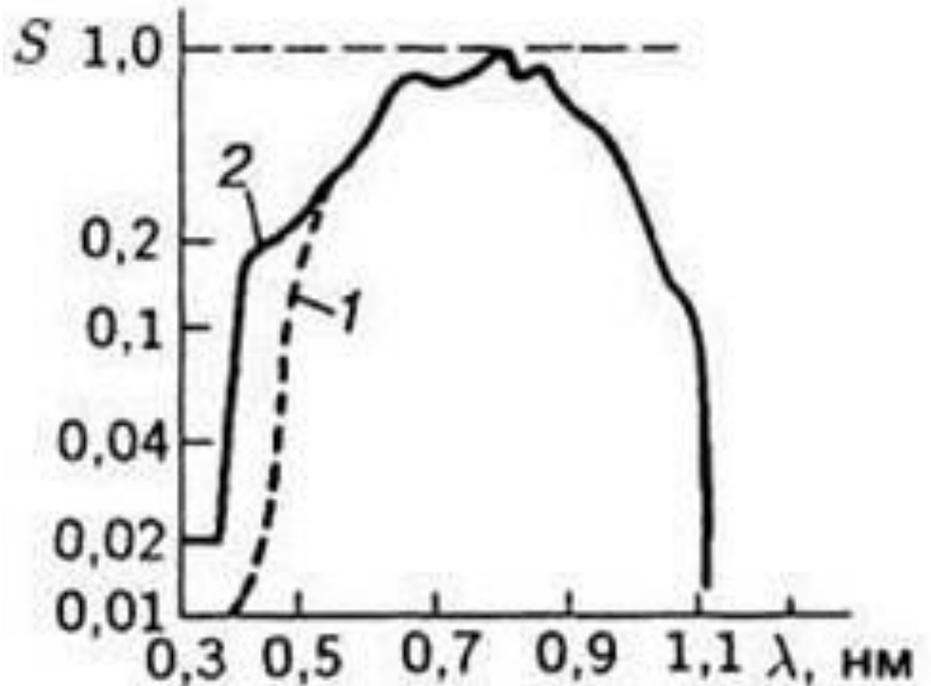


Режим накопления поля

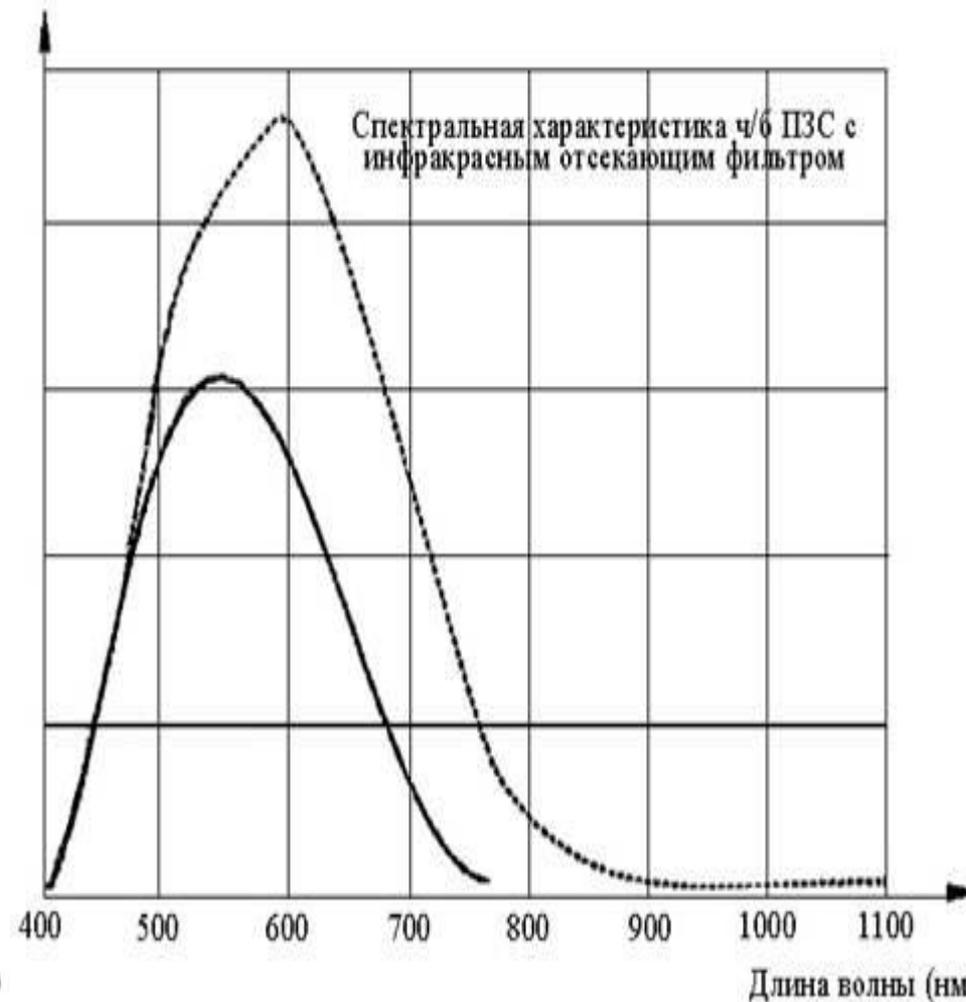
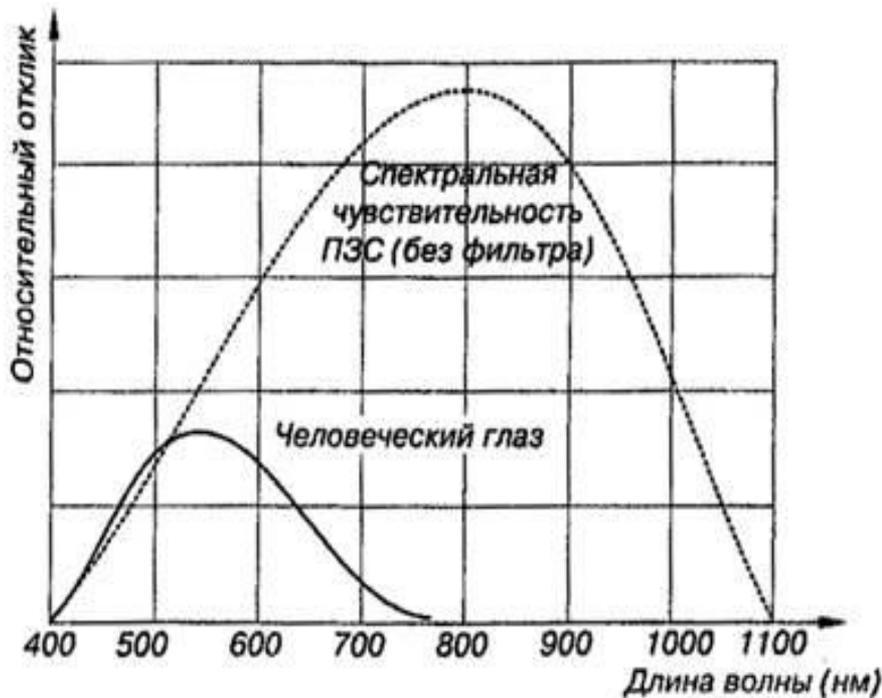
Инфракрасный отсекающий фильтр изменяет характеристику спектральной чувствительности ПЗС-матрицы



