

УДК 621.432.9

МАТРИЦЫ ЦИФРОВЫХ ФОТОАППАРАТОВ

Казак А.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Михальцевич Г.А.

Типы матриц

Матрица цифрового фотоаппарата – это, в первую очередь, микросхема. Она преобразует световые лучи, которые, преломившись в системе линз и зеркал, попадают на нее. В результате такого преобразования получается электрический сигнал, который выводится в цифровом виде, образуя снимок. За весь этот процесс отвечают специальные фотодатчики, расположенные на самой плате. Чем больше количество датчиков, чувствительных к свету, тем больше разрешение, и, как следствие, качество конечного снимка.

Устройство с зарядовой связью (CCD)

Устройство с зарядовой связью (ПЗС) было изобретено в 1969 году учеными Bell Labs в Нью-Джерси, США. В течение многих лет это была распространенная технология захвата изображений, от цифровой астрофотографии до машинного зрения. ПЗС-сенсор представляет собой кремниевый чип, содержащий массив светочувствительных участков (рис. 1).

Термин «устройство с зарядовой связью» фактически относится к методу, с помощью которого пакеты зарядов перемещаются по микросхеме от фото ячеек к считыванию, сдвиговому регистру, сродни понятию бригады ведра. Тактовые импульсы создают потенциальные ямы для перемещения пакетов заряда по микросхеме, прежде чем они будут преобразованы в напряжение конденсатором. ПЗС-датчик сам по себе является аналоговым устройством, но выходной сигнал немедленно преобразуется в цифровой сигнал с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в цифровых камерах, как на кристалле, так и вне его.

Пакеты заряда ограничены скоростью, с которой они могут быть переданы, поэтому перенос заряда является причиной главного недостатка ПЗС - скорости, но также приводит к высокой чувствительности и согласованности пикселей ПЗС. Поскольку каждый пакет заряда имеет одинаковое преобразование напряжения, ПЗС-матрица очень однородна по своим светочувствительным участкам. Перенос заряда также приводит к явлению «расплывания», когда заряд с одного светочувствительного участка перетекает на соседние участки из-за конечной глубины лунки или емкости заряда, устанавливая верхний предел полезного динамического диапазона датчика. Это явление проявляется в размытии ярких пятен на изображениях с камер CCD.

Чтобы компенсировать небольшую глубину ямы в ПЗС, используются микролинзы для увеличения коэффициента заполнения или эффективной светочувствительной области, чтобы компенсировать пространство на кристалле, занимаемое регистрами сдвига с зарядовой связью. Это улучшает эффективность пикселей, но увеличивает угловую чувствительность для входящих световых лучей, требуя, чтобы они попадали на датчик близко к нормальному падению для эффективного сбора.

