

Датчики изображения

Ольга Гуреева (Москва)

Датчиками изображения называются полупроводниковые устройства, преобразующие фотоны в электрическое напряжение, а затем в цифровые данные. Датчики изображения используются в самых различных электронных системах – от любительской цифровой камеры до промышленных, научных и военных приборов регистрации фото- и видеоинформации. В статье подробно рассматриваются основные принципы работы датчиков изображения, выполненных по ПЗС- и КМОП-технологиям.

Немного истории

Как и другие цифровые устройства, твердотельные датчики изображения впервые появились в военной лаборатории. В начале 60-х годов прошлого века, в разгар холодной войны, американские военно-воздушные силы совместно с ЦРУ запустили на околоземную орбиту секретный спутник Corona (см. рис. 1).

Спутник-шпион был оснащён самой современной аппаратурой, в том числе уникальной фотокамерой КН с длиннофокусным объективом и новым типом фотоплёнки на полиэфирной основе. Для калибровки масштаба получаемых изображений американцы выкашивали на бескрайних кукурузных полях Среднего

Запада огромные геометрические фигуры, легко наблюдаемые из космоса. Жёлтая пресса сразу приписала «загадочным кругам» внеземное происхождение (см. рис. 2).

Когда специальный керамический контейнер заполнялся отснятыми фотоплёнками, он сбрасывался со спутника и, преодолев плотные слои атмосферы, спускался на парашюте в районе Гавайских островов. Находясь ещё в воздухе, груз захватывался транспортным самолетом ВВС США C-119, оборудованным специальным тросом с крюками (рис. 3).

Если самолету не удавалось выполнить захват, контейнер падал в Тихий океан, где мог плавать на поверхности воды в течение двух суток, дожидаясь

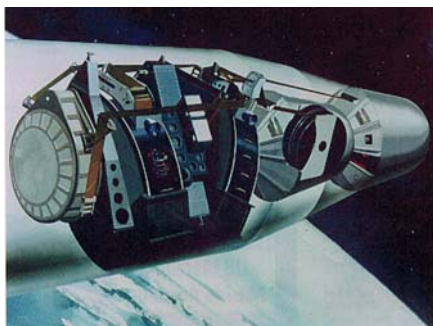


Рис. 1. Спутник Corona с фотокамерой КН на борту

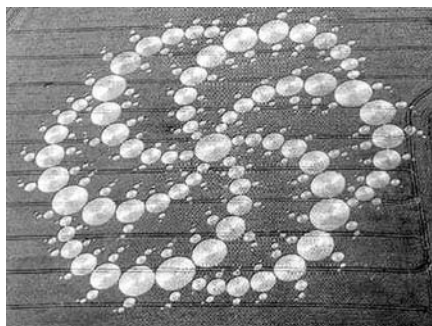


Рис. 2. Геометрические фигуры, предназначенные для калибровки изображения



Рис. 3. Транспортный самолет C-119 в момент захвата контейнера с фотоплёнкой



Рис. 4. Уильям Бойль (слева) и Джордж Смит (справа)

ья, пока его выловят американские военные корабли. Через сорок восемь часов вода растворяла соляные пробки контейнера, и он шёл на дно со всем содержимым. Несмотря на предусмотренный режим самоуничтожения, несколько контейнеров всё же попали в руки советских спецслужб.

Американцы были крайне заинтересованы в разработке новых технологий спутникового слежения, которые исключали бы «слабое звено» – процесс возвращения плёнки с околоземной орбиты. Было предложено обрабатывать фотоплёнку на борту спутника, затем с помощью светового луча сканировать её, преобразуя графическую информацию в аналоговый сигнал. Далее сигнал передавался на наземную приёмную станцию, которая, в свою очередь, преобразовывала его обратно в изображение. Процесс был похож на тот, что использовался информационными агентствами Associated Press и United Press International для передачи новостей и фотографий по проводам.

Очень скоро на смену аналоговым пришли цифровые системы. Трудно сейчас определить точную дату рождения цифровой фотографии. Предположительно это самое начало 60-х годов XX века, когда были обнаружены светочувствительные свойства комплементарного металло-оксидного полупроводника (КМОП). Прибор с зарядной связью (ПЗС) был изобретен позже, в 1969 г., двумя сотрудниками Bell Laboratories – Уильямом Бойлем и Джорджем Смитом (см. рис. 4).

