

УДК 520.6.05

# СТРУКТУРА, СОСТАВ И КОМПОНЕНТЫ МАЛОГАБАРИТНОГО ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

К.т.н. О.Н. Замирец<sup>1</sup>, Я.О. Замирец<sup>2</sup>

1. Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г.Харьков

2. Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского «ХАИ», г.Харьков

*Приведены структура, состав и компоненты малогабаритного звездного датчика. Описаны физические процессы функционирования и характеристики КМОП и ПЗС матриц, их основные преимущества и недостатки. Даны рекомендации для выбора и практического построения звездных датчиков.*

*Наведено структуру, склад і компоненти малогабаритного зоряного датчика. Описано фізичні процеси функціонування і характеристики КМОП і ПЗС матриць, їх основні переваги та недоліки. Дано рекомендації для вибору і практичної побудови зоряних датчиків.*

*The structure, composition and components of compact star sensor have been presented. Physical processes of functioning and characteristics of CMOS and CCD matrix, their main advantages and disadvantages have been described. Recommendations for the selection and practical construction of the star sensor have been given.*

**Ключевые слова:** звездный датчик, ПЗС и КМОП матрицы, астроизмерительная система, астроориентация, астрокоррекция.

## Введение

Система ориентации имеет решающее значение для успеха всей космической миссии. Большинство первых спутников либо не имело систему ориентации, либо имело пассивную систему. Вообще, под пассивными системами понимаются такие системы, которые в процессе своего функционирования не расходуют энергетических ресурсов аппарата и не требуют информационного обеспечения. К активным относятся системы, включающие в свой состав датчики, вычислитель и исполнительные органы, потребляющие энергию. Развитие активных систем ориентации началось в основном благодаря запускам телекоммуникационных спутников, имеющих ограничение на направление антенны.

Для построения трехосной ориентации в 70-80 гг. использовались астроприборы, принцип действия которых был основан на слежении за выбранным астроориентиром и автоматическом совмещении направления оптической оси прибора с направлением на астроориентир [1, 2]. С помощью таких приборов осуществлялась начальная выставка гироскопических систем и их периодическая астрокоррекция. Сложность процедуры астрокоррекции, выполнение которой

прерывало решение целевой задачи КА, подталкивало технический прогресс в двух направлениях. С одной стороны, такая ситуация стимулировала разработку более высокоточных гироскопов с возможно малыми величинами собственных дрейфов. Со временем это привело к созданию целого ряда гироскопов, основанных на различных физических принципах и обладающих различными точностными и массово-габаритными характеристиками. В другом направлении велись изыскания по созданию более совершенных и удобных в использовании астроприборов. В результате в конце 80-х годов стали появляться первые звездные датчики, основанные на ПЗС-матрице и способные определять трехосную ориентацию по любому участку звездного неба.

Современные модификации астроизмерительных систем, обладая массой в несколько килограммов, определяют ориентацию с точностью до единиц угловых секунд. В последнее десятилетие существенно повысились технические характеристики звездных координаторов, а именно увеличились частота обновления информации об ориентации и диапазон рабочих угловых скоростей. За счет этого стало возможным проводить квазинепрерывную калибровку гироскопов, практически полностью, исключая их дрейф.

Обеспечение высокого уровня информационных технических и эксплуатационных характеристик бортовых приборов малых космических аппаратов имеет решающее значение для достижения высокого технического уровня спутников в целом. Недостаточный ресурс работы, большие массогабаритные параметры и энергопотребление, и самое главное, невысокие информационные характеристики (пространственное разрешение, точность ориентации и стабилизации, качество калибровки и др.) многих современных приборов создают серьезные затруднения при разработке новых КА. В связи с этим необходимо уделять повышенное внимание совершенствованию аппаратной базы, повышению точности, быстродействия, помехозащищенности с одновременным уменьшением массогабаритных характеристик.

## Матрицы и сенсоры для звездных датчиков

Сердцем любой цифровой видео- или фотокамеры (в настоящее время границы между этими типами устройств постепенно стираются) является

светочувствительный сенсор. Он преобразует видимый свет в электрические сигналы, используемые для дальнейшей обработки с помощью электронных схем. Свет можно рассматривать как поток элементарных частиц — фотонов. Фотоны, попадая на поверхность некоторых полупроводниковых материалов, способны приводить к образованию электронов и дырок (напомним, что дыркой в полупроводниках принято называть вакантное место для электрона, образующееся в результате разрыва ковалентных связей между атомами полупроводникового вещества). Процесс генерации электронно-дырочных пар под воздействием света возможен только в том случае, когда энергии фотона достаточно, чтобы «оторвать» электрон от «родного» ядра и перевести его в зону проводимости. Энергия фотона напрямую связана с длиной волны падающего света, то есть зависит от так называемого цвета излучения. В диапазоне видимого (то есть воспринимаемого человеческим глазом) излучения энергии фотонов оказывается достаточно для того, чтобы породить генерацию электронно-дырочных пар в таких полупроводниковых материалах, как, например, кремний.

Поскольку количество образующихся фотоэлектронов прямо пропорционально интенсивности светового потока, появляется возможность математически связывать количество падающего света с величиной порождаемого им заряда. Именно на этом простом физическом явлении и основан принцип действия светочувствительных сенсоров. Сенсор выполняет пять основных операций: поглощает фотоны, преобразует их в заряд, накапливает его, передает и преобразует в напряжение. В зависимости от технологии изготовления различные сенсоры осуществляют задачи хранения и накопления фотоэлектронов по-разному. Кроме того, могут использоваться различные методы преобразования накопленных электронов в электрическое напряжение (аналоговый сигнал), которое, в свою очередь, преобразуется в цифровой сигнал.

