

5. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

Использование одноэлементных фотоприемников для получения изображения приводит к необходимости сканирования (как правило, механического) по двум координатам. Это приводит к существенному усложнению аппаратуры, снижению ее технологичности и надежности. При наблюдении за быстро перемещающимися объектами возникают большие сложности при создании быстродействующего механического сканера. В видимой области спектра в 40-е годы были созданы электровакуумные приемные телевизионные трубки, основанные на считывании возникающих на мишени зарядов с помощью электронного луча. В конце 70-ых годов были созданы пировидиконы, позволяющие получать тепловое изображение в спектральной области от 2 до 20 мкм. Большие габариты электронно-лучевых трубок и необходимость применения высоковольтного питания, накаливаемого катода, отклоняющих и фокусирующих систем не позволяли создавать портативные передающие видеокамеры. Поэтому большое внимание уделялось разработке систем на основе многоэлементных приемников. Отметим, что применение матрицы приемников позволяет накапливать сигнал на одном элементе в течение кадра. Это позволяет в \sqrt{N} раз (N - количество элементов в матрице) увеличивать пороговую чувствительность матрицы по сравнению с системой механического сканирования, использующей одноэлементный приемник. Такое свойство матриц приемников очень важно в военных системах инфракрасного обнаружения пассивного типа и позволяет в десятки раз снизить минимальный разрешаемый температурный контраст.

Развитие многоэлементных приемников шло по пути создания, как линейек приемников, так и матриц. Применение однорядной линейки с большим числом элементов позволяет использовать сканирование только по одной координате, что значительно упрощает конструкцию аппаратуры. Потерю информации из-за наличия зазоров между элементами линейки компенсируют применением чересстрочной развертки.

Увеличение числа чувствительных элементов привело к необходимости создания эффективных внутренних систем коммутации. Если одно- или малоэлементные фотоприемники изготавливались без систем коммутации и усиления, то рост числа элементов до нескольких тысяч потребовал разработки твердотельных коммутаторов, последовательных линий передачи сигналов, а также систем их предварительной обработки и выдачи по одному каналу в виде видеосигнала.

5.1. Многоэлементные фотоприемники с координатной "матричной" выборкой.

Фотоприемники и с координатной выборкой представляют собой решетчатую организацию массива фотоячеек. Чувствительные элементы располагаются на пересечении строк и столбцов. Элементарная ячейка матрицы такого типа состоит из трех основных функциональных элементов: фоточувствительного элемента, накопителя заряда и ключа, управляемого импульсами опроса.

Преобразование фрагмента изображения в видеосигнал определяется процессами в обедненной области p - n -перехода. На фотодиод подается обратное смещение, при этом в емкости p - n -перехода накапливается заряд, величина которого однозначно связана со смещением. Схема включения фотодиода изображена на рис. 5.1. После снятия напряжения емкость начинает постепенно разряжаться током утечки. При наличии освещенности фототок быстрее разряжает емкость p - n -перехода. Накопленный емкостью перехода заряд Q и дифференциальная емкость фотодиода $C(U)$ связаны соотношением $C(U)=dQ/dU$. Ток разряда емкости описывается дифференциальным уравнением $I=dQ/dt=C(U)dU/dt$, интегрирование которого с соответствующими подстановками дает следующее соотношение:

$$\frac{U}{U_0} = \left(1 - \frac{t}{2T}\right)^2, \quad (5.1)$$

где U_0 - начальное напряжение на диоде; t - время освещения; $T = C_0 U_0 / I_{\phi}$, где емкость $C_0 = C(U)$ при $U = U_0$, а I_{ϕ} - фототок. За время T емкость объемного заряда p - n -перехода разряжается полностью. Одним из способов считывания информационного заряда является измерение напряжения. В качестве ключа может быть использован МДП-транзистор (см. рис. 5.2). Область истока такой структуры выполняет функцию фоточувствительного эле-

Режим работы фотодиода с накоплением заряда и использованием источника постоянного напряжения

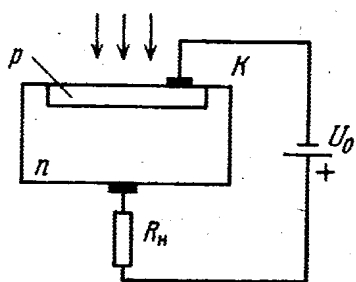
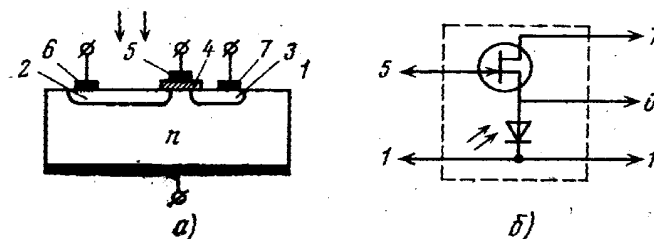


Рис. 5.1.

