

ОПТО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Преобразователи оптического изображения в электрический сигнал – датчики ТВ сигнала – преобразуют световую энергию, отраженную от объекта и спроецированную на его фоточувствительную поверхность, в последовательность электрических сигналов с определенными параметрами, обеспечивающими обратное преобразование.

Датчик должен обладать способностью не только оценивать яркость отдельных элементов изображения, но и осуществлять процесс развертки. В ТВ технике преобразование осуществляется с помощью передающих электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) и твердотельных датчиков.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

- **Чувствительность** – параметр показывающий минимальную освещенность светочувствительного элемента (фотослоя) в **люксах**, при которой обеспечивается заданное соотношение **сигнал/шум**. Чем выше чувствительность датчика, чем меньшая требуется освещенность.
- **Световая характеристика** – зависимость тока сигнала на выходе преобразователя от освещенности его фоточувствительной поверхности – позволяет судить об интервале освещенностей, в котором способен работать датчик.
- **Спектральная характеристика** – зависимость величины ТВ сигнала от длины волны падающего на датчик излучения равной интенсивности.
- **Инерционность** – параметр, характеризующий запаздывание изменения ТВ сигнала на выходе преобразователя относительно изменения освещенности его фоточувствительной поверхности.

Работа фоточувствительных поверхностей основывается на использовании **внешнего и внутреннего фотоэффекта.**

При **внешнем фотоэффекте** освобожденные электроны покидают облученное вещество, вылетая в пространство, – фотоэлектронная эмиссия, при **внутреннем** – остаются внутри твердого тела, изменяя его проводимость, – фотопроводимость.

Для фотоэлектронной эмиссии установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

Закон Столетова (основной закон фотоэффекта) – фототок фотоэлемента i_{ϕ} пропорционален интенсивности светового потока вызывающего этот ток.

$$i_{\phi} = S\Phi,$$

где Φ – световой поток, лм; S – чувствительность фотокатода, мкА/лм.

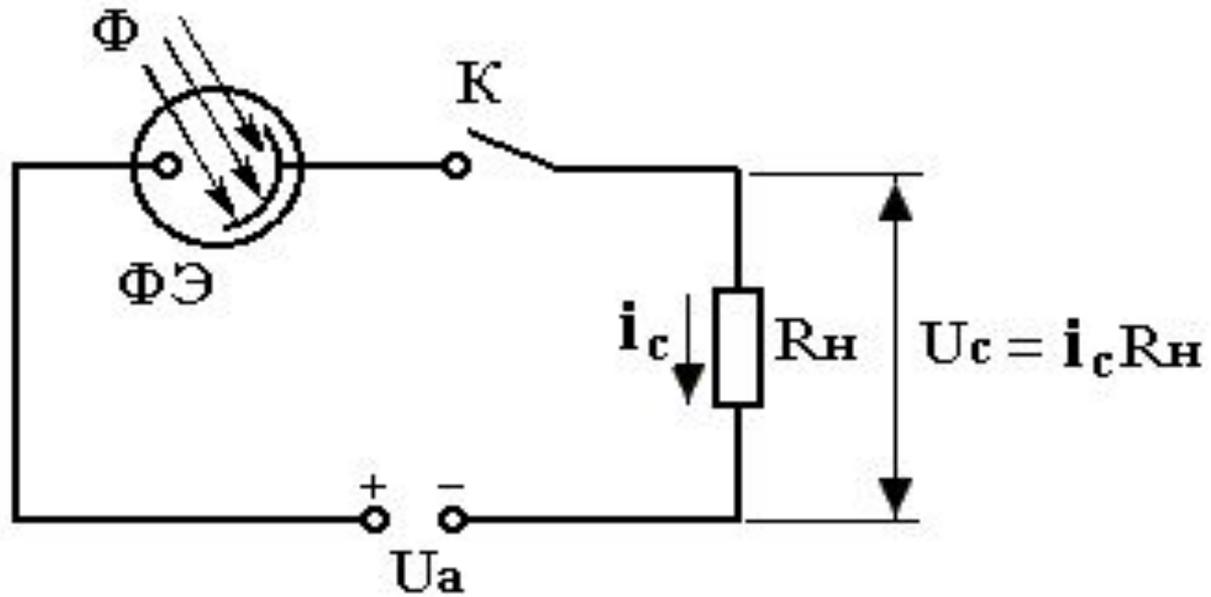
Без инерционность фотоэлектронной эмиссии – фототок следует за изменениями светового потока практически без запаздывания до частоты 100 МГц.

Закон Эйнштейна – максимальная энергия фотоэлектрона пропорциональна частоте падающего излучения и не зависит от его интенсивности. Она определяется энергией кванта света.

ПРИНЦИП МГНОВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Принцип мгновенного действия основан на том, что фотоэлектронная эмиссия с каждого элемента изображения используется в интервале времени, равному времени коммутации одного элемента и, следовательно мгновенные значения тока сигнала изображения пропорциональны световому потоку падающему на 1 элемент изображения в течение времени коммутации этого элемента.

При этом напряжение сигнала на нагрузке R_n при замыкании ключа K на время коммутации этого элемента определяется протекающим током фотоэмиссии.