Матрица позволяет преобразовывать свет в электрические сигналы, доступные для дальнейшей электронной обработки. Существуют матрицы двух типов: КМОП и ПЗС. Основной принцип действия и ПЗС- и КМОП-матриц (сенсоров) одинаков: под воздействием света в полупроводниковых элементах рождаются носители заряда, которые впоследствии преобразуются в электрический сигнал. Различие между данными сенсорами заключается, прежде всего, в способе накопления и передачи заряда, а также в технологии преобразования его в аналоговый сигнал.

Данные типы матриц имеют одну светоприёмную плоскость, на которой расположены очень маленькие светочувствительные элементы, реагирующие на световой поток разных цветов, и впоследствии, с помощью программного обеспечения, все пересчитываются в привычное RGB или CMYK изображение, которые, в свою очередь складываются из элементарных цветовых точек (пикселей).

Немаловажную роль играет программное обеспечение. Поэтому, если относиться к изначально

полученному файлу как и к исходнику для работы, можно почувствовать и увидеть эту разницу. Из-за того, что файлы, полученные цифровым способом не содержат зерна, они менее критичны к процедуре интерполированного увеличения размера. Это делается с помощью специальных программ. Конечно, есть предел этому увеличению, но у ПЗС и КМОП сенсорах он сильно отличается, в пользу ПЗС матриц. Это происходит из-за того, что файлы, полученные ПЗС матрицами, содержат значительно больше мелких деталей, чем файлы КМОП-сенсоров, благодаря технологии их работы. Изображение, полученное бти мегопиксельной приставкой к среднеформатной камере способно быть увеличенным, при умелом обращении, до 150 – 200 мегабайт, всего с 18.

CCD- это charge-coupled device (ПЗС — прибор с обратной зарядной связью). Этот тип матриц изначально считался более качественным, однако и более дорогим и энергозатратным. Если представить основной принцип работы матрицы CCD (рис. 1) в двух словах, то они собирают всю картину в аналоговой версии, и только потом оцифровывают [3].

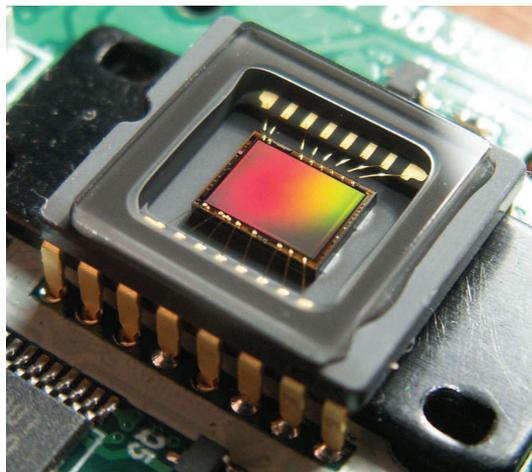


Рис.1. ПЗС матрица

В отличие от CCD матриц, CMOS матрицы (complementary metal-oxide-semiconductor, комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник, КМОП), оцифровывают каждый пиксель на месте. CMOS матрицы были изначально менее энергопотребляющие и дешевыми, особенно в производстве больших размеров матриц, однако уступали CCD матрицам по качеству (рис. 2).

### Характеристика ПЗС – сенсоров

Исторически первыми в качестве светочувствительных элементов для видеокамер были использованы так называемые ПЗС-матрицы, массовое производство которых началось в 1973 году. Аббревиатура ПЗС расшифровывается как прибор с зарядовой связью; в английской литературе используется термин CCD (Charge-Coupled Device). Простейший ПЗС-сенсор представляет собой конденсатор, способный под воздействием света накапливать электрический заряд.

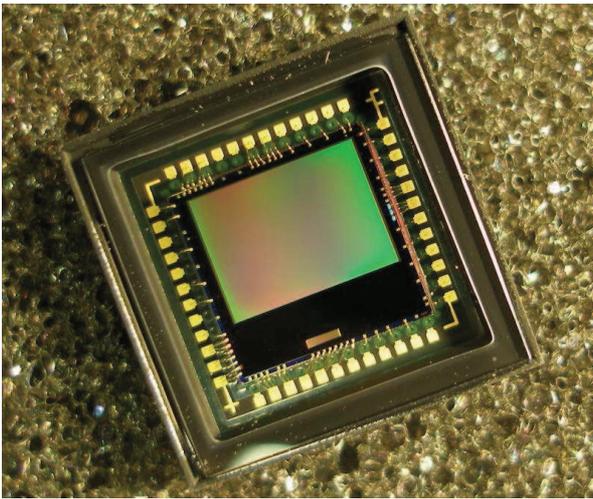


Рис. 2. КМОП-матрица

Обычный конденсатор, состоящий из двух разделенных слоев диэлектрика металлических пластин, здесь не подойдет, поэтому используют так называемые МОП-конденсаторы. По своей внутренней структуре такие конденсаторы представляют собой сэндвич из металла, оксида и полупроводника (от первых букв используемых компонентов они и получили свое название). В качестве полупроводника используется легированный кремний р-типа, то есть такой полупроводник, в котором за счет добавления атомов примеси (легирования) образуются избыточные дырки. Над полупроводником расположен тонкий слой диэлектрика (оксида кремния), а сверху — слой металла, выполняющий функцию затвора, если следовать терминологии полевых транзисторов (рис. 3).