Световая характеристика матрицы ПЗС



Спектральная характеристика матрицы ПЗС



Спектральная чувствительность глаза и ПЗС-матрицы

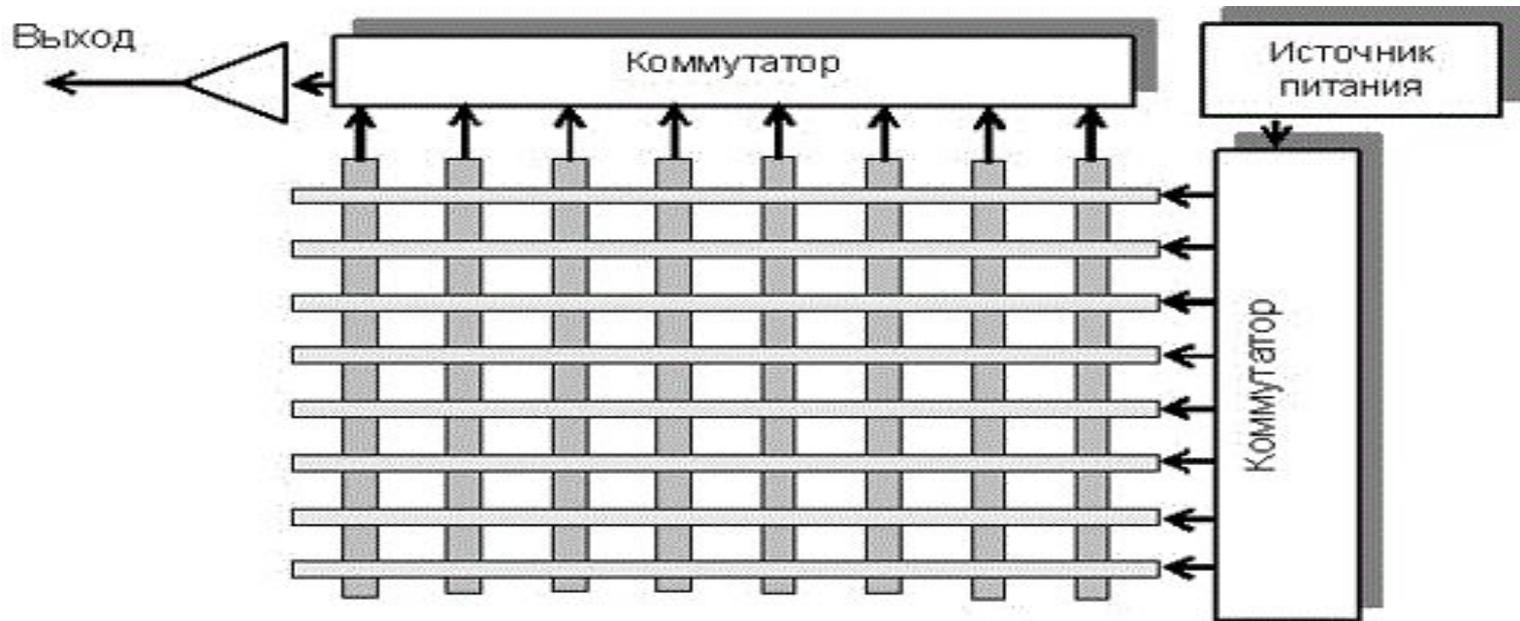
Инфракрасный отсекающий фильтр изменяет характеристику спектральной чувствительности ПЗС-матрицы