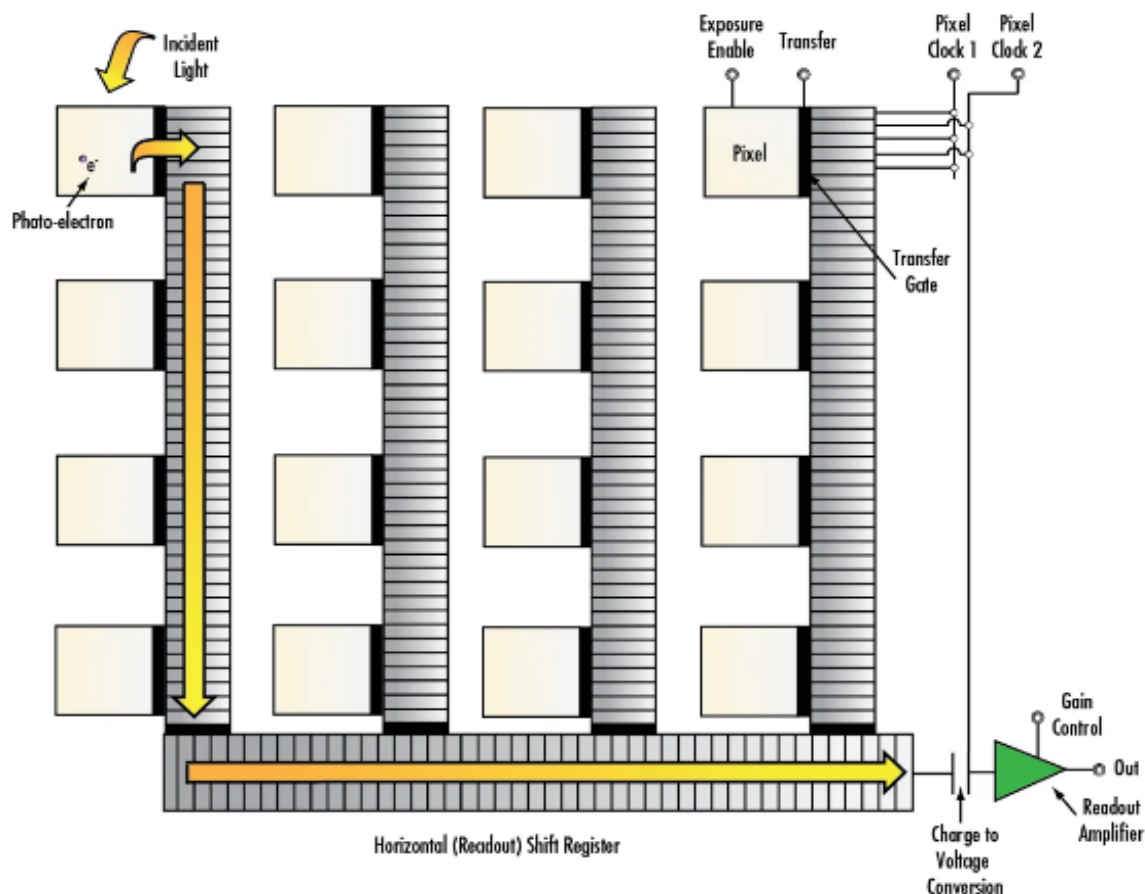


Рисунок 1 – Блок-схема устройства с зарядовой связью (CCD)

Дополнительный металлооксидный полупроводник (CMOS)

Дополнительный металлооксидный полупроводник (CMOS) был изобретен в 1963 году Фрэнком Ванлассом. Однако он не получил на него патента до 1967 года, и он не стал широко использоваться для приложений обработки изображений до 1990-х годов. В датчике CMOS заряд светочувствительного пикселя преобразуется в напряжение на участке пикселя, а сигнал мультиплексируется по строкам и столбцам в несколько встроенных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). CMOS по своей конструкции является цифровым устройством. Каждый узел, по сути, представляет собой фотодиод и три транзистора, выполняющих функции сброса или активации пикселя, усиления и преобразования заряда, а также выбора или мультиплексирования (рис. 2). Это приводит к высокой скорости работы датчиков CMOS.

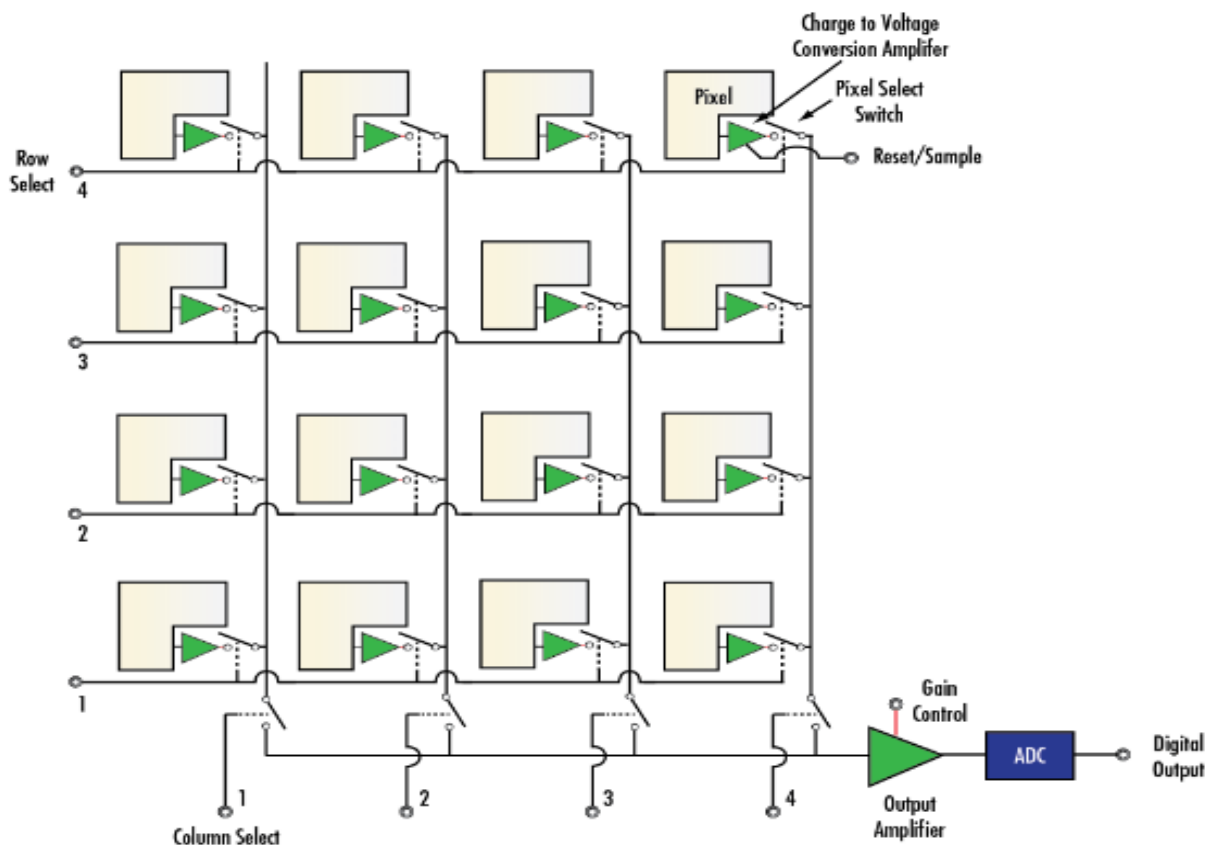


Рисунок 2 – Блок-схема дополнительного металлооксидного полупроводника (CMOS)