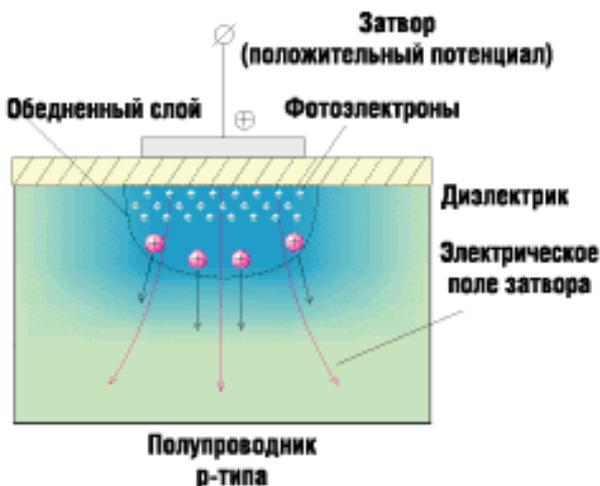


Рис. 3. МОП-конденсатор, выполняющий функцию элементарного светочувствительного сенсора

Как уже отмечалось, под воздействием света в полупроводнике образуются электронно-дырочные пары. Однако наряду с процессом генерации происходит и обратный процесс — рекомбинация дырок и электронов. Поэтому следует предпринять меры, чтобы разделить образующиеся электроны и дырки и сохранять их в

течение необходимого времени. Ведь именно количество образованных фотоэлектронов несет информацию об интенсивности поглощенного света. Для этого и предназначены затвор и слой изолирующего диэлектрика. Предположим, что на затвор подан положительный потенциал. В этом случае под воздействием созданного электрического поля, проникающего сквозь диэлектрик в полупроводник, дырки, являющиеся основными носителями заряда, начнут сдвигаться в сторону от диэлектрика, то есть в глубь полупроводника. На границе полупроводника с диэлектриком образуется обедненная основными носителями, то есть дырками, область, причем размер этой области зависит от величины приложенного потенциала. Именно эта обедненная область и является «хранилищем» для фотоэлектронов. Действительно, если полупроводник подвергнуть воздействию света, то образующиеся электроны и дырки будут двигаться в противоположных направлениях — дырки в глубь полупроводника, а электроны к обедненному слою. Так как в этом слое нет дырок, то электроны будут сохраняться там без процесса рекомбинации в течение требуемого времени. Естественно, что процесс накопления электронов не может происходить бесконечно. По мере увеличения количества электронов между ними и положительно заряженными дырками возникает наведенное электрическое поле, направленное противоположно полю, создаваемому затвором. В результате поле внутри полупроводника уменьшается до нуля, после чего процесс пространственного разделения дырок и электронов становится невозможным. Как следствие — образование электронно-дырочной пары сопровождается ее рекомбинацией, то есть число «информационных» электронов в обедненном слое перестает увеличиваться. В этом случае можно говорить о переполнении емкости сенсора.

Рассмотренный сенсор способен выполнять две важные задачи — преобразовывать фотоны в электроны и накапливать их. Осталось решить задачу передачи этих информационных электронов в соответствующие блоки преобразования, то есть задачу съема информации.

Представим себе не один, а несколько близко расположенных затворов на поверхности одного и того же диэлектрика (рис.4). Пусть в результате фотогенерации под одним из затворов накопились электроны. Если на соседний затвор подать более высокий положительный потенциал, то электроны начнут перетекать в область более сильного поля, то есть перемещаться от одного затвора к другому. Теперь уже должно быть ясно, что если мы имеем цепочку затворов, то, подавая на них соответствующие управляющие напряжения, можно перемещать локализованный зарядовый пакет вдоль такой структуры. Именно на этом простом принципе и основаны приборы с зарядовой связью.

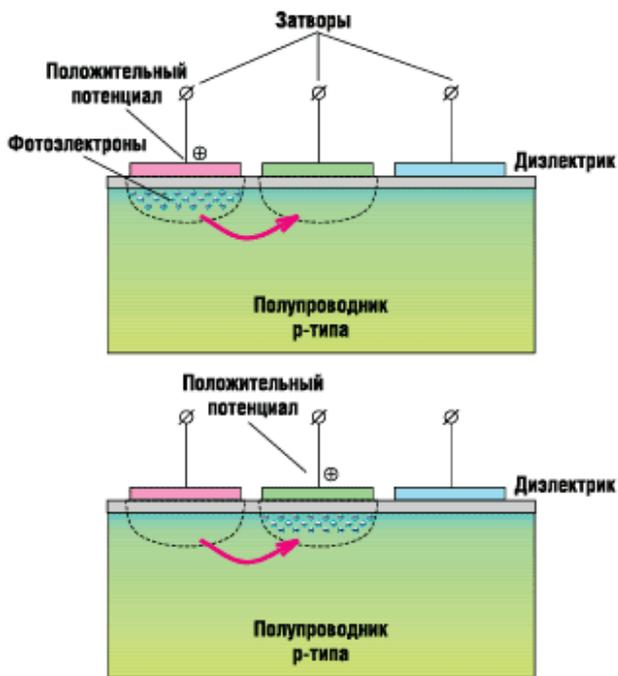


Рис. 4. Перетекание электронов в область более высокого потенциала

Замечательное свойство ПЗС состоит в том, что для перемещения накопленного заряда достаточно всего трех типов затворов — одного передающего, одного принимающего и одного изолирующего, разделяющего пары принимающих и передающих друг от друга, причем одноименные затворы таких троек могут быть соединены друг с другом в единую тактовую шину, требующую лишь одного внешнего вывода (рис. 5). Это и есть простейший трехфазный регистр сдвига на ПЗС.

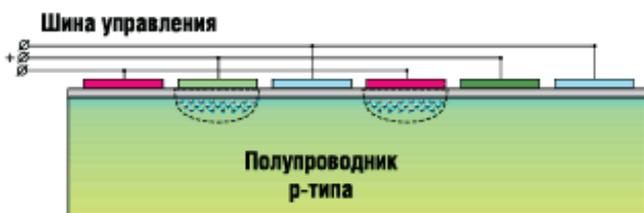


Рис. 5. Перенос заряда с помощью трехфазного регистра сдвига

Так как до сих пор ПЗС-сенсор рассматривался только в одной плоскости — вдоль бокового разреза, вне поля зрения остался механизм удержания электронов в поперечном направлении, при котором затвор подобен длинной полоске. Учитывая, что освещение полупроводника неоднородно в пределах такой полоски, скорость образования электронов под воздействием света будет меняться по длине затвора. Если не принять мер по локализации электронов вблизи области их образования, то в результате диффузии концентрация электронов выровняется и информация об изменении интенсивности света в продольном направлении будет утеряна. Естественно, можно было бы сделать размер затвора одинаковым как в продольном, так и поперечном

направлении, но это потребовало бы изготовления слишком большого числа затворов на ПЗС-матрице. Поэтому для локализации образующихся электронов в продольном направлении используют так называемые стоп-каналы (рис. 6), представляющие собой узкую полоску полупроводника с повышенным содержанием легирующей примеси.

