

4. ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

4.1. Устройство и принцип действия приборов с зарядовой связью

В настоящее время в МДП-технологии используются две разновидности активных приборов. К первой относятся различные типы МДП-транзисторов, рассмотренные в предыдущем разделе, а ко второй – приборы с зарядовой связью (ПЗС).

Приборы с зарядовой связью относятся к классу новых, весьма перспективных интегральных микросхем, реализуемых на основе структуры металл – диэлектрик – полупроводник. Принцип действия их основан на хранении заряда неосновных носителей в потенциальных ямах, возникающих вблизи поверхности полупроводника под действием внешнего электрического поля, и на перемещении этого заряда вдоль поверхности при сдвиге потенциальных ям. Основываясь на таком принципе переноса носителей заряда, можно осуществить преобразование, хранение и обработку информации, представленной плотностью заряда.

В современных интегральных микросхемах на приборах с зарядовой связью используется несколько типов создания потенциальных ям вблизи поверхности полупроводника. Однако наибольшее распространение получили ПЗС на основе МДП-структур.

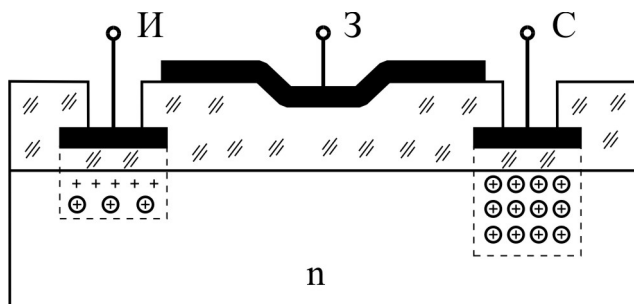


Рис. 4.1

Одним из важнейших типов ПЗС является поверхностно-зарядовый транзистор, структура которого приведена на рис. 4.1. Она представляет собой кремниевую подложку n-типа, на которой создаются области, покрытые слоем SiO_2 толщиной 0,1...0,2 мкм. Над этими областями создаются металлические электроды.

Количество технологических операций, необходимых для изготовления ПЗС, вдвое меньше, чем для изготовления МДП-структур. Важная особенность ПЗС-структур состоит в том, что их можно изготавливать не только на основе кремния, но и на основе ряда других полупроводников, например арсенида галлия, имеющих высокую подвижность носителей заряда и большую ширину запрещенной зоны. Однако следует отметить, что для функционирования ПЗС плотность поверхностных состояний должна быть меньше примерно на два порядка, чем в МДП-структуре.

Рассмотрим принцип работы ПЗС. Для ПЗС характерно два режима работы: режим хранения и режим передачи информационного заряда. Если, используя соответствующий электрод, приложить к поверхности подложки электрическое поле с вектором напряженности, имеющим такое направление, при котором основные носители заряда отталкиваются, то под электродом будет форми-

роваться обедненная область. Эта область представляет собой потенциальную яму для неосновных носителей заряда, которыми являются дырки. По мере накопления дырок в потенциальной яме возникает равновесный поверхностный слой, что и соответствует режиму хранения информационного заряда. Информационный заряд не может храниться в ПЗС в течение длительного времени вследствие термической генерации носителей, которые вызывают накопление паразитного заряда дырок в потенциальной яме. С помощью электродов истока и стока создаются обедненные поверхностные области. Третий электрод – затвор, частично перекрывает исток и сток. После приложения напряжения к истоку в транзисторе создается распределение зарядов, показанное на рис. 4.1. Под истоком возникает потенциальная яма, содержащая поверхностный заряд, причем дырки, попавшие в эту область под действием электрического поля, притягиваются к поверхности подложки и локализуются в узком инверсном слое. Под стоком возникает потенциальная яма, заполненная неосновными дырками, образующимися в результате термогенерации. Если используется дополнительный источник неосновных дырок, инжектирующий заряды в потенциальные ямы некоторым образом, и заряд устанавливается до наступления термического равновесия, то потенциальные ямы могут хранить передаваемую информацию.

Если к истоку приложить более отрицательное напряжение, чем напряжение хранения, приложенное к другому электроду, то под первым электродом возникает более глубокая потенциальная яма, а в области, разделяющей потенциальные ямы, создаётся электрическое поле, параллельное поверхности подложки. Это приводит к процессу переноса дырок в более глубокую потенциальную яму, который осуществляется как за счёт дрейфа под действием поля, так и за счёт диффузии под действием градиента концентрации неосновных дырок.