Конфигурация мультиплексирования КМОП-сенсора часто сочетается с электронной рольставни. Хотя с помощью дополнительных транзисторов на участке пикселей можно реализовать глобальный затвор, при котором все пиксели экспонируются одновременно, а затем считываются последовательно. Дополнительным преимуществом датчика CMOS является его низкое энергопотребление и рассеиваемая мощность по сравнению с эквивалентным датчиком CCD из-за меньшего расхода заряда или тока. Кроме того, способность CMOS-сенсора работать с высокими уровнями освещенности без размытия позволяет использовать его в специальных камерах с широким динамическим диапазоном, даже способных отображать сварные швы или световые нити. КМОП-камеры также имеют тенденцию быть меньше, чем их цифровые ПЗС-аналоги, поскольку цифровые ПЗС-камеры требуют дополнительных внешних схем АЦП.

Процесс изготовления многослойной МОП-матрицы КМОП-сенсора не позволяет использовать микролинзы на кристалле, что снижает эффективную эффективность сбора или коэффициент заполнения сенсора по сравнению с эквивалентом ПЗС. Эта низкая эффективность в сочетании с несогласованностью пикселей в пиксели способствует более низкому соотношению сигнал/шум и более низкому общему качеству изображения по сравнению с датчиками ПЗС.

Альтернативные сенсорные материалы

Коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR) – это новая технология визуализации. Обычно его определяют как свет в диапазоне длин волн 0,9-1,7

мкм, но его также можно отнести к диапазону 0,7-2,5 мкм. Использование длин волн SWIR позволяет получать изображения изменений плотности, а также сквозь препятствия, такие как туман. Однако обычное изображение CCD и CMOS недостаточно чувствительно в инфракрасном диапазоне, чтобы быть полезным. По этой причине используются специальные сенсоры на основе арсенида индия-галлия (InGaAs). Материал InGaAs имеет запрещенную зону, что делает его полезным для генерации фототока из инфракрасной энергии. Эти датчики используют массив фотодиодов InGaAs, как правило, в архитектуре датчика CMOS для видимых изображений и изображений сравнения SWIR (SWIR – коротковолновый инфракрасный свет 0,7-2,5 мкм).

На более длинных волнах, чем SWIR, тепловое изображение становится доминирующим. Для этого используется матрица микроболометров с ее чувствительностью в диапазоне длин волн 7-14 мкм. В матрице микроболометров каждый пиксель имеет болометр, сопротивление которого изменяется в зависимости от температуры. Это изменение сопротивления считывается путем преобразования в напряжение электроникой (рис. 3). Эти датчики не требуют активного охлаждения, в отличие от многих инфракрасных тепловизоров, что делает их весьма полезными в использовании.