Необходимость передачи сигнала цветности через канал с той же полосой пропускания (примерно, 6 МГц) ведёт к сокращению полосы частот яркостного канала. В результате разрешающая способность цветных ПЗС снижается на 20-30% по сравнению с чёрно-белыми с тем же числом элементов.

Использование матрицы цветоделительных фильтров уменьшает световой поток, поступающий на элементы матрицы ПЗС. Это обуславливает снижение чувствительности цветных матриц ПЗС на порядок по сравнению с чёрно-белыми при той же площади элемента разложения.

# Фотоприёмники с координатной адресацией.

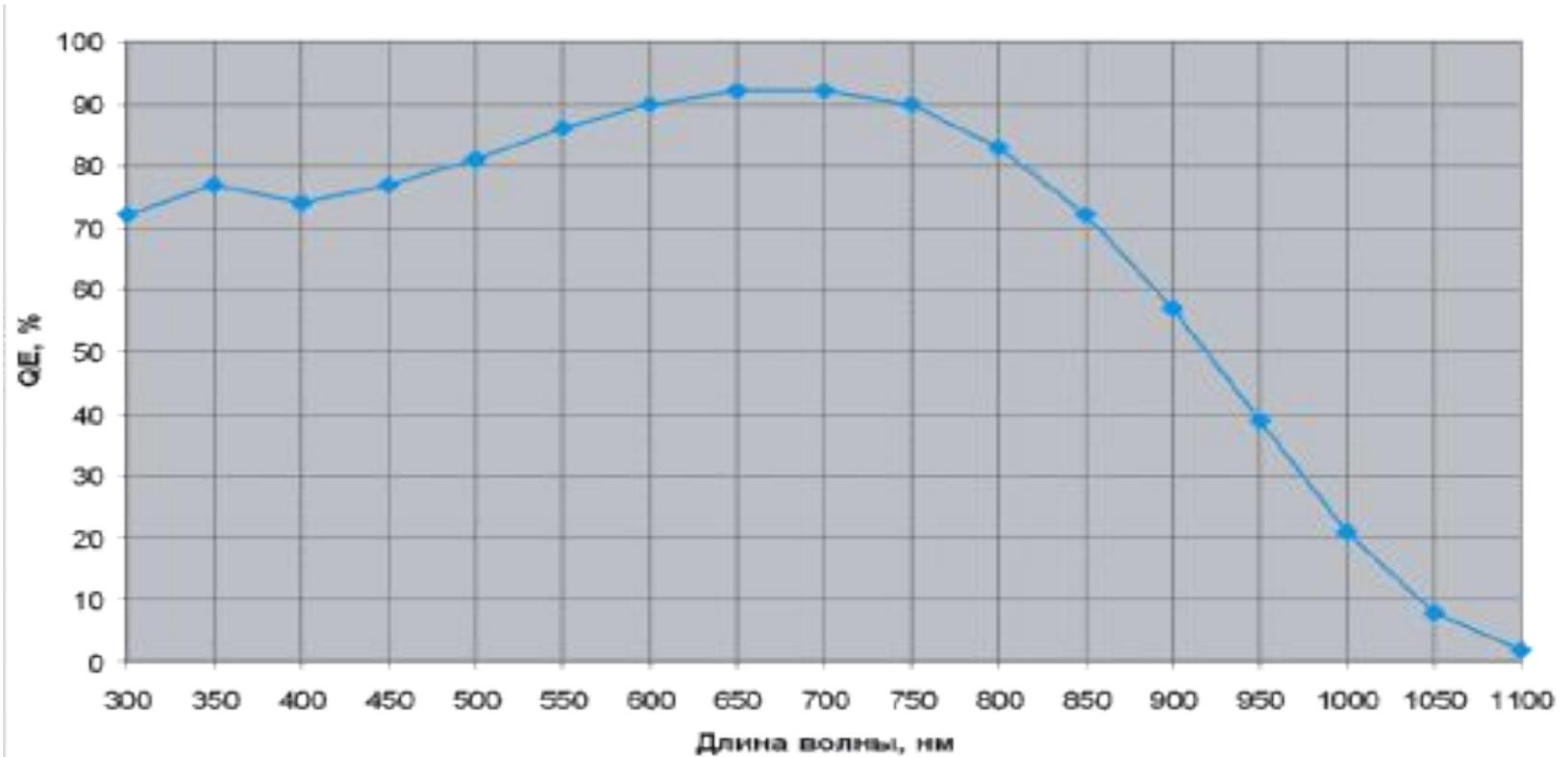
Считывание электрического сигнала, накопленного под воздействием света может быть осуществлено двухмерной координатной адресацией к элементам фотодиодных или фоторезистивных матриц



