

Л. Лазовский

ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ: ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВЗГЛЯД НА МИР

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс, помимо очевидных приобретений (не всегда, впрочем, замечаемых неблагодарным человечеством), сопровождается также и безвозвратными потерями (тоже порой незаметными). Так, широкое распространение электронных калькуляторов привело к практически полному исчезновению неременного атрибута инженера многих предыдущих десятилетий – логарифмической линейки и кошмара школьников прошлых лет – таблиц Брадиса. А кто из читателей сможет вспомнить, когда он последний раз пользовался копиркой? Принтеры и ксероксы, стоящие едва ли не в каждой комнате любого мало-мальски солидного учреждения, избавили тысячи и тысячи машинисток (тоже ведь уходящая профессия!), да и нас, грешных, от этой головной боли.

Похоже, что вслед за этими символами своих эпох уходят и такие, казалось бы, незаменимые вещи, как кино- и фотопленка. Уходят под натиском ПЗС.

В этой статье я постараюсь рассказать, как устроены ПЗС (приборы с зарядовой связью; в английской аббревиатуре – CCD, charge coupled devices), как они возникли и развивались и какое место занимают сейчас. Разумеется, это изложение ни в коей мере не может претендовать на полноту или объективность (в силу ограниченных возможностей автора и его пристрастности), однако, надеюсь, позволит удовлетворить любопытство тех, кто всегда хочет знать, «а как оно устроено?»

В НАЧАЛЕ БЫЛО...

Вскоре после того, как был изобретен транзистор и, впоследствии, планарная технология, полупроводниковые приборы заменили вакуумные, либо были близки к этому почти во всех областях электроники, за исключением трех, еще долго не поддававшихся «кремнизации» – генераторные лампы для мощных передатчиков, высоковольтные приборы (кенотроны, рентгеновские трубки...) и приборы для ТВ – кинескопы и передающие трубки.

Я полагаю, нет необходимости объяснять, чем твердотельный приёмник изображения лучше, чем вакуумная передающая трубка. Достаточно сказать, что процессор Пентиум с его 5 миллионами транзисторов потребляет энергии меньше, чем один ламповый триггер, а о массогабаритных показателях, механической стойкости и сроке службы можно не упоминать. Ничего удивительного, что попытки создать твердотельный аналог передающей трубки – после изобретения компанией Texas Instruments планарной технологии в 1960 г. – не заставили себя ждать. Все такие разработки без исключения представляли собой матрицу фоточувствительных элементов (как правило, фоторезисторов или фототранзисторов) и схемы сканирования по вертикали и горизонтали (регистры сдвига на биполярных, а позднее и полевых транзисторах). Число элементов разложения этих датчиков не превышало 256 на 256, а качество изображения с них было удручающим – как из-за низкой чувствительности, так и, в первую очередь, из-за числа дефектов, свойственных тогдашнему уровню технологии. Весьма раздражающей для глаза была и структурная неоднородность (выглядевшая как полосатость), связанная с неоднородностью выходных емкостей шин считывания разных столбцов (или строк – в зависимости от организации конкретного прибора).

Луч света забрезжил, как это часто бывает, с неожиданной стороны. В 1970 г. сотрудники фирмы Bell Laboratories У. Бойл и Дж. Смит в поисках электрического аналога схем на цилиндрических магнитных доменах предложили и продемонстрировали экспериментально принцип зарядовой связи. Самый первый ПЗС представлял собой аналоговый (!) регистр сдвига на 8 элементов, изготовленный по p -МОП технологии с молибденовыми затворами, а вскоре появились и двумерные матрицы. Очень быстро стало ясно, что присущее ПЗС свойство самосканирования (об этом чуть дальше) устраняет необходимость в регистрах развёртки, создававших столько проблем в предшествующих типах датчиков.

Дальнейший рывок в технологии и параметрах ПЗС был связан с появлением скрытого канала переноса (об этом тоже ниже) и применением прозрачных электродов из поликристаллического кремния, что резко повысило чувствительность приборов. Уже в середине 70-х появились первые коммерческие матрицы производства фирм Fairchild, Bell и RCA в США и

Philips в Европе, совместимые с ТВ стандартом (т. е. имеющие разрешение по вертикали 476 или 576 строк соответственно для американского или европейского стандартов разложения и, по меньшей мере, 350 элементов разложения по горизонтали). А вскоре в Японии было налажено массовое производство недорогих ПЗС приемлемого качества для бытовой электроники – и на смену кинокамерам в массовом порядке пришли видеокамеры.

Революционное воздействие оказали ПЗС на астрономию, где их появление по степени влияния сравнимо разве что с тем, которое оказало применение в качестве средства регистрации фотопластинок вместо человеческого глаза (собственно, именно астрономия стала той первой отраслью человеческой деятельности, где фотозульсия уступила место кремнию). С другой стороны, и требования, предъявляемые астрономией, особенно космического базирования, к ПЗС, стимулировали развитие технологии их изготовления, и ныне приборы с числом элементов 4096 на 4096 и с квантовым выходом около 90% уже не являются экзотикой.

Ну и, наконец, микроскопия в медицине и биологии, компьютерное зрение и видеоконференции, системы ориентации космических аппаратов и считыватели штрих-кода, телефакс и сканер... – всё это тоже стало возможным и доступным благодаря ПЗС.

Итак...

КАК ЖЕ ОНИ УСТРОЕНЫ?

Для начала отметим, что ПЗС относятся к изделиям *функциональной электроники*, то есть их нельзя представить как совокупность транзисторов или же конденсаторов. Сам же принцип зарядовой связи весьма прост и основан на двух равно фундаментальных положениях: 1) одноимённые заряды отталкиваются, и 2) рыба ищет где глубже. Для начала представим себе МОП-конденсатор (сокращение от слов металл-окисел-полупроводник). Это то, что остаётся от МОП-транзистора, если убрать из него сток и исток, то есть просто электрод, отделённый от кремния слоем диэлектрика. Для определённости будем считать, что полупроводник *p*-типа, т. е. концентрация дырок в равновесных условиях много (на несколько порядков) больше, чем электронов.

Что будет, если на такой электрод (его называют затвором) подать положительный потенциал? Первый ответ, который приходит на ум, – «ничего не будет, поскольку диэлектрик не проводит электричества» – не совсем верен, ибо электрическое поле через диэлектрик проникать может. И когда электрическое поле, создаваемое затвором, проникая в кремний сквозь диэлектрик, отталкивает подвижные дырки; возникает обеднённая область – некоторый объём кремния, свободный от основных носителей. При параметрах полупроводниковых подложек, типичных для ПЗС, глубина этой области составляет около 5 мкм. Напротив, электроны, если они каким-либо образом (например, в результате *фотогенерации*) окажутся вблизи, притянутся к затвору и будут накапливаться на границе раздела окисел-кремний непосредственно под затвором, т.е. как бы сваливаются в яму, которая совершенно официально называется потенциальной ямой (рис. 1а). При этом электроны по мере накопления в яме частично нейтрализуют электрическое поле, создаваемое в полупроводнике затвором, и в конце концов могут полностью его скомпенсировать, так что всё электрическое поле будет падать только на диэлектрике, и всё вернётся в исходное состояние (так что действительно «ничего не изменилось» – почти!) – за тем исключением, что на границе раздела образуется тонкий слой электронов.

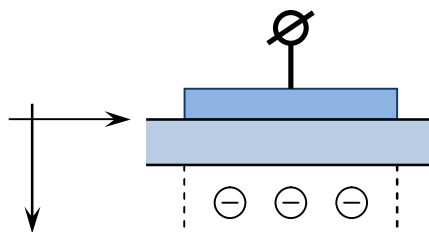


Рис. 1а. Образование потенциальной ямы при приложении напряжения к затвору

Пусть теперь рядом с затвором расположен ещё один, и на него тоже подан положительный потенциал, причём больший, чем на первый (рис. 1б). Так вот, если только затворы расположены достаточно близко, их потенциальные ямы объединяются, и электроны, находящиеся в одной потенциальной яме, *перемещаются в соседнюю*, если её потенциал выше (т.е. если она глубже), в полном соответствии с упомянутым выше фундаментальным принципом. Теперь уже должно быть ясно, что если мы имеем цепочку затворов, то можно, подавая на них соответствующие управляющие напряжения, *передать локализованный зарядовый пакет вдоль такой структуры*.

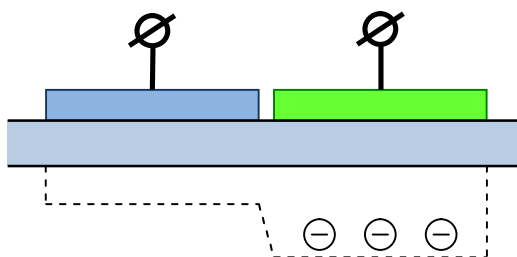


Рис. 1б. Перекрытие потенциальных ям двух близко расположенных затворов. Заряд перетекает в яму, в которой потенциальная яма глубже.