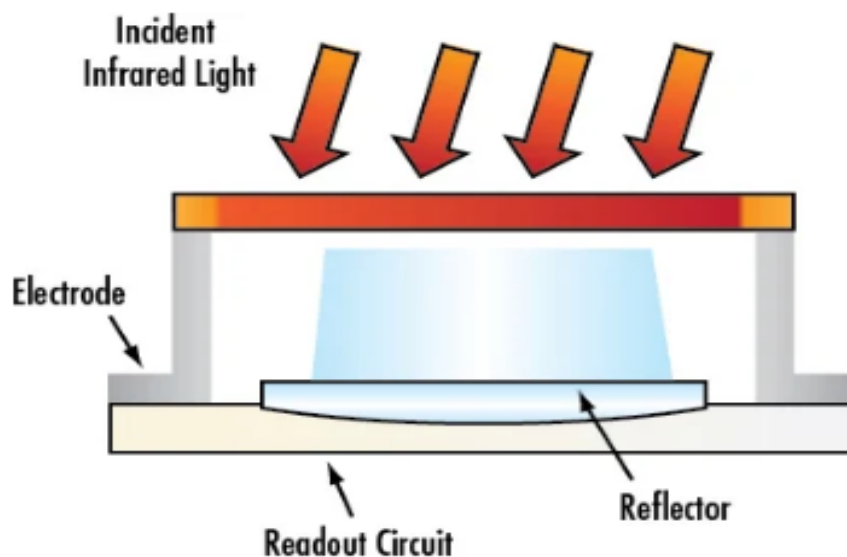


Рисунок 3 – Изображение поперечного сечения матрицы датчика микроболометра

Характеристики датчика

Пиксели

Когда свет от изображения падает на камеру-сенсор, он собирается матрицей небольших потенциальных ям, называемых пикселями. Изображение делится на эти маленькие дискретные пиксели. Информация с этих фото ячеек собирается, систематизируется и передается на монитор для отображения. Пиксели могут быть, например, фотодиодами или фото конденсаторами, которые генерируют заряд, пропорциональный количеству света, падающего на это дискретное место датчика. Способность пикселя преобразовывать падающий фотон в заряд определяется его квантовой эффективностью. Например, если на десять падающих фотонов образуется четыре фотоэлектрона, то квантовая

эффективность составляет 40%. Типичные значения квантовой эффективности для твердотельных формирователей изображения находятся в диапазоне 30-60%. Квантовая эффективность зависит от длины волны и не обязательно одинакова в зависимости от интенсивности света. Кривые спектрального отклика часто определяют квантовую эффективность как функцию длины волны.

В цифровых камерах пиксели обычно квадратные. Обычные размеры пикселей составляют от 3 до 10 мкм. Хотя датчики часто определяются просто количеством пикселей, размер очень важен для визуализации оптики. Большие пиксели, как правило, имеют высокую емкость насыщения заряда и высокое отношение сигнал/шум (SNR). С маленькими пикселями становится довольно легко достичь высокого разрешения при фиксированном размере сенсора и увеличении изображения, хотя такие проблемы, как размытость изображения, становятся более серьезными, а перекрестные помехи пикселей снижают контраст на высоких пространственных частотах. Простая мера разрешения сенсора – это количество пикселей на миллиметр.

Аналоговые камеры CCD имеют прямоугольные пиксели (больше по вертикали). Это результат ограниченного количества строк развертки в стандартах сигналов (525 строк для NTSC, 625 строк для PAL) из-за ограничений полосы пропускания. Асимметричные пиксели дают более высокое разрешение по горизонтали, чем по вертикали. Аналоговые камеры CCD (с одинаковым стандартом сигнала) обычно имеют одинаковое разрешение по вертикали. По этой причине отраслевым стандартом визуализации является определение разрешения по горизонтали.

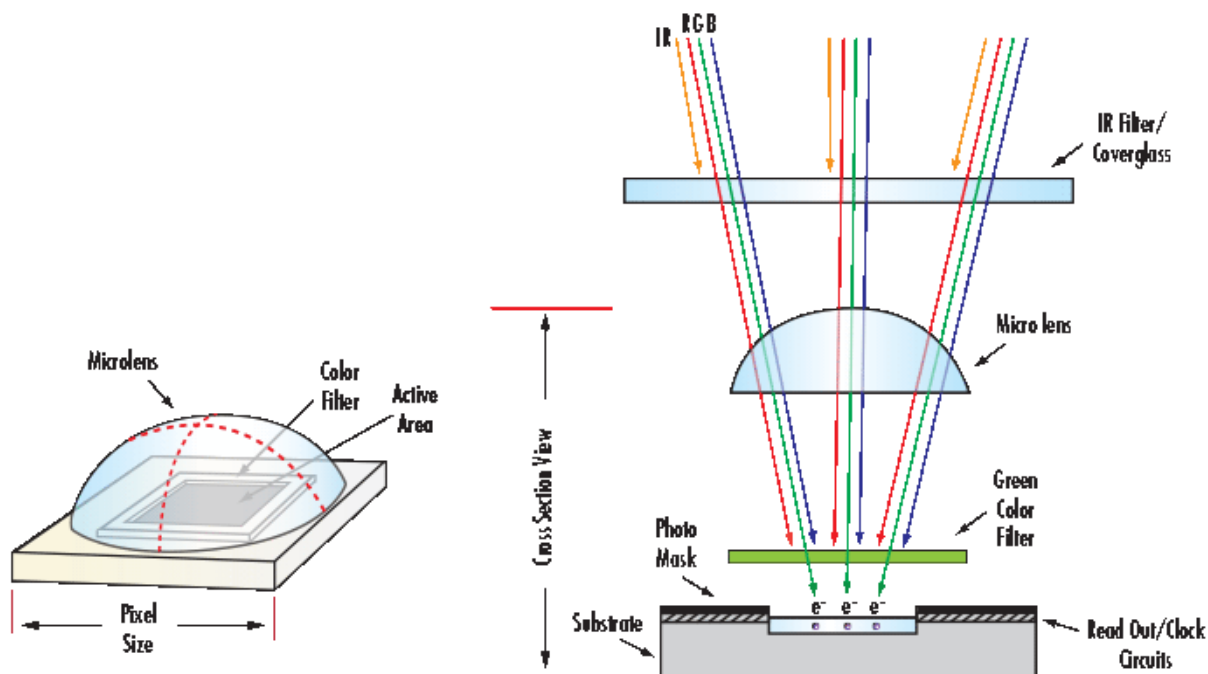


Рисунок 4 – Изображение пикселей сенсора камеры с цветным RGB и фильтрами блокировки инфракрасного излучения