Схематическая конструкция (а) и принципиальная схема (б) МДП-фотодиода



1 - подложка с электрическим выводом; 2 - исток (p^+); 3 - сток (p^+); 4 - подзатворный диэлектрик; 5, 6, 7 - электроды затвора, истока и стока, соответственно.

Рис. 5.2.

мента, а канал играет роль собственного ключа или нагрузки. Подачей на затвор импульса управляющего напряжения подзатворную область переводят в проводящее состояние. Емкость фотодиода заряжается. После выключения импульса эта емкость разряжается фото- и темновыми токами. Фотоячейки такого типа помимо основной функции преобразования

Общая схема самосканирующей фотодиодной линейки

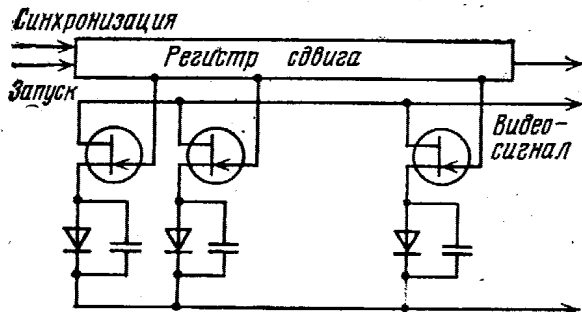


Рис. 5.3.

оптических сигналов в электрические могут также реализовывать функции коммутации, усиления электрических сигналов и др.

Линейные фоточувствительные структуры (линейки) содержат ряд фоточувствительных элементов с самосканирующей системой адресной выборки. Эквивалентная схема типичной самосканирующей фотодиодной линейки приведена на рис. 5.3. Регистр сдвига управляет последовательными адресными ключами.

Двумерные фотодиодные матрицы характеризуются двухкоординатной адресацией

Фотоячейка двумерной матрицы

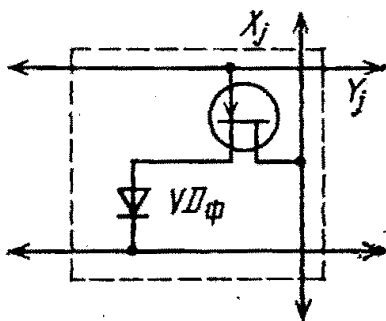


Рис. 5.4.

опроса фоточувствительных элементов (см. рис. 5.4). Сток и затвор МДП-транзистора соединены соответственно с вертикальной X_j и горизонтальной Y_j шинами, а катод фотодиода с общей шиной.

Шумы фотоприемников с координатной выборкой подразделяются на коррелированные и некоррелированные. Физические источники коррелированного шума следующие: гальваническая или емкостная связь фотоячеек по системе шин, а также по объему полупроводниковой подложки; неоднород-

ность физико-технологических и конструктивных параметров фотоячеек и др. Оценка порога чувствительности фотодиодных линеек и матриц с учетом некоррелированного шума дает значение порядка $4,6 \cdot 10^{-12}$ Дж.

Физические механизмы некоррелированного шума те же, что и в одноэлементных фоточувствительных устройствах. В фотодиодных матрицах с МДП-ключевыми транзисторами преобладает тепловой шум. Порог чувствительности, ограниченный этим шумом, составляет приблизительно $6 \cdot 10^{-15}$ Дж.