Замечательное свойство ПЗС – свойство *самосканнирования* – состоит в том, что для управления цепочкой затворов любой длины достаточно всего трёх тактовых шин. Действительно, для передачи зарядовых пакетов необходимо и достаточно трёх электродов: одного передающего, одного принимающего и одного изолирующего, разделяющего пары принимающих и передающих друг от друга, причём одноимённые электроды таких троек могут быть соединены друг с другом в единую тактовую шину, требующую лишь одного внешнего вывода (рис. 1в). Это и есть простейший трёхфазный регистр сдвига на ПЗС.

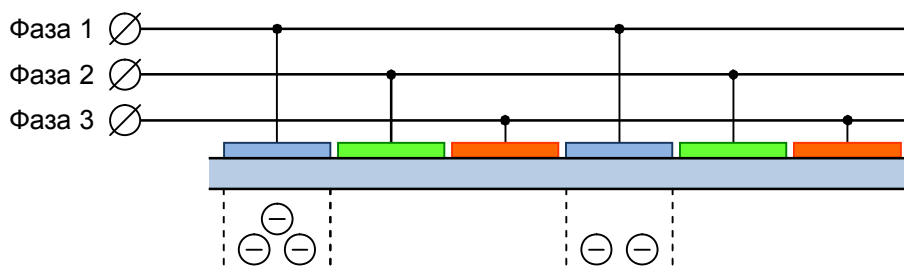


Рис. 1в. Простейший трёхфазный ПЗС-регистр. Заряд в каждой потенциальной яме разный!

Тактовые диаграммы работы такого регистра показаны на рис. 1г. Видно, что для его нормальной работы в каждый момент времени, по крайней мере на одной тактовой шине, должен присутствовать высокий потенциал, и по крайней мере на одной – низкий потенциал (потенциал барьера). При повышении потенциала на одной шине и понижении его на другой (предыдущей) происходит одновременная передача *всех* зарядовых пакетов под соседние затворы, и за полный цикл (один такт на каждой фазной шине) происходит передача (сдвиг) зарядовых пакетов на один элемент регистра.

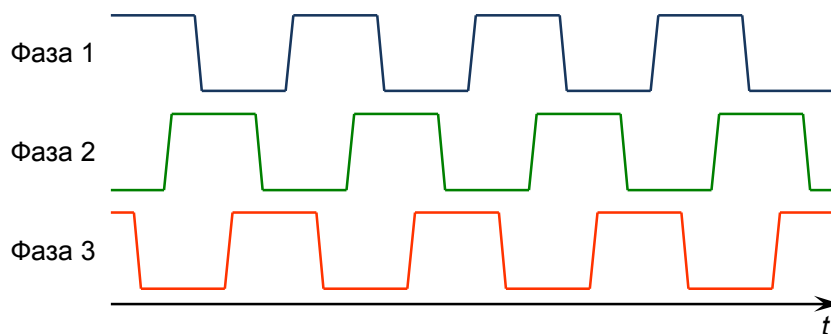


Рис. 1г. Тактовые диаграммы управления трёхфазным регистром – это три меандра, сдвинутые на 120°.

Для локализации зарядовых пакетов в поперечном направлении формируются так называемые стоп-каналы – узкие полоски с повышенной концентрацией основной легирующей примеси, идущие вдоль канала переноса (рис. 1д). Дело в том, что от концентрации легирующей примеси зависит, при каком конкретно напряжении на затворе под ним образуется обеднённая область (этот параметр есть не что иное, как пороговое напряжение МОП-структуры). Из интуитивных соображений понятно, что чем больше концентрация примеси, т. е. чем больше дырок в полупроводнике, тем труднее их отогнать вглубь, т. е. тем выше пороговое напряжение или же, при одном напряжении, тем ниже потенциал в потенциальной яме (если она вообще образовалась).

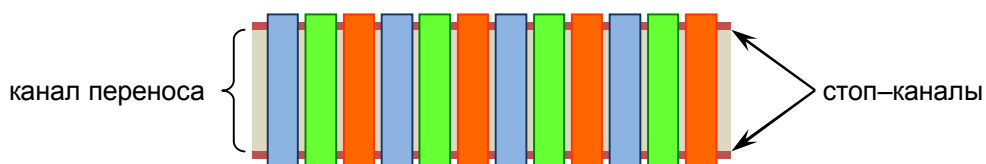


Рис. 1д. Вид на регистр «сверху». Канал переноса в боковом направлении ограничивается стоп-каналами

Понятно, что на полную передачу заряда из одной ямы в другую требуется время, так что при высокой тактовой частоте (а для ТВ стандарта она составляет в регистре считывания 7–13 МГц в зависимости от числа элементов по горизонтали) этого времени может и не хватить. Величина, показывающая, какая часть зарядового пакета передалась в следующий элемент ПЗС, называется *эффективностью переноса* ϵ .

Часто пользуются и связанной с ней величиной *неэффективности* $\eta = 1 - \epsilon$. Однако частотные ограничения – это ещё полбеды. Беда же в том, что для структуры ПЗС, обсуждавшейся до сих пор, все события происходят в очень тонкой (десятки ангстрем) области у границы раздела окисел-кремний. Сколь бы не была совершенной кристаллическая структура подложки, граница раздела – нарушение однородности кристалла, а из физики твёрдого тела известно, что всякое нарушение однородности кристаллической решётки приводит к возникновению разрешённых энергетических уровней в запрещённой зоне. Ясно что такое нарушение, как граница раздела, даром не проходит, и образующихся при этом энергетических уровней столько, что они образуют квазинепрерывный спектр, а значит, среди них есть такие, которые способны захватывать электроны из зоны проводимости (ловушки), причём время, через которое захваченный электрон вернётся обратно в зону проводимости, зависит от энергии ловушки (и абсолютной температуры). И получается, что, пока над данной точкой границы раздела нет заряда (а это когда-нибудь да так), часть ловушек освобождается, эмиттируя электрон обратно в зону проводимости, а когда придёт очередной зарядовый пакет – мгновенно заполняется, чтобы снова освободить захваченные электроны после того, как этот зарядовый пакет ушёл, так что освобождённые электроны попадают в *другой*, пришедший позднее, зарядовый пакет.

Более того, эмиссия электронов с ловушек обратно в зону проводимости, как всякий тепловой процесс, подвержена термодинамической флуктуации и привносит в распределение зарядов по ячейкам шум переноса. Кроме того, часть электронов, попавшая на глубокий уровень с длительным временем эмиссии, может вовсе не вернуться (это называется фиксированными потерями, и особенно заметно при переносе малых зарядовых пакетов). И наконец, через квазинепрерывный спектр ловушек происходит интенсивная генерация темнового тока (тепловой процесс спонтанного образования электронно-дырочных пар – к сожалению, процесс неизбежный при температуре, отличной от абсолютного нуля, а наличие уровней в запрещённой зоне резко повышает его вероятность).

Все эти неприятности, связанные с *поверхностным каналом переноса*, удалось полностью (или почти полностью) устранить инженерам фирмы Philips, в 1972 году предложившим ПЗС со *скрытым каналом*. Это решение, разом убивавшее несколько зайцев, оказалось настолько удачным, что с тех пор все ПЗС выпускаются только со скрытым каналом. От обычного он отличается тем, что в поверхностной области кремния создаётся тонкий (порядка 0,3–0,5 мкм) слой с проводимостью противоположного подложке типа и с концентрацией примеси такой, чтобы он мог полностью обедняться при подаче на него напряжения через соответствующий контакт. Что же происходит в такой структуре?

Для простоты предположим, что скрытый канал имеет однородную концентрацию примеси по всей глубине. При полном обеднении скрытого канала в нём остаётся нескомпенсированный заряд легирующей примеси (будем считать её примесью *n*-типа, т. е. остаются положительно заряженные атомы примеси).

Кроме того, обеднённая область будет простирается и в подложку, как и для ПЗС с поверхностным каналом, причём в подложке заряд нескомпенсированной примеси – отрицательный. Распределение потенциала при таком *ступенчатом* распределении объёмного заряда, как следует из уравнения Лапласа, будет *кусочно-параболическим* с максимумом потенциала, лежащем на некоторой глубине от границы раздела (фактически вблизи металлургической границы *pn*-перехода скрытый канал–подложка; см. рис. 2а).

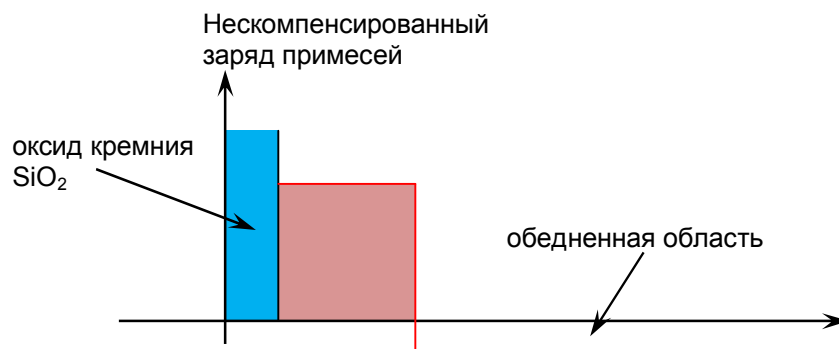


Рис. 2а. Распределение зарядов в скрытом канале

Всё. Задача решена. Ведь теперь сигнальные электроны собираются именно в области максимума потенциала, нейтрализуя по мере накопления атомы примеси (зелёная линия на рис. 2б; это, в частности, означает, что максимальная плотность накопленного заряда не может превышать поверхностной концентрации примеси – порядка $1,5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$), и *не достигают поверхности*. А значит, уходят все отрицательные моменты, связанные с взаимодействием зарядового пакета с границей раздела. Для дальнейшего изложения отметим ещё, что потенциал канала в максимуме пропорционален дозе легирования канала.