Размер сенсора

Размер активной области сенсора камеры важен для определения поля зрения системы (FOV). При фиксированном первичном увеличении (определяемом объективом изображения) более крупные датчики обеспечивают большее поле обзора. Существует несколько стандартных размеров сенсоров с зонным сканированием: 1/4", 1/3", 1/2", 1 / 1,8", 2/3", 1" и 1,2", доступны более крупные размеры (рис. 5). Номенклатура этих стандартов восходит к вакуумным лампам Vidicon, используемым для телевизионных формирователей изображения, поэтому важно отметить, что фактические размеры датчиков различаются. **Примечание:** нет прямой связи между размером датчика и его размерами; это чисто устаревшее соглашение. Однако большинство этих стандартов поддерживают соотношение сторон 4:3 (по горизонтали: вертикали).

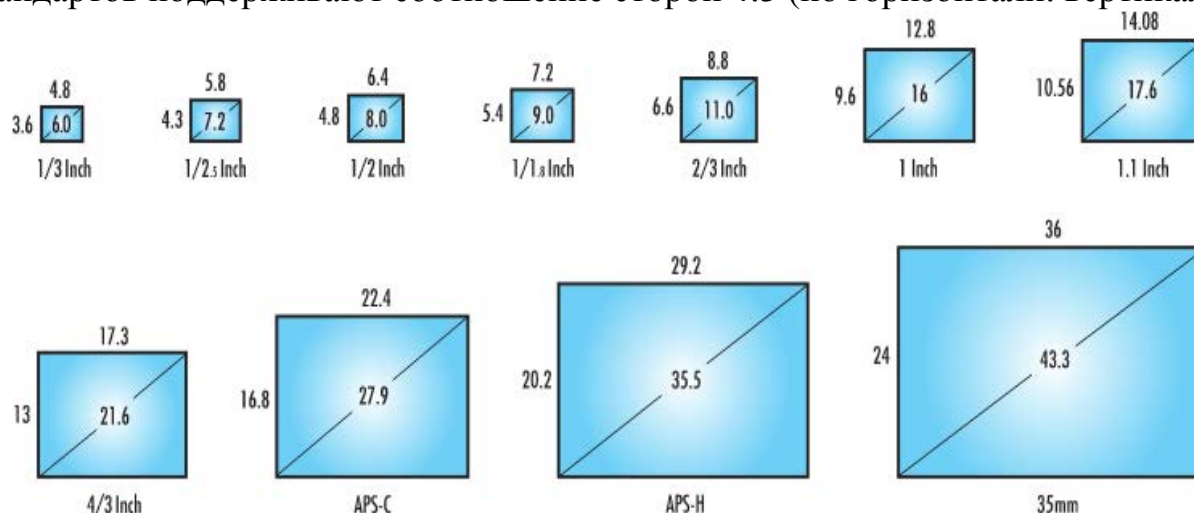


Рисунок 5 – Иллюстрация размеров сенсора для стандартных сенсоров камеры

В таблице 1 показано способность разрешения камеры по размеру пикселей.

Таблица 1 – Способность разрешения камеры по размеру пикселей

Размер пикселя (мкм)	9,9	7,4	5,86	5,5	4,54	3,69	3,45	2,2	1,67
Разрешение (lp / мм)	50,5	67,6	85,3	90,9	110,1	135,5	144,9	227,3	299,4
Типичный 1/2-дюймовый сенсор (MP)	0,31	0,56	0,89	1,02	1,49	2,26	2,58	6,35	11,02
Типичный 2/3-дюймовый датчик (MP)	0,59	1,06	1,69	1,92	2,82	4,27	4,88	12,00	20,83

Одна проблема, которая часто возникает в приложениях для обработки изображений – это способность объектива для обработки изображения поддерживать датчик определенных размеров. Если датчик слишком велик для конструкции объектива, результирующее изображение может исчезнуть и ухудшиться по направлению к краям из-за виньетирования (затухания лучей, проходящих через внешние края объектива формирования изображения). Это обычно называют туннельным эффектом, поскольку края поля становятся

темными. Меньшие размеры сенсора не приводят к этой проблеме виньетирования.

Частота кадров и выдержка

Частота кадров относится к числу полных кадров (которые могут состоять из двух полей), составленных за секунду. Например, аналоговая камера с частотой кадров 30 кадров в секунду содержит два поля по $1/60$ секунды. В высокоскоростных приложениях полезно выбирать более высокую частоту кадров, чтобы получить больше изображений объекта, когда он перемещается через поле зрения.