Образование сигнала в системе мгновенного действия

Схема устройства трубки типа ДИССЕКТОР

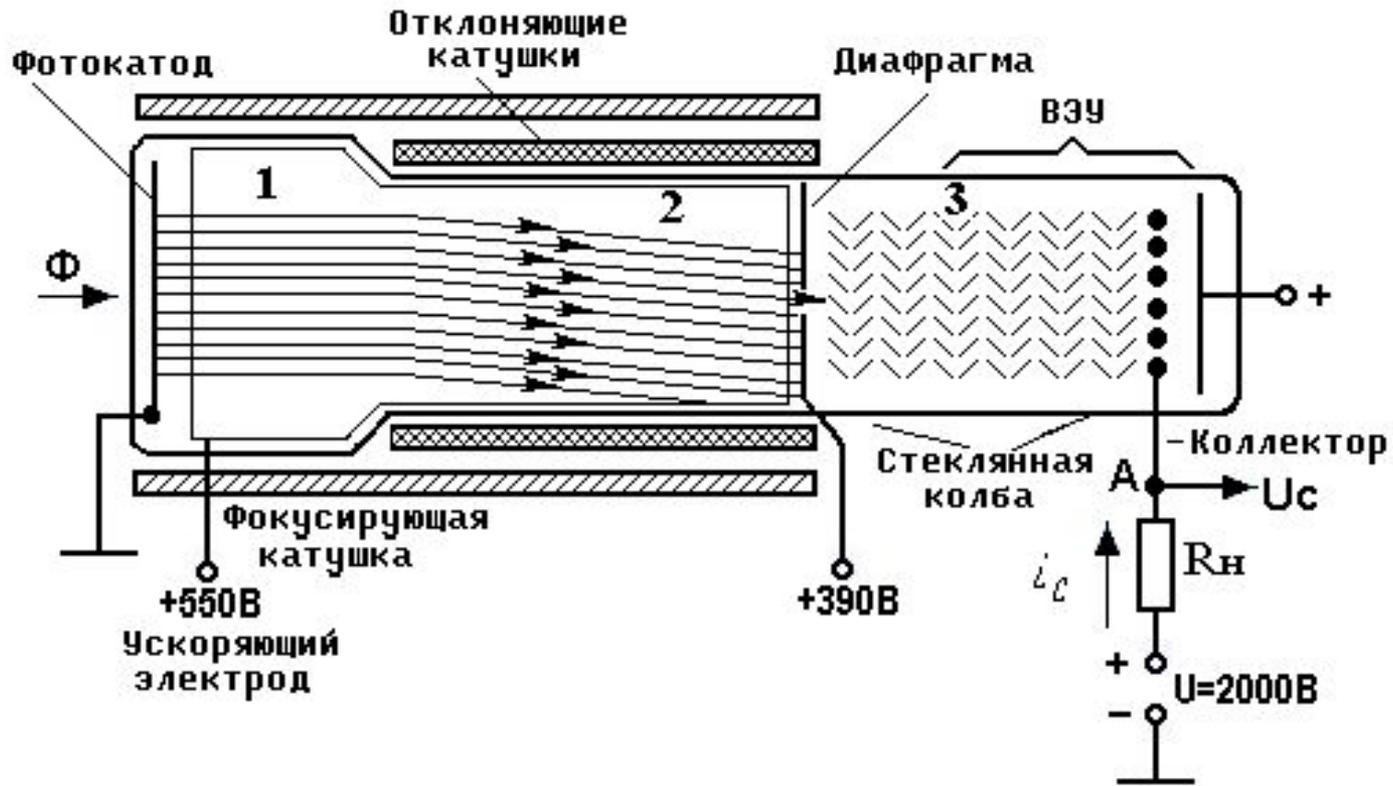


Схема устройства трубки типа ДИССЕКТОР

Световое изображение преобразуется в электронное на полупрозрачном светочувствительном слое – **фотокатоде**, нанесенном на внутреннюю поверхность планшайбы трубки, за счет того, что падающий световой поток выбивает фотоэлектроны с его поверхности. Причем, число фотоэлектронов зависит от яркости элементов изображения – чем ярче изображение, тем больше фотоэлектронов. Далее это электронное изображение переносится в плоскость диафрагмы с помощью ускоряющего напряжения, приложенного к **УСЭ** в магнитном поле **ФК**. В плоскости **диафрагмы** под действием отклоняющего поля **ОК** электронное изображение перемещается относительно **отверстия диафрагмы** по закону развертки. При этом **фотоэлектроны** с различных участков **ФК** попадают через отверстие на первый **динод ФЭУ** в котором мгновенное значение фототока усиливается за счет размножения вторичных электронов. Питание на диноды подается таким образом, что потенциал каждого последующего динода выше предыдущего, таким образом выбитый электрон из 1 динода ускоряется полем 2 динода и выбивает из него уже 2 электрона и так далее.

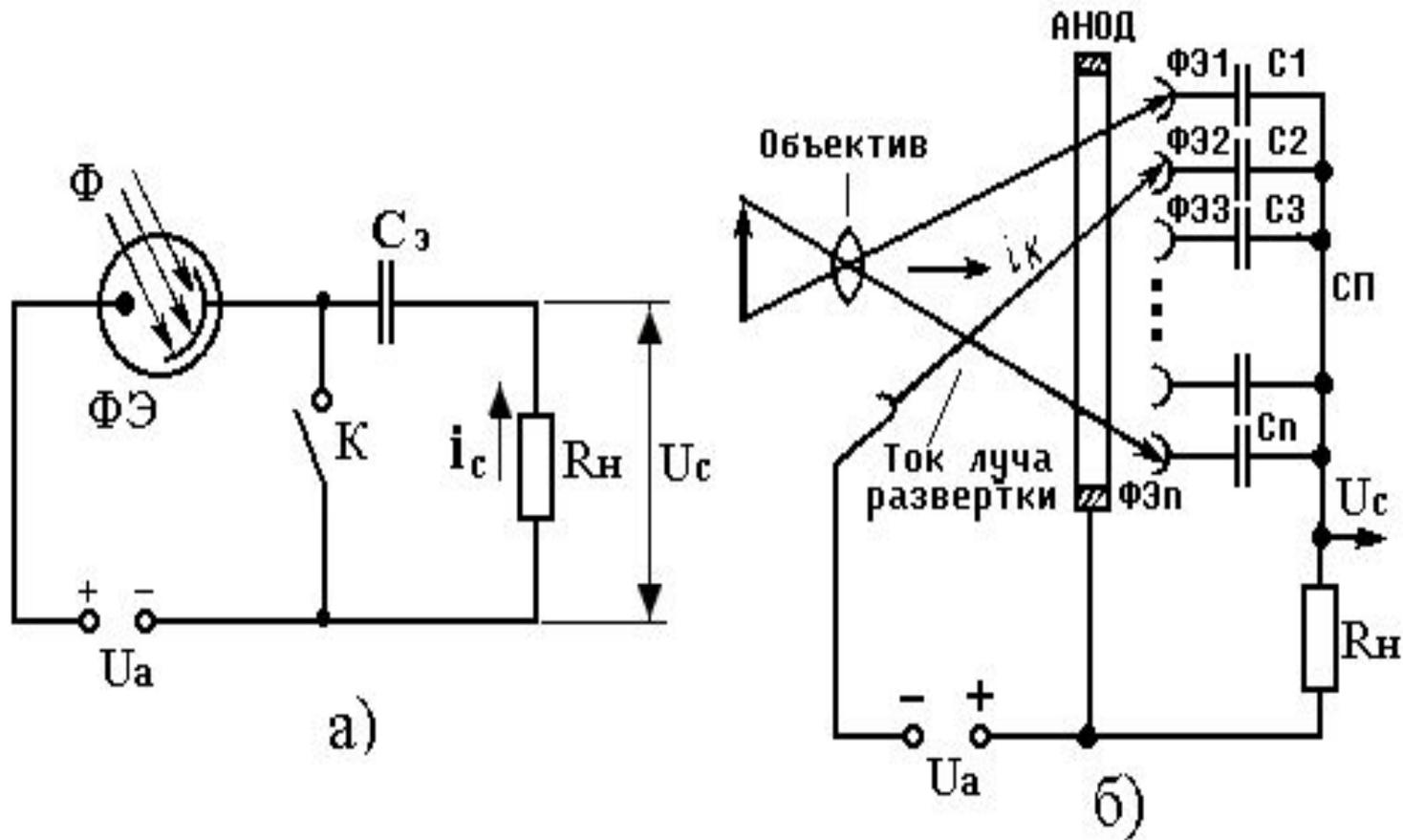
Коэффициент усиления **ФЭУ** достигает **100000**, что позволяет поучить ток сигнала порядка **100мкА**, отрицательной полярности.

ПРИНЦИП НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

Повысить эффективность работы фотопреобразователей можно за счет использования **принципа накопления заряда**, заключающегося в том, что световая энергия, облучающая элемент в межкоммутационный период, **накапливается на специальном накопительном конденсаторе** .

Принцип накопления световой энергии:

а - эквивалентная схема; б - модуль ТВ системы с накоплением



Принцип накопления световой энергии:

а - эквивалентная схема; б - модуль ТВ системы с накоплением

Емкость **Cэ** за счет фотоэмиссии накапливает заряд в течении кадра, а поскольку увеличение светового потока сопровождается увеличением фототока, то элементы имеющие разную освещенность получают различные заряды. Сигнал с элементарного конденсатора **Cэ** получается в результате его быстрого разряда коммутирующим лучом развертки за время **tэ** на нагрузочный резистор **Rн**, причем, в идеале принцип накопления увеличивает напряжение сигнала в **N раз**, равное количеству элементов разложения, поскольку:

$$Q_{зар} = i_{ф} T_k ; i_{раз} = Q_{зар}/t_{э} = i_{ф} T_k / t_{э} = i_{ф} N ; u_{ср} = R_n i_{ф} N ,$$

где N-количество элементов разложения.