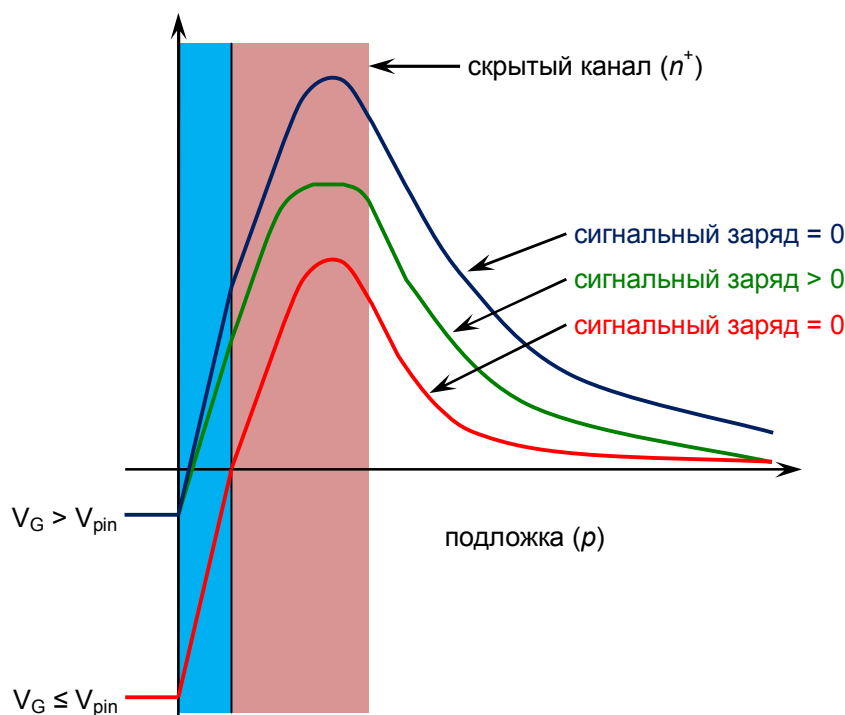


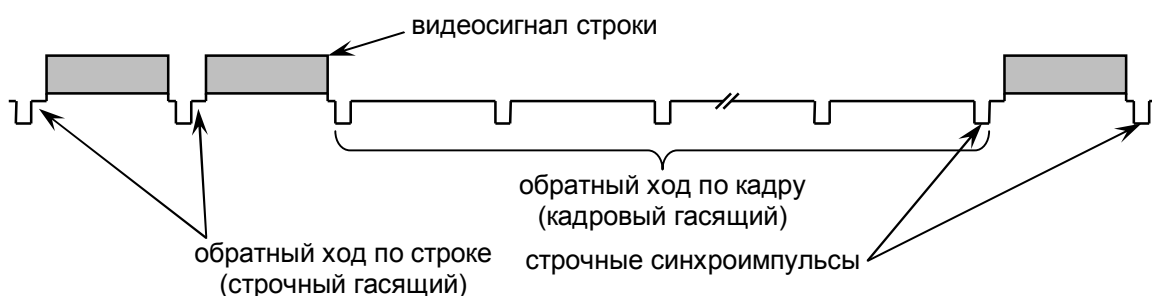
Рис. 2б. Распределение потенциалов в ПЗС со скрытым каналом: при отсутствии сигнального заряда, с сигнальным зарядом и при фиксации поверхностного потенциала

Степень совершенства кристаллической решётки в современных материалах весьма высока, и ныне эффективность переноса в ПЗС со скрытым каналом (собственно, далее речь будет идти только о них) достигает в лучших приборах потрясающих величин 99,9999% (или $\eta = 10^{-6}$ на перенос), т. е. после тысячи переносов искажения от неэффективности составляют 0,1%. Достигается это не только из-за крайне низкой плотности ловушек в объёме полупроводника, но и из-за того, что перенос происходит на некотором удалении от затворов, а значит, становятся заметными двумерные эффекты – электрическое поле одного затвора проникает под соседний, создавая тем самым дрейфовую составляющую переноса (тянущее поле), что вытягивает заряд гораздо быстрее, чем просто тепловая диффузия, так что частотные ограничения эффективности в диапазоне частот, характерном для телевизионных матриц, практически незаметны.

Отметим ещё одно отличие ПЗС со скрытым каналом от ПЗС с поверхностным каналом: уровни управляющих напряжений для них биполярные, т. е. напряжение барьера – отрицательное.

Причём при некотором его значении потенциал на границе раздела достигает нуля и дальше изменяться не может, так как дырки из стоп-канала заполняют поверхность, закорачивая её на стопор и экранируя канал от дальнейшего изменения электрического поля затвора. Это явление называется *фиксацией поверхностного потенциала* (pin) и используется в ПЗС с виртуальной фазой и т. н. приборах MPP (multi-pin phase), о чём мы ещё поговорим. И ещё: скрытый канал *невозможно закрыть*; как только наступает фиксация, дальнейшее изменение потенциала канала прекращается.

Теперь, прежде, чем рассказать о том, как из одного регистра сделать двумерную матрицу, несколько слов о том, как, собственно, выглядит стандартный телевизионный сигнал черно-белого телевидения. Мы не будем углубляться в детали того или иного ТВ стандарта, а рассмотрим общие принципы формирования сигнала.



Посмотрим на этот рисунок, где схематично изображён ТВ сигнал. Он содержит видеосигналы отдельных строк, разделённые интервалом обратного хода по строке (строчный гасящий интервал), необходимым для того, чтобы электронный луч как в кинескопе, так и в передающей камере (вспомним, что этот стандарт возник достаточно давно, в эпоху вакуумных приборов) успел вернуться к началу следующей строки. Во время этого интервала подается и строчный синхроимпульс (он формируется не самим датчиком изображения, а замешивается в сигнал электронными схемами камеры). Уровень синхроимпульсов принят за 0 В, уровень черного в видеосигнале составляет 0,33 В, уровень гасящего – 0,3 В (30 мВ разницы образуют т. н. защитный интервал), максимальный уровень видеосигнала (уровень белого) – 1,00 В. Когда переданы сигналы всех строк одного поля, начинается формирование кадрового гасящего интервала. Строчные синхроимпульсы в это время продолжают формироваться, чтобы не сбивать схемы строчной развёртки кинескопа (в реальности их частота на короткое время, равное 2,5 длительности строки, удваивается, а полярность инвертируется, чтобы обозначить кадровый синхроимпульс), а видеосигнал не формируется. Затем, по окончании кадрового гасящего, начинается прямой ход по кадру для следующего поля. По принятому, например, в Европе стандарту период строчной развёртки составляет 64 мкс, длительность прямого хода по строке – 52 мкс, длительность обратного хода по строке – 12 мкс, а длительность кадрового гасящего – 25 строк. При этом в каждом поле имеется 312,5 строки, из которых 287,5 – активные, т. е. имеющие видеосигнал (полстроки возникает из-за того, что полное число строк в кадре для чересстрочной развёртки нечётное – 625).

Теперь вернёмся к структуре двумерной матрицы ПЗС. Простейший её вариант изображён на рис. 4а. В нём можно выделить два вертикальных регистра сдвига на ПЗС, образующие секцию накопления и секцию хранения с равным числом строк (каждая строка секции образована одной тройкой электродов), горизонтальный регистр сдвига и выходное устройство. Рассмотрим подробнее работу такой структуры.

В течение времени прямого хода по кадру секция накопления стоит, т. е. на неё подаются неизменные напряжения, формирующие потенциальные ямы только под одним электродом каждой тройки, скажем, под электродом первой фазы (VS1), причём потенциальные ямы образуются во всех элементах всех строк секции. По горизонтали отдельные *ячейки накопления* отделены стоп-каналами (выделены на рисунке красным цветом). Изображение, проецируемое на секцию накопления, вызывает фотогенерацию – образование электронно-дырочных пар. При этом фотогенерированные электроны остаются в потенциальной яме, дырки же, соответственно, уйдут в подложку или в вдоль поверхности в стоп-каналы. Таким образом, под действием света в ячейках накапливается *зарядовый рельеф*, т.е. в каждой ячейке собирается заряд, пропорциональный её освещённости и времени накопления.