Качество изображений, полученных с помощью прибора с зарядной связью, было намного выше качества изображений, полученных с помощью КМОП-датчиков. Вследствие этого ПЗС быстро вытеснил КМОП, став наиболее распространённым полупроводниковым устройством для цифровой регистрации изображений. Тем не менее, КМОП-датчики не были забыты. Они оказались более радиационно-стойкими, поэтому американское военное ведомство продолжило финансирование исследований в области КМОП с целью их дальнейшего использования в космической фотографии.

ПЗС и КМОП-технологии

Сегодня, несмотря на всё разнообразие технологических деталей, в боль-

шинстве цифровых камер используются либо ПЗС, либо КМОП-датчики. Основным отличием между ними является способ переноса электронов в матрице, а также возможность КМОП реализовывать дополнительные функции непосредственно на кристалле. Интересно, что первоначально ни КМОП, ни ПЗС не имели никакого отношения к считыванию изображения. Оба устройства были созданы для хранения информации и представляли собой твердотельную память.

В 1967 г. сотрудник Bell Laboratories Эндрю Бобек разработал первую энергонезависимую память на цилиндрических магнитных доменах (пузырьковая память). Вдохновлённые полученным результатом, в Bell Labs продолжили работы в области энергонезависимой памяти и стали экспериментировать с последовательно запоминающими ПЗС-устройствами. Появление более эффективной и быстрой технологии EEPROM (электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство) привело к тому, что ПЗС и пузырьковая память сразу морально устарели. Тем не менее в результате экспериментов обнаружилось, что ПЗС-память обладает прекрасными возможностями по переносу заряда, что и определило её дальнейшую судьбу. Прибор с зарядовой связью стал использоваться в качестве устройства для считывания изображения. Первые коммерчески доступные версии ПЗС-датчиков появились в 1973 г. В свою очередь многофункциональная и энергосберегающая КМОП-технология стала широко применяться в различных устройствах памяти и обработки информации.

ЭФФЕКТ МАСШТАБА ПРОИЗВОДСТВА

ПЗС-устройства представляют собой специализированные микросхемы, предназначенные исключительно для «захвата» изображения. Микросхемы данного класса производятся на полупроводниковых фабриках, принадлежащих крупнейшим корпорациям – Sony, Sharp, Philips, Kodak, Matsushita и Fuji.

В отличие от ПЗС, область применения КМОП-устройств намного шире – от сложнейшей вычислительной техники до разнообразных изделий потребительской электроники.

КМОП-устройства изготавливаются по стандартному технологическому процессу в массовых количествах, и поэтому себестоимость их производства невысокая. Помимо дешёвизны производства, КМОП-устройства в сравнении с ПЗС имеют ряд дополнительных преимуществ. Во-первых, архитектура КМОП позволяет расположить на одном кристалле процессор обработки изображения и аналого-цифровой преобразователь, что значительно снижает стоимость готового изделия. Во-вторых, геометрические размеры КМОП-датчиков значительно меньше ПЗС, так как в них не используется ряд дополнительных компонентов. И в-третьих, к достоинствам КМОП следует отнести их экономичность с точки зрения энергопотребления. Это делает КМОП-датчики более дешёвыми в эксплуатации.

Тем не менее в устройствах, где требуется получить высокое качество изображения, предпочтительнее использовать технологию ПЗС. ПЗС-датчики обладают большей светочувствительностью, широким динамическим диапазоном и меньшими шумами.

Следует заметить, что в последнее время КМОП-технология была значительно усовершенствована. Достижения в области сверхтонкой литографии и дальнейшая миниатюризация транзисторов в интегральных схемах позволили использовать в КМОП-устройствах более тонкие металлические проводники. Соответственно, увеличилась полезная поверхность кремниевого кристалла КМОП-датчика, на который падает свет. Это позволило увеличить его светочувствительность и уменьшить потребляемую мощность.