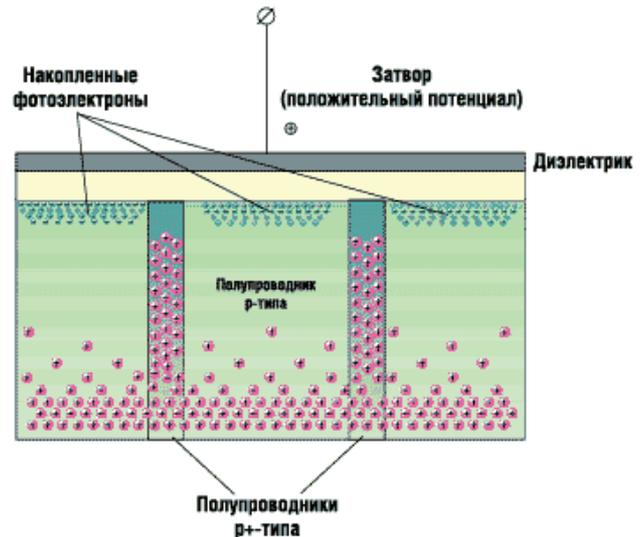


Рис. 6. Формирование стоп-каналов в ПЗС-сенсорах

Чем больше концентрация примеси, тем больше дырок образуется внутри такого проводника (каждый атом примеси приводит к образованию дырки). Но от концентрации дырок зависит, при каком конкретно напряжении на затворе под ним образуется обедненная область. Интуитивно понятно, что чем больше концентрация дырок в полупроводнике, тем труднее их отогнать вглубь.

Рассмотренная нами структура ПЗС-матрицы носит название ПЗС с поверхностным каналом передачи, так как канал, по которому передается накопленный заряд, находится на поверхности полупроводника. Поверхностный способ передачи имеет ряд существенных недостатков, связанных со свойствами границы полупроводника. Дело в том, что ограничение полупроводника в пространстве нарушает идеальную симметрию его кристаллической решетки со всеми вытекающими отсюда последствиями. Не вникая в тонкости физики твердого тела подобное ограничение приводит к образованию энергетических ловушек для электронов. В результате накопленные под воздействием света электроны могут захватываться этими ловушками, вместо того чтобы передаваться от одного затвора к другому. Помимо прочего такие ловушки могут непредсказуемо высвобождать электроны, причем не всегда, когда это действительно нужно. Получается, что полупроводник начинает «шуметь» — иначе говоря, количество накопленных под затвором электронов не будет точно соответствовать интенсивности поглощенного излучения. Избежать подобных явлений можно, но для этого сам канал переноса нужно отодвинуть в глубь проводника. Такое решение было

реализовано специалистами фирмы Philips в 1972 году. Идея заключалась в том, что в поверхностной области полупроводника р-типа создавался тонкий слой полупроводника n-типа, то есть полупроводника, в котором основными носителями заряда являются электроны (рис. 7).

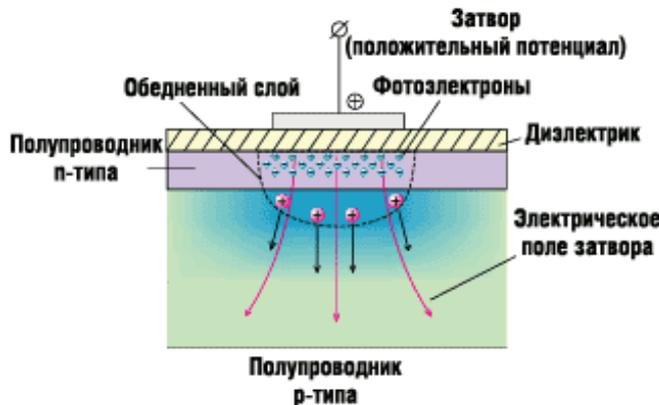


Рис. 7. ПЗС-сенсор со скрытым каналом переноса

Хорошо известно, что контакт двух полупроводников с различными типами проводимости приводит к образованию обедненного слоя на границе перехода. Происходит это за счет диффузии дырок и электронов во взаимно противоположных направлениях и их рекомбинации. Подача положительного потенциала на затвор увеличивает размер обедненной области. Характерно, что теперь сама обедненная область, или емкость для фотозлектронов, находится не на поверхности, а следовательно, отсутствуют и поверхностные ловушки для электронов. Такой канал переноса называется скрытым, и все современные ПЗС изготавливаются именно со скрытым каналом переноса.

Рассмотренные основные принципы функционирования ПЗС-сенсора используются для построения различных по архитектуре ПЗС-матриц. Конструктивно можно выделить две основные схемы матриц: с покадровым переносом и с межстрочным переносом.

В матрице с покадровым переносом имеются две равнозначные секции с одинаковым числом строк: накопления и хранения. Каждая строка в этих секциях образована тремя затворами (передающий, принимающий и изолирующий). Кроме того, все строки разделены множеством стоп-каналов, формирующих ячейки накопления в горизонтальном направлении. Таким образом, наименьший структурный элемент ПЗС-матрицы (пиксел) создается из трех горизонтальных затворов и двух вертикальных стоп-каналов (рис. 8).