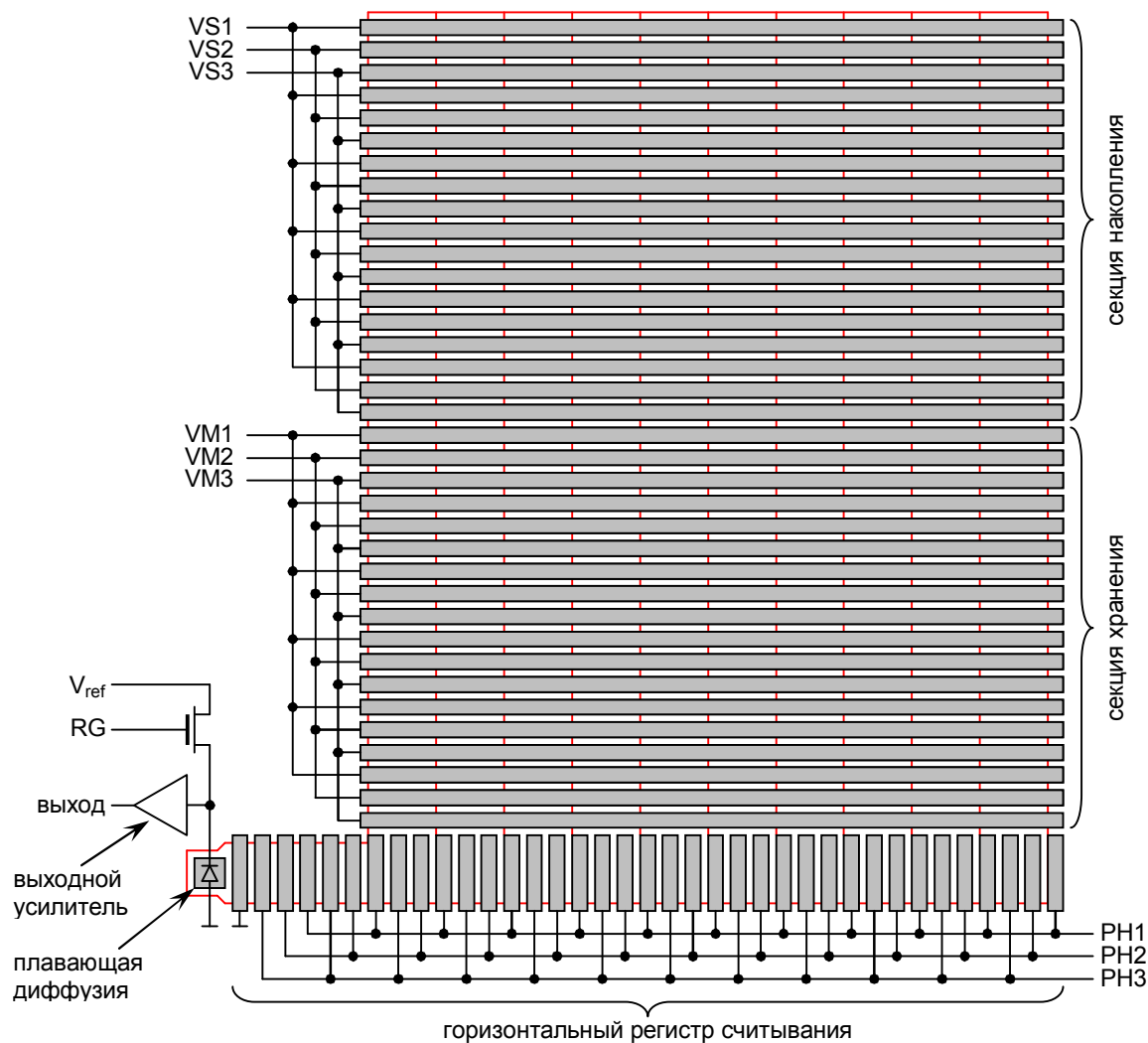


Рис. 4а. Простейшая структура двумерной матрицы ПЗС

По окончании прямого хода по кадру на обе секции подаются тактовые импульсы, вызывающие *синхронный* перенос заряда, при этом важно (и это показано на рисунке), что обе секции образуют непрерывный регистр сдвига. После числа тактов, равного числу строк в каждой секции (напомним, что каждая строка образована тремя электродами), весь накопленный зарядовый рельеф целиком переместится в секцию памяти, закрытую от света, а секция накопления будет очищена от заряда. Этот перенос секции в секцию происходит достаточно быстро (фактически он занимает малую часть времени обратного хода по кадру). Теперь, во время следующего цикла накопления (это следующее поле кадровой развёртки), секция накопления накапливает следующий кадр изображения, а из секции памяти заряды построчно, во время обратного хода по строке, передаются в горизонтальный регистр (каждый элемент регистра имеет зарядовую связь с соответствующим столбцом секции памяти, и за один раз передаётся одна строка), и затем выводятся в выходное устройство регистра за время прямого хода по строке, формируя видеосигнал. О выходном устройстве мы подробнее поговорим ниже.

Сразу отметим одно важное обстоятельство. Первые матрицы выглядели именно так, как показано на рисунке, с электродами, сформированными из металла (молибдена). Понятно, что для обеспечения зарядовой связи и возможно полного переноса заряда от затвора к затвору зазор между ними не мог быть большим, что приводило к крайне низкой чувствительности: действительно, почти вся площадь элемента оказывалась непрозрачной для света. Кроме того, при ширине зазора 2 микрона и суммарной его длине для всей матрицы *несколько метров* весьма вероятно замыкание металлических фаз друг на друга, что приводит к потере работоспособности матрицы.

Радикальным выходом стало предложенное в 1974 г. К. Секеном и М. Томпсеттом из Bell Labs использование электродов из поликристаллического кремния, прозрачного почти во всём видимом диапазоне. В таких приборах для формирования трёхфазной системы электродов используются три последовательно наносимых на подложку уровня поликремния, каждый для

своей фазы, которые после формирования электродного рисунка окисляются. Чтобы при окислении поликремния не изменялась толщина подзатворного диэлектрика, в современных приборах он делается двухслойным – окисел + нитрид кремния (Si_3N_4). Первые же приборы с поликремниевыми затворами превзошли по чувствительности вакуумные трубки и даже фотоэмульсию. Кроме того, выращенный на каждом слое поликремния изолирующий окисел (см. рис. 5а) резко снизил вероятность межфазного замыкания, а межфазный зазор уменьшился до 0,2 мкм – толщины межфазного окисла.

Теперь, мне кажется, настало время поговорить о достоинствах и ограничениях ПЗС вообще и данной структуры в частности. Разумеется, общие преимущества перехода от вакуумных приборов сразу к ИС высокой степени интеграции очевидны и не нуждаются в комментариях. Остановимся на менее очевидных (а для непосвящённых, возможно, и просто новых) моментах.

Прежде всего отметим *жёсткий растр*. В трубках растр создавался сканирующим электронным лучом, и его геометрическое качество зависело от массы факторов – линейности напряжений развёрток, стабильности питающих напряжений, температурных эффектов и т. д. В твердотельных приборах растр задаётся с высокой точностью в процессе изготовления структуры прибора, так что геометрические искажения получаемого изображения определяются только качеством оптики.

С жёсткостью растра связаны и такие достоинства, как отсутствие *микروفонного эффекта* (т. е. изменения параметров электровакуумного прибора из-за акустического воздействия) и нечувствительность к *магнитным полям* – а ведь искажения в трубках, если не принимать специальных мер, могли возникать даже от изменения её положения относительно магнитного поля Земли!

Ещё одно достоинство – отсутствие *эффекта выжигания*. В трубках чрезмерно яркий свет (например, случайно попавший в поле зрения яркий источник света или, не приведи бог, Солнце), приводил к выжиганию – длительному, а иногда и необратимому изменению параметров фотокатода – и изображение этого источника (причём негативное) ещё долгое время можно было наблюдать, даже не открывая объектив... Ещё один неприятный эффект, свойственный трубкам (кстати, и фоторезисторным матрицам) и полностью отсутствующий в ПЗС – *инерционность*. Многие, вероятно, видели хвост, тянущийся за изображением яркой лампы при панорамировании камеры. Именно так проявляется инерционность трубки – даже после исчезновения освещённости данной точки фотокатода сигнал с неё не спадает мгновенно. В матрицах ПЗС накопленный сигнальный заряд *полностью* выводится при переносе кадра – и к началу следующей экспозиции секция накопления как новенькая.

По сравнению с твердотельными приборами с координатной адресацией (КА) ПЗС сильно выигрывают в однородности сигнала, так как *все* зарядовые пакеты детектируются *одним* усилителем (вспомним, что в приборах с КА каждый столбец имеет *свой* усилитель со своим коэффициентом усиления). Помимо одинакового для всех зарядовых пакетов коэффициента преобразования заряд-напряжение, усилитель ПЗС характеризуется и значительно меньшим по сравнению с матрицами с КА шумом (это связано с величиной ёмкости преобразования, о чём мы ещё поговорим).

И ещё одно достоинство по сравнению с конструкцией, о которой речь пойдёт ниже: вся площадь секции накопления является фоточувствительной, т. е. коэффициент заполнения (*fill factor*) равен 100%. Эта особенность делает приборы данной организации монополистами в астрономии и вообще везде, где идёт борьба за чувствительность.

При всей несомненной простоте, у матриц с рассмотренной организацией (они называются *ПЗС с кадровым переносом*) есть один существенный недостаток – собственно, сам кадровый перенос (КП).