Всего несколько лет назад цифровые камеры, оснащённые КМОП-датчиками, обеспечивали посредственное качество снимков. Шумы были настолько заметны, что, например, ровные вертикальные кромки зданий на фотографии казались изогнутыми. Сегодня зеркальная фотокамера Cannon EOS 400D, оснащённая 10,1-мегапиксельным КМОП-датчиком, ничем не уступает по качеству изображения аналогичным камерам с дорогими ПЗС-датчиками. Вероятнее всего, в ближайшие годы как в любительских, так и в профессиональных камерах на смену ПЗС придут КМОП-

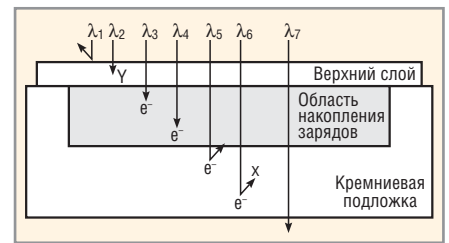


Рис. 5. Взаимодействие фотонов с кремнием

датчики. Технология ПЗС будет применяться ещё некоторое время в высшем ценовом сегменте и при узкоспециализированной съёмке.

КРЕМНИЙ

подавляющее большинство датчиков изображения созданы на основе кремния. Когда фотоны попадают на кристалл кремния, электроны кремния возбуждаются и разрушают ковалентную связь, удерживающую их в атоме. Количество высвободившихся электронов прямо пропорционально мощности светового потока. Основное отличие конструкций датчиков определяет технология считывания свободных электронов. Появление свободных электронов, точнее, электронно-дырочных пар, возможно, если фотоны обладают достаточной энергией, чтобы разрушить ковалентные связи в атомах кремния. Таким образом, энергия фотонов должна быть больше, чем запрещённая зона кремния – 1,1 эВ. Этот энергетический барьер преодолевают электромагнитные волны видимой части спектра (от 400 до 750 нм) и волны, близкие к инфракрасному спектру (до 1100 нм). Волны длиной менее 400 нм могут быть поглощены или отражены датчиком. В том случае, когда энергия фотонов меньше, чем ширина запрещённой зоны, а это происходит при длинах волн свыше 1100 нм, фотоны проходят сквозь кристалл кремния, не вызывая появления свободных электронов. По этой причине именно кремний используется для создания датчиков изображения (рис. 5).

В идеальных условиях существует прямая зависимость между фотонами и электронами, когда один фотон высвобождает один электрон. В таком случае мы говорим о 100-% квантовом выходе. В реальных условиях датчики изображений не столь эффективны. Для высвобождения одного электрона могут потребоваться несколько фотонов. Встречается и обратная си-



Рис. 6. Пиксели датчика изображения

туация, когда фотон невидимой области спектра высвобождает более одного электрона. Как только электроны высвобождены, они должны быть считаны датчиком. На этапе считывания также возникают потери, поэтому говорить о 100-% квантовой эффективности не приходится.

Существует ещё одно обстоятельство, которое влияет на квантовую эффективность. Это качество и чистота кремниевой подложки. Кристалл кремния выращивается, и от того, в каких условиях и как он выращивается, зависит его качество. Когда кристаллические решетки расположены в одном направлении, кремний обладает лучшей электропроводностью. Возможно, в будущем кремниевые пластины будут выращивать в космосе. Это позволит устранить негативное влияние силы тяжести, не позволяющее сформировать идеальную кристаллическую решетку.

Получение полупроводникового материала на основе кремния является сложной технологией, которая требует сверхчистого помещения и высокоточных операций. Особо прецизионным процессом является нанесение на кремниевую пластину фоторезистивной маски. Далее пластина подвергается световой и температурной обработке, ионному легированию, нанесению дополнительных слоёв и травлению. Легирование кремния повышает его электропроводность. В качестве примесей используются различные материалы. Так, например, бор, имеющий одним электроном меньше, создаёт в кри-

сталлической решётке «дырку». Полученный таким образом полупроводник называется полупроводником р-типа, или PMOS (positive metal-oxide semiconductor – положительный металло-оксидный полупроводник). С примесью фосфора, имеющего на один электрон больше, полупроводник становится полупроводником n-типа, или NMOS (negative metal-oxide semiconductor – отрицательный металло-оксидный полупроводник).

PMOS-полупроводники притягивают отрицательно заряженные частицы, а NMOS – отталкивают. Это взаимодействие определяет характер движения заряженных частиц в полупроводнике.

КМОП-датчики содержат пару транзисторов р- и n-типа. Специфика КМОП-устройств заключается в низком энергопотреблении в режиме ожидания и/или хранения логических уровней и высоком энергопотреблении при переключении из одного состояния в другое.