За время экспозиции в секции накопления образуются фотозлектронны. После этого тактовые импульсы, подаваемые на затворы, переносят накопленные заряды из секции накопления в затененную секцию хранения, то есть фактически происходит передача всего кадра целиком. Поэтому такая архитектура и получила название ПЗС с покадровым

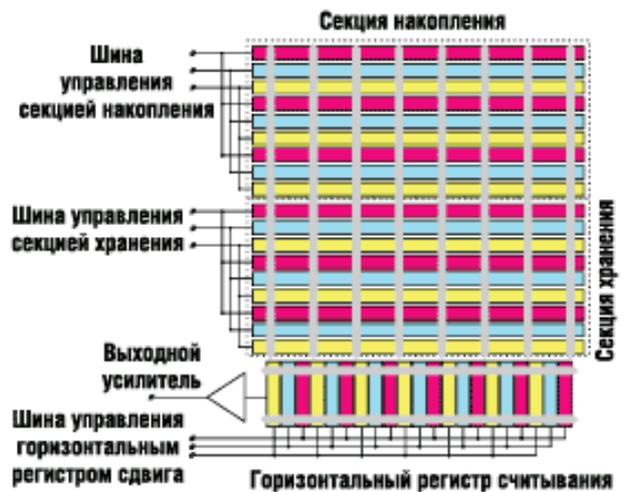


Рис. 8. ПЗС-матрица с покадровым переносом

переносом. После переноса секция накопления очищается и может повторно накапливать заряды, в то время как из секции памяти заряды поступают в горизонтальный регистр считывания. Структура горизонтального регистра аналогична структуре ПЗС-сенсора — те же три затвора для переноса заряда. Каждый элемент горизонтального регистра имеет зарядовую связь с соответствующим столбцом секции памяти, и за каждый тактовый импульс из секции накопления в регистр считывания поступает вся строка целиком, которая после этого передается в выходной усилитель для дальнейшей обработки.

Рассмотренная схема ПЗС-матрицы имеет одно несомненное достоинство — высокий коэффициент заполнения (fill factor). Этим термином принято называть отношение фоточувствительной площади матрицы к ее общей площади. У матриц с покадровым переносом коэффициент заполнения достигает практически 100%. Такая особенность позволяет создавать на их основе очень чувствительные приборы.

Кроме рассмотренного преимущества матрицы с покадровым переносом обладают и рядом недостатков. Прежде всего отметим, что сам процесс переноса не может осуществляться мгновенно. Именно это обстоятельство приводит к ряду негативных явлений. В процессе переноса заряда из секции накопления в секцию хранения первая остается освещенной и в ней продолжается процесс накопления фотозлектронов. Это приводит к тому, что яркие участки изображения успевают внести свой вклад в чужой зарядовый пакет даже за то короткое время, в течение которого он проходит через них. В результате на кадре появляются характерные искажения в виде вертикальных полос, простирающихся через весь кадр от ярких участков изображения. Конечно, для борьбы с подобными явлениями можно применять различные ухищрения, однако наиболее радикальным способом является разделение секции накопления и секции переноса, с тем чтобы перенос протекал в затененной области. Матрицы такой архитектуры получили название ПЗС с межстрочным переносом (рис. 9).

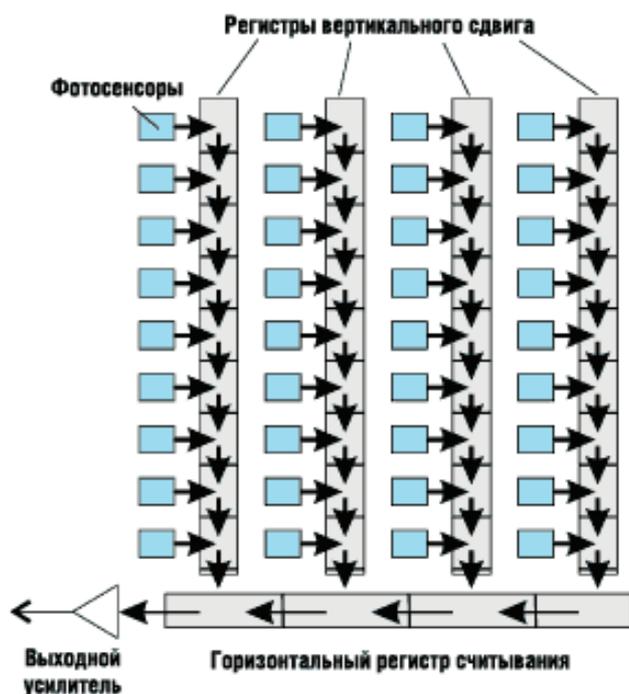


Рис. 9. ПЗС-матрица с межстрочным переносом

В отличие от описанной ранее матрицы с покадровым переносом, в качестве элементов накопления заряда здесь выступают фотодиоды. Заряды, накапливаемые фотодиодами, передаются в затененные ПЗС-элементы, которые осуществляют дальнейший перенос заряда. Необходимо обратить внимание, что перенос всего кадра от фотодиодов в вертикальные ПЗС-регистры переноса происходит за один такт. Возникает закономерный вопрос: почему такая архитектура получила название межстрочного переноса, а также и покадрового переноса, вспомним основной принцип вывода изображения на экран формирования видеосигнала. Кадровый сигнал состоит из сигналов строк, разделенных межстрочным промежутком, то есть временем, необходимым для того, чтобы электронный луч, сканирующий по экрану, успел переместиться от конца одной строки к началу следующей. Имеются также межкадровые промежутки — время, необходимое для перемещения луча от конца последней строки к началу первой строки (переход на новый кадр).

Если вернуться к архитектуре ПЗС-матрицы с межкадровым переносом, то становится понятно, что перенос кадра из секции накопления в секцию хранения происходит во время межкадрового промежутка видеосигнала. Это очевидно, так как для переноса всего кадра потребуется значительный интервал времени. В архитектуре с межстрочным переносом передача кадра происходит за один такт, и для этого достаточно небольшого промежутка времени. Далее изображение поступает в горизонтальный регистр сдвига, причем передача происходит по строкам во время межстрочных интервалов видеосигнала.