Скорость затвора соответствует времени экспозиции сенсора. Увеличение скорости работы затвора может помочь в создании снимков динамического объекта, которые можно делать только 30 раз в секунду (живое видео).

В отличие от аналоговых камер, где в большинстве случаев частота кадров определяется дисплеем, цифровые камеры позволяют настраивать частоту кадров. Максимальная частота кадров для системы зависит от скорости считывания датчика, скорости передачи данных интерфейса, включая кабели, и количества пикселей (количества данных, передаваемых за кадр). В некоторых случаях камера может работать с более высокой частотой кадров за счет уменьшения разрешения путем объединения пикселей вместе или ограничения интересующей области съемки. Это уменьшает количество данных на кадр, позволяя передавать больше кадров с фиксированной скоростью передачи. В хорошем приближении время экспозиции обратно пропорционально частоте кадров. Однако существует конечное минимальное время между экспозициями (порядка сотен наносекунд) из-за процесса сброса пикселей и считывания, хотя многие камеры имеют возможность считывать кадр при следующей экспозиции (конвейерная обработка); это минимальное время часто можно найти в паспорте камеры.

КМОП-камеры обладают потенциалом для более высокой частоты кадров, так как процесс считывания каждого пикселя может выполняться быстрее, чем при переносе заряда в регистре сдвига ПЗС-датчика. Для цифровых фотоаппаратов выдержки могут составлять от десятков секунд до минут, хотя самые длинные выдержки возможны только с камерами CCD, которые имеют более низкие темновые токи и шум по сравнению с CMOS. Из-за шума, присущего КМОП-формирователям изображения, их полезная экспозиция ограничивается секундами.

Электронный затвор

Еще несколько лет назад в камерах CCD использовались электронные или глобальные затворы, а все камеры CMOS были ограничены рольставнями. Глобальный затвор аналогичен механическому затвору в том, что все пиксели экспонируются и дискретизируются одновременно, а считывание затем происходит последовательно; получение фотонов начинается и останавливается одновременно для всех пикселей. С другой стороны, рольставни подвергают экспонированию, выборке и считыванию последовательно; это означает, что каждая строка изображения отбирается в немного разное время. Интуитивно изображение движущихся объектов искажается рольставнями; этот эффект

можно свести к минимуму с помощью запускаемого строба, помещенного в момент времени, когда период интегрирования линий перекрывается. Обратите внимание, что это не проблема на низких скоростях. Реализация глобального затвора для КМОП требует более сложной архитектуры, чем стандартная модель скользящего затвора, с дополнительным транзистором и накопительным конденсатором, что также позволяет конвейерную обработку или начало экспонирования следующего кадра во время считывания предыдущего кадра. Поскольку доступность CMOS-датчиков с глобальными затворами постоянно растет, камеры CCD и CMOS полезны в приложениях для высокоскоростного движения.

При работе асинхронного затвора, камера готова к получению изображения, но не активирует пиксели до тех пор, пока не получит внешний сигнал запуска. Это противоположно обычной постоянной частоте кадров, которую можно рассматривать как внутренний запуск затвора.

На рисунках 6 и 7 изображены фото при движении объекта при различных технологиях обработки видеосигнала.



Рисунок 6 – Сравнение размытия в движении:
чип датчика на быстро движущемся конвейере с глобальным затвором (слева)
и непрерывным глобальным затвором (справа)



Рисунок 7 – Сравнение размытия движения в глобальных и рольставнях: чип датчика на медленно движущемся конвейере с глобальной заслонкой (слева) и рольставнями (справа)

Сенсорные экраны

Один из способов увеличить скорость считывания датчика камеры – использовать несколько нажатий на датчик. Это означает, что вместо того, чтобы все пиксели считывались последовательно через один выходной усилитель и АЦП, поле разделяется и считывается на несколько выходов. Это обычно рассматривается как двойное касание, при котором левая и правая половины поля считываются отдельно. Это эффективно удваивает частоту кадров и позволяет легко реконструировать изображение с помощью программного обеспечения. Важно отметить, что если коэффициент усиления не одинаков между отводами датчика или если АЦП имеют немного разные характеристики, как это обычно бывает, то в восстановленном изображении происходит разделение. Хорошая новость в том, что это можно откалибровать. Многие большие датчики с числом пикселей более нескольких миллионов используют несколько касаний датчика. Это, по большей части, применимо только к цифровым камерам с прогрессивной разверткой; в противном случае возникнут трудности с отображением. Производительность датчика с несколькими касаниями во многом зависит от реализации аппаратного обеспечения внутренней камеры.

Монохромные камеры

Датчики CCD и CMOS чувствительны к длинам волн приблизительно от 350 до 1050 нм, хотя диапазон обычно составляет от 400 до 1000 нм. На эту чувствительность указывает спектральная кривая отклика сенсора (рис. 8). Большинство высококачественных камер оснащены фильтром, отсекающим инфракрасный (ИК) диапазон излучения, для получения изображений именно в видимом спектре. Эти фильтры иногда снимаются для получения изображений в ближнем ИК-диапазоне.

