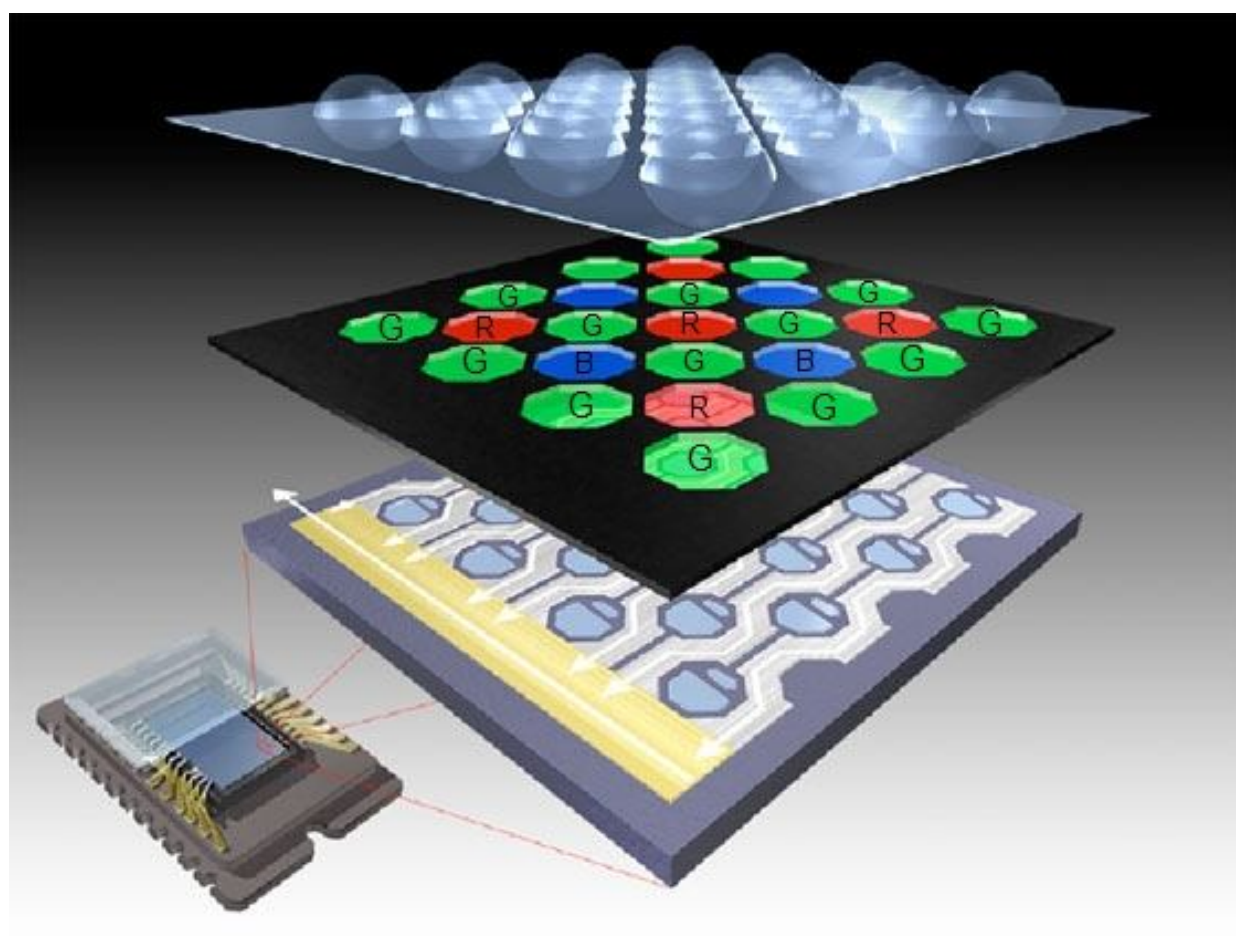


А. А. Горбачёв, В. В. Коротаев, С. Н. Ярышев

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И КАМЕРЫ НА ИХ ОСНОВЕ



**Санкт-Петербург
2013**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

А. А. Горбачёв, В. В. Коротаев, С. Н. Ярышев

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МАТРИЧНЫЕ
ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И
КАМЕРЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

Учебное пособие



**Санкт-Петербург
2013**

Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 98 с.

Приводится описание двух типов твердотельных матричных преобразователей оптического излучения, используемых для создания современных телевизионных камер. Приводятся краткие параметры и характеристики фотоприемников и телевизионных камер на их основе. Приводятся примеры технических реализаций камер.

Учебное пособие предназначено для студентов по направлению подготовки магистров 200400 – «Опготехника» и по специальности 200401 – "Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения".

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и опготехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200400 «Опготехника» и по специальности 200401 – "Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения" протокол № 6 от «20» 09. 2013 г.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013
©А.А. Горбачёв, В.В. Коротаев, С.Н. Ярышев, 2013

Содержание

Введение	5
1 История создания твердотельных формирователей изображения	7
2 Аналоговый и цифровой видеосигналы.....	10
2.1 Аналоговый видеосигнал.....	10
2.2 Цифровой видеосигнал	15
3 Фотоприемники на базе ФПЗС.....	20
3.1 Краткие теоретические сведения.....	20
3.2 Технические параметры и характеристики матричных фотоприемников на ФПЗС.....	29
4 Фотоприемники на базе КМОП.....	36
4.1 Краткие теоретические сведения.....	36
4.2 Основные параметры и характеристики КМОП-фотоприемников ...	40
5 Телевизионные камеры на ФПЗС.....	45
6 Телевизионные камеры на КМОП	51
6.1 Телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с аналоговым выходом	51
6.2 Телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с цифровым выходом	56
6.3 Телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом	58
6.4 Телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом и встроенной обработкой видеосигнала	61
6.5 Телевизионная камера низкого разрешения	62
6.6 Камерные модули	64
7 Оптические системы твердотельных телевизионных камер	71
8 Системы на кристалле.....	80
Список использованных источников	86

Введение

Телевидение является одним из наиболее значимых технических направлений XX века. Оно успешно развивается и сейчас благодаря внедрению новых технологий во все составные части телевизионной системы от формирователя видеосигнала до устройства отображения телевизионной информации. Телевизионные системы выходят на качественно новый уровень, связанный с внедрением системы телевидения высокой четкости (ТВЧ), а также благодаря переходу на цифровые технологии обработки и передачи видеосигнала. Кроме того, выйдя за рамки традиционного использования телевизионной системы как системы передачи изображения на расстоянии, телевизионные методы получили применение в областях, не всегда связанных непосредственно с передачей изображения, таких как измерительные системы, системы безопасности, системы технологического контроля и другие.

Возможности телевизионной системы во многом определяются ее первичным звеном, а именно, формирователем видеосигнала – фоточувствительного устройства, преобразующего входной оптический сигнал в электрический видеосигнал. Именно поэтому совершенствование телевизионных систем во многом определяется прогрессом в области создания новых более совершенных формирователей видеосигнала.

Исторически можно выделить три основных пути, положенных в основу работы формирователей видеосигнала.

Первый путь связан с устройствами на основе механической развертки. Это был первый этап развития телевизионных систем. Обычно его связывают с изобретением диска Нипкова в 1880 году. На его основе было создано первое поколение телевизионных систем. Наибольшего расцвета такие системы получили в 20-е годы XX века в связи с работами таких изобретателей, как Бэрд. Это направление, в основном, завершилось благодаря открытию принципа электронной развертки. Однако, в некоторых применениях механическая развертка сохранилась. Механическую развертку используют такие приборы как тепловизоры дальнего ИК-диапазона, устройства регистрации рентгеновских и гамма-лучей.