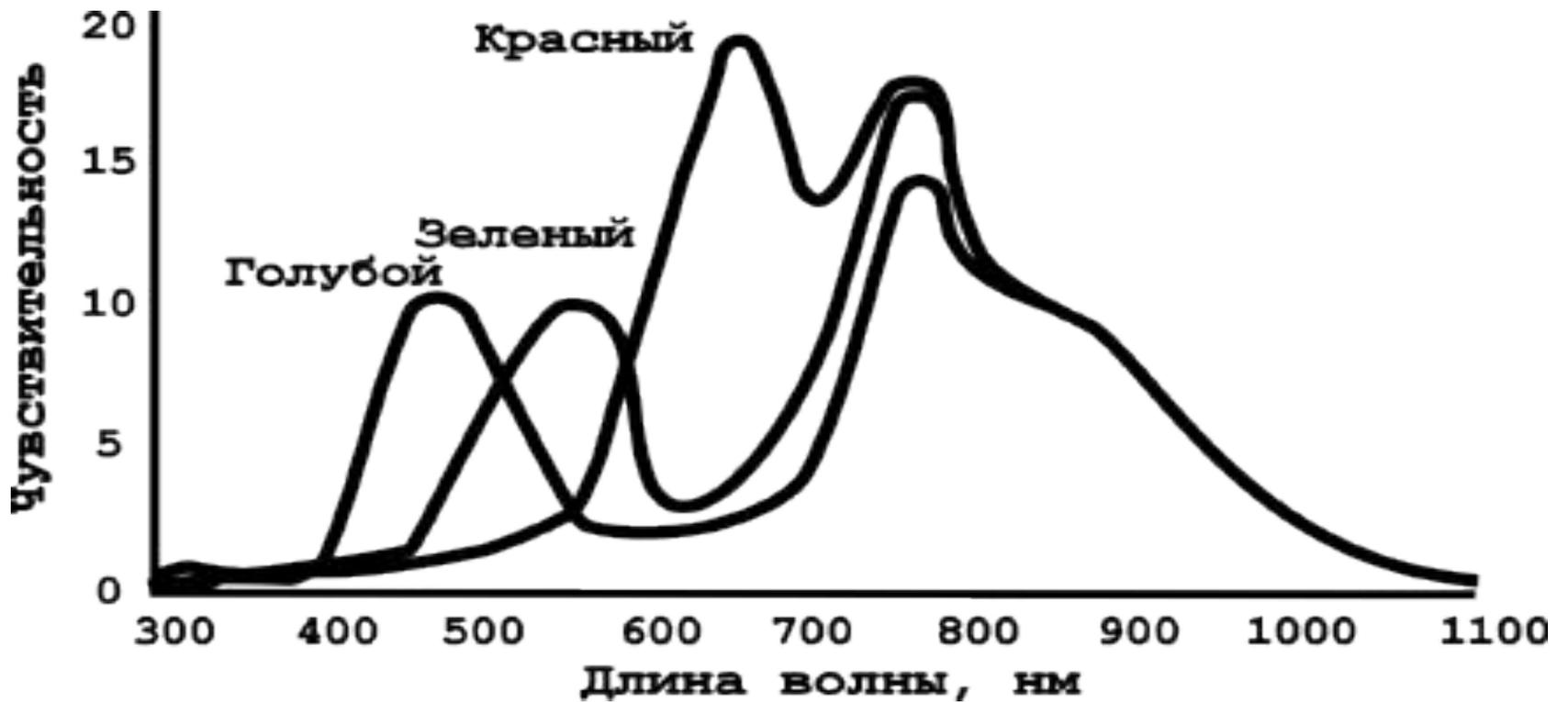
Считывание электрического сигнала в фотоприемнике с координатной адресацией

- Поочерёдное подключение каждого из элементов разложения осуществляется с помощью электронных ключей, выполненных по технологии комплиментарных МОП-транзисторов (КМОП).
- Эти фотоприёмники имеют ряд достоинств по сравнению с ПЗС, хотя и уступают им по качеству изображения .
- Можно выделить такие свойства КМОП-фотоприёмников, как низкая мощность потребления, возможность считывания произвольного фрагмента изображения, низкая стоимость.
- Важным преимуществом КМОП-камер является возможность реализации функций накопления, управления считыванием, квантования и обработки видеосигнала на одном кристалле