Процесс переноса дырок и представляет собой второй характерный режим работы ПЗС, называемый режимом передачи информационного сигнала. Максимальное значение напряжённости электрического поля, возникающего под электродами вследствие неравномерного распределения неосновных дырок, определяется полуэмпирическим соотношением

$$E_{p \max} = 7,2 \cdot 10^3 \left(\frac{p_0}{10^{11}} \right), \quad (4.1)$$

где p_0 – стандартная поверхностная концентрация дырок.

Процесс переноса дырок используется без передачи зарядов от одного электрода к другому, что позволяет реализовать специфические сдвиговые регистры, не требующие между собой проводниковых соединений между образующими их элементами и соединений с поверхностью подложки.

На основе ПЗС таким образом можно строить сдвиговые регистры подобно регистрам на триггерах и других элементах в виде одноктактных, двухтактных и трёхтактных схем. Рассмотрим работу ПЗС на примере трёхтактного сдвигового регистра (рис. 4.2, а).

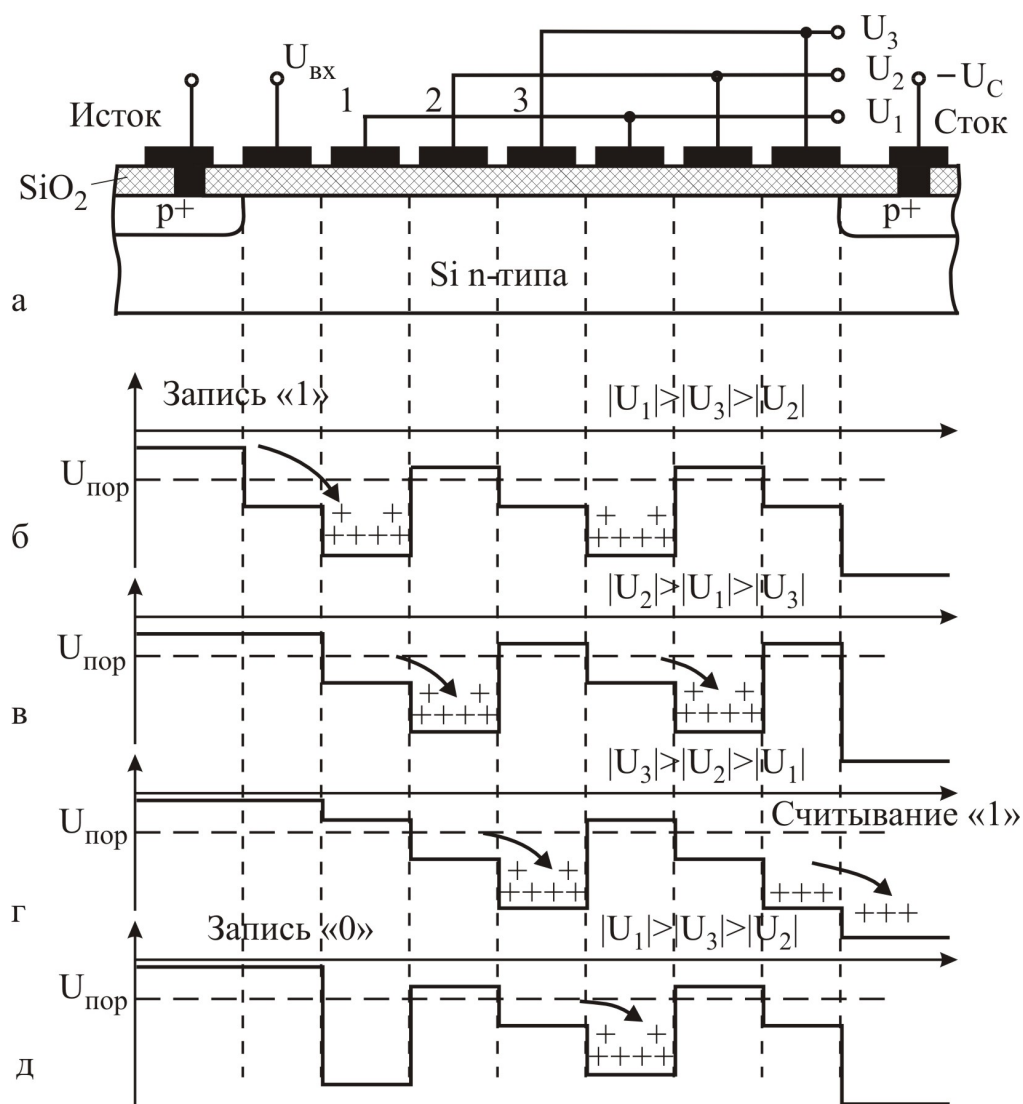


Рис. 4.2

Этот прибор состоит из трёх секций: входной, секции переноса и выходной секции.