Второй путь развития телевизионных систем связан с открытием Б.Л. Розингом и В.К. Зворыкиным принципа электронной развертки и созданием на его основе вакуумных формирователей телевизионного сигнала (телевизионных передающих трубок) и устройств отображения телевизионной информации (электронно-лучевых трубок или кинескопов). Бурное развитие телевизионной техники в середине и конце XX века произошло именно на основе таких устройств. Это направление постепенно сдает свои позиции, но сохраняется как лидирующее в области

телевизионных устройств, предназначенных для работы в условиях сильной радиации.

Наконец третий путь базируется на основе твердотельных формирователей изображения, которые работают на основе внутреннего фотоэффекта в полупроводниках, а также на организации электронной развертки непосредственно в теле полупроводника. Именно такие устройства имеют в настоящее время наибольшее распространение благодаря таким достоинствам, как высокая технологичность, повторяемость, высокие технические параметры, потребительские достоинства и малая стоимость. Твердотельные фотоприемники базируются на технологиях, используемых при производстве интегральных микросхем, поэтому их совершенствование и развитие идет такими темпами, которые характерны для отрасли интегральной микроэлектроники в целом.

Именно твердотельным формирователям изображения посвящено данное учебное пособие.

Учебное пособие предназначено для студентов по направлению подготовки магистров 200400 – «Оптотехника» и по специальности 200401 – "Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения".

1 История создания твердотельных формирователей изображения

Твердотельные формирователи видеосигнала пришли на смену вакуумным формирователям, однако этот процесс происходил постепенно.

Принято считать, что история твердотельных преобразователей видеосигнала началась с изобретением приборов с зарядовой связью в 1969 году. Однако, еще в 1961 году во Всесоюзном научно-исследовательском институте телевидения (ВНИИТ) были созданы экспериментальные образцы твердотельных многоэлементных фотоприемников «сканистор» с числом элементов 25×25 [1]. Позже были созданы приборы форматом 300×300 .

Приборы выполнялись по гибридной технологии. Коммутация выполнялась с помощью двух внешних регистров сдвига. Прибор работал без накопления энергии, но тем не менее обладал довольно высокой чувствительностью. В планах института были работы по созданию матричных «сканисторов» с числом элементов 625×625 , 400×400 и однострочных приборов с числом элементов до 5000, работающих как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах спектра. К сожалению, технологическая база, которая была доступна разработчикам, не позволила создать совершенные приборы, которые можно было выпускать серийно. Работы проводились на уровне НИР и ОКР и продолжались примерно до момента изобретения ПЗС в США, но затем были постепенно свернуты.

В 1969 году американские исследователи Бойл и Смит предложили принцип переноса заряда при поиска электрического аналога приборов на цилиндрических магнитных доменах. Они предположили, что цепочка МОП-конденсаторов может служить для хранения и переноса вдоль нее электрических зарядов [2]. Идея ПЗС оказалась настолько простой, что за короткое время было предложено множество вариантов технической реализации и применения. В 1970 году впервые был предложен линейный ПЗС, представляющий собой линейный фотоприемник, а в 1972 году – первый матричный фотоприемник для телевизионной системы с количеством элементов 13000.

Для создания полноценной твердотельной телевизионной камеры требуется такой фотоприемник, который бы формировал электрический видеосигнал в соответствии с действующими телевизионными стандартами. В частности, количество строк в матрице должно быть кратно числу строк, предусмотренным телевизионным стандартом. Кроме того, должен быть реализован принцип чересстрочной развертки. Такие фотоприемники промышленность стала выпускать в 1973 году. Цветные твердотельные телевизионные камеры, выполненные по трехматричной схеме также появились в 1973 году. В то же время появилась идея о создании одноматричной телевизионной твердотельной камеры с использованием

интегральных светофильтров. Однако, практические реализации таких камер появились заметно позже.

По мере совершенствования технологии изготовления ФПЗС постепенно удалось довести разрешающую способность до требований телевизионного стандарта. Для этого пришлось увеличивать количество элементов матрицы до 750x576. Кроме этого проводились работы по увеличению чувствительности матриц, уменьшению геометрических шумов и неэффективности переноса. Матрицы с кадровым переносом были заменены на более совершенные со строчно-кадровым переносом. Очень существенно, что стоимость таких приборов заметно уменьшилась. Примерно к началу 90-х годов твердотельные камеры постепенно вытеснили вакуумные из большинства областей телевизионной техники. В настоящее время вакуумные телевизионные формирователи видеосигнала имеют преимущество лишь при работе в условиях сильной радиации.

Следует отметить, что технология изготовления микросхем ФПЗС оказалась довольно сложной, поэтому выпускали и выпускают их довольно ограниченное количество производителей.

Альтернативными твердотельными матричными фотоприемниками стали приборы с зарядовой инжекцией, которые были предложены в 1973 году [2]. Эти приборы не являются приборами с переносом заряда. Основой их работы является матрица с координатной адресацией, в каждой ячейке которой имеется пара смежных МОП-конденсаторов. В первых ПЗИ сигнал инжектировался непосредственно в подложку. Затем была предложена схема параллельной инжекции. Основными достоинствами прибора были возможности неразрушающего считывания сигналов и произвольный порядок считывания. Основным недостатком долгое время являлась низкая чувствительность.

Недостаток технологии ФПЗС, связанный со сложностью изготовления этих микросхем долгое время являлся сдерживающим фактором их развития. Прежде всего это сказывалось в невозможности интеграции в кристалл ФПЗС других функциональных блоков телевизионной камеры или системы, которые изготавливались, в основном, по технологии КМОП. Поэтому значительным шагом явилось создание фоточувствительного прибора, аналогичного по структуре микросхемам оперативной памяти, но эти ячейки памяти являлись фоточувствительными элементами, составляющими многоэлементный формирователь изображения. Эти приборы получили название КМОП-фотоприемники и имели произвольную двухкоординатную адресацию [3]. Благодаря развитой технологии КМОП, эти фотоприемники начали очень быстро развиваться. За несколько лет они практически избавились от своего главного недостатка – низкой чувствительности, которая была характерна для КМОП-фотоприемников первого поколения. В 1993 году была

изобретена технология активного пиксела, что привело к дальнейшему росту чувствительности прибора.

Благодаря хорошо освоенной промышленностью технологии КМОП в эти фотоприемники стали интегрироваться и другие узлы телевизионной камеры и системы. Сначала это были узлы, обеспечивающие синхронизацию, предварительную аналоговую обработку и формирование видеосигнала. Таким образом, появились однокристалльные твердотельные телевизионные камеры (Camera on chip).

При переходе к цифровым технологиям в телевидении в КМОП-фотоприемники производители стали постепенно интегрировать блоки тракта цифровой обработки видеосигнала. Первым из таких блоков был аналого-цифровой преобразователь. Затем в КМОП-фотоприемниках появились блоки цифровой обработки видеосигнала, сжатия изображений, цифровые интерфейсы и специализированные процессоры. Такие высокоинтегрированные КМОП-фотоприемники обычно называют видеосистемами на кристалле.

Следует также отметить, что эволюция всех типов твердотельных фотоприемников идет также по пути повышения разрешающей способности путем увеличения количества элементов, а также повышения скорости считывания видеосигнала.

Таким образом, совершенствование твердотельных матричных формирователей изображения происходит в соответствии с ростом возможностей технологии изготовления интегральных микросхем в целом.