Тактовая частота, подаваемая на секции во время КП, составляет, как правило, несколько сот кГц (редко 1–2 МГц), что связано с большой ёмкостью фаз секций (до 10 000 пФ) и тем, что сами электроды имеют распределённые параметры (RC), и тактовые импульсы при их высокой частоте могут просто не дойти до середины электрода. Раз так, то КП занимает существенное время – доли мс. Если теперь учесть, что во время КП секция накопления остаётся освещённой, то яркие участки изображения успевают дать вклад в чужой зарядовый пакет даже за то короткое время, когда он проходит через них. Так на сигнале появляется *смаз* – вертикальный след от ярких участков изображения размером во весь кадр. Для борьбы с ним применяются разные ухищрения. Так, в *малокадровых системах* (прикладные системы с низкой кадровой частотой; яркий пример, астрономия, где время накопления составляет порой часы) используется механический затвор, или же, если есть возможность, просто отключают источник света. В *цифровых камерах* для

компенсации смаза используются достаточно простые алгоритмы обработки изображения (отдельно запоминается картинка смаза – её можно получить, например, при нулевом времени накопления – и затем она вычитается из «суммарного» изображения). Однако радикально проблема смаза решается в приборах с межстрочным переносом (МП), завоевавших доминирующее положение на рынке бытовой видеотехники (см. рис. 4б). В отличие от матриц с КП, функции накопления заряда и его переноса здесь разделены. Заряд из элементов накопления (как правило, фотодиоды – они тоже обладают ёмкостью и способны накапливать заряд!) передаётся в закрытые от света ПЗС-регистры переноса, т. е. секция переноса как бы вставлена в секцию накопления.

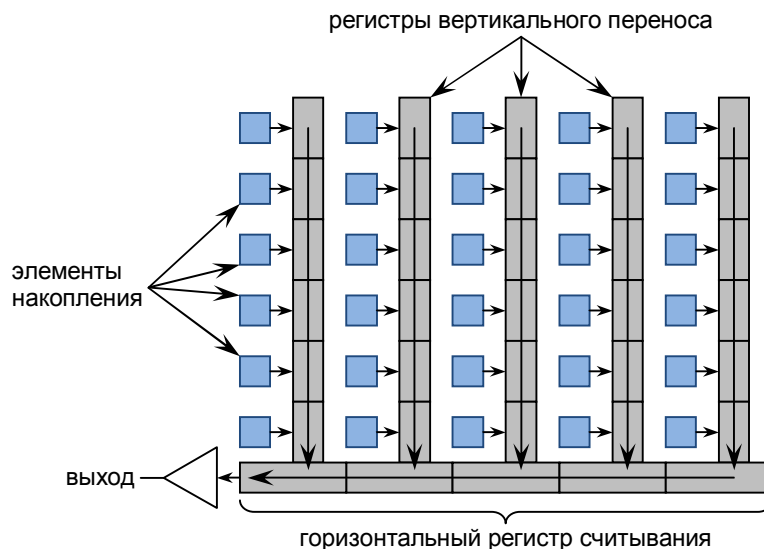


Рис. 4б. Приборы с межстрочным переносом. Весь накопленный заряд перемещается в закрытые от света вертикальные регистры за один перенос

Теперь перенос зарядового рельефа всего кадра происходит за один такт, и смаз, связанный с переносом, не возникает. Чтобы побороть ещё и искажения, возникающие из-за попадания в каналы переноса носителей, генерируемых в глубине подложки (если только не применяется фильтр ИК отсечки – а в видеокамерах он всегда применяется), к матрице с МП добавляется ещё одна секция памяти с соответствующим числом элементов (рис. 4в). Смаз в такой матрице со строчно-кадровым переносом (СКП) пренебрежимо мал.

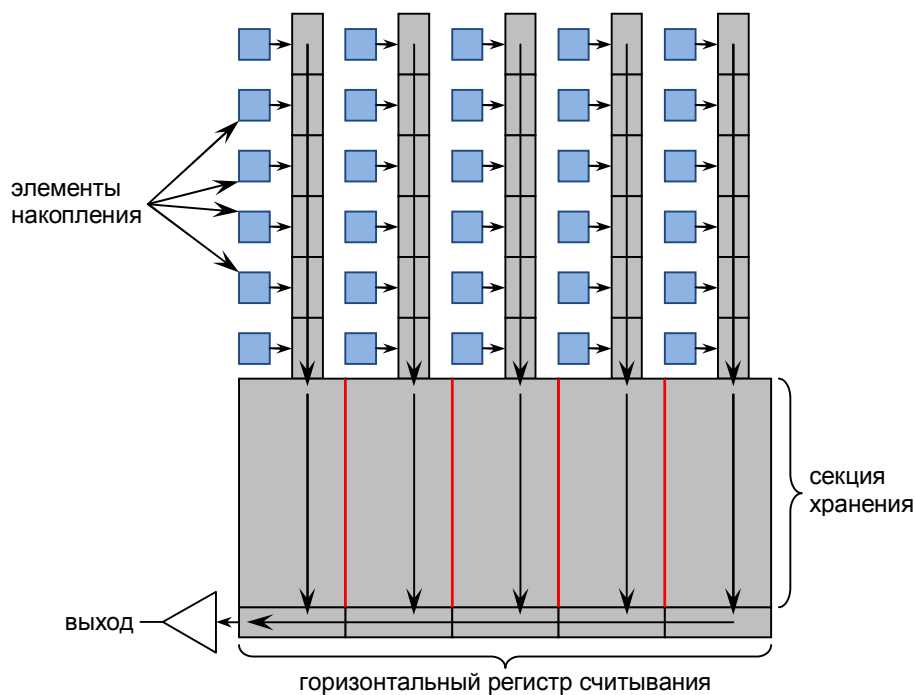
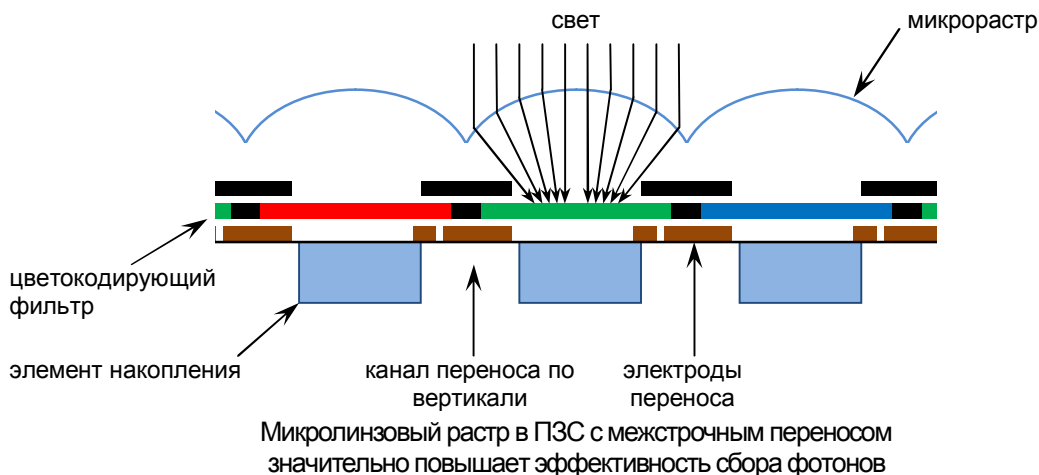


Рис. 4в. Структура матрицы ПЗС со строчно-кадровым переносом

По сравнению с матрицами с КП фактор заполнения в матрицах с МП или СКП примерно вдвое меньше, так как около половины площади фоточувствительной поверхности закрыто от света. Чтобы повысить эффективность сбора фотонов, используется микрорастр – массив небольших линзочек. Он формируется очень просто: на поверхность пластины с уже сформированными структурами матрицы наносится слой оптической легкоплавкой пластмассы, из которого методом фотолитографии вырезаются изолированные квадратики, лежащие над каждым элементом. Зазор между отдельными квадратиками невелик. Затем пластина нагревается, пластмасса подплавляется и поверхность отдельных квадратиков приобретает близкую к сферической форму, фокусируя приходящий на её поверхность свет точно на фоточувствительный элемент матрицы. Получается вот что:



ЧТО ОНИ УМЕЮТ?

Перейдём теперь к рассказу о параметрах и характеристиках ПЗС. Прежде всего остановимся на их спектральных характеристиках – зависимости выходного сигнала от длины волны, или, что эквивалентно, *квантовом выходе* – количестве фотоэлектронов на один фотон падающего излучения.

Спектральная характеристика (СХ) ПЗС определяется, причём мультипликативно, двумя факторами – прохождением света через электродную структуру и фотогенерацией, вызванной поглощением света непосредственно в полупроводнике (внутренний квантовый выход). Начнём с последнего.

Поглощение света в полупроводнике описывается *коэффициентом поглощения* – величиной, обратной длине, на которой интенсивность излучения падает в e раз. Далее, фотогенерацию вызывают только фотоны с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны – около 1,2 эВ (что соответствует длине волны чуть больше 1,05 мкм – это ближний ИК диапазон). Фотоны с большей длиной волны просто не поглощаются и соответственно не дают вклада в выходной сигнал, а длина $\sim 1,05$ мкм оказывается красной границей фотоэффекта в кремнии. При уменьшении длины волны коэффициент поглощения постепенно растёт; так при $\lambda = 1$ мкм свет затухает в e раз на 100 мкм, при $\lambda = 0,7$ мкм (красный цвет) на 5 мкм, а при $\lambda = 0,5$ мкм (зелено-голубой) на 1 мкм. Что же из этого следует?