Входная секция включает в себя исток с P⁺-областью под ним и входной затвор, выполняющий роль ключа для управления движением дырок из диффузионной P⁺-области истока в первую потенциальную яму.

Секция переноса состоит из ряда затворов, управляющих потенциалом на границе кремний – диоксид кремния. Эти затворы соединены между собой через два. Напряжения на затворах секции переноса имеют вид импульсов различной амплитуды, которые сменяют друг друга циклической перестановкой (рис 4.2, б – д). При этом потенциальные ямы перемещаются к выходу прибора, увлекая за собой пакеты носителей заряда – дырок.

Выходная секция включает в себя p-n-переход стока. Он смещён в обратном направлении и предназначен для экстракции дырок из подходящих к нему потенциальных ям.

Если к электроду 1 при наличии проводящего канала под входным затвором приложить отрицательное напряжение, превышающее по абсолютному

значению пороговое $|U_{\text{вх}}| > |U_{\text{зи пор}}|$, то под первым затвором образуется глубокая потенциальная яма, куда поступают неосновные носители, которые в ней хранятся. Для передачи зарядового пакета к соседнему электроду прикладывается большее отрицательное напряжение – напряжение записи, при этом напряжение на входном затворе снимается (исчезает проводящий канал). Напряжение записи создаёт более глубокую яму под этим электродом и образует продольное электрическое поле в области, разделяющей электроды.

После переноса зарядового пакета в потенциальную яму потенциал электрода снизится до напряжения хранения. При следующих тактах изменения напряжения на электродах в цепи переноса будет происходить дальнейшее продвижение зарядового пакета к выходной цепи. Если в потенциальной яме, подходящей к р-n-переходу стока, отсутствует информационный зарядовый пакет, изменение тока в зарядовой цепи происходить не будет. Использование в выходной цепи МДП-транзистора позволяет осуществить неразрушающее считывание зарядов пакета. Когда информационный зарядовый пакет переместится в потенциальную яму, на границу к р-n-переходу стока, дырки втягиваются в область стока. Это вызывает появление импульса тока или изменение напряжения на стоке. Для записи логического нуля на входной затвор не должно быть подано отрицательное напряжение. В этом случае не будет инжекции дырок из p^+ -области истока в потенциальную яму под первым затвором и в ней может оказаться только относительно небольшой заряд дырок Q_p , связанный с неполным опустошением ямы на предыдущих тактах работы прибора.

4.2. Параметры приборов с зарядовой связью

ПЗС являются типично динамическими устройствами и имеют нижний и верхний предел тактовых частот импульсов напряжения, питающих секцию переноса.

Нижний предел тактовой частоты определяется токами, связанными с тепловой генерацией носителей и в принципе не отличающимися от обратного тока экстракции через р-n-переход. Заметное накопление дырок в пустых потенциальных ямах может произойти за время от сотых долей до единиц секунд. Таким образом, нижний предел тактовой частоты составляет обычно единицы – десятки килогерц.

Верхний предел тактовой частоты определяется временем перетекания заряда из одной потенциальной ямы в другую (порядка единиц наносекунд). Поэтому верхний предел тактовых частот определяется десятками мегагерц.

В диапазоне рабочих частот в ПЗС не происходит полной передачи информационного пакета из одной потенциальной ямы в другую, что связано с явлениями захвата носителей заряда поверхностными энергетическими уровнями, ловушками захвата. Поэтому для уменьшения этого влияния необходимо уменьшать плотность поверхностных состояний, использовать углубленный канал, что резко снижает потери на захват носителей. Для оценки рассматрива-

емого эффекта захвата носителей в ПЗС вводится параметр эффективности передачи заряда или коэффициент потерь (неэффективность передачи) $K_{\Pi} = 1 - \eta$. Коэффициент потерь составляет менее $10^{-9} \dots 10^{-5}$. Чтобы уменьшить потери информационного заряда, используют схемы регенерации, представляющие собой усилители. Сигнал с ПЗС усиливается в соответствии с формированием его уровней, а затем производится запись информации в цепочку ПЗС.