2 Аналоговый и цифровой видеосигналы

2.1 Аналоговый видеосигнал

Видеосигнал, принятый для использования в настоящее время в РФ описывается ГОСТ 7845-92. Стандарт регламентирует параметры и характеристики используемого телевизионного изображения и электрического сигнала, используемого для передачи от источника телевизионного изображения к приемнику. Это позволяет добиться совместимости телевизионных устройств по видеосигналу.

Видеосигнал или сигнал яркости – это электрический сигнал, получаемый с выхода телевизионного фотопреобразователя в процессе развертки изображения и затем усиливаемый в видеотракте [4].

Источником видеосигнала является формирователь видеосигнала. В качестве последнего могут выступать телевизионные камеры любого типа, устройства видеозаписи (видеомагнитофоны, DVD-проигрыватели, компьютеры с ТВ видеовыходами и пр.).

Приемником видеосигнала являются устройства отображения видеoinформации, в частности телевизоры и видеомониторы, работающие на любом принципе (ЭЛТ, ЖК, плазменная панель), а также устройства видеозаписи (видеомагнитофоны, записывающие DVD-проигрыватели, видеорегистраторы систем видеонаблюдения).

Мгновенное значение освещенности на фоточувствительной поверхности телевизионного фотоприемника преобразуется в мгновенное значение напряжения на выходе этого фотоприемника. Таким образом, в видеосигнале напряжение пропорционально яркости в данной точке изображения. Эта часть видеосигнала носит название сигнала яркости и используется для передачи черно-белого видеосигнала или сигнала яркости в цветном видеосигнале [5]. Диапазон передаваемых значений яркости определяется уровнем черного и уровнем белого сигналов в видеосигнале. Уровень черного является минимальным сигналом яркости и соответствует уровню синхроимпульсов. Он же одновременно является и опорным сигналом. Уровень белого соответствует максимальному уровню передаваемой яркости (рис. 2.1).

Кроме сигнала яркости в видеосигнале присутствуют служебные составляющие, обеспечивающие синхронизацию сигнала между источником и приемником.

Существуют два типа сигналов синхронизации – строчные и кадровые.

Сигналы кадровой синхронизации обеспечивают передачу информации о времени начала каждого поля телевизионного изображения в видеосигнале, а также информацию о типе этого поля (четное или нечетное).

В соответствии с ГОСТ 7845-92 длительность поля составляет 20 мс, период кадра 40 мс.

Сигналы строчной синхронизации (длительность 4,7 мкс) необходимы для обеспечения временной привязки строк внутри сигнала поля. Положение этих сигналов в видеосигнале соответствуют началу каждой строки в телевизионном поле. Период строчных синхроимпульсов составляет 64 мкс.

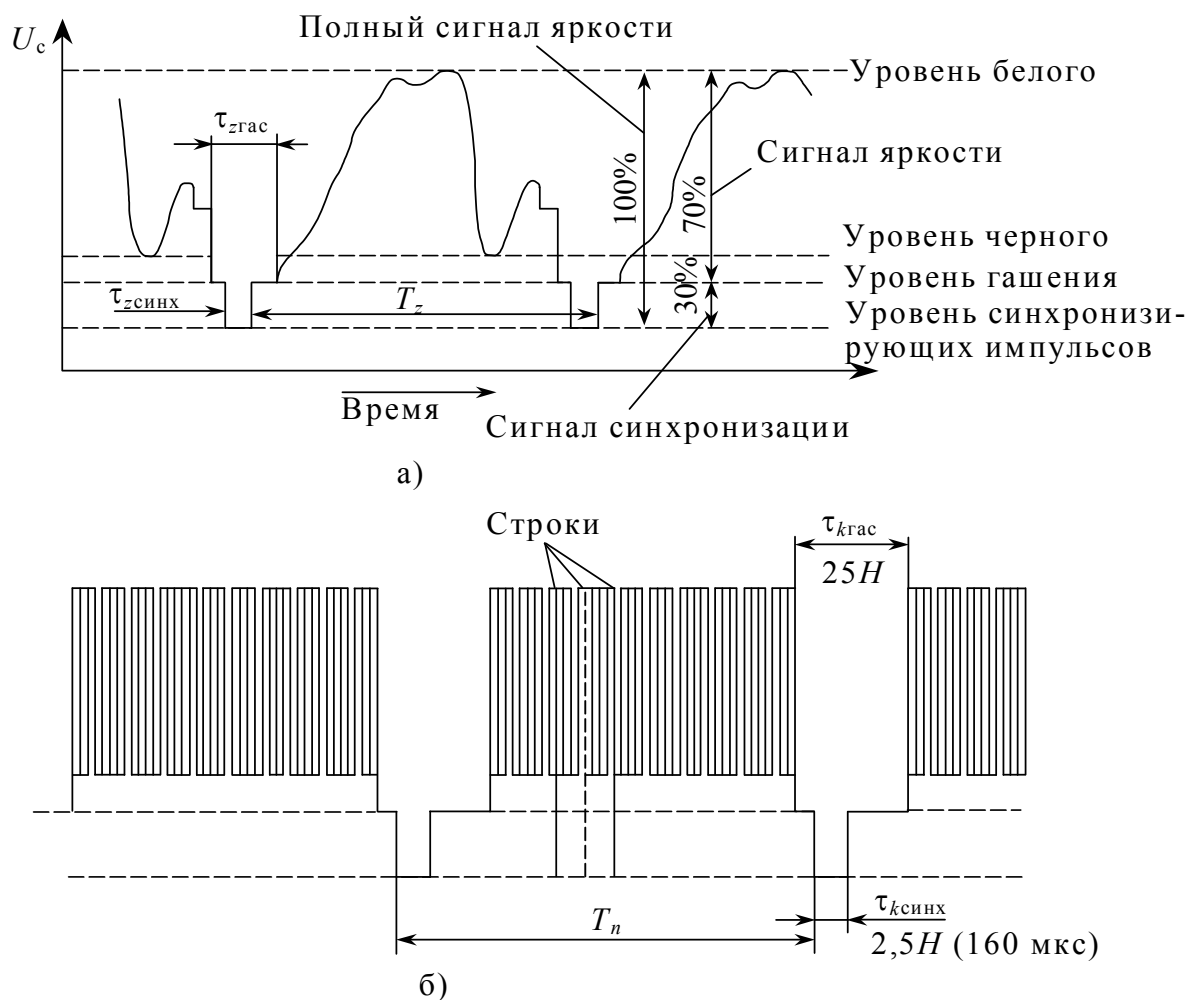


Рисунок 2.1 – Форма видеосигнала за периоды строки (а) и кадра (б)

Кроме сигналов синхронизации имеются гасящие импульсы кадров и строк. Они имеют те же периоды, что и синхронизирующие импульсы, но от последних отличаются длительностью (длительность гасящего импульса полей 1612 мкс, длительность гасящего импульса строк 12 мкс). На рисунке 2.1 они обозначены как $\tau_{згас}$ и $\tau_{кгас}$. Используются эти сигналы для гашения луча ЭЛТ при обратном ходе строчной и кадровой развертки.

Кадровый синхроимпульс (длительность 160 мкс) имеет импульсы врезки длительностью 4,7 мкс, а перед ним и после него передаются уравнивающие импульсы длительностью 2,35 мкс. Частота следования

уравнивающих импульсов и импульсов врезок в два раза выше, чем строчная частота (рис. 2.2).