Вспомним, что глубина обеднённого слоя (глубина, на которую распространяется электрическое поле затвора вглубь полупроводника) – около 5 мкм. Ясно, что для света, который целиком поглощается внутри этого слоя (при длине волны менее примерно 0,6 мкм), внутренний квантовый выход будет почти 100%, так как происходит мгновенное разделение электронно-дырочных пар электрическим полем. Для более длинных волн значительная доля фотонов поглощается в нейтральной подложке, откуда носители могут попасть в потенциальные ямы только за счёт тепловой диффузии – на что шансов тем меньше, чем глубже родился каждый конкретный электрон. Надо ещё учесть, что сама подложка по своим свойствам неоднородна.

Так практически все западные приборы изготавливаются на эпитаксиальных подложках с толщиной эпитаксиального слоя 10–12 мкм, а российские ПЗС – на подложках с внутренним геттерированием (это специальный процесс, при котором дефекты кристаллической решётки загоняются вглубь подложки, так что поверхностный слой толщиной около 20 мкм становится свободным от дефектов). В обоих этих случаях время жизни свободных носителей вне поверхностного слоя чрезвычайно мало, и они просто не успевают попасть в потенциальные ямы. Это ещё больше снижает внутренний квантовый выход ПЗС для длинноволнового участка спектра.

Для очень коротких длин волн (менее 270 нм) энергия фотонов достаточна для генерации двух электронно-дырочных пар, так что для них внутренний квантовый выход, на первый взгляд, может превышать 100%. Увы, нет в мире совершенства, и граница раздела окисел-кремний – яркий тому пример. При коротких длинах волн коэффициент поглощения становится настолько большим, а длина поглощения настолько маленькой, что становятся существенным вклад поверхностной рекомбинации, то есть только что рождённые пары успевают рекомбинировать, не успев разделиться. Так что в области коротких длин волн внутренний квантовый выход тоже падает, хотя и не до нуля.

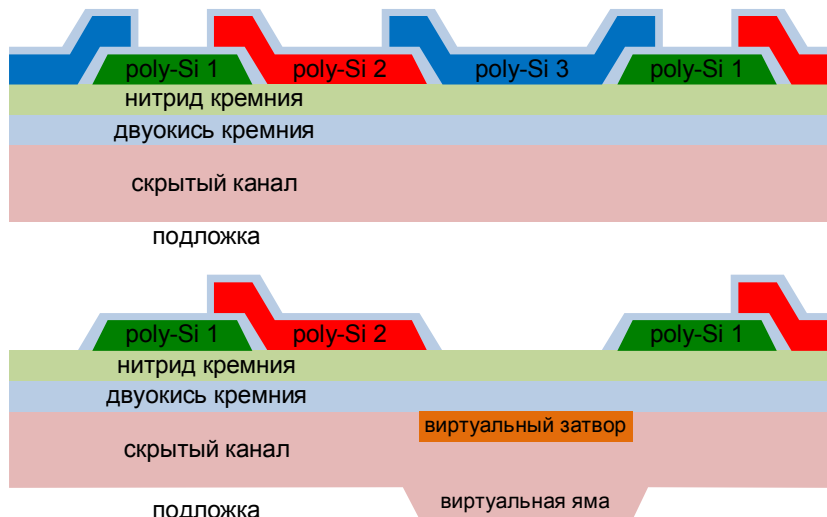


Рис. 5. Сечение трёхфазного ПЗС с электродами из поликристаллического кремния (вверху) и с виртуальной фазой (внизу). Около половины площади ячейки свободно от поликремния.

Теперь поговорим о пропускании света электродной структурой. Как можно судить по рис. 5а, где схематично изображено сечение трёхфазного ПЗС с поликремневыми затворами, свет, попадая в полупроводник, проходит через несколько слоёв с различными оптическими характеристиками, так что неизбежна его интерференция, благо что толщина этих слоёв соизмерима с длиной волны. И действительно, СХ ПЗС довольно причудлива. Далее, поликристаллический кремний, из которого сделаны электроды, совершенно непрозрачен в области длин волн до 430–450 нм (синий и фиолетовый цвета). В итоге СХ обычного трёхфазного ПЗС с поликремневыми затворами выглядит так, как показано на рис. 6 красной линией.

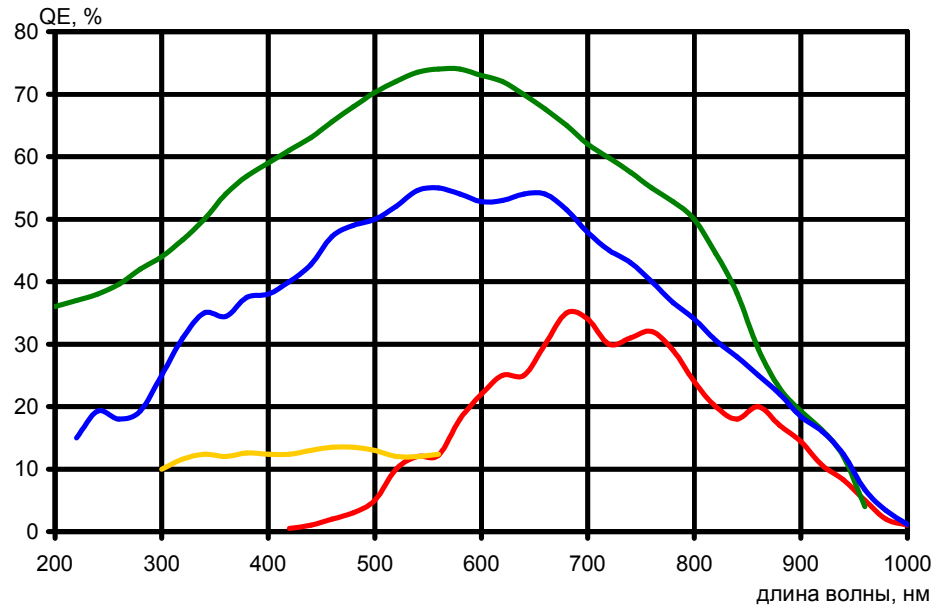


Рис. 6. Спектральные характеристики абсолютного квантового выхода: **обычного ПЗС**, **ПЗС с люминофорным покрытием**, **с освещением с обратной стороны подложки**, **с виртуальной фазой**.

Использование фотодиодов в матрицах МП и СКП значительно улучшает СХ ПЗС, особенно в коротковолновой части спектра, поскольку уходят проблемы, связанные с электродами. Именно это обстоятельство позволяет таким приборам успешно работать в вещательных и бытовых камерах цветного телевидения. В камерах прикладного и научного направления, где доминируют всё же приборы с КП, применяются совершенно другие подходы.

Самый простой – нанесение люминофора, специального вещества, прозрачного для длинных волн, но преобразующего коротковолновый свет в кванты с большей длиной волны. Этот приём позволяет расширить СХ ПЗС в синюю и УФ область спектра (на рис. 6 показано жёлтым цветом), не затрагивая, впрочем, средне- и длинноволновую часть СХ.

Существенным недостатком этого способа является ограниченный температурный диапазон работы такого прибора – люминофорные покрытия не выдерживают глубокого охлаждения (автору приходилось видеть, *во что* превращается такое покрытие после охлаждения до -100°C). А работа с глубоким охлаждением (о причинах чего мы ещё поговорим) – ситуация довольно распространённая...

Второй способ, пожалуй, самый трудоёмкий и дорогой, но именно он позволяет добиться фантастических результатов. Состоит он в том, что кристалл ПЗС, уже после изготовления, утоньшается до толщины 10 мкм и менее (и это при размере кристалла в несколько сантиметров!), а свет падает *на обратную сторону подложки*, специальным образом обработанную. При столь тонкой подложке носители успевают добраться до потенциальных ям (напомним, что они простираются на глубину до 5 мкм), а полное отсутствие каких бы то ни было электродов гарантирует, что практически весь свет, за исключением потерь на отражение, проникает в кремний.

Квантовая эффективность таких матриц (зелёная кривая на рис. 6) достигает иногда 90%, а спектральный диапазон простирается от 180 до 950 нм. Именно такие матрицы, несмотря на дороговизну (порой несколько десятков тысяч долларов – хотя что это за деньги, если сам телескоп стоит сотни миллионов!), применяются в большинстве серьёзных астрономических проектов, включая космический телескоп «Хаббл» или недавно построенную Южную Европейскую Обсерваторию в Чили с несколькими 8-метровыми телескопами.

И, наконец, третий способ улучшения спектральных характеристик ПЗС – виртуальная фаза, способ, предложенный в 1980 году Ярославом Хинечком, в то время работавшим в фирме Texas Instruments, для американского проекта Galileo по запуску космического аппарата к Юпитеру. Суть этого способа в том, что один из электродов обычного ПЗС заменяется на мелкий слой *p*-типа (виртуальный затвор) непосредственно на поверхности кремния, замкнутый на стоп-каналы (сам Хинчек модифицировал двухфазный ПЗС; автору ближе ПЗС с виртуальной фазой, полученные из обычных трёхфазных – см. рис. 5б).