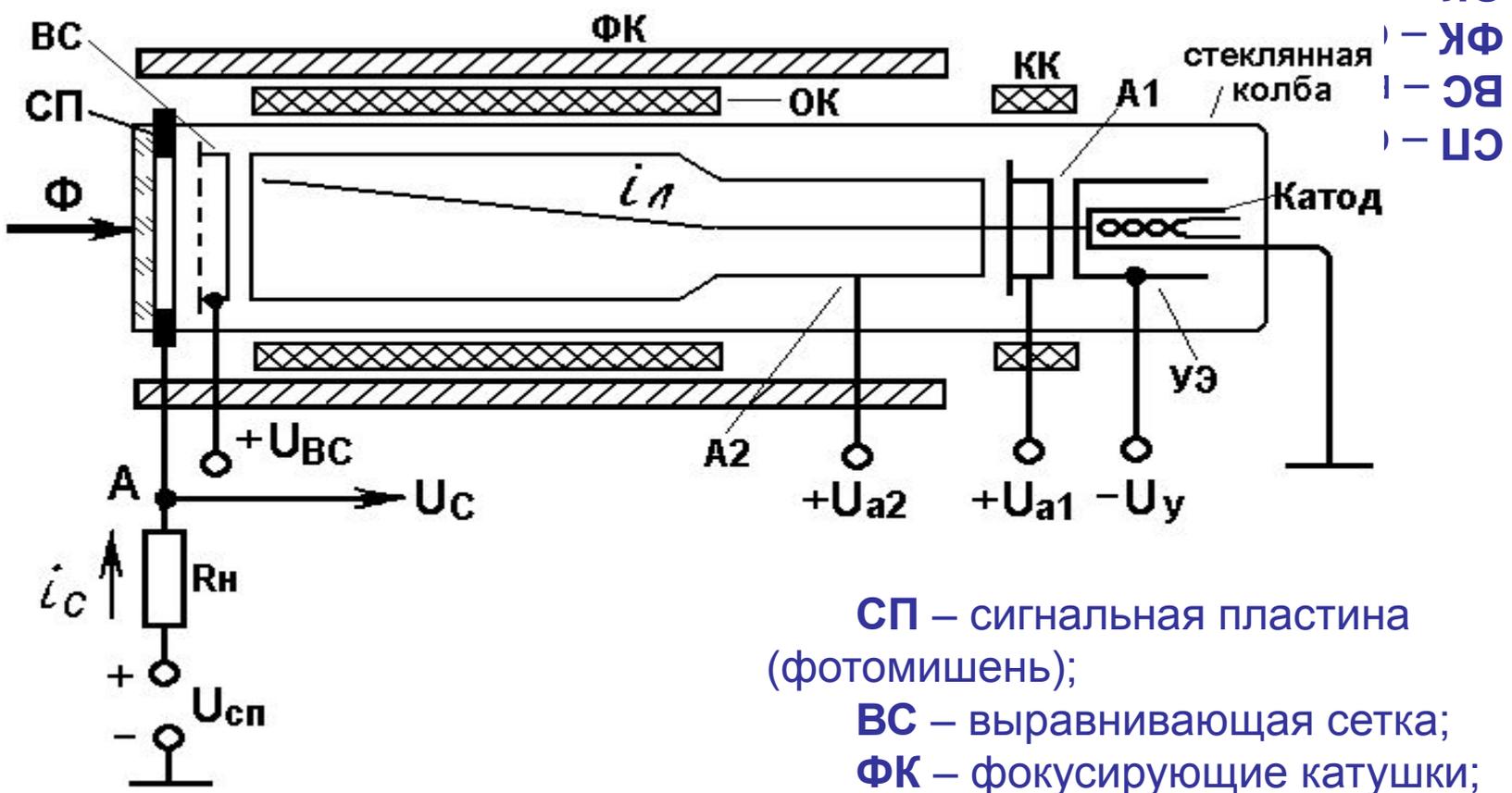
Однако, на практике такой выигрыш получить не удастся.

Рассмотренный процесс накопления зарядов реализован в ряде передающих трубок содержащих мозаичную или фотопроводниковую фотомишень, эквивалентная схема которой представлена на рис. Она состоит из изолированных ячеек, каждая из которых содержит фотоэлемент и накопительный конденсатор. При проекции оптического изображения в цепях ФЭ возникает ток, пропорциональный освещенности, поэтому конденсаторы заряжаются до различных значений, образуя потенциальный рельеф. Преобразование потенциального рельефа в сигнал изображения происходит путем последовательной коммутации, электронным лучом развертки, накопительных конденсаторов в цепь нагрузки. Токи разряда накопительных конденсаторов, протекая через резистор нагрузки, включенный в цепь сигнальной пластины **СП** создают на нем сигнал изображения.

ВИДИКОН

Фоточувствительные поверхности, использующие явление внешнего фотоэффекта, обладают малой чувствительностью. Существенно увеличить чувствительность трубок можно, используя фотомишени, построенные на явлении **внутреннего фотоэффекта** - **фотопроводимости**. Кроме того, мишень из фотопроводящих слоев, являясь фоточувствительным элементом, одновременно накапливает световую энергию, что значительно упрощает конструкцию трубки.

КК – корректирующие катушки;
 ОК – отклоняющие катушки;



- СП – сигнальная пластина (фотомишень);
- ВС – выравнивающая сетка;
- ФК – фокусирующие катушки;
- ОК – отклоняющие катушки;
- КК – корректирующие катушки;
- A1 – первый анод;
- A2 – второй анод
- Φ - световой поток;
- Uс – напряжение выходного сигнала.

Трубки типа **видикон** содержат 2 основных узла: **фотомишень и электронную пушку**. **Фотомишень** состоит из **фотослоя и сигнальной пластины**, которая представляет собой проводящий слой **золота, платины** или **окиси олова**, нанесенную на внутреннюю поверхность планшайбы и имеющую прозрачность более 90% и поверхностное сопротивление $200 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. На СП нанесен фотослой толщиной 1...3 мкм из **соединения сурьмы, мышьяка, серы**. Материал, из которого изготовлена мишень и его толщина определяют чувствительность, спектральную характеристику и инерционность видикона. Электронно-оптическая система содержит электронную пушку и мелкоструктурную выравнивающую сетку (ВС) помещенную перед фотомишенью. Пушка состоит из **подогреваемого катода, управляющего электрода (УЭ), первого (А1) и второго (А2) анодов**. Второй анод создает эквипотенциальную область, в которой происходит фокусировка и отклонение развертывающего луча.

Потенциал выравнивающей сетки в 1,5-2 раза превосходит напряжение второго анода, что обеспечивает подход электронов ко всей поверхности фотомишени под прямым углом. Это обеспечивает равномерную фокусировку луча, и одинаковый исходный потенциал на всей поверхности мишени, что является одним из условий получения равномерного сигнала по всему полю изображения.

Фокусировка, отклонение и коррекция траектории электронного луча осуществляется **внешней магнитной системой**, состоящей из **длинной фокусирующей катушки ФК, отклоняющих ОК и корректирующих КК катушек**.