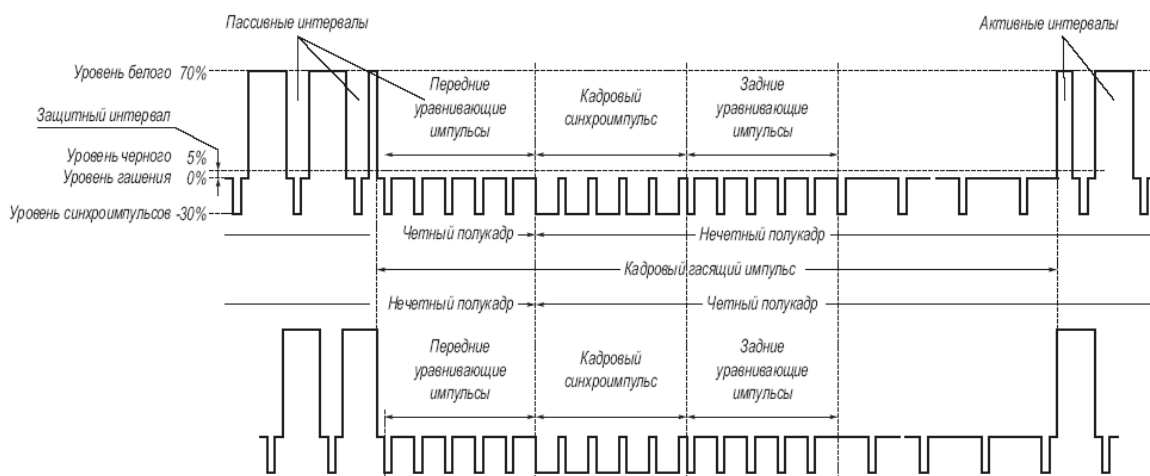


Рисунок 2.2 – Подробная структура кадрового синхроимпульса

В случае использования цветного изображения в видеосигнал дополнительно включаются сигналы цветности и цветовой синхронизации. В настоящее время используются три стандарта цветного видеосигнала – SECAM, PAL и NTSC.

Во всех трех стандартах используется модуляция сигнала и цветное матрицирование. Исходные сигналы трех основных цветов E_r , E_g , E_b (красный, зеленый и синий) преобразуются в сигнал яркости E_y по формуле:

$$E_y = 0,299E_r + 0,587E_g + 0,114E_b,$$

а также в два цветоразностных сигнала по формулам:

$$D_r = -1,9 \cdot (E_r - E_y);$$

$$D_b = 1,5 \cdot (E_b - E_y).$$

В системе SECAM сигналы цветности формируются посредством частотной модуляции с построчным чередованием [5]. В видеосигнале присутствуют сигнал яркости и только один из сигналов цветности, который накладывается на сигнал яркости методом частотного уплотнения. Для этого в сигнале яркости с помощью режекторного фильтра освобождается часть спектра (рис. 2.3).

Два сигнала цветности передаются попеременно через строку. Так как для получения полной цветовой информации необходим и второй цветоразностный сигнал, то его получают из предыдущей строки с помощью линии задержки на 64 мкс (длительность одной строки).

Частотно-модулированные сигналы цветности используют различные частоты поднесущих. В строках с номерами от 23 до 310 передается красная цветоразностная составляющая D_r . Для нее частота поднесущей составляет

4406,25 МГц. В строках с номерами от 336 до 623 передается синяя цветоразностная составляющая D_b с частотой поднесущей 4250,0 МГц.

Для селекции красных и синих строк используются сигналы полевой цветовой синхронизации, которые формируются в нескольких первых строках каждого поля и представляют собой немодулированные цветные поднесущие.

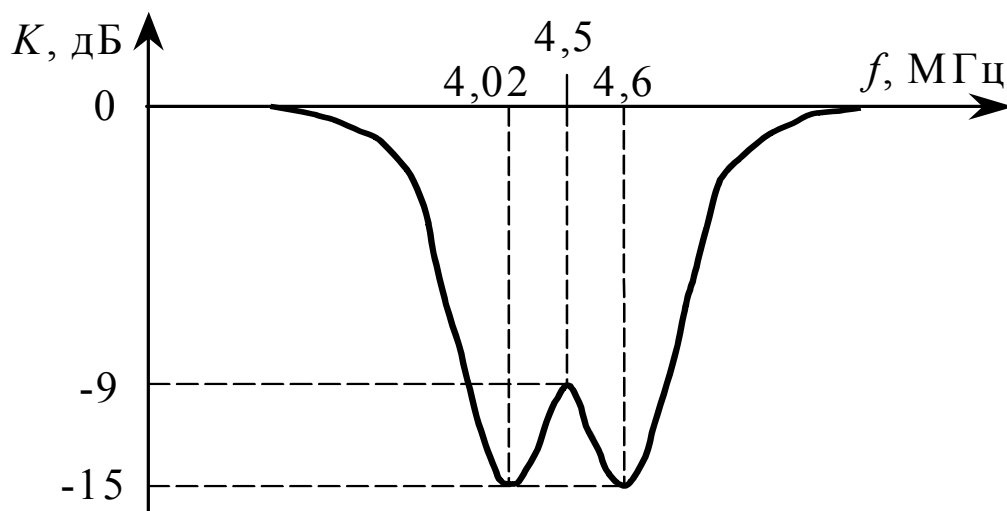


Рисунок 2.3 – Амплитудно-частотная характеристика режекторного фильтра системы SECAM

В системах PAL и NTSC используется квадратурная амплитудная модуляция с подавленной поднесущей.

Сигнал яркости формируется в соответствии с формулой

$$E_y = 0,299E_r + 0,587E_g + 0,114E_b.$$

Цветоразностные сигналы:

$$E_u = 0,493 \cdot (E_b - E_y);$$

$$E_v = 0,877 \cdot (E_r - E_y).$$

Полный видеосигнал с учетом модуляции выражается следующий формулой:

$$E = E_y + E_u \sin(2\pi f_{\text{цп}}) \pm E_v \cos(2\pi f_{\text{цп}}),$$

где $f_{\text{цп}} = 4433618,75$ Гц – частота цветовой поднесущей.

Так как в основе данного метода лежит квадратурная модуляция, для нормальной работы синхронного детектора требуется наличие двух сигналов. В качестве одного из сигналов используется собственно сам видеосигнал, а в качестве опорного сигнала – встроенный генератор с частотой, равной $f_{\text{цп}}$. Синхронизация этого генератора производится раз в строку с использованием специального сигнала-вспышки. Последний также передается в видеосигнале и располагается на задней полке строчного

гасящего импульса и представляет собой несколько периодов немодулированной поднесущей $f_{\text{цн}}$ (рис. 2.4).