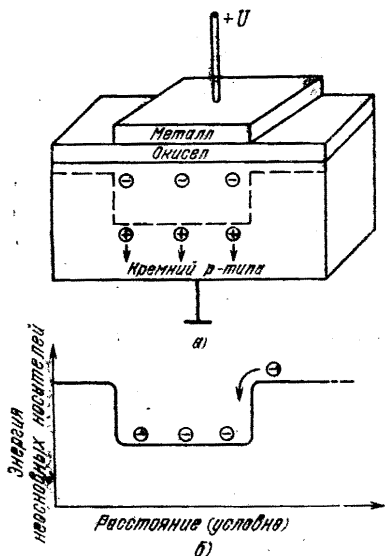
Основным недостатком многоэлементных фотоприемников с координатной выборкой является низкое соотношение сигнал-шум. Это обусловлено самим принципом сканирования, когда на большую емкость столбца считывается малый заряд одного элемента. Импульсные помехи через паразитные емкости попадают на вход матрицы, что приводит к неоднородности изображения.

5.2. Приемники изображения на приборах с зарядовой связью (ПЗС).

Приборы с зарядовой связью были изобретены в 1970 г. Основным фундаментальным отличием ПЗС явилась реализация принципа "передачи локализованного заряда от одной МОП-емкости к другой с помощью манипуляции электрическими потенциалами". Передача локализованных зарядов (зарядового "пакета") означает, что в процессе их переноса по цепочке МДП-структур не требуется осуществления на каждом шаге преобразования этих зарядов в потенциалы и обратного - в заряды. Такое преобразование осуществляется только на видеовыходе. Подобный принцип работы, прост и в идеале позволяет осуществлять высококачественную обработку информации.

Изобретатели ПЗС Бойл и Смит предложили для локализации заряда использовать МОП-емкости, а передачу локализованного заряда из емкости в емкость обеспечить за счет тесного соседства их друг с другом. На рис. 5.5 изображен основной элемент ПЗС -

Основной элемент ПЗС структуры
МОП-емкость



а - разрез МОП-структуры, смещенной в область обеднения; б - распределение энергии неосновных носителей, иллюстрирующее понятие "потенциальная яма"

Рис. 5.5.

МОП-емкость, образованная металлическим электродом, расположенном на тонком слое диэлектрика, покрывающим полупроводник. Для примера выбран кремний дырочного типа проводимости, а диэлектриком служит двуокись кремния толщиной около 0,1 мкм. Если к электроду приложить положительный потенциал, основные носители (дырки) отойдут от поверхности в объем. Под электродом образуется область, обедненная основными носителями. Глубина этой области будет зависеть от значения приложенного потенциала и от свойств МОП-структуры. В частности обедненная область будет простирается тем глубже, чем выше удельное сопротивление кремния и тоньше слой диэлектрика.

Неосновные носители (электроны) при приложении к электроду положительного потенциала будут, напротив, притягиваться к электроду, собираясь в обедненной области. Поскольку из обедненной области основные носители ушли в объем кремния, неосновные носители в этой области могут существовать, не рекомбинируя.

Эти явления можно проиллюстрировать энергетическими диаграммами. Одна из основных характеристик МОП-емкости - поверхностный потенциал, т.е. величина, на которую искривляются границы зон на поверхности кремний-окисел по сравнению с их положением в объеме. Поверхностный потенциал, отмеченный на рис. 5.5,а штриховой ли-

нией, оказывается различным для областей вне электрода и под положительно заряженным электродом. Распределение энергии неосновных носителей также будет различным