Кроме этих параметров ПЗС характеризуются амплитудой рабочих напряжений и величиной рассеиваемой мощности. Управляющее напряжение лежит в пределах 10...20 В. Рассеиваемая мощность составляет единицы микроватт.

4.3. Применение приборов с зарядовой связью

В настоящее время выявились три основных направления в использовании ПЗС:

- цифровые устройства;
- аналого-цифровые устройства;
- оптоэлектронные приборы.

В цифровых устройствах их используют как регистры сдвига, логические схемы динамического типа, постоянные запоминающие устройства (ПЗУ), обеспечивающие ёмкость хранения информации $10^6 \dots 10^7$ бит на кристалле с частотой выдачи информации 1...10 МГц.

Аналого-цифровые устройства ПЗС используются для обработки сигналов в радиотехнических устройствах (линии задержки, фильтры, мультиплексоры). В линиях задержки входной аналоговый сигнал преобразуется в дискретные зарядовые пакеты, а затем через определённое время задержки поступают на вход ПЗС.

В оптоэлектронных ПЗС используется эффект чувствительности для создания одномерных и плоскостных приборов, таких, как усилители с плавающим затвором, фотоячейки, приёмники изображения для портативных телевизионных камер.

Отметим некоторые преимущества ПЗС перед существующими электронно-лучевыми приборами.

Необходимо отметить жёсткий растр. Если в трубках растр создаётся сканирующим лучом и его геометрическое качество зависит от линейности напряжения развёрток, стабильности питающих напряжений, температурных эффектов и др., то в твёрдотельных приборах растр создаётся с высокой точностью в процессе изготовления структуры прибора, т. е. геометрические искажения изображения определяются только качеством оптики. С жёсткостью растра связано и отсутствие микрофонного эффекта и нечувствительность к магнитным полям.

Особенно четко эти преимущества проявляются при использовании ПЗС в профессиональных цветных камерах, а именно совмещение растров датчиков в трёхматричных камерах ТВ.

Жёсткий растр и связанная с этим жёсткая привязка выходного сигнала к тактовой частоте упростили и конструкцию одноматричных цветных камер, в которых для получения информации в цвете используется нанесение непосредственно на фоточувствительную секцию специального фильтра – мозаичного или полосового – так, что каждый элемент ПЗС передаёт сигнал только одного какого-то цвета, а полный цветной сигнал получается за счёт соответствующей обработки выходного сигнала ПЗС.

Ещё одно достоинство – отсутствие выжигания. В матрицах ПЗС накопленный заряд полностью выводится при переносе кадра. По сравнению с твёрдотельными приборами с координатной адресацией ПЗС сильно выигрывают в однородности сигнала, т. к. все зарядовые пакеты детектируются одним усилителем. Помимо одинаковых для всех зарядовых пакетов коэффициентов преобразования заряд – напряжение усилитель ПЗС характеризуется и значительно меньшим шумом по сравнению с матрицами с координатной адресацией.