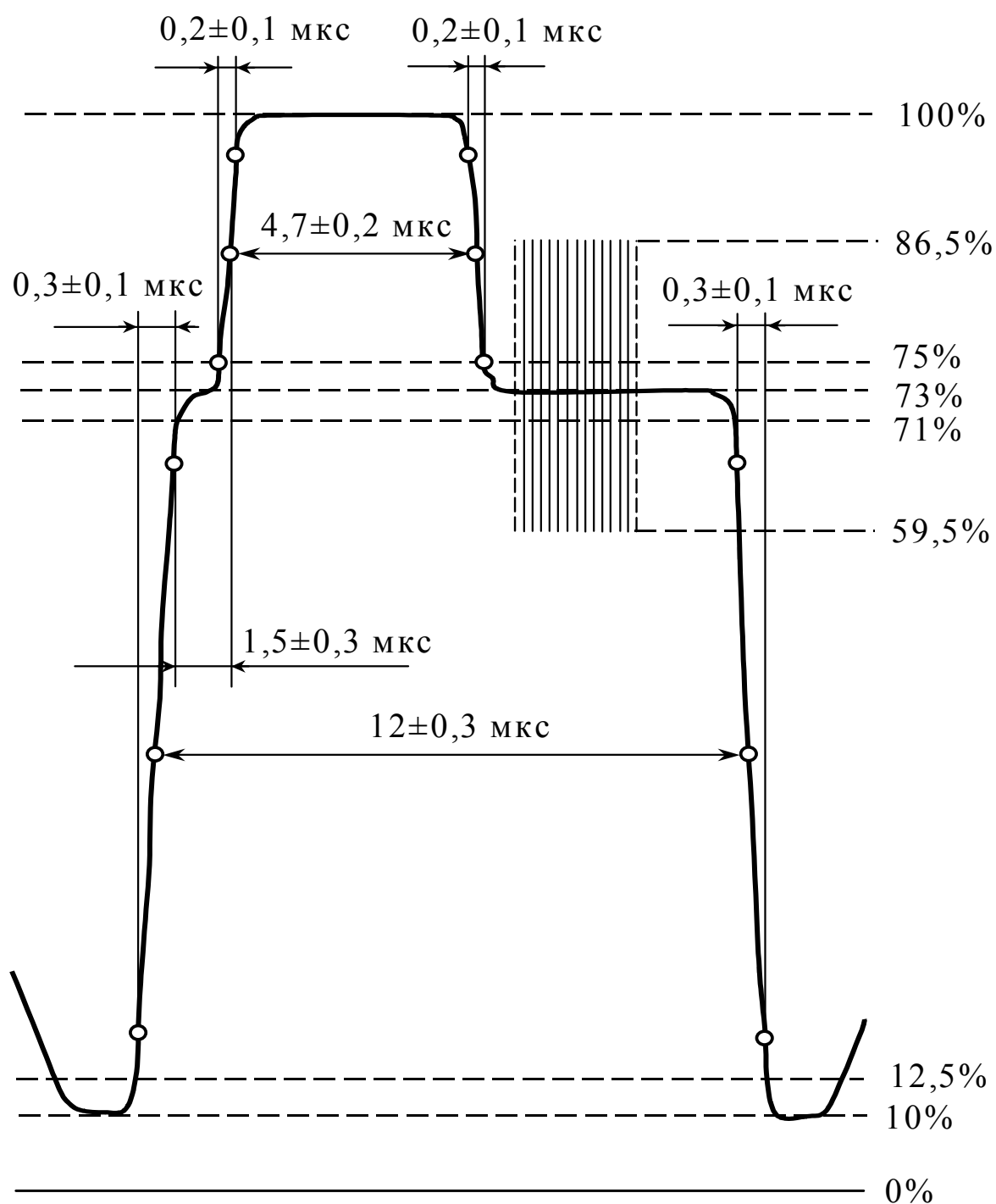


Рисунок 2.4 – Расположение сигнала-вспышки относительно строчного синхроимпульса

Основные параметры телевизионного изображения, принятого в РФ следующие:

- стандарт цветности – SECAM;

- число полей в одном телевизионном кадре – 2 (чересстрочная развертка);
- номинальная частота полей – 50 Гц;
- число строк в одном кадре – 625;
- формат кадра – 4:3.

Основные электрические параметры видеосигнала:

- минимальная частота спектра видеосигнала – 50 Гц (определяется частотой смены полей);
- максимальная частота спектра видеосигнала – 6,5 МГц (определяется наибольшей частотой изменения яркости вдоль строки);
- полный размах видеосигнала – 1 В;
- размах видеосигнала от уровня черного до уровня белого – 0,7 В.

Фактически же в РФ действуют два стандарта – SECAM и PAL.

Аналоговый видеосигнал этих стандартов используется для передачи телевизионного изображения стандартного качества с числом активных строк 575 в чересстрочном режиме. Формировать такой сигнал могут как вакуумные телевизионные трубки предыдущего поколения, так и твердотельные телевизионные формирователи изображения.

2.2 Цифровой видеосигнал

Использование цифрового видеосигнала позволяет максимально сохранить качество обрабатываемого и передаваемого изображения.

Для сохранения максимального качества аналогового видеосигнала в процессе его обработки и/или передаче на большие расстояния необходимо аналоговый видеосигнал преобразовать в цифровую форму.

При обработке и передаче видеосигнала в цифровом виде требуется его перевод в цифровую форму.

Сначала цифровой видеосигнал использовался для передачи телевизионного изображения стандартного разрешения. С таким разрешением работает и аналоговый видеосигнал. Поэтому цифровой видеосигнал на первых порах рассматривался как цифровой эквивалент стандартного аналогового видеосигнала. Фактически необходимо было иметь возможность производить аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразование стандартного видеосигнала таким образом, чтобы при преобразовании не было потерь качества телевизионного изображения. С этой целью был разработан стандарт цифрового видеосигнала стандартного разрешения ITU-R BT.601 (он же CCIR-601), а немного позже вышла его обновленная версия ITU-R BT.656 (он же CCIR-656). На этом стандарте остановимся подробнее.

Основными параметрами цифрового сигнала являются частота дискретизации и число уровней квантования по амплитуде. Последний параметр тесно связан с разрядностью используемых АЦП и ЦАП.

В соответствии с вышеуказанным стандартом частота дискретизации выбрана как удвоенная максимальная частота в спектре аналогового видеосигнала (6,5 МГц) с небольшим запасом. В итоге частота дискретизации получилась равной 13,5 МГц.

Для частоты 13,5 МГц получилось, что общее число цифровых отсчетов за время одной строки (64 мкс) составляет 864 (рис. 2.5). Из них 144 отсчета соответствуют положению гасящего строчного импульса и не несут информации о яркости. На активную часть строки приходится 720 отсчетов. Поэтому стандартный формат кадра составляет 720x576 пикселей [6].

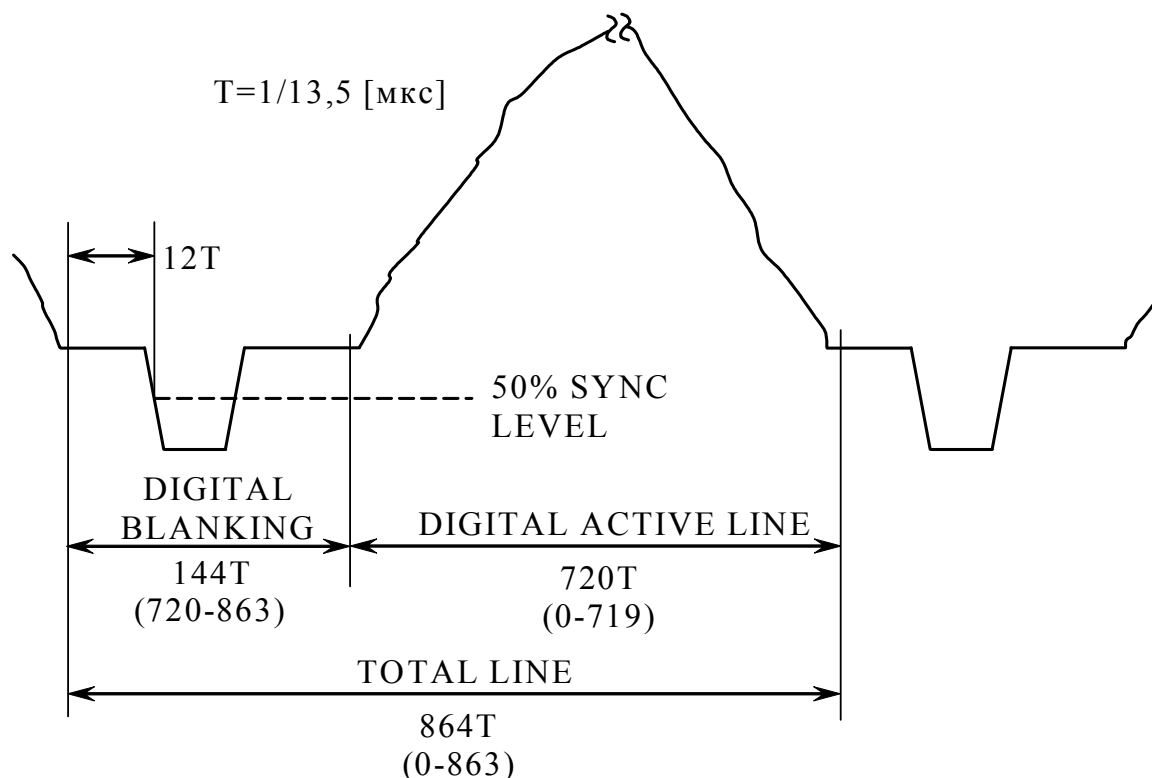


Рисунок 2.5 – Видеосигнал в цифровой форме:

DIGITAL ACTIVE LINE – активная часть строки цифрового видеосигнала, DIGITAL BLANKING – сигнал гашения цифрового видеосигнала, TOTAL LINE – полная строка цифрового видеосигнала, SYNC LEVEL – уровень импульсов синхронизации

Выбор числа уровней квантования определяется следующими факторами. Необходимо, чтобы при оцифровке и последующем восстановлении аналогового видеосигнала не возникло бы яркостных искажений в изображении. Наиболее отчетливо они видны в сценах с протяженными поверхностями, на которых яркость плавно изменяется.

Кроме того, необходимо учитывать отношение сигнал/шум в видеосигнале. Для большинства применений отношение сигнал/шум не превышает 42-46 дБ. Поэтому для передачи оцифрованного видеосигнала в большинстве случаев достаточно около 200-250 уровней квантования. Это число хорошо согласуется с 8-разрядным АЦП и ЦАП. Кроме того, 8 разрядов хорошо согласуется с байтовой архитектурой большинства системных шин, разрядностью процессоров и памяти. Это значение разрядности и принято в данном стандарте как базовое. Стандарт предусматривает также расширение разрядности до 10 бит, что дает возможность повысить число уровней квантования в четыре раза.

При реализации стандарта использовалось следующее представление сигнала яркости и сигналов цветности (рис. 2.6) [6].

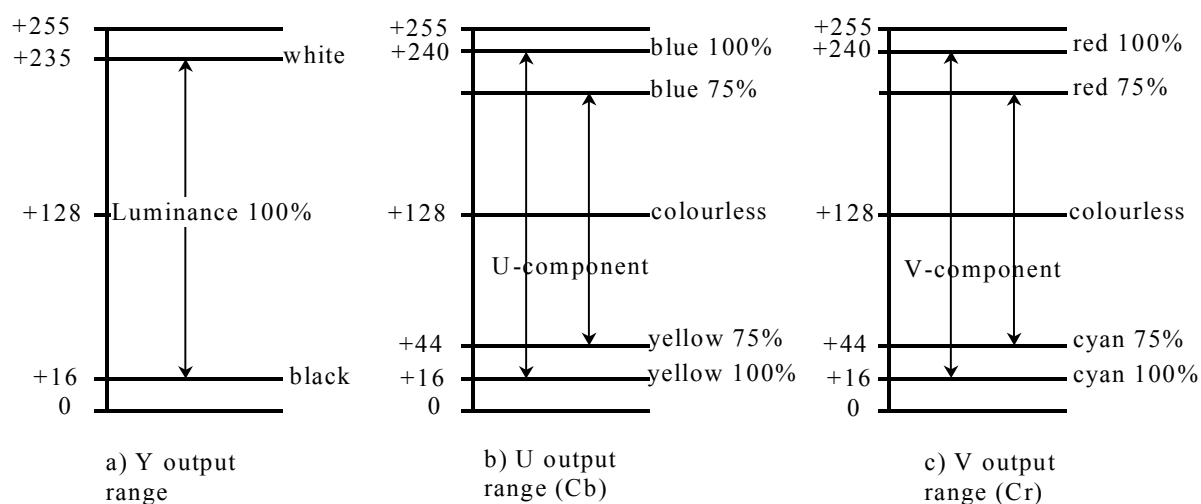


Рисунок 2.6 – Представление сигнала яркости и сигналов цветности для 8-разрядного АЦП

Сигналы несколько ограничиваются с обеих сторон (16 отсчетов сверху и 16 отсчетов снизу). Это связано с наличием дополнительных сигналов, которые будут описаны ниже. Кроме того, сигналы цветности используются таким образом, что их средние значения соответствуют отсутствию цветовых составляющих.

Передача видеосигнала предусмотрена как в параллельном, так и в последовательном виде. Как правило, используется передача в параллельном виде с использованием 8-разрядной шины данных.

Так как для передачи цветного видеосигнала требуется передавать не только сигнал яркости, но и сигнал цветности, то предусмотрена их передача в общем потоке с сигналом яркости. При этом реализуется схема 4:2:2. То есть, на каждые четыре отсчета сигнала яркости приходится по два отсчета каждого из сигналов цветности. Таким образом, для передачи цветного видеосигнала требуется 16-разрядная шина данных, по которой

информацию, чередующуюся служебными последовательностями SAV и EAV .

Следует отметить, что объем данных, который можно передать в качестве дополнительной информации в участках гасящих импульсов довольно большой. В частности, этот объем позволяет передавать высококачественное звуковое сопровождение без сжатия с параметрами оцифровки (5 каналов, 16 бит, 48 кГц).

Так, стремление использовать квадратные пиксели привело к тому, что потребовалось ввести коррекцию на частоту дискретизации для разных цветовых стандартов. Например, для стандарта 625 строк 50 Гц потребовалось увеличение частоты с 27 до 29,5 МГц. В связи с этим формат кадра увеличился до 768x576 пикселей. При этом число байт, соответствующее активной части строки увеличилось до 1536, а область между сигналами *EAV* и *SAV* увеличилась до 344 байт (рис. 2.8) [6].

Рисунок 2.8 – Формат данных для передачи видеосигнала 625 строк 50 Гц с коррекцией на частоту дискретизации

3 Фотоприемники на базе ФПЗС

3.1 Краткие теоретические сведения

Приборы с зарядовой связью были изобретены У. Бойлом и Г. Смитом в 1969 году. Принцип их работы основан на переносе зарядовых пакетов. Для фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) следует разделить процессы фотогенерации, переноса зарядов и детектирования зарядов.

Фотогенерация в ФПЗС основана на внутреннем фотоэффекте в полупроводниках [7]. В этом случае световое излучение (фотоны) попадая на фоточувствительную поверхность (полупроводник) преобразуется в электронно-дырочные пары. При этом количество этих пар будет пропорционально интенсивности падающего светового излучения. Для сбора носителей заряда следует создать определенные условия, а именно разделить носители зарядов (дырки и электроны), чтобы воспрепятствовать их рекомбинации. Для этой цели используется электрическое поле. Простейшим фотоприемником, способным аккумулировать носители заряда является МОП-конденсатор (рис. 3.1).