Помимо двух рассмотренных типов ПЗС-матриц существуют и иные схемы. Например, схема, объединяющая межкадровый и межстрочный механизм (строчно-кадровый перенос), получается при добавлении к ПЗС-матрице межстрочного переноса секции хранения. При этом перенос кадра от фоточувствительных элементов происходит за один такт во время межстрочного интервала, а во время межкадрового интервала кадр передается в секцию хранения (межкадровый перенос); из секции хранения кадр передается в горизонтальный регистр сдвига во время межстрочных интервалов (межкадровый перенос).

В последнее время получили распространение так называемые супер-ПЗС (Super CCD), использующие оригинальную сотовую архитектуру, которую образуют восьмиугольные пиксели. За счет этого увеличивается рабочая поверхность кремния и повышается плотность пикселей (количество пикселей ПЗС). Кроме того, восьмиугольная форма пикселей увеличивает площадь светочувствительной поверхности.

### Характеристика КМОП – сенсоров

Принципиально другим типом сенсора является так называемый КМОП-сенсор (КМОП — комплементарный металл-оксид-полупроводник; в англоязычной терминологии — CMOS).

Внутренняя архитектура КМОП-сенсоров может быть различной. Так, в качестве фоточувствительного элемента могут выступать фотодиоды, фототранзисторы или фотопентоды [4]. Независимо от типа фоточувствительного элемента неизменным остается принцип разделения дырок и электронов, получаемых в процессе фотогенерации. Рассмотрим наиболее простой тип фотодиода, на примере которого легко понять принцип действия всех фотоэлементов.

Простейший фотодиод представляет собой контакт полупроводников n- и p-типов. На границе контакта этих полупроводников образуется обедненная область, то есть слой без дырок и электронов. Такая область формируется в результате диффузии основных носителей зарядов во взаимно противоположных направлениях. Дырки движутся из p-полупроводника (то есть из области, где их находится в избытке) в n-полупроводник (то есть в область, где их концентрация мала), а электроны движутся в противоположном направлении, то есть из n-полупроводника в p-полупроводник. В результате такой рекомбинации дырки и электроны исчезают и создается обедненная область. Кроме того, на границах обедненной области оголяются ионы примеси, причем в n-области ионы примеси имеют положительный заряд, а в p-области — отрицательный. Эти заряды, распределенные по границе обедненной области, образуют электрическое поле, подобное тому, что создается в плоском конденсаторе, состоящем из двух пластин. Именно это поле выполняет функцию пространственного разделения

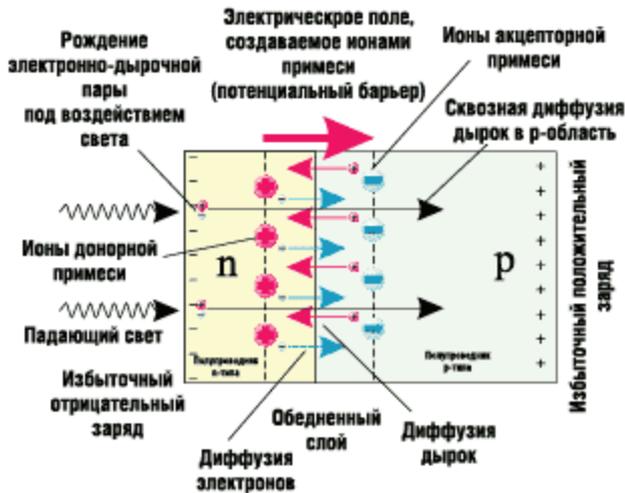


Рис. 10. Принцип действия фотодиода

дырок и электронов, образующихся в процессе фотогенерации. Наличие такого локального поля (его также называют потенциальным барьером) является принципиальным моментом в любом фоточувствительном сенсоре (не только в фотодиоде). Предположим, что фотодиод освещается светом, причем свет падает на n-полупроводник, а p-n-переход перпендикулярен лучам света (рис. 10). Фотоэлектроны и фотодырки будут диффундировать в глубь кристалла, и некоторая их доля, не успевая рекомбинировать, достигнет поверхности p-n-перехода. Однако для электронов существующее электрическое поле является непреодолимым препятствием — потенциальным барьером, поэтому электроны не смогут преодолеть p-n-переход. Дырки же, напротив, ускоряются электрическим полем и проникают в r-область. В результате пространственного разделения дырок и электронов n-область заряжается отрицательно (избыток фотоэлектронов), а r-область — положительно (избыток фотодырок).

Основное отличие КМОП-сенсоров от ПЗС-сенсоров заключается не в способе накопления заряда, а в способе его дальнейшего переноса. Технология КМОП, в отличие от ПЗС, позволяет осуществлять большее количество операций прямо на кристалле, на котором расположена фоточувствительная матрица. Кроме высвобождения электронов и их передачи, КМОП-сенсоры могут также обрабатывать изображения, выделять контуры изображения, уменьшать помехи и производить аналого-цифровые преобразования. Более того, имеется возможность создавать программируемые КМОП-сенсоры, следовательно, можно получить очень гибкое многофункциональное устройство.

Столь широкий набор функций, выполняемых одной микросхемой, — основное преимущество технологии КМОП над ПЗС. При этом сокращается количество необходимых внешних компонентов. Использование в цифровой камере КМОП-сенсора позволяет устанавливать на освободившееся место другие чипы — например, цифровые сигнальные процессоры (DSP) и аналого-цифровые преобразователи.