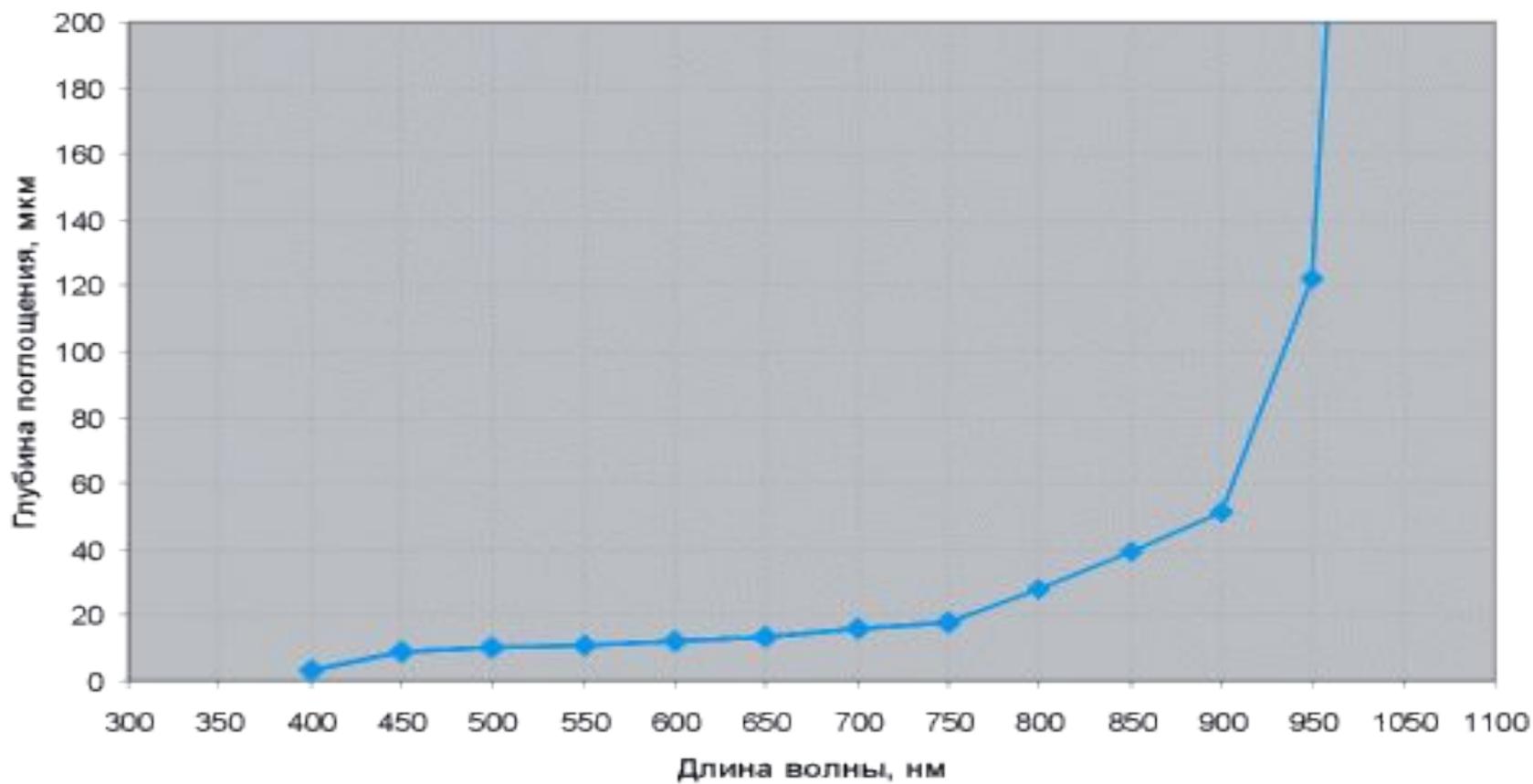
# Чувствительность и спектральный диапазон



*Квантовая эффективность ПЗС-матриц*



Спектральная чувствительность цветной ПЗС-матрицы с RGB стандартными полосами.



*Зависимость глубины поглощения фотонов в кремнии от длины волны.*

# ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

- Интегральная чувствительность матричных преобразователей определяется отношением выходного видеосигнала к освещенности на светочувствительной поверхности при заданных условиях (времени накопления, цветовой температуре источника освещения и др.).

- Квантовый выход

$$\theta = n_e / n_p$$

- 

$$\theta(x, y, \lambda)$$

-распределение квантового выхода по светочувствительной площади и по длинам волн падающего света  
плотностью светового потока

$$\phi(x, y, \lambda, t),$$

плотность светового потока

Светочувствительная ячейка ПЗС имеет размеры:  $\Delta x \times \Delta y$

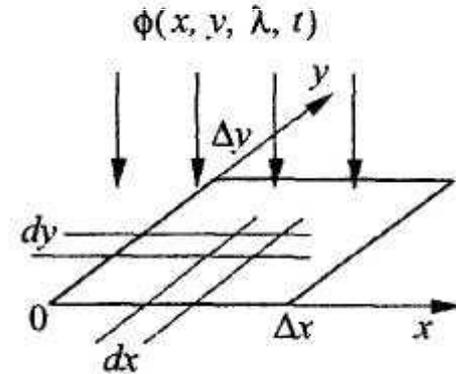
Элементарная энергия светового потока, приходящаяся на площадку размерами  $dx \times dy$

в течение промежутка времени

от  $t$  до,  $t + dt$  в диапазоне  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ :

$$dE(x, y, \lambda, t) = \phi(x, y, \lambda, t) dx dy d\lambda dt .$$

$$dn_p(x, y, \lambda, t) = \frac{dE(x, y, \lambda, t)}{e_{pl}(\lambda)} = \frac{\lambda}{hc} \phi(x, y, \lambda, t) dx dy d\lambda dt .$$