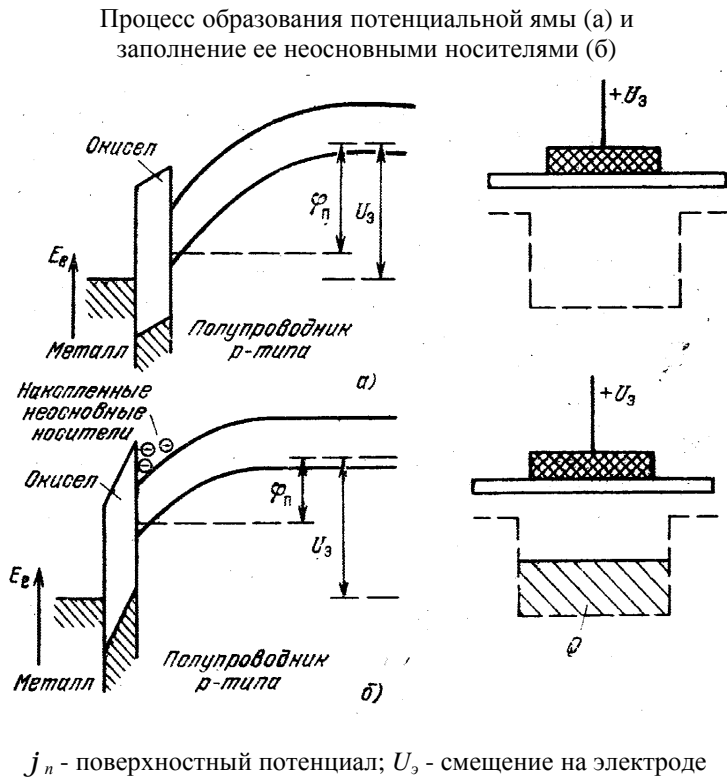


Рис. 5.6.

(см. рис. 5.5,б); под электродом образуется как бы яма (ее так и называют потенциальной ямой), в которую неосновным носителям энергетически выгодно "скатываться".

По мере того, как неосновные носители собираются в потенциальной яме под электродом, энергетические диаграммы МОП-структуры изменяются. На рис. 5.6,а показана диаграмма МОП-структуры в тот момент, когда на электрод только что было подано положительное смещение U_3 . Обедненная область (потенциальная яма) образовалась, но неосновные носители в ней еще не собрались. Рис. 5.6,б отражает картину накопления неосновных носителей. По мере того, как в потенциальной яме собираются неосновные носители, поверхностный потенциал j_n уменьшается и, в конце концов,

становится таким же, как и вне электрода; потенциальная яма заполняется. Величина поверхностного потенциала j_n определяется выражением

$$j_n = U'_3 + U_0 - \sqrt{2U'_3U_0 + U_0^2}, \quad (5.1)$$

где $U'_3 = (U_3 - U_{n3}) + Q/C_{ок}$; $U_0 = qN_{mn}e_0e_{mn}/C_{ок}$; $C = e_0e_{ок}/d_{ок}$; U_{n3} - напряжение плоских зон; Q - заряд неосновных носителей в потенциальной яме; $C_{ок}$ - емкость окисла на единицу площади; N_{mn} - концентрация примесей в полупроводнике; e_0 , $e_{ок}$, e_{mn} - диэлектрические проницаемости вакуума, окисла и полупроводника; $d_{ок}$ - толщина окисла.

Глубина обедненной области

$$x_d = \sqrt{\frac{2e_0e_{mn}j_n}{qN_{mn}}}. \quad (5.2)$$

Емкость электрода (последовательно соединенные емкости окисла и обедненной области)

$$C_3 = C_{ок} \frac{1}{1 + \sqrt{2j_n/U_0}}. \quad (5.3)$$

Обычно потенциал, прикладываемый к электроду, велик, т.е. $U_3 \gg U_{n3}$ и $U_3 \gg U_0$, тогда можно легко оценить максимальный удельный заряд, который может уместиться в яме:

$$Q_{max} \cong C_{ок} U_3. \quad (5.4)$$

На графиках рис. 5.7 показано, как уменьшаются

Зависимость поверхностного потенциала и
глубины ямы от величины заряда в яме

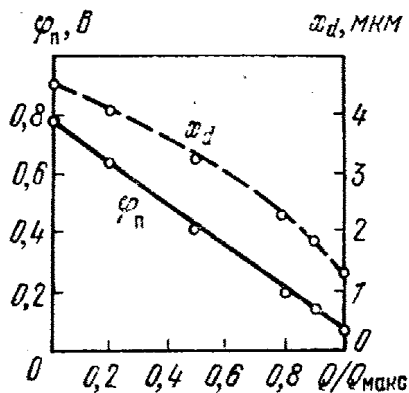
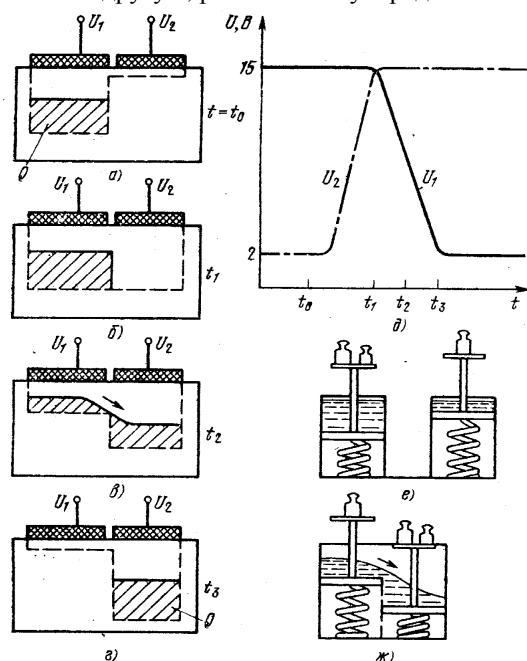


Рис. 5.7.