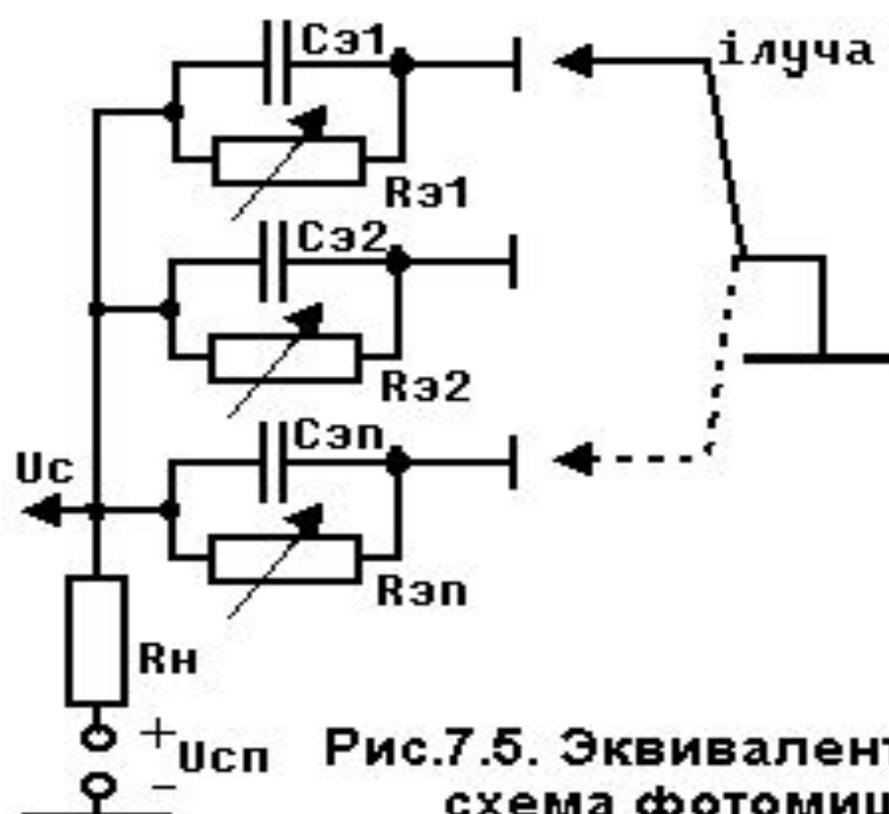


Рис.7.5. Эквивалентная схема фотомишени видикона

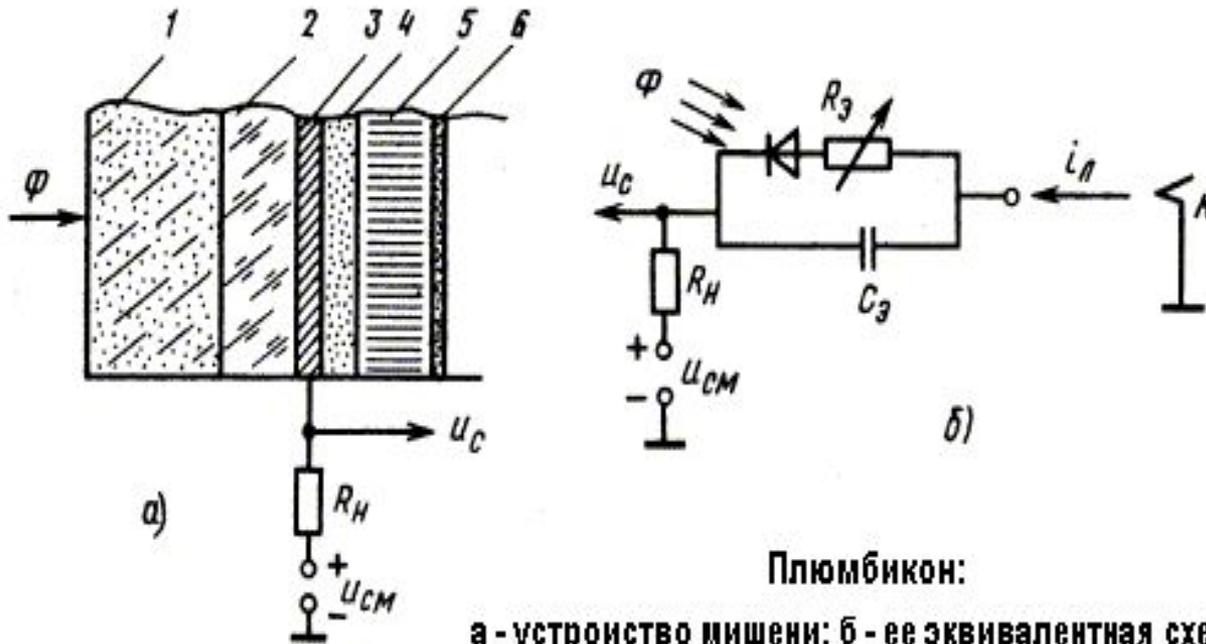
При проекции изображения на мишень, сопротивления $R_{\text{э}}$ оказываются различными. Возникает рельеф сопротивлений. При коммутации пучком медленных электронов потенциал правой стороны мишени устанавливается равным потенциалу катода = 0 (заземлен). Тогда под действием тока луча емкости заряжаются до потенциала сигнальной пластины. Между двумя коммутациями (период кадра) происходит разряд емкостей через элементарные сопротивления, а так как эти сопротивления разные (чем выше освещенность, тем меньше сопротивление), ток разряда будет тоже изменяться (меньше сопротивление – больше ток), и за это время оставшийся заряд на емкостях будет разный (большой ток – сильнее разрядится емкость – меньше потенциал останется).

Таким образом, рельеф сопротивлений преобразуется в потенциальный рельеф.

Недостатком видикона является его инерционность, которая проявляется в виде тянущегося следа за движущимися объектами.

Широкому использованию **видикона** в вещательном ТВ препятствует его инерционность, которая складывается из коммутационной и фотоэлектрической составляющих. Для уменьшения фотоэлектрической инерционности необходимо использовать материал с низкой концентрацией ловушек обеспечивающий прохождение носителей тока без рекомбинации, а для уменьшения коммутационной инерционности, необходимо уменьшить емкость элементарного конденсатора мишени за счет изменения его геометрии что приводит к уменьшению времени дозаряда этого конденсатора. Однако, при этом падает постоянная времени разряда $C\tau$, что приводит к неполному использованию эффекта накопления. Устранение этого недостатка возможно при замене **фоторезистивной мишени** на мишень **фотодиодного типа** с **p-i-n** переходом включенным в обратном направлении. Это обеспечивает малую инерционность фотоэффекта, высокое темновое сопротивление и близкую к линейной световую характеристику.

4. Прозрачный слой полупроводника n типа
5. Тонкий слой химически чистой окиси свинца, обладающий собстве
6. Прозра
- провод



1. Противоореольный фильтр.
2. Стекланная планшайба.
3. Сигнальная пластина – прозрачный слой чистой окиси свинца.
4. Прозрачный слой полупроводника n типа
5. Тонкий слой химически чистой окиси свинца, обладающий собственной проводимостью - i проводимости .
6. Прозрачный слой полупроводника p типа с большей проводимостью, чем слой 5.

Сигнальная пластина и слой n прозрачны. Слой i выполнен из кристаллов пластинчатой формы с размерами $0.1 \times 3 \times 0.05$ мкм, ориентированных параллельно направлению света. Такая структура мишени позволяет увеличить скорость дрейфа и уменьшить рекомбинацию носителей. Это позволяет увеличить толщину мишени не увеличивая фотоэлектрической инерционности, что позволяет уменьшить емкость и увеличить ее чувствительность за счет более полного поглощения света.

Из-за большой ширины запрещенной зоны i скорость тепловой генерации носителей тока мала, что уменьшает темновой ток и увеличивает темновое R мишени, а в момент коммутации $p-i-n$ переход смещается в обратном направлении, что дополнительно увеличивает $R_{эт}$.

Повышенное диффузное рассеяние света вызывает образование ореолов и бликов вокруг ярких деталей, поэтому на плумбикон устанавливается противоореольный стеклянный диск толщиной около 6 мм.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ПЗС

Развитие твердотельной технологии и технологии тонкопленочных покрытий позволило разработать твердотельные матричные фотоэлектрические преобразователи. Разработанные в 1969 г. **приборы с зарядовой связью (ПЗС)** позволили создать твердотельные ФЭП с числом элементов разложения, соответствующим стандарту ТВ вещания.

В основе ПЗС лежат свойства структуры металл - окисел-проводник, способной собирать, накапливать и хранить зарядовые пакеты на основных носителях в локализованных потенциальных ямах, образующихся у поверхности полупроводника под действием электрического поля.

Зарядовые пакеты возникают под действием светового излучения, а переносятся путем управляемого перемещения потенциальных ям в требуемом направлении. Таким образом, ПЗС работает как аналоговый сдвиговый регистр, способный собирать, накапливать и хранить зарядовую информацию. Основным достоинством является последовательный перенос зарядовой информации от элементов к единственному выходному устройству, преобразующему зарядовые пакеты в сигнал изображения, в результате чего формируется растр.