Величина

$$\frac{q\lambda_0}{hc} \theta(\lambda_0)$$



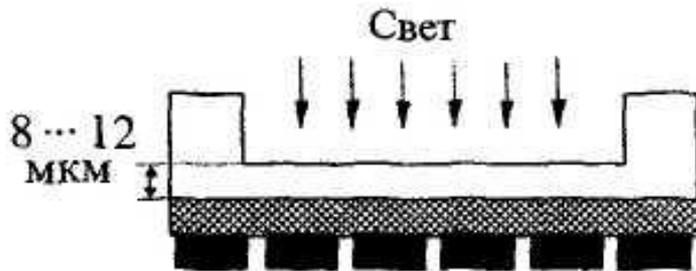
спектральная чувствительность  
ПЗС

на длине волны

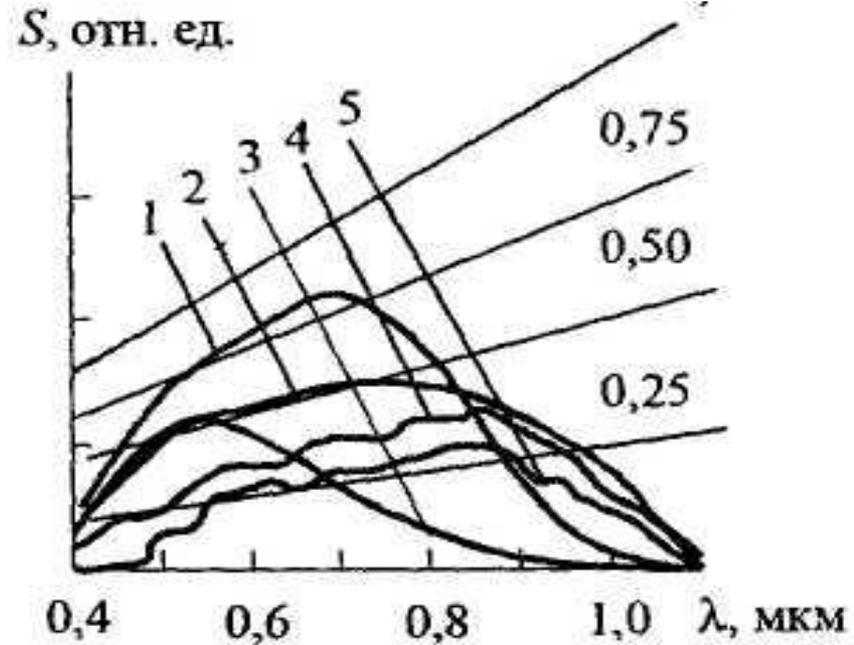
$\lambda_0$

$$U_s = E_{об} \frac{\rho \mu \Theta^2}{4(1-\beta)^2} \frac{KAT_i}{C_{ВЫХ}} \frac{\int_{\lambda_{мин}}^{\lambda_{макс}} \phi'(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{k \int_{-\infty}^{+\infty} \phi'(\lambda) v(\lambda) d\lambda}$$

Спектральная чувствительность ПЗС



Матричный ПЗС с освещением с обратной стороны



Пороговая чувствительность ПЗС

$$J_d$$

$$Q_d = J_d AT_i$$

**Шумом называют любой источник неопределенности сигнала.**

Можно выделить следующие типы шумов ПЗС.

**Дробовые шумы**

$$\bar{n}_d = \sqrt{n_d} = \sqrt{J_d A T_i / q} .$$

**Шумы переноса**

$$\bar{n}_t = \sqrt{2 \ln 2 k_0 T N_{ss} A_s} ,$$

**Фотонный шум-  $n_e$**

$$\bar{n}_e = \sqrt{n_e} = \sqrt{Q/q} = \sqrt{S(\lambda_0) A T_i \Phi_0 / q} .$$

**Шум непустого нуля**

$$\bar{n}_z = (1/q) \sqrt{k_0 T C_{\text{ВХ}}}$$

**Шум установки потенциала  
выходного узла детектирования**

$$\bar{n}_{\text{ВЫХ}} = \bar{U}_n C_{\text{ВЫХ}} / q = (1/q) \sqrt{k_0 T C_{\text{ВЫХ}}} .$$

**Собственный шум выходного  
гальванического транзистора**

$$\underline{n_{vi}} = \bar{n}_{\text{ВЫХ}} = \bar{U}_n C_{\text{ВЫХ}} / q = (1/q) \sqrt{k_0 T C_{\text{ВЫХ}}} .$$

## Полное среднеквадратичное значение шума

$$\bar{n}_{\text{ПЗС}} = \sqrt{n_s^{-2} + n_z^{-2} + n_d^{-2} + n_t^{-2} + n_{\text{ВЫХ}}^{-2} + n_{\text{VI}}^{-2}}.$$

Отношение сигнал / шум

$$\psi = \frac{S(\lambda_0) A T_i \Phi}{q n_{\text{ПЗС}}},$$

Пороговая чувствительность

$$\Phi' = \frac{\psi' q n_{\text{ПЗС}}}{S(\lambda_0) A T_i}.$$

# ***Динамический диапазон***

- Динамический диапазон — это отношение максимально возможного сигнала, сформированного светоприемником, к его собственному шуму.
- Для ПЗС этот параметр определяется как отношение наибольшего зарядового пакета, который может быть накоплен в пикселе к шуму считывания.
- Чем больше размер пиксела ПЗС, тем больше электронов может удерживаться в нем. Для разных типов ПЗС эта величина составляет от 75000 до 500000 и выше.
- Для сравнения: лучшие фотоэмульсии имеют динамический диапазон лишь около 100