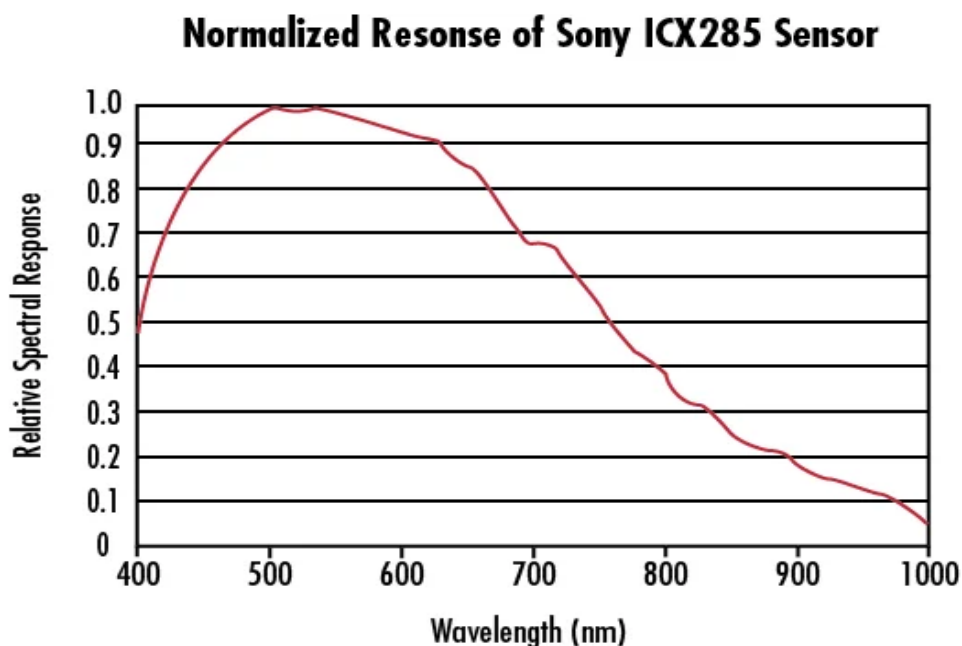


Рисунок 8 – Нормализованная спектральная характеристика типичной монохромной ПЗС-матрицы

КМОП-датчики, как правило, более чувствительны к длинам волн ИК-излучения, чем ПЗС-датчики. Это происходит из-за их увеличенной глубины активной области. Глубина проникновения фотона зависит от его частоты, поэтому более глубокая глубина при заданной толщине активной области производит меньше фотоэлектронов и снижает квантовую эффективность.

Цветные камеры

Твердотельный датчик основан на фотоэлектрическом эффекте и, как следствие, не может различать цвета. Есть два типа цветных ПЗС-камер: однокристалльные и трехчиповые. Одночиповые цветные ПЗС-камеры предлагают обычное и недорогое решение для обработки изображений и используют мозаичный (например, байеровский) оптический фильтр для разделения падающего света на серии цветов. Затем каждый цвет направляется на другой набор пикселей (рис. 9). Точная компоновка мозаичного рисунка зависит от производителя. Поскольку для распознавания цвета требуется больше пикселей, одночиповые цветные камеры по своей природе имеют более низкое разрешение, чем их монохромные аналоги. Степень этой проблемы зависит от конкретного производителя алгоритма интерполяции цвета.

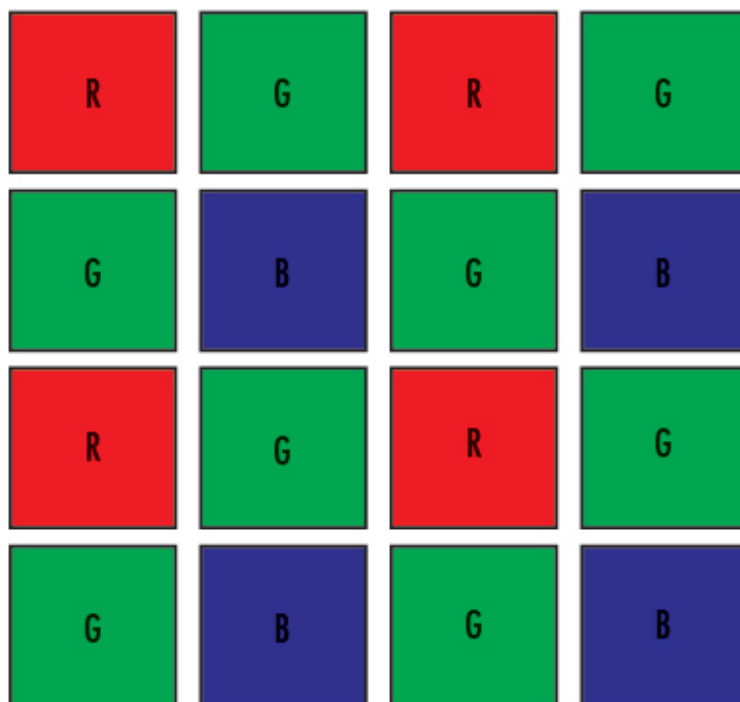


Рисунок 9 – Одночиповый цветной датчик камеры CCD с использованием мозаичного фильтра для фильтрации цветов