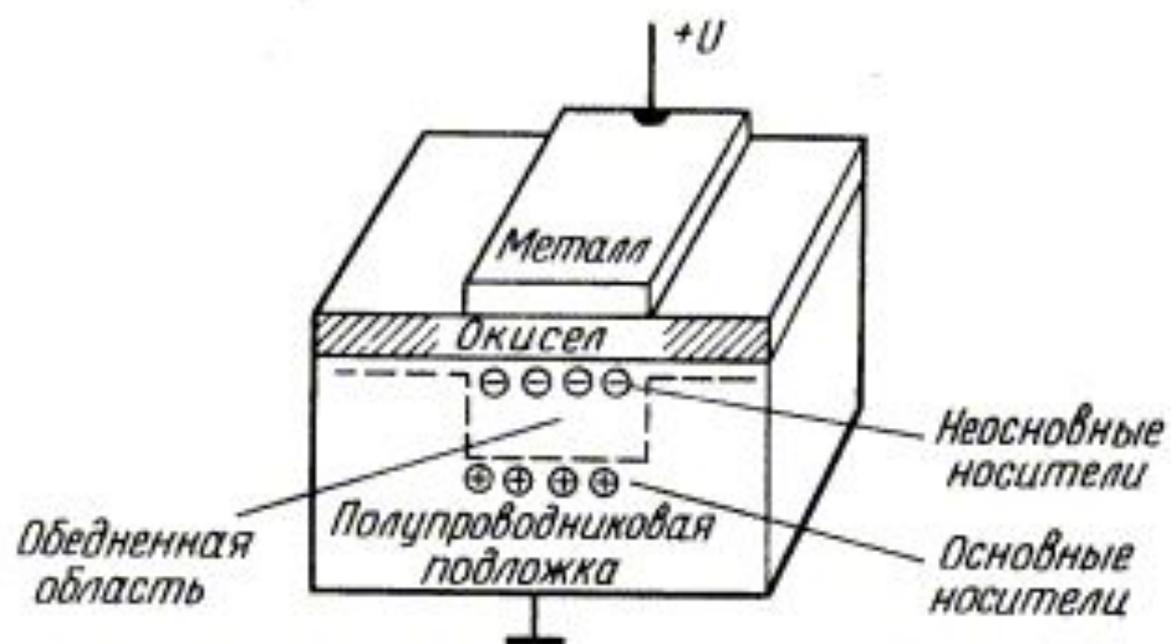
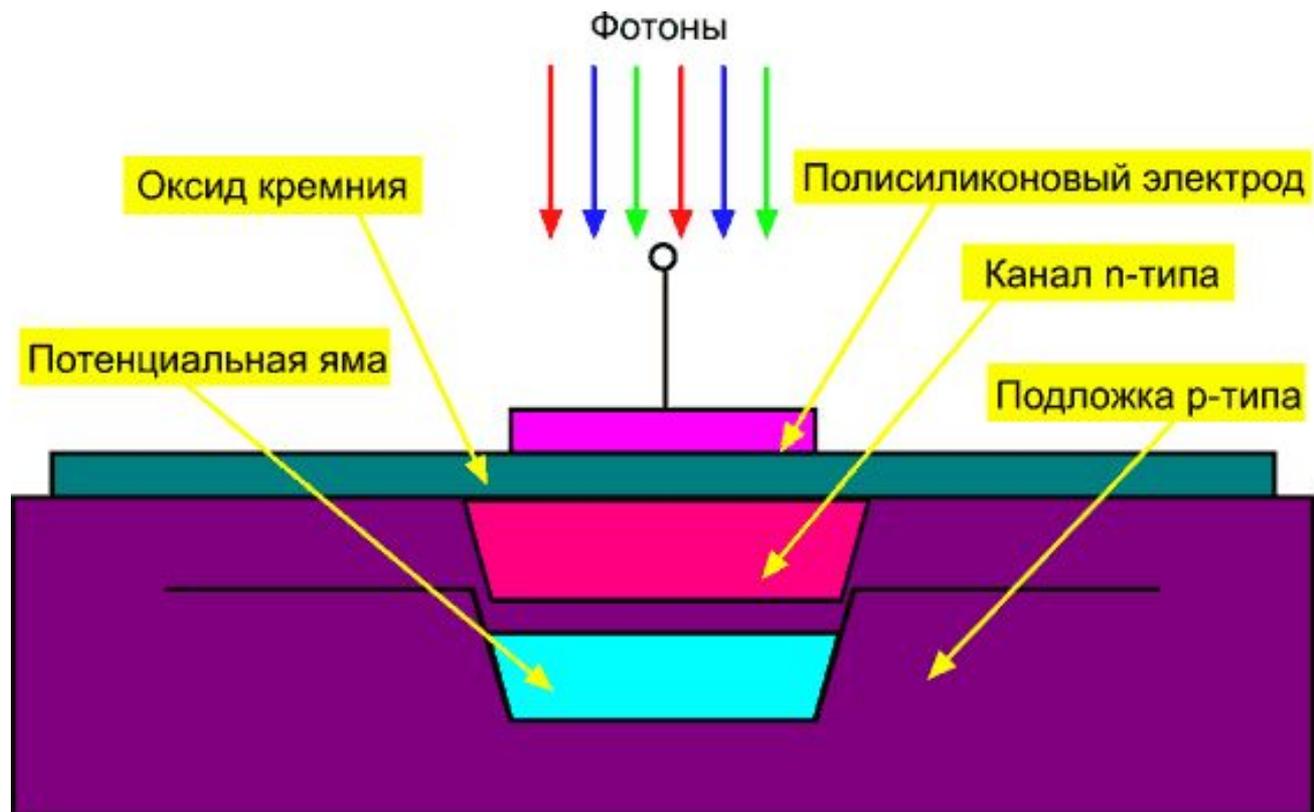


Рис.7.7. Конденсатор МОП структуры

Элемент ПЗС

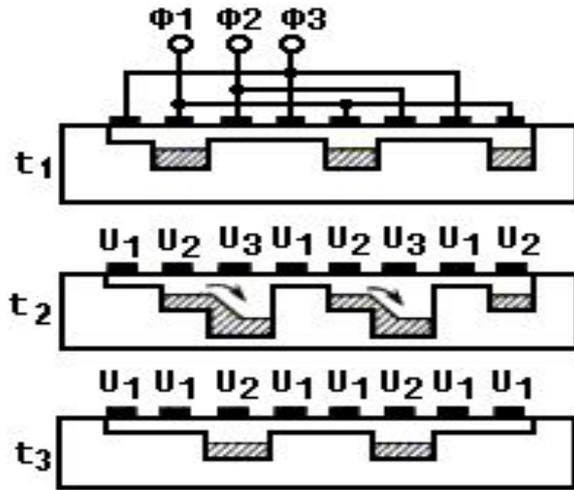


Основу ПЗС составляют конденсаторы МОП структуры одной из обкладок, которого служит металлический электрод, второй – полупроводниковая подложка, диэлектриком служит слой двуокиси кремния толщиной 0.01 мм.