$S$  — количество фотонов

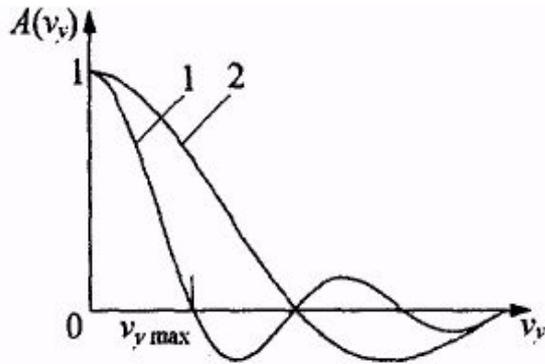
$$\sqrt{S}$$

- Фотонный шум
- сигнал/шум (обозначается как  $S/N$  — signal/noise ratio)

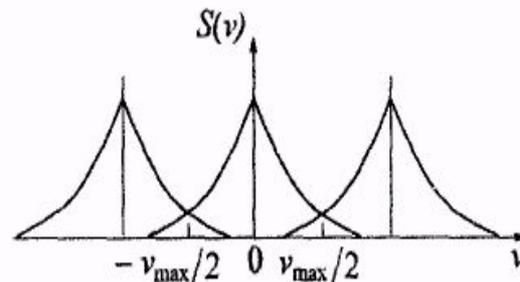
- $S/N = \frac{S}{\sqrt{S}}$

# Пространственное разрешение ПЗС.

$$A_{\text{ПЗС}}(v_x, v_y) = A_g(v_x, v_y) A_d(v_x, v_y) A_\varepsilon(v_x, v_y)$$

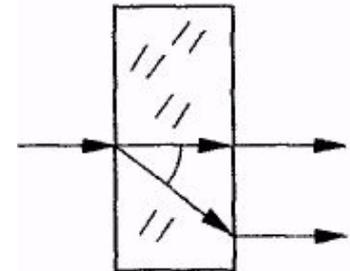


Поперечные АЧХ в режиме накопления поля - / и кадра - 2



. Перекрывание спектров при дискретизации в ПЗС

Фильтр НПЧ



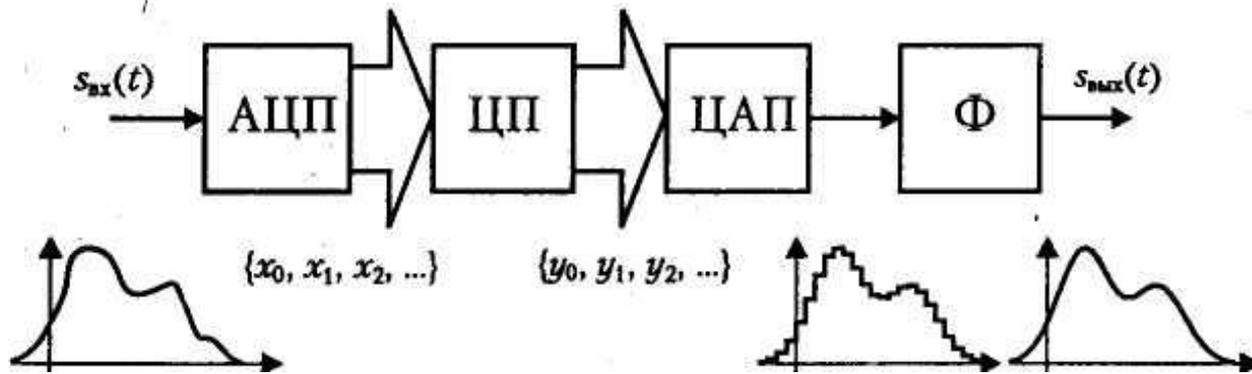
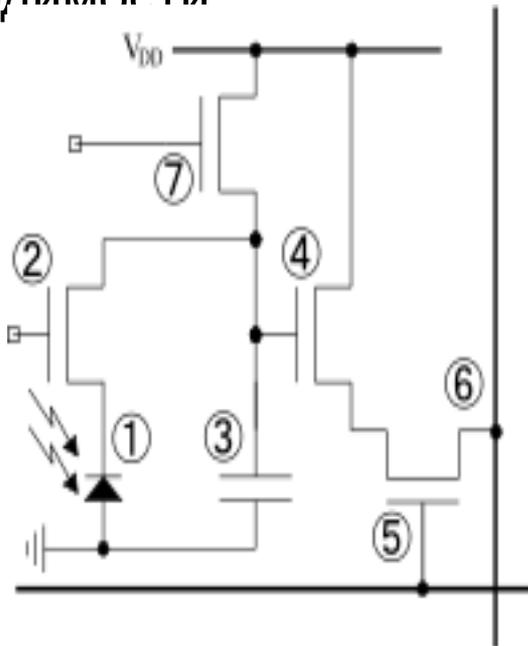
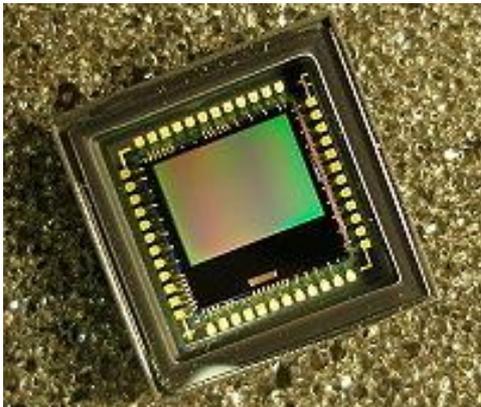