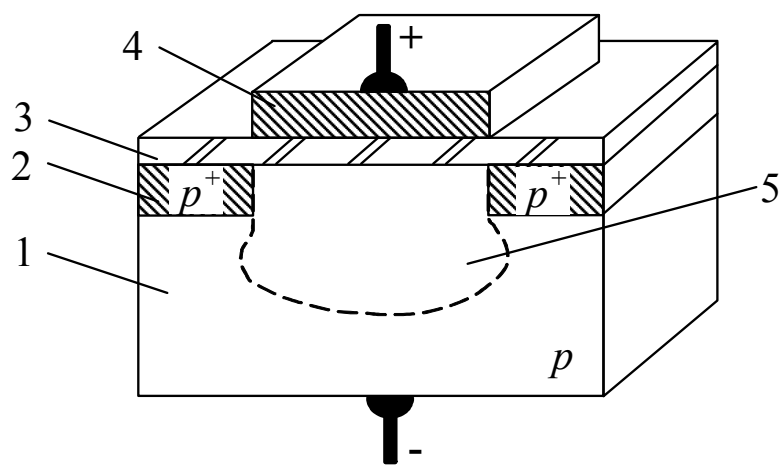


Рисунок 3.1 – МОП-емкость: 1 – полупроводник; 2 – стоп-канальная область; 3 – оксид; 4 – электрод; 5 – обедненная область

Слои металла и диэлектрика в этом конденсаторе очень тонкие и не препятствуют прохождению светового излучения в толщу полупроводниковой подложки 1. При подаче напряжения между электродами носители заряда разделяются. Дырки движутся в сторону отрицательного электрода, уходят в толщу полупроводниковой подложки. Электроны наоборот движутся вверх, в сторону положительного электрода. Достигнув слоя оксида (диэлектрика) они скапливаются под ним и образуют зарядовый пакет, величина которого пропорциональна

экспозиции светового потока, падающего на этот МОП-конденсатор. Максимальный размер зарядового пакета определяется геометрическими размерами МОП-конденсатора, а также напряжением на этом конденсаторе. Максимальный размер зарядового пакета обычно выражается числом содержащихся в нем электронов, обычно составляет несколько сот тысяч электронов. Этой величиной определяется экспозиция насыщения, создавшая максимальный зарядовый пакет. Кроме электронов, полученных в результате фотогенерации (фотоэлектронов) в зарядовом пакете всегда присутствуют и электроны, образованные вследствие термогенерации. Последние создают мешающий фон и являются дополнительным источником шумов.

Перенос зарядов собственно и есть главная особенность ФПЗС. Зарядовый пакет необходимо измерить и результат вывести из прибора наружу в виде напряжения или тока. С этой целью организуется перенос заряда. Для иллюстрации этого процесса воспользуемся двумя близко расположенных МОП-конденсаторами, представленными на рисунке 3.2 [7].

Фотогенерация происходит под левым конденсатором. При этом под левым электродом создается потенциальная яма (область, обедненная основными носителями заряда), которая заполняется фотоэлектронами в процессе фотогенерации. На следующем этапе происходит переключение напряжения на электродах МОП-конденсаторов. На электрод левого конденсатора подается напряжение низкого уровня, а на правый электрод – высокого уровня. При этом глубина левой потенциальной ямы резко уменьшается, а правой – увеличивается. Зарядовый пакет при этом перетекает в правую потенциальную яму. В этом и заключается перенос заряда.

Следует отметить, что часть зарядового пакета может остаться в левом МОП-конденсаторе. Этот эффект вызван диффузным переносом в обратном направлении, а также временным захватом и последующим освобождением носителей заряда на дефектах структуры полупроводника. Этот эффект носит название неэффективности переноса и является одним из специфических шумов ФПЗС.

При создании многоэлементных линейных и матричных ФПЗС используется регулярная структура из большого количества МОП-конденсаторов (рис. 3.3) [7].

Для обеспечения независимого накопления зарядовых пакетов требуется осуществлять накопление под каждым третьим МОП-конденсатором. В этом случае как при накоплении, так и при переносе не будет соприкосновения зарядовых пакетов, они будут независимы друг от друга как при накоплении, так и при переносе.

В этом случае регулярную структуру МОП-конденсаторов удобно объединить с помощью трех управляющих фаз. Теперь металлические

электроды МОП-конденсаторов электрически соединены друг с другом фазными шинами, которые в свою очередь являются управляющими электродами этой структуры, на которые подаются внешние управляющие сигналы.

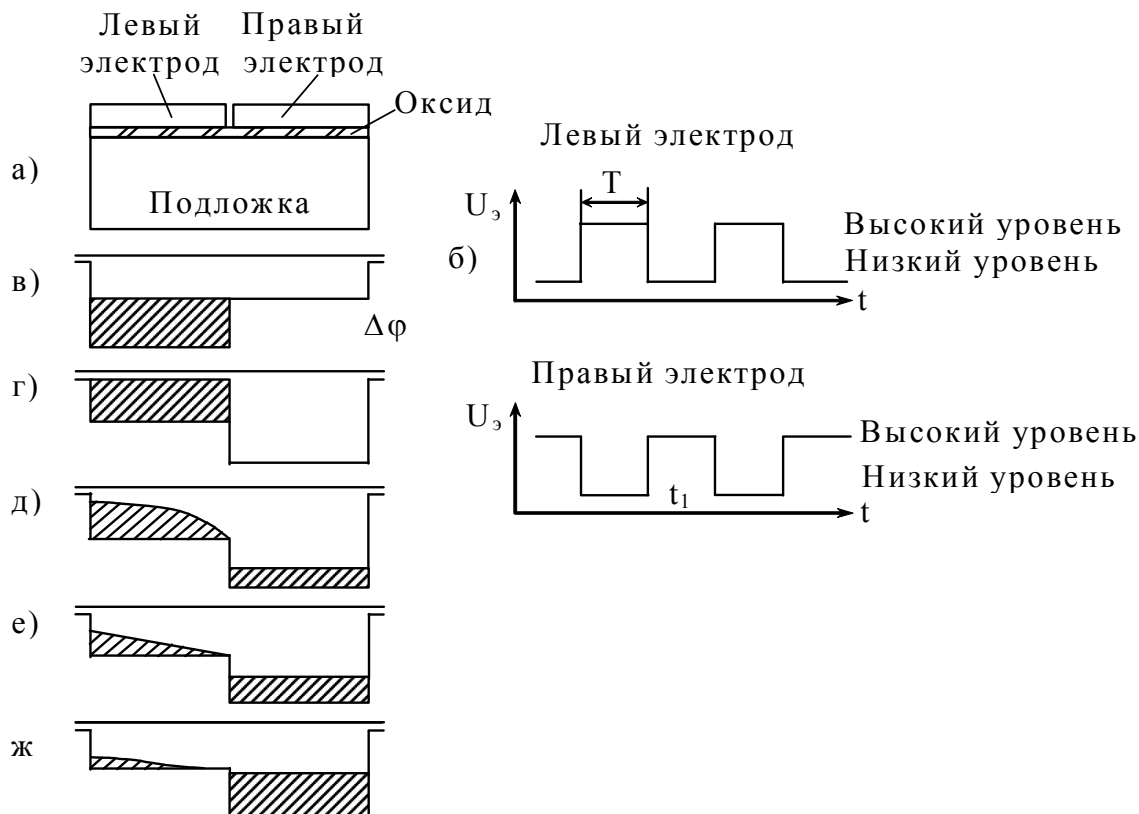


Рисунок 3.2 – Два МОП-конденсатора, связанные зарядовой связью: Две МОП-емкости, связанные зарядовой связью (надпись на скан. рис.): а – сечение; б – импульсные смещения, подаваемые на электроды; в – потенциальная яма образована под левым электродом и заполнена зарядом; г – пустая потенциальная яма образована под правым электродом; д – перенос зарядов самоиндуцированным дрейфом; е – перенос зарядов краевым полем; ж – перенос зарядов диффузией

Как видно из рисунка 3.3 зарядовые пакеты будут выполнять совместное перемещение по цепочке из связанных между собой МОП-конденсаторов при подаче на управляющие шины трехфазного сигнала, вид которого показан на рисунке 3.3, д. Количество МОП-конденсаторов в цепочке может достигать нескольких десятков тысяч (в линейных ФПЗС) и ограничивается прежде всего неэффективностью и шумами переноса.