поверхностный потенциал и глубина ямы по мере накопления в ней неосновных носителей (т.е. по мере того, как Q приближается к Q_{max}).

Процесс переноса заряда из одной МОП-емкости в другую, расположенную рядом



а, б, в, г - стадии перетекания зарядов; д - изменение напряжений на электродах (во времени); е, ж - гидростатическая аналогия

Рис. 5.8.

нем равна отношению объема воды (заряда) к площади ванны (емкости электрода), а расстояние от уровня воды до верха ванны показывает поверхностный потенциал.

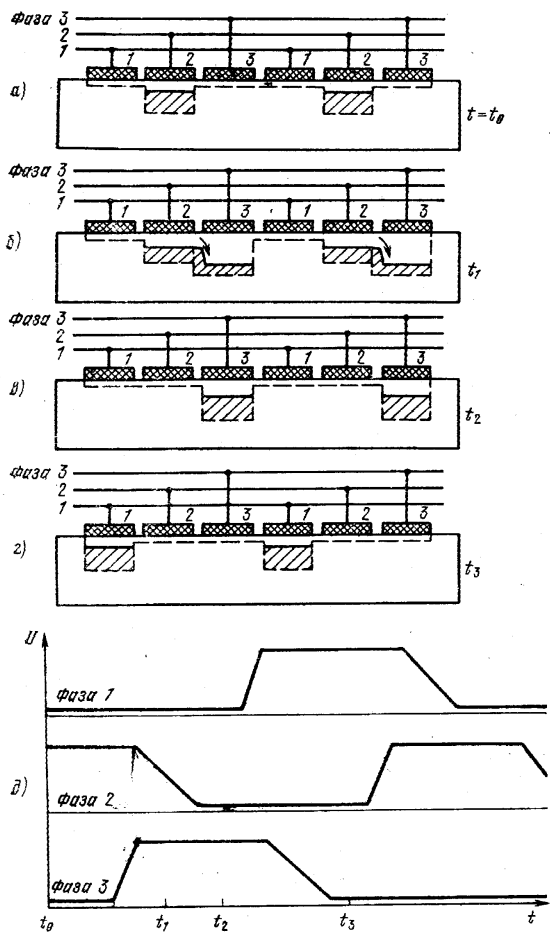
Расположим теперь две МОП-емкости рядом, как показано на рис. 5.8,а. Пусть к левой емкости приложен высокий положительный потенциал (10...15 В) и в образовавшейся потенциальной яме накопился некоторый заряд неосновных носителей Q ; на правом электроде потенциал отсутствует или невелик. Затем произведем переключение потенциалов так, чтобы высокий положительный потенциал был подан на правый электрод, а на левом потенциал понизился (рис. 5.8,д). Тогда под правым электродом образуется пустая потенциальная яма, готовая принять заряд из-под левого электрода (рис. 5.8,б). Глубина левой потенциальной ямы в результате того, что смещение на электроде понизилось, уменьшится (яма "схлопнется", говорят специалисты). Заряд перетечет из левой емкости в правую точно так же, как перетекает вода из полного сосуда в пустой (рис. 5.8,г). Если расстояние между МОП-емкостями увеличить, то из-за диффузии зарядов во все стороны в подготовленную правую яму доберется лишь часть носителей. Потому МОП-емкости стараются располагать как можно ближе друг к другу. На рис. 5.8,е ж показаны гидростатические аналоги пар изолированных и близко расположенных МОП-емкостей. Для объяснения явлений, возникающих при близком соседстве двух емкостей, придется принять, что в тех местах, где стенки ванн соприкасаются, они (стенки) как бы взаимно уничтожаются, а ванны объединяются. Как видно из рис. 5.8,ж, в правой ванне поршень опущен ниже (смещение больше) и вода (заряд) из левой ванны свободно перетекает в правую ванну, а может разлиться по обеим ваннам, так, что установится некий общий уровень.