Трехчиповые цветные ПЗС-камеры предназначены для решения этой проблемы с разрешением за счет использования призмы для направления каждого участка, падающего спектра на другой чип (рис. 10). Возможно более точное воспроизведение цвета, поскольку каждая точка в пространстве объекта имеет отдельные значения интенсивности RGB, вместо использования алгоритма для определения цвета. Трехчиповые камеры обладают чрезвычайно высоким разрешением, но имеют более низкую светочувствительность и могут быть дорогостоящими. Как правило, требуются специальные линзы 3CCD, которые хорошо корректируют цвет и компенсируют измененный оптический путь, а в случае с байонетом – уменьшенную прозрачность для выступа задней линзы. В конце концов, выбор одного или трех чипов сводится к требованиям приложения.

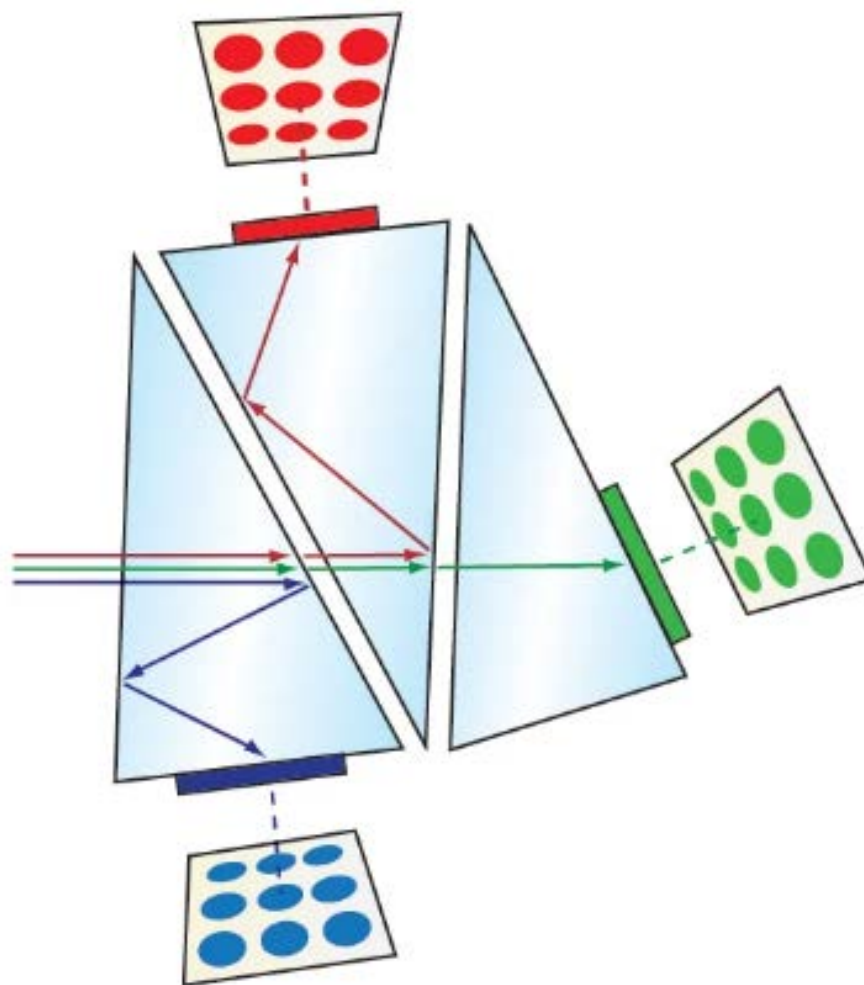


Рисунок 10 – Трехчиповый цветной датчик камеры CCD, использующий призму для разделения цветов

Самым основным компонентом системы камеры является датчик. Тип технологий и функций в значительной степени способствует общему качеству изображения, поэтому знание того, как интерпретировать характеристики сенсора камеры, в конечном итоге приведет к выбору лучшей оптики для формирования изображений и сопряжения с ней электроники.

Литература

1. Фотоматрица [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотоматрица> – Дата доступа: 20.10.2020
2. Матрицы цифровых камер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/143169/> – Date of access: 20.10.2020.
3. Матрица фотоаппарата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://64bita.ru/matrix.html> – Date of access: 20.10.2020.