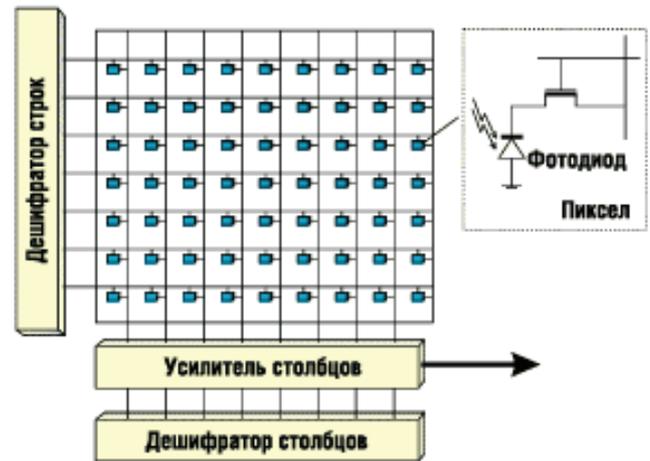


Рис. 11. Структурная схема КМОП-матрицы

Бурное развитие КМОП-технологий началось в 1993 году, когда были созданы активные пиксельные сенсоры. При этой технологии у каждого пикселя имеется свой считывающий транзисторный усилитель, что и позволяет преобразовывать заряд в напряжение непосредственно на пикселе. Кроме того, появилась возможность для произвольного доступа к каждому пикселу сенсора (подобно тому, как работает оперативная память с произвольным доступом) [5]. Считывание заряда с активных пикселей КМОП-сенсора производится по параллельной схеме (рис. 11), что позволяет считывать сигнал с каждого пикселя или с колонки пикселей напрямую. Произвольный доступ позволяет КМОП-сенсору считывать не только всю матрицу целиком, но и выборочные области (метод оконного считывания).

Несмотря на кажущиеся преимущества КМОП-матриц перед ПЗС (основным из которых является более низкая цена), они обладают и рядом недостатков. Наличие дополнительных схем на кристалле КМОП-матрицы приводит к появлению ряда помех, таких как транзисторные и диодные рассеивания, а также эффект остаточного заряда, то есть КМОП-матрицы на сегодняшний день являются более «шумными». Поэтому в профессиональных цифровых камерах в ближайшее время будут использоваться качественные ПЗС-матрицы, а КМОП-сенсоры осваивают рынок более дешевых устройств, к которому, в частности, относятся Web-камеры.

СDD матрицы отличаются более высоким качеством изображения и все еще остаются популярными в областях медицины, промышленности, науки, там где качество изображения является критически важным. За последнее время СDD матрицы уменьшили энергозатратность и стоимость, а CMOS матрицы значительно усовершенствовали качество изображения, особенно после технологического переворота в производстве CMOS -сенсоров, когда по технологии Active Pixel Sensors (APS) к каждому пикселю был добавлен транзисторный усилитель для считывания, что позволило преобразовывать заряд в напряжение прямо в пикселе. Это и обеспечило прорыв CMOS технологии, к

2008 году она стала практически альтернативой CCD матрицам. Более того, технология CMOS позволили снимать видео и ввести эту функцию в современные фотоаппараты, и в большинстве своем современные цифровые фотоаппараты оснащены именно CMOS матрицами.

Сложно однозначно сказать, что лучше – CCD или CMOS матрицы, ибо обе технологии имеют свой рынок и свое применение, и пока что остаются скорее взаимодополняющими. Со временем, возможно, CMOS охватит большие сферы применения, где традиционно первенство принадлежит CCD, но это, по оценкам некоторых экспертов, дело еще по меньшей мере десятилетия.

### Сравнение ПЗС и КМОП-матрицы

Отношение производителей конечной продукции к выбору между ПЗС и КМОП радикально поменялось в 2001 году, когда основные поставщики впервые высказывали общую точку зрения, касающуюся разграничения сфер их применения. К тому времени стало очевидным, что ПЗС обеспечивает лучшие показатели при съемке динамичных и мелких объектов, поэтому её предлагалось использовать для построения систем, требующих высокого качества изображения: цифровых фото и видео камер, медицинского оборудования и т.д. КМОП же отводилась ниша устройств, для которых критична конечная стоимость – недорогие фотоаппараты, бытовая офисная техника и игрушки.

Опыт производства, накопленный за годы развития КМОП, позволил с каждым новым поколением этих сенсоров существенно снижать фиксированные и случайные шумы, влияющие на качество картинки. Еще одно слабое место КМОП – искажения, появляющиеся при захвате динамического изображения без особых артефактов возможен со скоростью 15-30 кадров/сек, и уже 0,3 – мегапиксельные КМОП-сенсоры фактически были избавлены от этой проблемы.

Однако победа в конкуренции технологий, скорее всего, лежит в плоскости уменьшения площади пиксела. Для успеха на рынке 1-мегапиксельных при диагонали 1/4 дюйма площадь пиксела должна составлять не более 3 мкм<sup>2</sup>. При всех усилиях производителей КМОП удовлетворить таким требованиям они пока не могут, поэтому, как считают эксперты, по крайней мере в ближайшее время в данной нише будет господствовать ПЗС.

Многие крупные производители компонентов выпускают и КМОП-сенсоры и ПЗС-матрицы. Например, Sharp, крупнейший в мире поставщик модулей захвата изображения (и ПЗС, и КМОП), считает 2003 год эпохой настоящего расцвета технологии ПЗС.

К преимуществам ПЗС матриц относятся:

- низкий уровень шумов;
- высокий коэффициент заполнения пикселей (около 100%);

- высокая эффективность (отношение числа зарегистрированных фотонов к их общему числу, попавшему на светочувствительную область матрицы, для ПЗС – 95%);

- высокий динамический диапазон (чувствительность).

К недостаткам ПЗС-матриц относятся:

- сложный принцип считывания сигнала, а, следовательно, и технология;

- высокий уровень энергопотребления (до 2-5 Вт);

- дороже в производстве.

Преимущества КМОП-матриц:

- высокое быстродействие (до 500 кадров/сек);

- низкое энергопотребление (почти в 100 раз по сравнению с ПЗС);

- дешевле и проще в производстве;

- перспективность технологии (на том же кристалле в принципе ничего не стоит реализовать все необходимые дополнительные схемы: аналого-цифровые преобразователи, процессор, память, получив, таким образом, законченную цифровую камеру на одном кристалле. Созданием такого устройства, кстати, с 2002 года занимаются совместно Samsung Electronics).