Рис. 9.24 Структурная схема системы цифровой обработки сигналов

# КМОП-матрица

- **КМОП-матрица**— светочувствительная матрица, выполненная на основе [КМОП-технологии](#). В КМОП-матрицах используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости



Эквивалентная схема ячейки КМОП-матрицы:

- 1 — светочувствительный элемент (фотодиод);
- 2 — затвор;
- 3 — конденсатор, сохраняющий заряд с диода;
- 4 — усилитель;
- 5 — шина выбора строки;
- 6 — вертикальная шина, передающая сигнал процессору;
- 7 — сигнал сброса

В конце 1960 гг. многие исследователи отмечали, что структуры КМОП (CMOS) обладают чувствительностью к свету. Однако ПЗСобеспечивали настолько более высокую светочувствительность и качество изображения, что матрицы на КМОП технологии не получили сколько-нибудь заметного развития.

- В NASA успешно реализовали Active Pixel Sensors (APS) — активно-пиксельные датчики. Теоретические исследования были выполнены ещё несколько десятков лет тому назад, но практическое использование активного сенсора отодвинулось до 1993 года.
- APS добавляет к каждому пикселю транзисторный усилитель для считывания, что даёт возможность преобразовывать заряд в напряжение прямо в пикселе. Это обеспечило также произвольный доступ к фотодетекторам наподобие реализованного в микросхемах
- **Принцип работы**
- До съёмки подаётся сигнал сброса
- В процессе экспозиции происходит накопление заряда фотодиодом
- В процессе считывания происходит выборка значения напряжения на конденсаторе

# Преимущества

- **Преимущества [КМОП](#)**
- — низкое энергопотребление в статическом состоянии. Это позволяет применять такие матрицы в составе энергонезависимых устройств, например, в датчиках движения и системах наблюдения, находящихся большую часть времени в режиме «сна» или «ожидания события»;
- - единство технологии с остальными, цифровыми элементами аппаратуры. Это приводит к возможности объединения на одном кристалле аналоговой, цифровой и обрабатывающей части (КМОП-технология, являясь в первую очередь процессорной технологией, подразумевает не только «захват» света, но и процесс преобразования, обработки, очистки сигналов не только собственно захваченных, но и сторонних компонентов РЭА);
- - возможность миниатюризации камер для самого разного оборудования и снижения их стоимости ввиду отказа от дополнительных процессорных микросхем;
- - возможность применения механизма произвольного доступа и считывание выбранных групп пикселей. Данная операция получила название кадрированного считывания ( *windowing readout*).

- Кадрирование позволяет уменьшить размер захваченного изображения и потенциально увеличить скорость считывания по сравнению с ПЗС-сенсорами, поскольку в последних для дальнейшей обработки необходимо выгрузить всю информацию. Появляется возможность применять одну и ту же матрицу в принципиально различных режимах.
- В дополнение к усилителю внутри пикселя, усилительные схемы могут быть размещены в любом месте по цепи прохождения сигнала. Это позволяет создавать усилительные каскады и повышать чувствительность в условиях плохого освещения. Возможность изменения коэффициента усиления для каждого цвета улучшает, в частности, балансировку белого.
- Дешевизна производства в сравнении с ПЗС-матрицами, особенно при больших размерах матриц.
- **Принцип работы**
- До съёмки подаётся сигнал сброса
- В процессе экспозиции происходит накопление заряда фотодиодом
- В процессе считывания происходит выборка значения напряжения на конденсаторе

# Недостатки

- Основной недостаток КМОП-камер связан пока с их малой чувствительностью, её неоднородностью по массиву элементов, а также с неоднородностью темновых сигналов. В настоящее время чувствительность КМОП-камер ограничена в первую очередь структурной помехой, на порядок превышающей флуктуационный шум. При компенсации структурной помехи флуктуационный шум КМОП-камер превышает аналогичное значение шума матричных ПЗС в 3-5 раз при одинаковой частоте считывания сигнала.
- Фотодиод ячейки матрицы имеет сравнительно малый размер, величина же получаемого выходного напряжения зависит не только от параметров самого фотодиода, но и от свойств каждого элемента пикселя.
- Таким образом, у каждого пикселя матрицы оказывается своя собственная характеристическая кривая, и возникает проблема разброса сеточувствительности и коэффициента контраста в пикселей матрицы. В результате чего первые произведённые КМОП-матрицы имели сравнительно низкое разрешение и высокий уровень так называемого «структурного шума»