Доза канала под виртуальным затвором делается больше, чем под тактовыми затворами. Вспомним то, что говорилось про ПЗС со скрытым каналом по поводу фиксации поверхностного потенциала и зависимости глубины потенциальной ямы от дозы легирования канала. Структура с виртуальным затвором, замкнутым на подложку, с точки зрения канала переноса не отличается от состояния фиксации в обычном ПЗС со скрытым каналом. Если к тому же выбрать дозу легирования канала в области виртуальной ямы надлежащим образом, то потенциал канала в ней будет средним между ямой и барьером под тактовыми электродами, так что условия для тактируемого переноса заряда сохраняются.

Достоинства такой структуры несомненны. По сравнению с обычными ПЗС, в ней около половины площади ячейки свободны от поликремния, отсюда высокая чувствительность в синей и УФ области спектра (теоретически даже и до мягкого рентгена). Вместе с тем достигается она при освещении с фронтальной стороны подложки, что явно положительным образом сказывается на их цене. Ещё, ПЗС с виртуальной фазой по принципу действия относятся к приборам с MPP (Multi-Pin Phase), но об этом ниже, там, где речь пойдёт о темновом токе.

Я не мог не упомянуть здесь ПЗС с виртуальной фазой, поскольку именно этим типом приборов я имею честь заниматься уже многие годы (я и не обещал быть беспристрастным...). Эти приборы, в частности, уже много лет используются в системах ориентации российских космических аппаратов (звёздные датчики), и именно на них в 1986 г. было впервые в мире получено детальное изображение кометы Галлея (проект ВЕГА).

Поговорим теперь о других параметрах ПЗС (про неэффективность переноса и спектральные характеристики мы уже поговорили). Здесь будут обсуждаться как сами параметры, так и те меры, которые применяются для их улучшения.

1. Темновой ток

Как уже упоминалось, темновой ток – это результат спонтанной генерации электронно-дырочных пар и есть явление неизбежное, однако бороться с ним можно. Дело в том, что теоретическая величина темнового тока для кремния (если брать в расчёт только прямую генерацию через запрещённую зону) крайне мала, и на самом деле темновой ток в ПЗС (как и обратные токи в других кремниевых приборах) определяется двустадийной генерацией через промежуточные энергетические уровни в запрещённой зоне. Понятно, что чем меньше концентрация этих уровней – а она определяется качеством исходного кремния, чистотой реактивов и степенью совершенства технологии – тем меньше темновой ток. Понятно также, что граница раздела, где этих уровней заведомо много, даёт заметно больший вклад в темновой ток, чем объём. И вот здесь-то и надо вспомнить про МРР-приборы. Их отличие от обычных ПЗС в том, что под одной из тактовых фаз доза канала увеличена, соответственно и потенциал канала при фиксации будет выше. Таким образом, даже если на всех фазах напряжение на затворе таково, что поверхностный потенциал фиксирован, в *канале переноса* потенциальный рельеф *сохраняется*, а значит, возможно локализованное накопление зарядовых пакетов. Поверхность же замкнута на подложку и *исключается* из процесса генерации темнового тока.

В настоящее время типовые значения темнового тока для лучших западных ПЗС составляют при комнатной температуре сотые доли $\text{nA}/\text{см}^2$, или несколько сотен (иногда тысяч) электронов на ячейку в секунду. И если для вещательного и бытового ТВ (время накопления 20 или 40 мс) такой темновой ток незаметен, то для научных применений, где регистрируются потоки в десятки фотонов на элемент, даже столь низкий темновой ток неприемлем. Действительно, время накопления в малокадровых системах, скажем, флуоресцентной микроскопии достигает минут, а в астрономии, когда нужно получить спектр звезды 20-й величины (совершенно типовое дело), – часов. В этом случае на помощь приходит охлаждение матриц. Как всякий термодинамический процесс, темновой ток сильно зависит от абсолютной температуры; принято считать, что при уменьшении температуры на каждые 7–8 градусов он уменьшается вдвое. Для глубокого охлаждения (в астрономических системах) используются азотные криостаты, где матрицы охлаждаются до -100°C . Для более простых систем применяется термоэлектронное охлаждение с использованием батарей Пельтье, которые способны обеспечить перепад в 70°C при подаче напряжения в 5–6 В, так что температура кристалла при комнатной наружной оказывается около -40°C . Темновой ток при этом уменьшается до ~ 1 электрона на ячейку в секунду. Эти батареи столь компактны, что монтируются непосредственно в один корпус вместе с кристаллом ПЗС. Такие охлаждаемые приборы широко выпускаются как в США (например, фирмой SITE Technology или Hamamatsu Photonics) и в Европе (EEV, Великобритания), так и в России (фирма «Электрон–Оптроник», СПб).

Ну и, наконец, в цифровых системах на ПЗС, поскольку характеристика его отличается высокой линейностью, можно просто запоминать темновой сигнал (при данной температуре и данном времени накопления), а затем вычитать его из результирующего.

2. Неоднородность чувствительности

Повторюсь, нет в мире совершенства. А потому ячейки ПЗС имеют неодинаковую чувствительность, т. е. даже при абсолютно однородной освещённости сигнал с них разный (иногда этот эффект называют геометрическим шумом). Величина этой неоднородности невелика и обычно не превышает 1–5% (для разных типов приборов), так что, скажем, в обычных ТВ камерах ею можно пренебречь. В научных системах, где требуется высокая фотометрическая точность, применяют довольно простой алгоритм коррекции неравномерности. Поскольку чувствительность каждого индивидуального элемента – фиксированная величина, то для её коррекции при некоторой равномерной освещённости запоминают сигналы со всех элементов прибора и используют их как коэффициенты коррекции при всех последующих экспозициях. Предварительно, разумеется, проводят коррекцию темнового тока.

3. Шумы

Начнём с того, что шумит сам световой поток (да-да!). То есть число фотоэлектронов, накопленное в ячейке, определено с точностью до квадратного корня из их числа (статистика Пуассона). Например, зарядовый пакет в 10000 электронов от кадра к кадру будет флуктуировать со среднеквадратическим отклонением в 100 электронов. Точно такой же статистике подвержен и темновой сигнал, и, следовательно, суммарный (световой + темновой). Это, однако, не снимает задачи снижения шумов собственно ПЗС, поскольку часто приходится работать с сигналами в десятки фотонов на ячейку (к счастью, не в ТВ системах).

Для качественных приборов, где низки темновой ток и неэффективность переноса, доминирующим источником шума будет выходное устройство. Обратимся ещё раз к рис. 4а и посмотрим на выходное устройство. Оно состоит из ёмкости считывания, как правило, диода, транзистора сброса Q_1 и выходного усилителя (обычно это двухкаскадный истоковый повторитель с высоким входным импедансом). Работает такое выходное устройство так. Импульс сброса соединяет диод с источником опорного напряжения V_{REF} , после чего транзистор сброса закрывается, и диод оказывается *плавающим*, т. е. его потенциал может изменяться при поступлении в него заряда и он изменяется при следующем такте переноса заряда в регистре. Это изменение потенциала передаётся на выход прибора через усилитель.

Так вот, фундаментальным свойством системы ключ–конденсатор (в случае ПЗС это транзистор Q_1 и плавающая диффузия) является то, что каждый раз после размыкания ключа исходный потенциал считывающей ёмкости *будет разным*, причём среднеквадратическая величина этого шума (он называется *установочным*) равна $(kTC)^{1/2}$, а эквивалентный шумовой заряд – $(kTC)^{1/2}$, где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, а C – ёмкость считывающего узла. При комнатной температуре установочный шум равен $400C^{1/2}$, если C – в пикофарадах. При этом сам сигнал пропорционален $1/C$. Стало быть, чем меньше ёмкость, на которой детектируется заряд, тем больше отношение сигнал/установочный шум для данного считывающего устройства. Именно здесь кроется преимущество ПЗС по сравнению с предшествующими датчиками, где заряд с *одного* элемента попадал на *общую для всего столбца* шину.

Величина ёмкости считывания в современных ПЗС достигает 0,01–0,03 пФ, что соответствует установочному шуму примерно в 40–70 электронов. Для многих применений такой уровень шума приемлем, однако существует метод, позволяющий практически полностью устранить его. Этот метод предложен М. Уайтом и другими из фирмы Westinghouse в 1974 и носит название *двойной коррелированной выборки*. Вдумаемся ещё раз в то, *когда* появляется установочный шум: *после* размыкания транзистора сброса (отмечу ещё раз, что «после» не значит «из-за»; причина установочного шума – в фундаментальных термодинамических законах), но *до* поступления заряда в плавающий диод.

Поступление сигнального заряда вызывает только *изменение* потенциала плавающей диффузии, и если предварительно запомнить напряжение установочного шума, то потом его легко вычестить из результирующего сигнала и тем самым полностью его (шум) устранить. Метод двойной коррелированной выборки стал фактически стандартным методом предварительной обработки сигнала для всех малокадровых систем, работающих на сравнительно низких тактовых частотах, да и во многих ТВ камерах.