Для передачи заряда (или пакета зарядов) по цепочке МОП-емкостей используют сдвиговые ПЗС регистры с 3-фазной электродной системой, показанной на рис. 5.9. Для направленного переноса зарядов необходимо на эти электроды в определенной последо-

При рассмотрении физических явлений в МОП-емкости полезна гидростатическая аналогия. МОП-емкость можно представить в виде сосуда, имеющего форму электрода, например, прямоугольной ванны, причем дно ванны подвижно наподобие поршня (см. рис. 5.8,е). Поршень "нагружается" приложенным к электроду потенциалом (с учетом потенциала плоских зон), а снизу подпирается пружиной, поднимающей поршень, как только потенциал уменьшается. Высота ванны над поршнем, таким образом, пропорциональна глубине потенциальной ямы при заданном смещении на электроде. Если смещение с электрода снять, поршень поднимется, но не до конца; оставшийся зазор будет отражать значения потенциала плоских волн. Полным аналогом зарядов явится вода, наливаемая в ванну. Высота столба воды над поршнем равна отношению объема воды (заряда) к площади ванны (емкости электрода), а расстояние от уровня воды до верха ванны показывает поверхностный потенциал.

вательности поочередно подавать положительные импульсы. Пусть в такой трехфазной системе высокий положительный потенциал подан на вторую фазу; на первой и второй фазах потенциал низкий (рис. 5.9,а).

Процесс накопления и переноса зарядов в 3-фазном ПЗС



а - накопление зарядов под электродом второй фазы, б - перенос зарядов под третью фазу, в - заряды находятся под электродами третьей фазы, г - заряды перенесены под следующие электроды первой фазы, д - временная (тактовая) циклограмма

Рис. 5.9.

Затем, когда под электродами второй фазы накопятся заряды, высокий потенциал с нее снимается и подается на одну из соседних фаз, например, на третью, расположенную справа. Заряды перетекут в пустые ямы справа; налево они двигаться не будут, так как на электродах первой фазы потенциал оставлен низким (рис. 5.9,б) На рис. 5.8,в видно, что перенос зарядовых пакетов вправо произойдет одновременно во всех элементах сдвигового регистра. Далее высокий потенциал с третьей фазы переключается на первую фазу, и все заряды одновременно перенесутся вправо на один шаг (рис. 5.9,г); затем с первой фазы на вторую и т.д. Последовательность смены потенциалов на фазах носит название временной фазовой (или тактовой) циклограммы (рис. 5.9,д).

Направленность переноса зарядов обеспечивается еще так называемыми стоп-каналами, которые не дают растекаться зарядовым пакетам в стороны и направляют их строго вдоль регистра. Стоп-каналы образуются с обеих сторон канала переноса узкими областями, легированными сильнее, нежели кремний в канале переноса. Хотя электроды располагаются поверх стоп-канальных областей, в них из-за высокого леги-

рования потенциальные ямы не образуются.

Световая инжекция неосновных носителей происходит при попадании в кремний фотонов с энергией, большей ширины запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны у кремния равна 1,12 эВ и, следовательно, при облучении в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного (примерно до 1,1 мкм) фотоны при поглощении будут образовывать электронно-дырочные пары. Возникающие заряды разделяются полем в обедненной области, и неосновные носители (электроны) станут накапливаться в потенциальной яме. Накопленный заряд будет пропорционален количеству фотонов и времени освещения (времени накопления). Таким образом, при фиксированном времени накопления зарядовый пакет несет информацию о том, какова освещенность вблизи данного электрода.