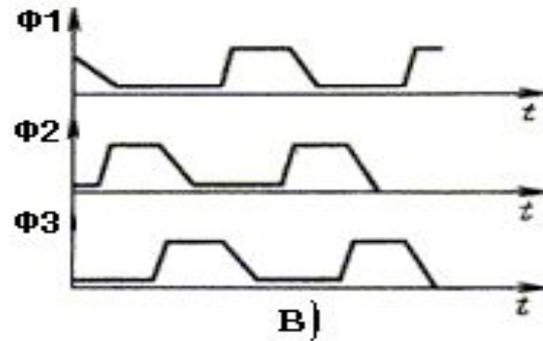
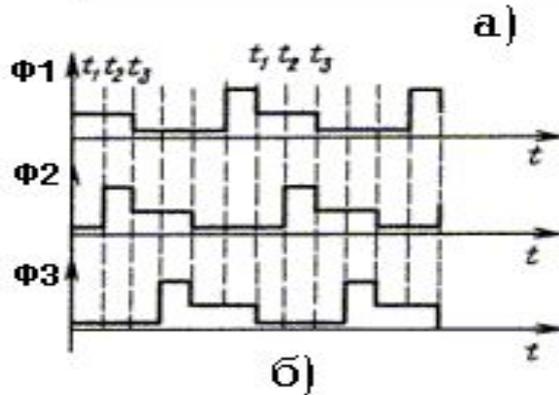
В полупроводнике дырочного типа основными носителями являются дырки, поэтому если приложить к металл электроду положительный потенциал, то дырки будут отталкиваться в глубь полупроводника и под электродами образуется область обедненная носителями – **потенциальная яма**, глубина которой зависит от напряжения на затворе, степени легирования полупроводника и толщины окисла. Т.е. изменяя U затвора можно эффективно управлять глубиной потенциальной ямы, однако, время жизни потенциальной ямы ограничено паразитным процессом термогенерации не основных носителей заряда (**ННЗ**), т.к. в кремнии всегда генерируются пары электрон-дырка. Под действием электрического поля основные носители зарядов (**ОНЗ**) «отгоняются» в толщину, а ННЗ постепенно заполняют яму.

Это паразитный процесс, а время заполнения ямы называется **временем релаксации**.

Принцип перемещения зарядовых пакетов в сдигном регистре ПЗС



а - трехфазный регистр;
б - идеальная тактовая диаграмма;
в - реальная форма управляющих импульсов



Принцип перемещения зарядовых пакетов в сдигном регистре ПЗС

Каждый электрод прибора подключен к одной из 3 тактовых шин **$\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$** . В такт (t_1) подано $+U_2$ в результате чего под этими электродами образуются потенциальные ямы, в которых могут накапливаться и хранится **ННЗ**. Время хранения равно времени действия U_2 , а режим работы ячейки под $\Phi 1$ наз **режимом хранения**. В t_2 на электрод $\Phi 2$ подается $+U_3$, значение которого в 1.5-2раза $>U_2$ (**U записи**). Под этими электродами образуются более глубокие ямы в которые перетекают электроны из электродов $\Phi 1$. Режим при котором электроны перетекают из одних из одних потенциальных ям в другие, называют **режимом записи**. В t_3 $U_{\Phi 1}, U_{\Phi 3}$ уменьшается до U_2 , что соответствует **режиму хранения** а $U_{\Phi 2}$ до U_1 , что предотвращает возврат зарядового пакета назад.

ФЭП на ПЗС делятся на 2 класса: линейные (одномерные) и матричные (двумерные).

Твердотельным аналогом передающей трубки являются матричные ПЗС, где сканирование осуществляется по координатам X и Y. Существует несколько способов считывания матричных ПЗС, однако, наиболее предпочтительным оказывается организация с кадровым переносом. В этом случае кроме фотоприемной секции, где происходит накопление зарядов, необходима еще секция хранения, в защищенной от света области. За время обратного хода по кадру накопленные заряды последовательно перемещаются в секцию хранения, и во время следующего кадра построчно перемещаются в секцию переноса заряда – регистр сдвига. Сдвиг строк в секцию переноса осуществляется во время обратного хода по строкам. Затем зарядовые пакеты строки поэлементно выводятся на выходное устройство.