ПИКСЕЛЫ

Датчик изображения состоит из набора пикселей, которые представляют собой светочувствительные элементы. Обычно пиксели располагаются в узлах пересечения строк и столбцов в предполагаемой координатной сетке (см. рис. 6).

Структура пикселей зависит от типа датчика, но принцип их работы везде одинаков. Светочувствительная область пикселей, преобразовывающая полученные кванты света в электроны, называется фотодетектором. Электроны фотодетектора накапливаются в так называемом зарядовом колодце или потенциальной яме (см. рис. 7).

Величина заряда зависит от интенсивности света, падающего на поверхность фотодетектора. Соответственно, зарядовый колодец содержит некоторую часть информации об ис-

ходном изображении в виде электрического заряда.

Зарядовый колодец создаётся с помощью введения примесей в процессе производства датчика. Например, пиксел может обладать PMOS-колодцем на NMOS-подложке. Чем меньше количество примесей используется, тем больше разница потенциалов.

Строение пикселей КМОП-и ПЗС-матриц примерно одинаковое. Различия между данными типами матриц проявляются уже после того, как фотоны преобразуются в электроны. Необходимо отметить, что архитектура пикселей у различных производителей может быть разной. Например, в свое время компания Philips использовала нанесение тонкого слоя кремния с примесью мышьяка на светочувствительный элемент PMOS (легирование бором) для увеличения зарядной ёмкости пиксела.

МИКРОЛИНЗЫ

В случае использования фотопленки галоиды серебра, нанесённые на её полимерную основу, всегда реагируют на свет, независимо от угла падения света.

Пиксели матрицы светочувствительны только в области прямого или близкого к прямому углу падения света, где зарядовая ёмкость пиксела максимальна. Для коррекции угла падения света и увеличения светочувствительности над каждым пикселем матрицы устанавливается выпуклая миниатюрная линза (см. рис. 6). Микролинзы создаются нанесением резистивного материала на матрицу по сетке расположения пикселей. Затем сетка протравливается. При нагревании остатки материала оплавляются и принимают куполообразную форму. Форма и характеристики микролинз зависят от толщины и свойств используемого резистивного материала.

Заметим, что микролинзы используются во многих, но не во всех датчиках изображения. Преимущество применения микролинз заключается в том, что при большой угловой чувствительности датчика можно использовать более компактную и, соответственно, более дешёвую оптическую систему объектива.

Таким образом, любой датчик изображения выполняет пять основных функций – поглощает кванты света, преобразует их в электрический за-

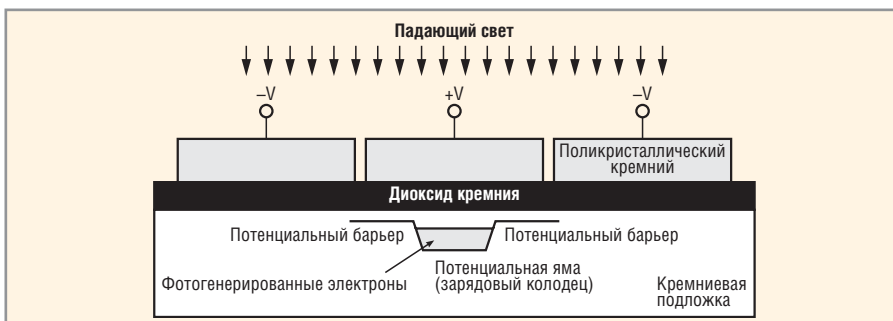


Рис. 7. Зарядовый колодец или потенциальная яма

ряд, накапливает электрический заряд, передает заряд и преобразует его в напряжение. Оба типа датчиков – КМОП и ПЗС – реализуют все эти пять функций. Первые три функции выполняются датчиками одинаково. Основное отличие датчиков КМОП и ПЗС состоит в технологии передачи заряда и в способе преобразования заряда в напряжение.