На рис. 5.10 показан простейший формирователь видеосигнала (ФВС), представляющий собой трехфазный сдвиговый регистр. С помощью объектива на поверхность регистра спроецирован тест-объект в виде полей с разной яркостью. Накопление генерированных светом носителей вначале происходит под электродами второй фазы,

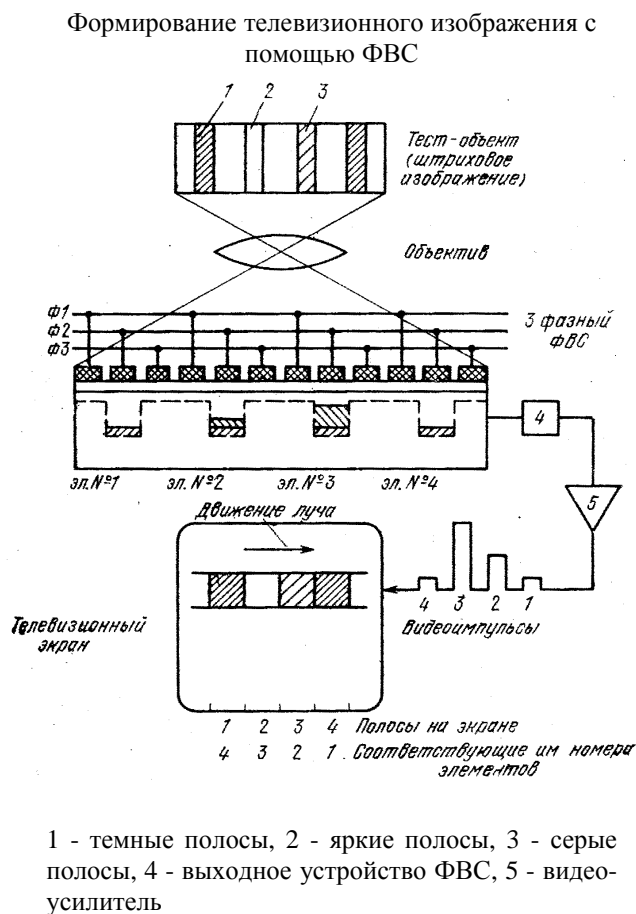


Рис. 5.10.

ство (ВКУ). Движение электронного луча в кинескопе ВКУ синхронизировано с движением зарядовых пакетов. На рис. 5.10 показано изображение полосок на экране ВКУ, соответствующие полям спроецированного на формирователь тест-объекта.

Для формирования двумерного изображения создается набор из линейных формирователей, образующий двумерную матрицу светочувствительных элементов. Простейший матричный формирователь, содержащий 10 линейных светочувствительных регистров по 10 элементов, показан на рис. 5.11. Каждый светочувствительный регистр соединен

Матричный формирователь видеосигнала, содержащий 10×10 элементов

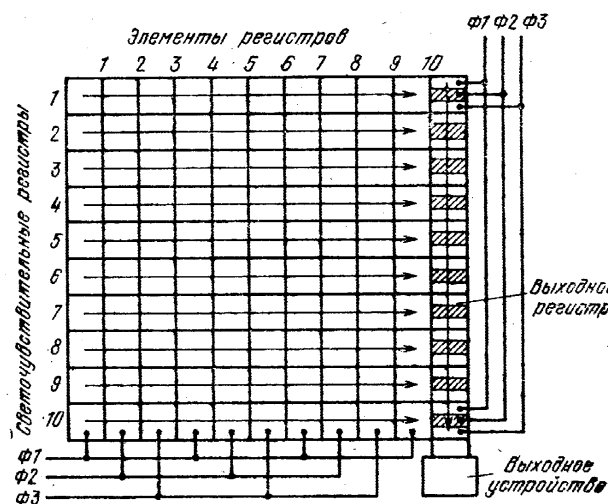


Рис. 5.11.

находящимися под высоким положительным потенциалом. За время накопления в потенциальных ямах появятся заряды, пропорциональные распределению освещенности на поверхности ПЗС. В элементе № 3, на который спроецировано яркое поле, заряд будет большим, в элементе № 2 (серое поле) - меньше, а в элементах № 1 и № 4 (темные поля) - накопятся только термогенерированные носители. Естественно, что термогенерированные носители попадут во все потенциальные ямы и составят паразитную добавку к информационным зарядам, создаваемым светом. Отношение заряда термогенерированных носителей к времени накопления называют темновым током. По окончании периода накопления зарядов под электродами второй фазы производится переключение фаз, и зарядовые пакеты сдвигаются к выходу регистра. На его выходе заряды преобразуются в импульсы тока или напряжения, которые усиливают и подают на видеоконтрольное устрой-

с элементом сдвигового регистра, служащего для вывода зарядовых пакетов из матрицы. Этот выходной сдвиговый регистр не является светочувствительным и выполняет только функции переноса. После накопления зарядовых пакетов, переключением фаз осуществляют их сдвиг на один шаг вправо. При этом крайние правые заряды перетекут в подготовленные потенциальные ямы выходного сдвигового регистра, например, под электроды второй фазы. После чего все элементы выходного сдвигового регистра оказываются заполненными. Приняв зарядовые пакеты, выходной регистр начинает переносить их на выход. Циклограммы работы современных телевизионных ПЗС

гораздо сложнее, что связано с необходимостью обслуживания трехцветных фоточувствительных элементов.