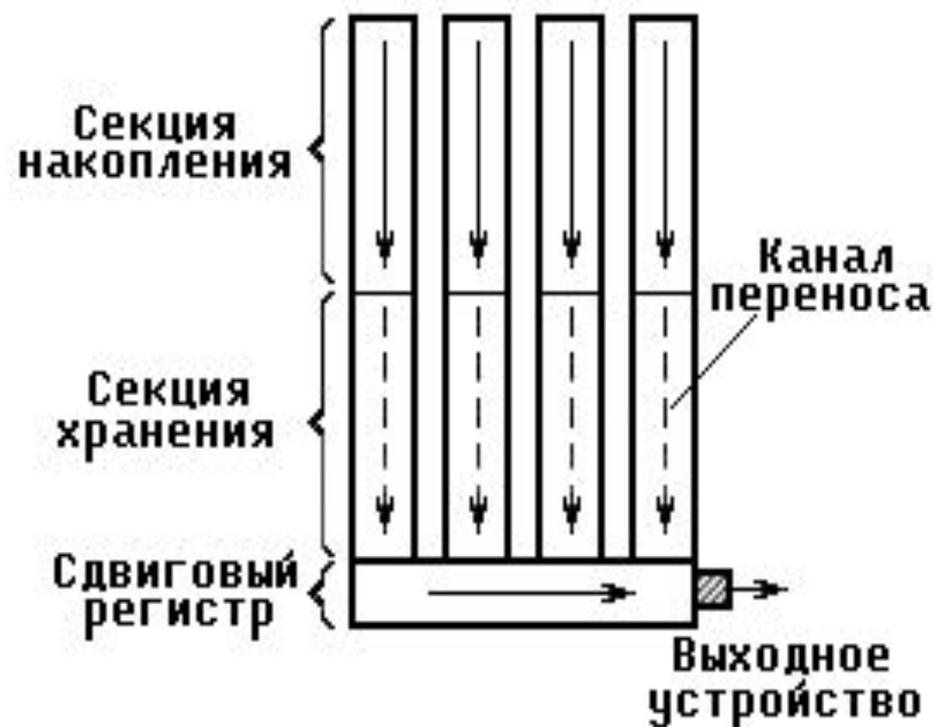
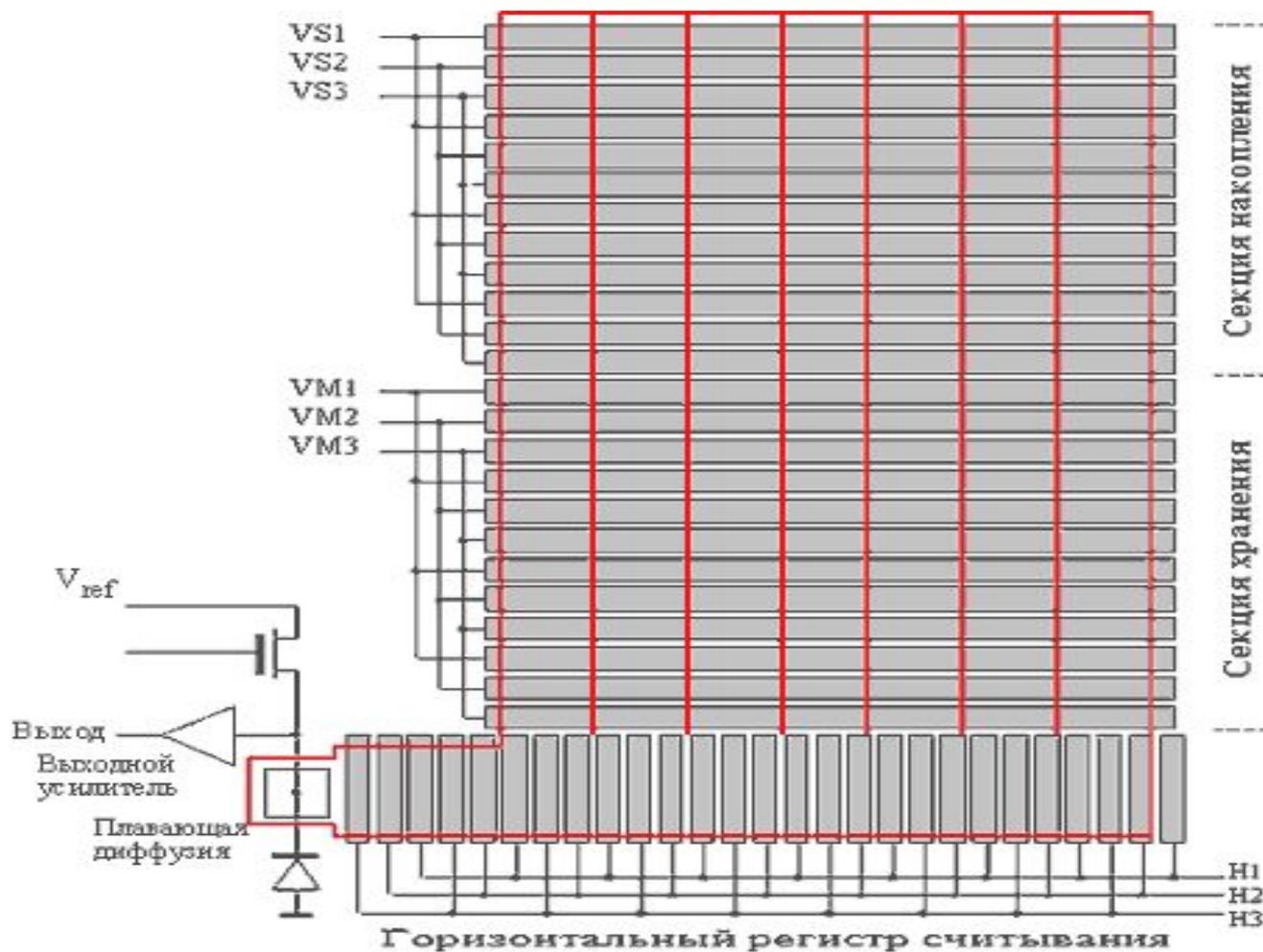
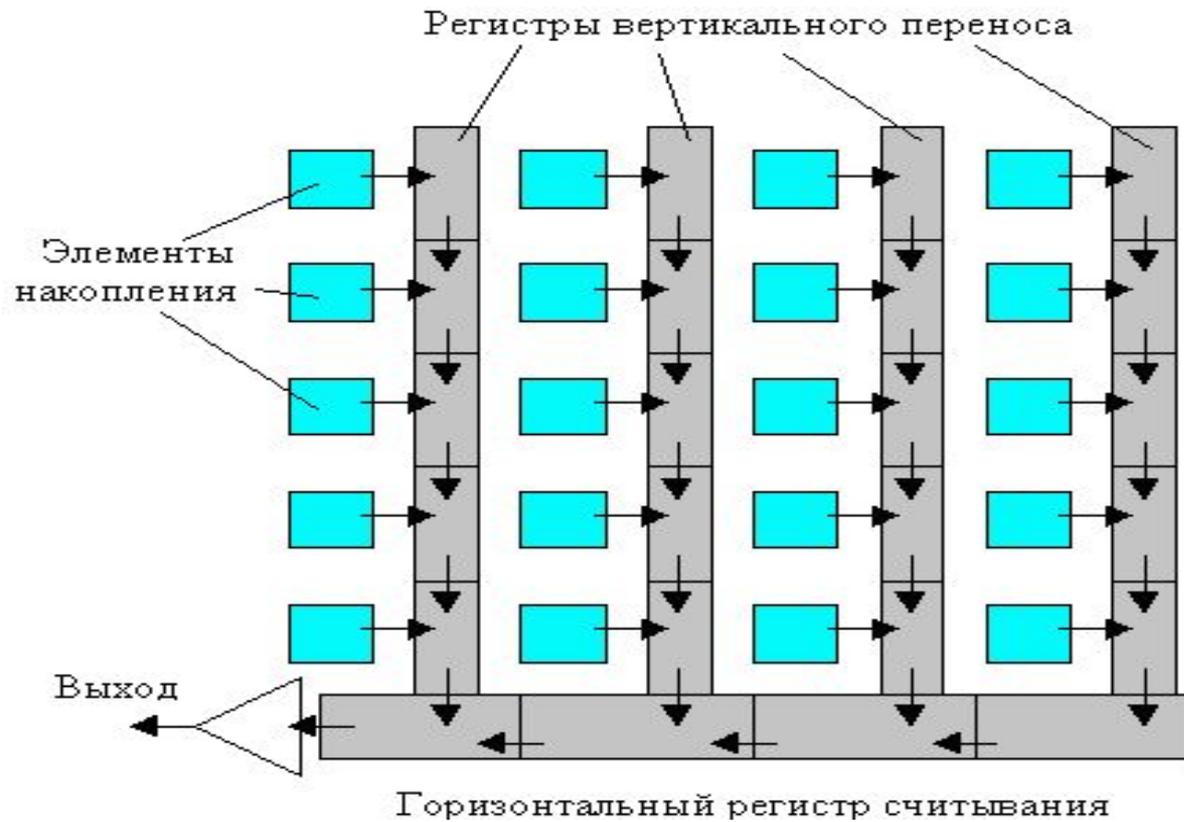