К недостаткам КМОП-матриц относятся:

- низкий коэффициент заполнения пикселей, что снижает чувствительность (эффективная поверхность пиксела 75%, остальное занимают транзисторы);

- высокий уровень шума (он обусловлен так называемыми темновыми токами – даже в отсутствие освещения через фотодиод течет довольно значительный ток, борьба с которым усложняет и удорожает технологию);

- невысокий динамический диапазон.

### Обоснование применения сенсора Aptina MT9D131 в звездном датчике

В результате проведенного исследования для использования в качестве КМОП-матрицы в малогабаритных астроизмерительных системах на базе звездных датчиков ориентации целесообразно применять сенсор Aptina MT9D131.

КМОП датчик Aptina MT9D131 включает в себя головку PCB сенсора с объективом и бортовую камеру, а также кабель USB и штатив. Технические характеристики датчика Aptina MT9D131 представлены в табл. 1.

Особенности КМОП-сенсора Aptina:

- улучшенная производительность при малом освещении;

- сверхнизкая мощность, экономически эффективный;

- внутренний тактовый генератор;

- электронный движущийся затвор;

- интегрированный процессор потока изображений;

- автоматическая коррекция и обработка изображения, включая коррекцию затенения объектива;

- произвольное прореживание изображения со сглаживанием;

- встроенный JPEG – кодер в режиме реального времени ;
- комплексный микроконтроллер для гибкости;
- двухпроводной последовательный интерфейс, обеспечивающий доступ к регистрам и памяти микроконтроллера;
- выбор выходного формата данных: ITU-R BT.601 (YCbCr), 565RGB, 555RGB, 444RGB, JPEG 4:2:2, JPEG 4:2:0;
- выходное FIFO для выравнивания скорости передачи данных;
- программируемая скорость нарастания входного/выходного сигнала.

Таблица 1  
 Параметры КМОП-датчика Artina MT9D131

Параметры	Значение
Разрешение	2Мп
Оптический формат	1/3.2 дюйма (4:3)
Полное разрешение	1600 x 1200 пикселей
Активная площадь матрицы пикселей	4,73 x 3,52 мм
Размер пикселей	2,8 x 2,8 мм
Тип затвора	Электронный движущийся затвор
Максимальная частота кадров	15 кадров в сек
Максимальная скорость передачи данных	80 Мп/сек
Напряжение питания	Аналоговое 2,5 – 3,1 В
	Цифровое 1,7 – 1,95 В
	I/O 1,7 – 3,1 В
	PLL 2,5 – 3,1 В
АЦП разрешение	10 бит
Чувствительность	1 В/ 550 нм
Динамический диапазон	71 дБ
Потребляемая мощность	348 мВт на 15 кадров в сек при полном разрешении

MT9D131 Artina является 1/3.2 дюймовым, 2 Мп КПОМ сенсором с системой встроенной передовой камеры. Система камеры имеет микроконтроллер (MCU) и сложный процессор потока изображений (IFP) с JPEG - кодером в режиме реального времени.

Микроконтроллер управляет всеми компонентами системы камеры и устанавливает основные параметры операций для ядра датчика для оптимизации качества ввода исходных данных изображения IFP.

Ядро датчика состоит из активного массива 1668 x 1248 пикселей, программируемых схем времени и управления, включая PLL, аналогового сигнала цепи с автоматической коррекцией смещения и программируемым коэффициентом усиления, и двух 10-битных A / D преобразователей (АЦП).

Одним из главных преимуществ КМОП технологии с низким уровнем шумов Artina MT9D131 является высокая производительность при малой освещенности, которая достигает качества ПЗС (на основе отношения сигнал – шум и чувствительности к низкой освещенности), сохраняя при этом свойственный размер, стоимость, энергопотребление и преимущества КМОП.

### Выводы

Для построения трехосной ориентации космических аппаратов по любому участку звездного неба требуется большой ресурс работы, минимальные массогабаритные параметры и энергопотребление, высокие информационные характеристики по пространственному разрешению, точности ориентации, стабилизации, быстродействию, помехозащищенности и частоте обновления информации.

Базовыми элементами светочувствительного сенсора, является ПЗС и КМОП-матрицы, которые преобразуют видимый свет в электрические сигналы, которые используются для дальнейшей обработки с помощью электронных схем, при этом количество образующихся фотоэлектронов прямо пропорционально интенсивности светового потока, это позволяет связать количество подающего света с величиной порождаемого заряда.

Принцип действия ПЗС и КМОП-матриц одинаков и базируется на преобразовании света в электрический сигнал, а различие между ними заключается в способе накопления и передачи заряда, а также в технологии преобразования его в аналоговый сигнал.

С точки зрения процесса чтения пикселей, КМОП-матрицы являются более гибкими чем ПЗС матрицы, так как читают каждый пиксель индивидуально.

КМОП-матрицы все еще не обеспечивают такую же высокую точность и гибкость как ПЗС матрицы, но они значительно дешевле.

Выявленные преимущества и недостатки ПЗС и КМОП-матриц учитываются при построении информационных технологий астроизмерительных систем космических аппаратов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ивандиков Я.М. Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов / Я.М. Ивандиков. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.
2. Изнар А.Н. Оптико-электронные приборы космических аппаратов / А.Н. Изнар, А.В. Павлов, Б.Ф. Федоров. - М.: Машиностроение, 1977. - 368 с.
3. Wikipedia: Charge-Coupled Device, May 2006 [http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled\\_device](http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device).
4. HowStuffWorks: What is the Difference between CCD and CMOS Imaging Sensors in a Digital Camera? <http://electronics.howstuffworks.com/question362.htm>.
5. Micron Technology, Inc., 2006. CMOS Image Sensors: CMOS Advantages. <http://www.micron.com/products/imaging/technology/advantages.html>