При создании ПЗС матриц, способных работать в инфракрасной области спектра, разработаны методы ввода сигналов в кремниевые ПЗС структуры, называемые прямой инжекцией зарядов. Для этого используется гибридная структура в виде "сэндвича", в которую входят инфракрасные приемники (фотодиоды или фоторезисторы) соединяемые с кремниевыми ПЗС-регистрами. Для фотоприемников с высоким сопротивлением, таких как фотодиоды на InSb или примесные фоторезисторы, может быть использован довольно простой входной элемент (прямая инжекция) для заполнения потенциальных ям ПЗС носителями, создаваемыми сигналом и фоновым излучением. Схематично структура с прямой зарядовой инжекцией (ПЗИ) показана на рис. 5.12. Анод фотодиода соединен с диффузионной областью p -типа кремниевой ПЗС-структуры. Потенциал V_g поддерживается

Входная ПЗС-структура с прямой инжекцией, иллюстрирующая связь между ИК-фотоприемником и входной диффузионной областью

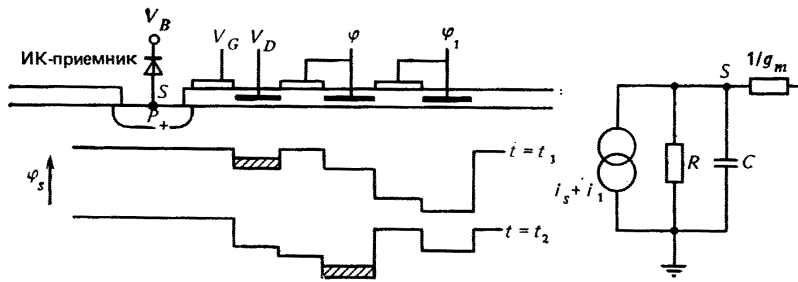


Рис. 5.12.

на фиксированном уровне для создания обеднения около входной диффузионной области. На второй электрод подается потенциал V_d , необходимый для создания потенциальной ямы, где собираются фотоносители. После завершения периода интегрирования накопленный заряд при изменении потенциалов фаз вводится в ПЗС-

регистр. Структуру ввода с прямой инжекцией удобно анализировать как полевой транзистор с заземленным затвором, где входная область p^+ , создаваемая диффузией, может рассматриваться как исток, V_g - как затвор, а потенциальная яма под V_d - как виртуальный сток. Напряжение "затвор-исток" фиксировано, и ток является функцией напряжения истока относительно затвора. Для схемы на рис. 5.12 постоянный ток "исток-сток" определяется падающим на приемник фоновым излучением.

Принципиальная трудность при использовании этого входного элемента состоит в том, что между ИК-приемником и ПЗС-регистром существует большое эффективное последовательное сопротивление. Поэтому на высоких частотах считывания емкость C будет шунтировать фототок и тепловой шум канала эквивалентного полевого МДП-транзистора может превысить дробовый шум, вызываемый однородным фоновым излучением. Это ограничивает верхнюю полосу частот считывания, при которой ПЗС-матрица еще работает в режиме ограничения чувствительности излучением фона. Применение примесных фоторезисторов с прямой инжекцией позволяет за счет коэффициента усиления фоторезистора увеличить ток инжекции. Также емкость C примесного фоторезистора может быть на порядок ниже емкости фотодиода, что приводит к увеличению частоты считывания.

В заключение отметим, что в видимой и ближней инфракрасной областях спектра созданы ПЗС матрицы с хорошими характеристиками. В средней ИК-области спектра усилия разработчиков направлены на получение более высоких частот считывания, поскольку фоновые засветки в этой области спектра достаточно большие. При этом основное внимание уделяется уменьшению емкости инфракрасных приемников излучения, используемых в гибридных матрицах с прямой инжекцией.