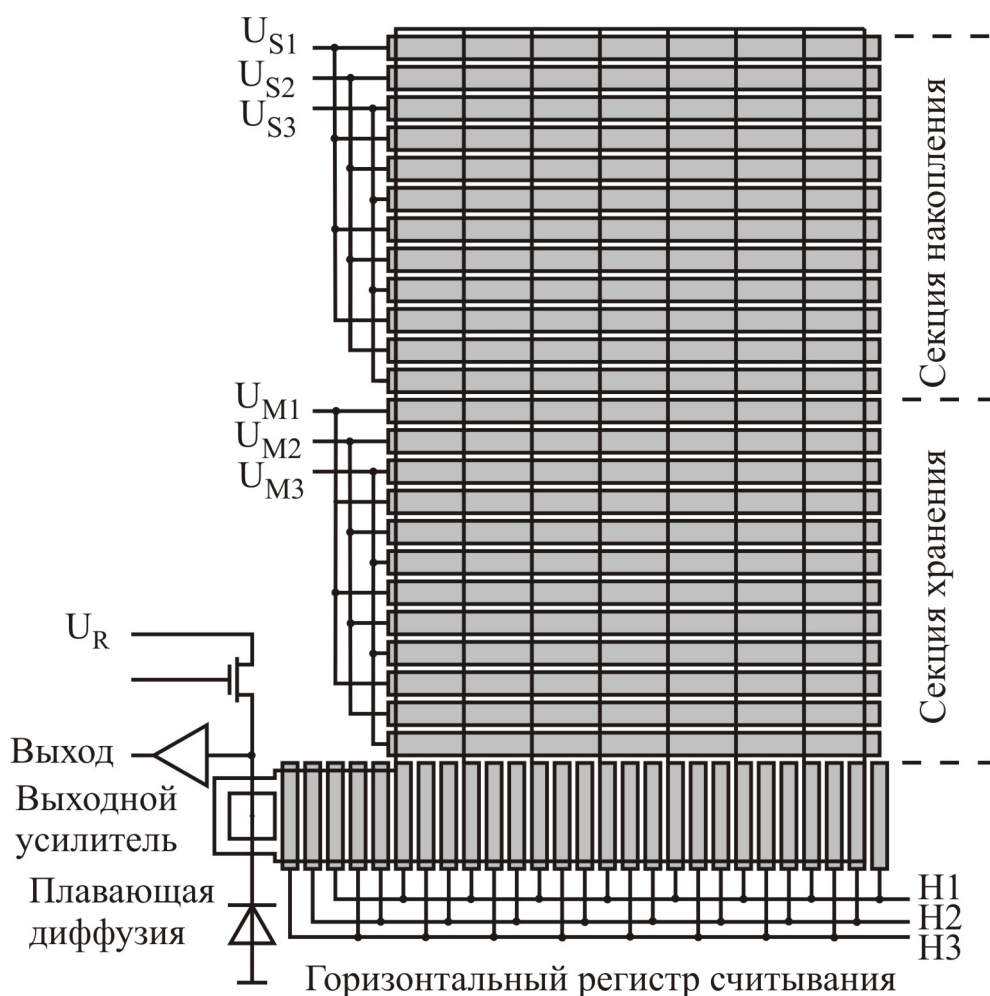


Рис. 4.3

Кроме того, вся площадь секции накопления является фоточувствительной, т. е. коэффициент заполнения равен 100 %. Эта особенность делает эти приборы монополистами в области астрономии и во всех областях, где идёт борьба за чувствительность.

На рис. 4.3 приведена структура двумерной матрицы ПЗС. В ней можно выделить два вертикальных регистра сдвига на ПЗС, образующих секцию накопления и секцию хранения с равным числом строк (каждая строка секции образована одной тройкой электродов), горизонтальный регистр и выходное устройство.

Однако у ПЗС есть и существенный недостаток: сам кадровый перенос занимает существенное время – доли миллисекунд. На сигнале появляется смаз – вертикальный след от ярких участков изображения размером во весь кадр. Эта проблема радикально решается в приборах с межстрочным переносом, завоевавших доминирующее положение на рынке бытовой видеотехники (рис. 4.4).