Рис.7.9. Способ организации покадрового считывания

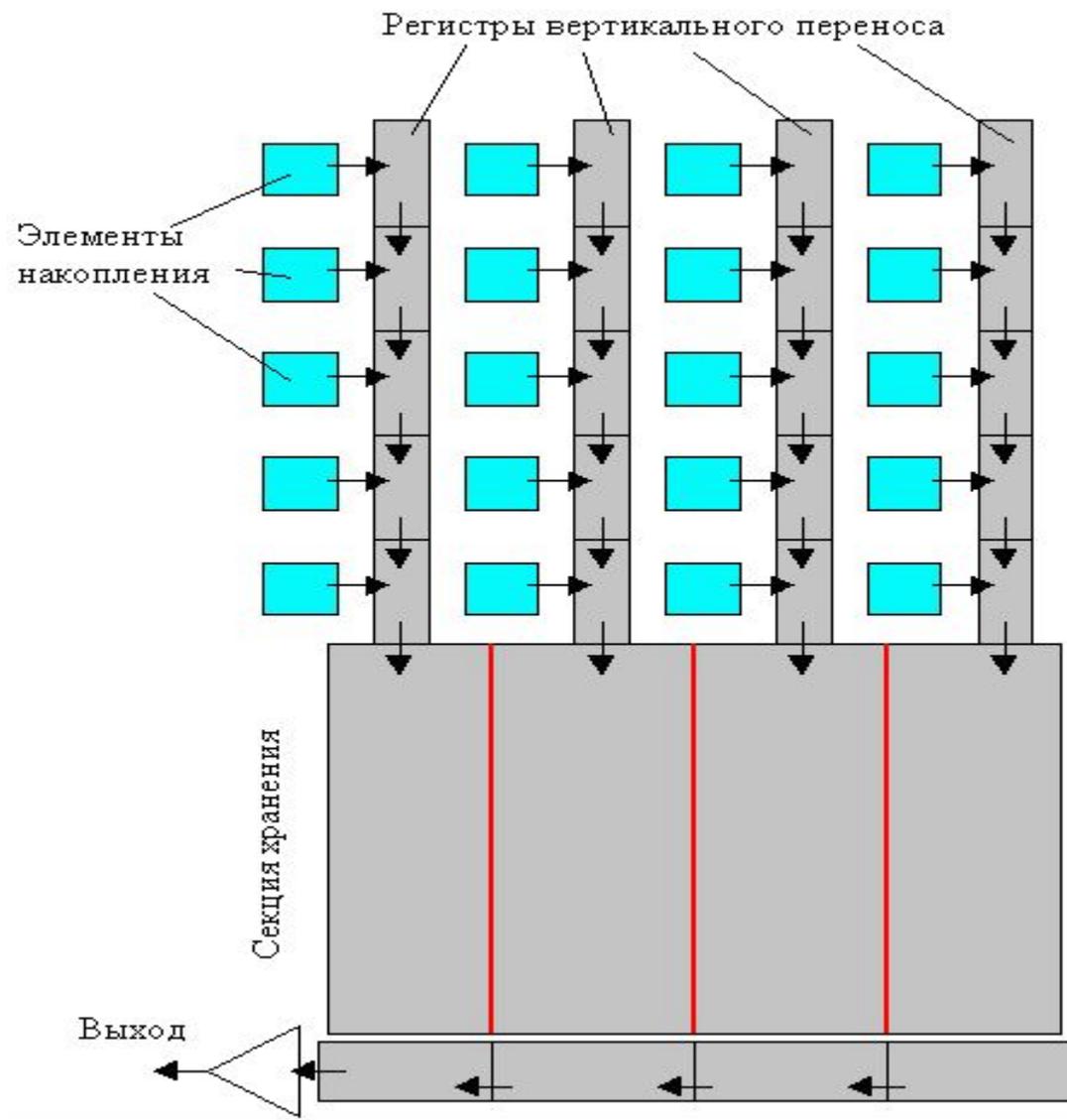
ПЗС с кадровым переносом заряда

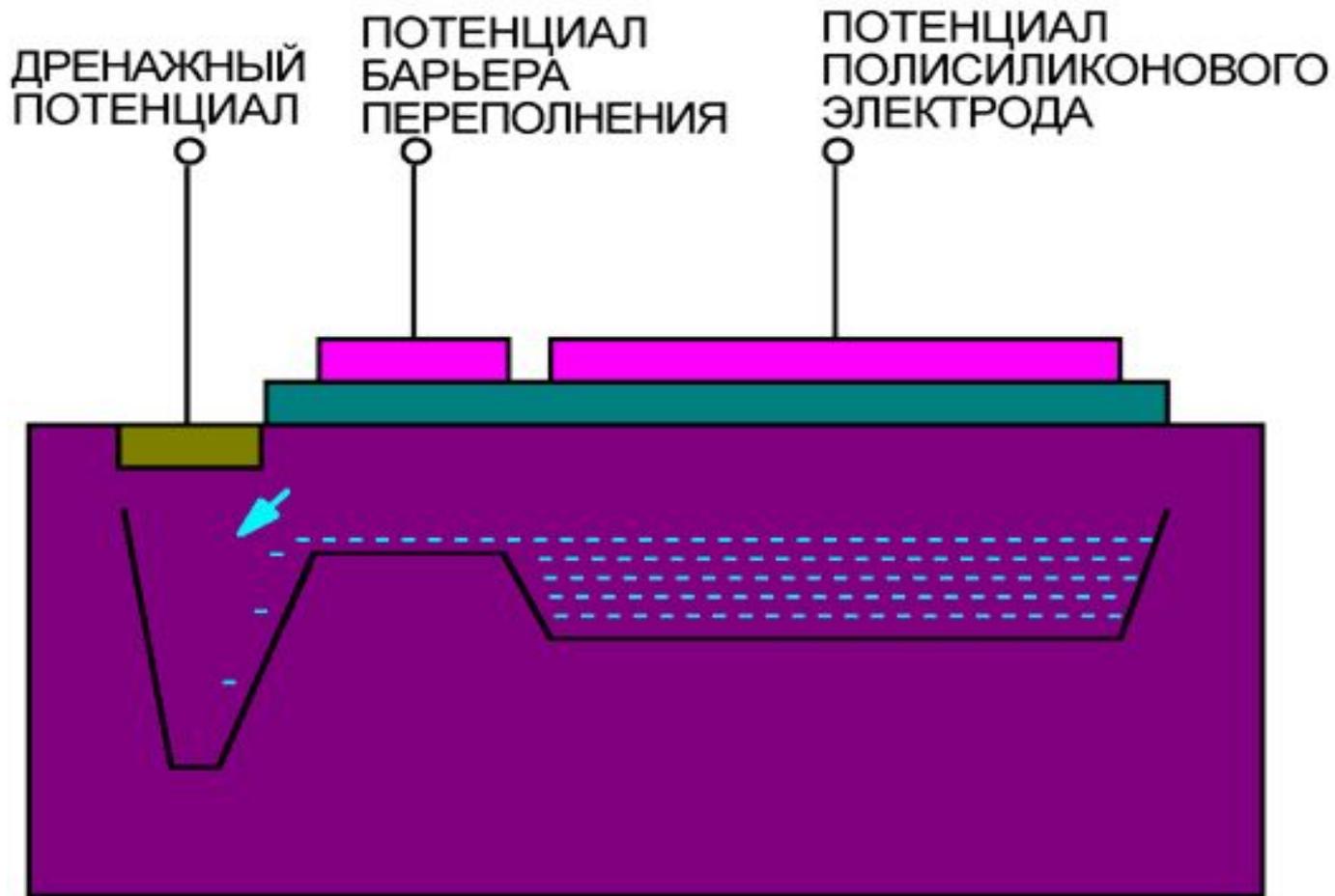


ПЗС со строчным переносом заряда

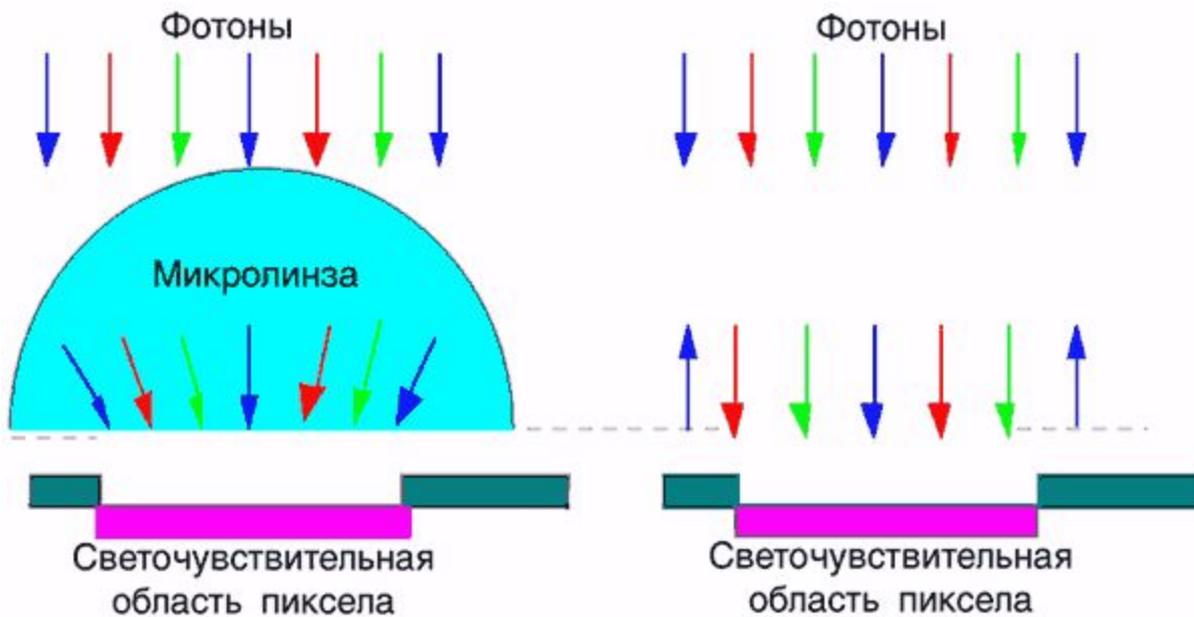


ПЗС со строчно-кадровым переносом заряда





Микролинзы ПЗС



- **Световая характеристика ПЗС в рабочем диапазоне освещенностей линейна, спектральная имеет подъем в длинноволновой области спектра и спад на 0,4-0,5 мкм за счет поглощения кремниевой подложкой. Для борьбы с этим в подложке делаются окна. Разрешающая способность определяется числом элементов, которое ограничено технологическими трудностями. Есть ПЗС -матрицы 1024x1024 элемента.**
- **Основным недостатком ПЗС матриц является их большая сложность изготовления, так как неисправность одного элемента вызывает потерю информации всей строки или столбца.**

Динамический диапазон