Остаётся только шум собственно выходного усилителя. Он имеет две компоненты: так называемый *шум 1/f*, присущий МОП-транзисторам, спектральная плотность которого, как следует из названия, растёт в области низких частот и сильно зависит от степени совершенства технологического процесса, и тепловой шум канала транзисторов, имеющий равномерный (белый) спектр. Шум *1/f* во многом подавляется схемой двойной коррелированной выборки, которая служит фильтром верхних частот, причём степень подавления зависит от соотношения тактовой частоты и частоты излома спектральной характеристики плотности шума. Обычно конструкция выходного усилителя оптимизируется с точки зрения достижения минимального эквивалентного шумового заряда для данных условий применения, а полный эквивалентный шумовой заряд зависит ещё и от тактовой частоты работы ПЗС. Для современных приборов на частоте порядка 100 КГц типовым считается шум выходного усилителя 3–6 электронов (при охлаждении), а в лучших приборах достигается цифра 2 электрона. Поскольку заряд насыщения (максимальная величина зарядового пакета, передаваемого без искажений) составляет, как правило, 200–500 тыс. электронов, то динамический диапазон ПЗС достигает примерно 100–110 дБ; это примерно 18 или 19 бит. Кстати, динамический диапазон аудио-CD всего лишь 16 бит. Впрочем, известны экспериментальные конструкции усилителей с шумом... *зжмурьтесь...* 0,5 электрона. То есть электроны считаются поштучно.

Последнее, о чём хотелось бы рассказать в отношении параметров ПЗС, –

4. Антиблуминг, или устойчивость к локальным пересветкам

Те, кто нашёл в себе силы дочитать до этого места, вероятно, ещё помнят замечание о том, что из-за явления фиксации поверхностного потенциала *скрытый канал запереть нельзя*. Что же будет происходить в ячейке ПЗС, когда заряд в ней будет расти и расти? Вернёмся к рис.2. На нём показано, что с ростом сигнального заряда в потенциальной яме потенциал канала в ней уменьшается, и когда он достигнет значения потенциала в канале по соседним электродам, заряд просто начнёт переливаться через этот незапертый участок канала в соседний элемент, причём в

обе стороны. На изображении это проявляется в виде вертикального расплывания ярких деталей изображения. Это явление и называется *оптической пересветкой* (blooming), и если в системах регистрации слабых сигналов с ним ещё можно мириться (в силу невысокой вероятности с ним столкнуться и возможности изменить время накопления), то в камерах для ТВ оно совершенно недопустимо.

Бороться с блюмингом можно только разработкой специальной конструкции ячейки. Первый способ (горизонтальный антиблюминг) состоит в том, что вдоль каждого столбца фоточувствительных ячеек прокладывается узкая стоковая область, находящаяся под большим положительным потенциалом и отделённая от накапливающей сигнальный заряд потенциальной ямы некоторым барьером, потенциал канала в котором (иногда управляемый отдельным затвором) *выше*, чем в запёртом канале, отделяющем ячейки друг от друга. В этом случае избыточный заряд будет переливаться в сток, и искажения сигнала в соседних элементах не возникает. Если используется специальный затвор управления антиблюмингом, то появляется возможность *принудительной* очистки заряда из накопительной ячейки даже без её переполнения, что есть не что иное, как *электронная регулировка экспозиции*.

Ценой горизонтального антиблюминга является некоторое снижение коэффициента заполнения (область стока, ясно, не может дать вклад в сигнал), и увеличение размеров ячейки, что для приборов с малым размером ячейки неприемлемо. В матрицах для ТВ, где размер ячейки, как правило, менее 10 мкм, для борьбы с блюмингом применяется другой, весьма изощрённый способ – вертикальный антиблюминг. При этом стоковая область располагается не рядом, а под накопительной ячейкой, следовательно, увеличения площади ячейки не требуется. Ячейка здесь имеет структуру не просто n^+p , как в обычном скрытом канале, а n^+pn^- , причём средний p -слой служит как бы «подложкой», а собственно n -подложка – стоком антиблюминга. Как можно догадаться, в отсутствие заряда вертикальное распределение потенциала в такой структуре при ступенчатой аппроксимации распределения примесей по глубине будет кусочно-параболическим с одним максимумом и одним *минимумом* потенциала, и при правильном выборе параметров легирования слоёв (и при тщательном их соблюдении в процессе изготовления!) избыточный заряд из ячейки будет сливаться не вбок, а *вниз*. Платой за это, помимо сложной технологии, является сильный спад ИК чувствительности прибора (большая часть ИК фотонов, если помните, поглощается на заметной глубине от поверхности) и некоторый спад в красной области, впрочем, волне приемлемый. Потеря же ИК чувствительности для приборов *цветного* телевидения, право же, беда невеликая.

ЧТО ЕЩЁ?

Многообразие ПЗС не исчерпывается рассмотренными в этом обзоре типами. Так, широкое распространение находят линейки ПЗС – как для считывания одномерных изображений (например, штрих-коды), так и в системах, где имеется механическая развёртка по одной координате. Простейшие примеры – телефакс и сканер. Менее очевидные применения – системы наблюдения за земной поверхностью с космических аппаратов или самолётов, где используется движение самого аппарата относительно Земли. Как правило, накопительными элементами в ПЗС–линейках служат фотодиоды; по обе стороны от линейки накопительных элементов располагаются регистры считывания (соответственно для чётных и нечётных элементов – *билинейная организация*). Номенклатура выпускаемых сейчас линеек довольно широка, а число элементов колеблется от 1024 до 8192.

Разновидностью приборов для систем с механической развёрткой являются приборы ВЗН – с временной задержкой и накоплением. Их организация тождественна односекционному ПЗС с КП, но отличаются они режимом тактировки по вертикали: секция тактируется *непрерывно*, причём тактовая частота подбирается такой, что скорость перемещения зарядового рельефа равна скорости перемещения изображения; при этом каждый элемент изображения даёт вклад *в один и тот же* зарядовый пакет, что, очевидно, увеличивает чувствительность ВЗН по сравнению с обычными линейками в число строк раз. Именно ВЗН широко применяются в космической аппаратуре для наблюдения за земной поверхностью. Число строк в таких приборах колеблется от 64 до 256, а число элементов по горизонтали – от 1024 до 4096.

А вообще приёмники изображения – не единственное применение ПЗС. Так, добавив к регистру ПЗС устройство ввода электрического сигнала, мы получим *аналоговую линию задержки*, причём время задержки определяется как числом элементов регистра, так и тактовой частотой, а значит, может *легко изменяться*. Далее. В качестве элемента регистрации зарядового пакета можно использовать не только плавающую диффузию, но и плавающий затвор, характеризующийся *неразрушающим считыванием*, т. е. получить регистр с отводами. Такие регистры являются основой *трансверсальных фильтров*, широко применявшихся, например, в

обработке радиолокационных сигналов.

ЧТО ДАЛЬШЕ?

Нельзя сказать, что сейчас ПЗС достигли совершенства, хотя за истекшие годы в технологии их изготовления и был достигнут потрясающий прогресс. Диапазон выпускаемых приборов охватывает как миниатюрные матрицы с шагом элементов примерно 3 на 5 мкм (одна из последних разработок Sony), так и гигантские кристаллы форматом 5 тыс. на 5 тыс. элементов и размером кристалла почти 8 на 8 см (фирма DALSA, Канада). Не за горами и появление однокристалльных приборов форматом 8 на 8 тысяч элементов, тогда как сейчас приборы сверхбольшого формата (эти астрономы ненасытны...) собираются из двух или четырёх отдельных кристаллов, монтируемых встык на общее основание.

Разумеется, у ПЗС есть и свои проблемы. Самая серьёзная из них – специфическая, ни на что не похожая технология изготовления и чрезвычайно жёсткие требования к однородности исходного кремния и степени совершенства технологического процесса. Если при производстве цифровых приборов разброс параметров по пластине может достигать нескольких крат без заметного влияния на параметры получаемых приборов (поскольку работа идёт с дискретными уровнями напряжения), то в ПЗС изменение, скажем, концентрации легирующей примеси на 10% *уже заметно на изображении*. Свои проблемы добавляет и размер кристалла, и невозможность резервирования, как в БИС памяти, так что дефектные участки приводят к негодности всего кристалла. Специфическим ограничением является и присущий им по принципу действия последовательный вывод информации, тогда как в ряде применений (например, оптические системы наведения или устройства ориентации космических аппаратов) удобнее иметь датчики с произвольным опросом. Всё это привело к тому, что в последние годы заметный интерес проявляется к т. н. приборам с активной ячейкой (APS – active pixel sensors), изготавливаемым по стандартной КМОП-технологии. Пока уступая по своим параметрам ПЗС, эти приборы быстро прогрессируют. В будущем, вероятно, произойдёт определённое разделение «зон влияния» каждого из этих классов приборов, а может быть, появится что-нибудь совершенно новое.

Ну и чтобы всё же закончить на оптимистической ноте... Недавно фирма Sony анонсировала Microblock CCD – цветную ПЗС-матрицу и чипсет управления ПЗС и обработки видеосигнала, смонтированные в единый корпус со встроенным пластмассовым объективом. На выходе формируется стандартный ТВ сигнал. Размер этой *цветной телекамеры* – 18,3 на 18,3 на 7,3 миллиметра.

Вы помните, как выглядели телекамеры каких-нибудь 10–15 лет назад?

Почувствуйте разницу.