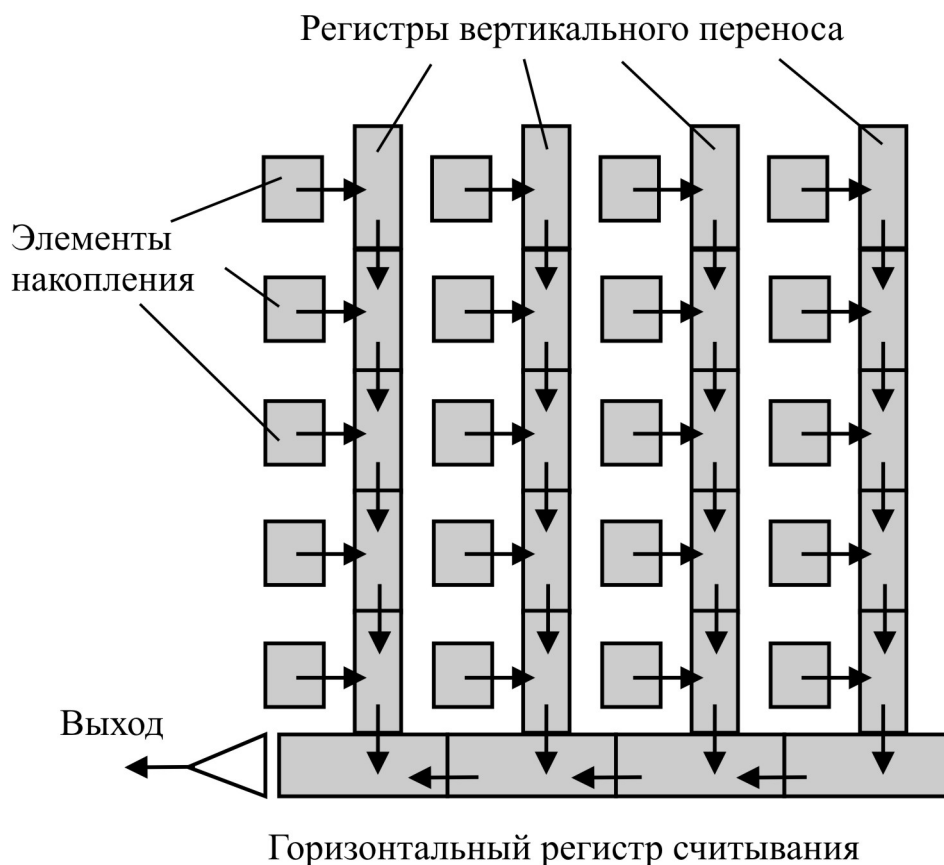


Рис. 4.4

Функция накопления заряда и его переноса здесь разделены. Перенос зарядового рельефа всего кадра происходит за один такт, и смаз не возникает; кроме того, к матрице с межстрочным переносом добавляется ещё одна секция памяти с соответствующим числом элементов, что исключает искажения, возникающие из-за попадания в каналы переноса носителей, генерируемых в глубине подложки.

По сравнению с матрицами с кадровым переносом фактор заполнения в матрицах с межстрочным переносом примерно вдвое меньше, т. к. около половины площади фоточувствительной поверхности закрыто от света. Чтобы повысить эффективность сбора фотонов, используется микрорастр – массив небольших линз (рис. 4.5).

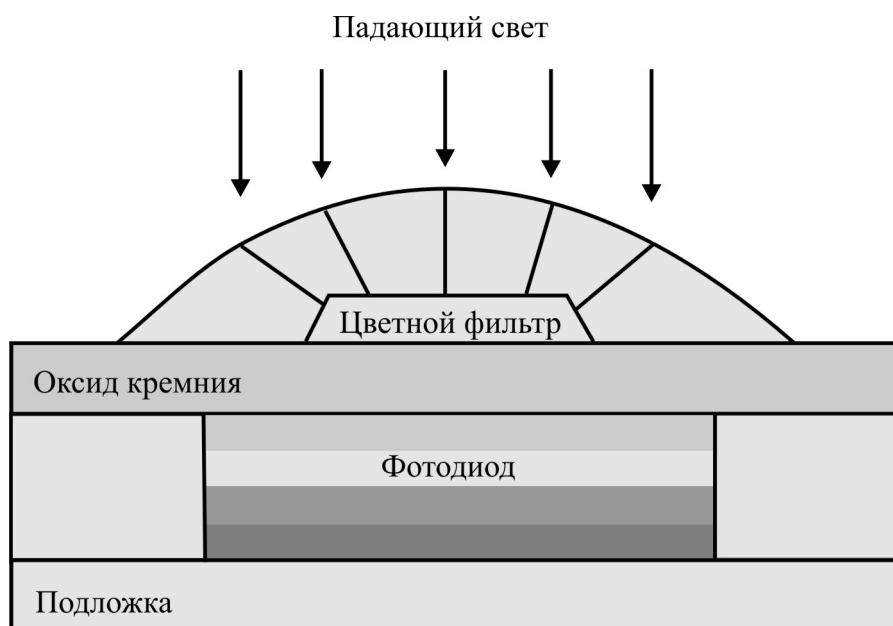


Рис. 4.5

Однако приёмники изображения – это одно из применений ПЗС. Добавив к регистру ПЗС устройство ввода электрического сигнала, получим линию задержки. В качестве элемента регистрации зарядового пакета можно использовать плавающий затвор, характеризующийся неразрушающим считыванием, т. е. получить регистр с отводами. Такие регистры являются основой трансверсальных фильтров, широко применяющихся в обработке радиолокационных сигналов. Налажено массовое производство ПЗС для бытовой электроники – видеокамер. Революционное воздействие оказали ПЗС на астрономию, где их появление по значению сравнимо разве что с тем, которое оказало применение фотопластинок в качестве средства регистрации вместо человеческого глаза.

Требования к ПЗС, предъявляемые астрономией, особенно космического базирования, стимулировали развитие технологии их изготовления и появления уже сегодня приборов с числом элементов 4096 на 4096 и квантовым выходом около 90 %. Наконец, микроскопия в медицине и биологии, компьютерное зрение и видеоконференции, системы ориентации космических аппаратов и считыватели штрихкода, телефакс и сканер – всё это стало доступным благодаря ПЗС.