ПЗС-датчики

Прибор с зарядовой связью обеспечивает очень высокое качество изображения. Заметим, что результат совместной работы других компонентов камеры – оптики объектива, АЦП, процессора обработки изображения – также существенно влияет на качество получаемой цифровой фотографии. Прибор с зарядовой связью получил своё название по способу передачи заряда между зарядовыми колодцами и вывода заряда из матрицы. Заряды сдвигаются от одного горизонтального ряда пикселей к последующему горизонтальному ряду, сверху вниз построчно. Такая параллельная архитектура с верти-

кальными сдвиговыми регистрами используется для передачи зарядов. Заряды перемещаются «в связке». Когда перемещается одна из строчек зарядов, на освободившееся место передвигаются все заряды из строчки выше. Последняя строчка в самой нижней позиции представляет собой горизонтальный сдвиговый регистр. В этой строчке все заряды последовательно покидают датчик, при этом освобождается место для новой «связки» зарядов. Перед тем как покинуть ПЗС-датчик, заряд каждого пикселя усиливается, и на выходе генерируется аналоговый сигнал с различным напряжением. Далее этот сигнал пересылается на отдельный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). На выходе АЦП формируется последовательность двоичных данных, представляющих строчку изображения, полученного датчиком. В отличие от оперативной памяти компьютера, где логическая единица либо ноль представлены наличием или отсутствием заряда, заряд на ПЗС сохраняется в аналоговом виде до тех пор, пока не преобразуется АЦП.

В связи с тем что ПЗС передаёт только электрический заряд, используя процесс зарядовой связи, который обладает низким сопротивлением и меньше подвержен помехам от других электронных компонентов, результирующий сигнал, как правило, содержит меньше шумов по сравнению с сигналом КМОП-датчиков. Тем не менее передача заряда не обладает 100-% эффективностью. Часть электронов теряется на пути между зарядовым колодцем и выходом датчика. Эффективность переноса заряда (charge transfer efficient – СТЕ) является одной из важнейших характеристик ПЗС-датчика.

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Curtin D.P. Image sensors. www.shortcourses.com.
2. Grotta S.W. Anatomy of digital camera: Image sensors. www.extremetech.com.
3. KODAK CCD Primer #KCP-001, Charge-coupled device (CCD) Image Sensors. www.kodak.com.



Новости мира News of the World Новости мира

Органическая память на золотых наночастицах

Учёными ведутся поиски материалов для создания памяти с хорошими техническими характеристиками. Важным показателем является стоимость производства. Именно на этом параметре акцентируют внимание разработчики новой технологии.

Для создания образца памяти учёные применили наночастицы золота и органическое вещество пентацен, которое применяется в качестве полупроводника. Устройство имеет многослойную структуру. На кремниевый субстрат с проводимостью n-типа наносят 4,5-нм слой диоксида кремния, широко применяющегося в качестве подзатворного диэлектрика в современных транзисторах. Поверх него наносится слой пентацена с наночастицами золота. В качестве материала для электрода выбрано золото.

Наночастицы золота, которые представляют собой слой толщиной 3...5 нм, играют роль ячеек с хранением (запоминанием) заряда. Для получения «стройного» слоя наночастицы помещаются в соль лимонной кислоты. Роль полупроводникового материала берёт на себя пентацен.

Для тестирования образца памяти исследователи изучали зависимость её состояния от приложенного напряжения. При

подаче отрицательного напряжения носители позитивного заряда с кремния инжектируются в слой пентацена и далее захватываются золотыми наночастицами. При подаче напряжения противоположного знака наночастицы дырки «отдают».

О сроках внедрения своего изобретения исследователи пока ничего не говорят. Возможно, это один из множества «мертворожденных» проектов. Учёные верят, что освоение новой технологии выведет на новый уровень молекулярную электронику.

physorg.com

Твёрдый метанол – решение проблемы безопасности топливных ячеек

На очередной выставке FC Expo 2007, посвящённой разработкам в области топливных ячеек, компания Kurita Water Industries представила новую версию своего твёрдого метанола.

Предыдущая версия требовала помещения гранул метанола в небольшое количество воды для осуществления контакта. Новая версия отличается отсутствием такого ограничения, что позволяет отказаться от дополнительных компонентов, отвечающих за водоснабжение. Для того чтобы запустить какое-либо устройство, нужно



лишь насыпать в ячейку гранулы, содержащие метанол. Такой метанол не является настолько опасным в применении по сравнению с жидким метанолом, а это позволяет использовать его даже во время авиаперелётов. Платить за это приходится вдвое меньшей ёмкостью батареи.

Теперь стоит задача воплотить эту усовершенствованную версию топливной ячейки в компактном съёмном картридже, который можно будет использовать в мобильных устройствах. Чтобы вывести технологию на рынок в 2007 или 2008 г., компания планирует сотрудничать с ведущими мировыми производителями мобильных устройств.

techon.nikkeibp.co.jp