Детектирование зарядов является последним процессом в работе ФПЗС. Информация, передаваемая зарядовыми пакетами, должна быть считана, преобразована и в удобной форме выведена из микросхемы ФПЗС [7].

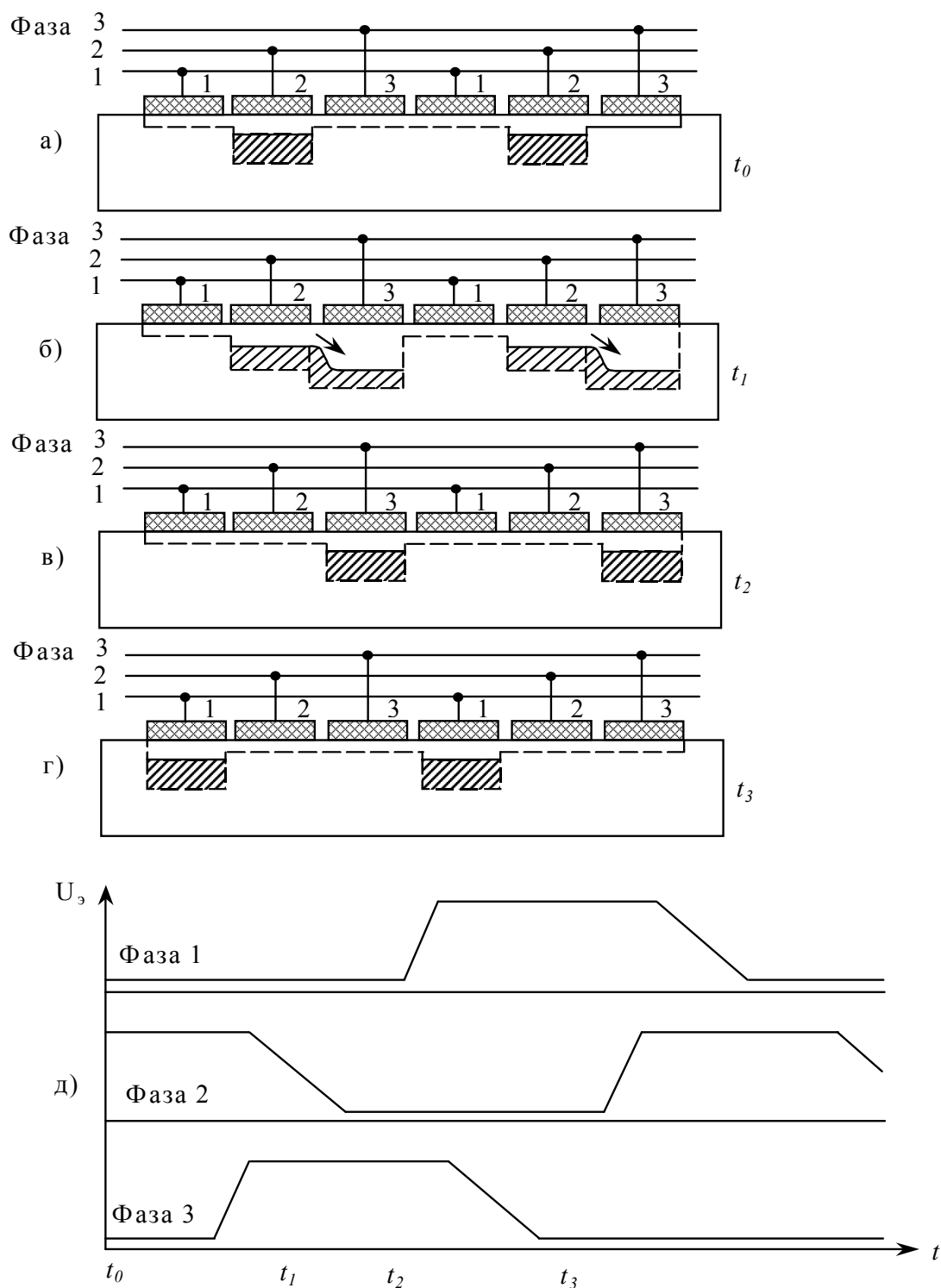


Рисунок 3.3 – Регулярная структура на основе МОП-конденсаторов:
а – зарядовые пакеты под электродами фазы 2; б – под электродами принимающей фазы 3 образовались потенциальные ямы, в них переходят зарядовые пакеты из-под электродов отдающей фазы 2; в – закончился перенос зарядовых пакетов; г – после повторения операций б, в для фаз 3 и 1, зарядовые пакеты переместились дальше вправо, под электроды фазы 1;
д – тактовая диаграмма

Для этого в ФПЗС имеется специальное выходное устройство (рис. 3.4). Находится оно в конце цепочки МОП-конденсаторов, и зарядовые пакеты передаются в сторону выходного устройства. Основу выходного устройства составляет выходной полевой транзистор $VT1$, затвор которого представляет собой элемент, участвующий в переносе зарядового пакета (плавающий затвор), также представляющий собой конденсатор. При попадании очередного пакета в зону плавающего затвора последний заряжается до напряжения, зависящего от величины зарядового пакета, а также от емкости затвора. Таким образом, транзистор $VT1$ выполняет роль преобразователя заряд-напряжение, параметры которого зависят от емкости затвора и от крутизны полевого транзистора. С выхода полевого транзистора может быть считан сигнал в виде напряжения, величина которого будет пропорциональна величине зарядового пакета и, следовательно, экспозиции светового потока, падающего на МОП-конденсатор, который сформировал данный зарядовый пакет.

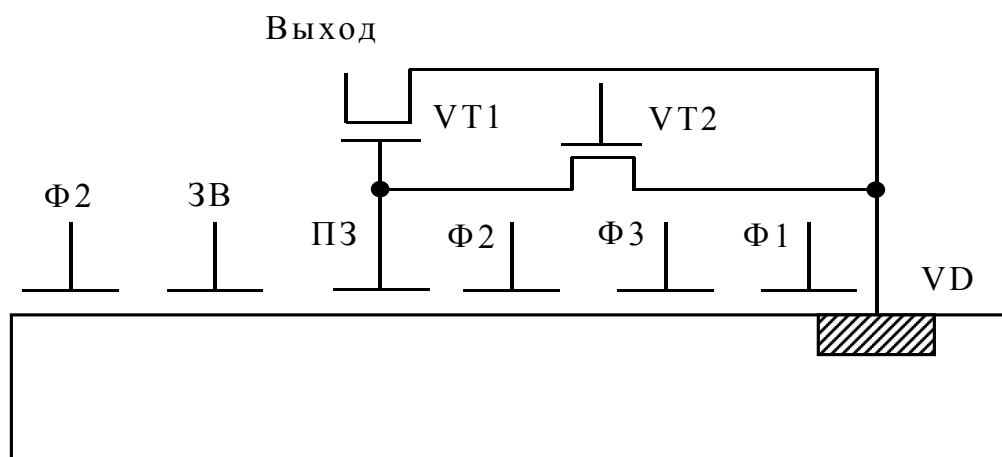


Рисунок 3.4 – Принцип работы выходного устройства ФПЗС

При последовательной передаче зарядовых пакетов в выходное устройство происходит последовательное детектирование зарядовых пакетов (зарядового рельефа) фотоприемника [7]. На выходе выходного устройства формируется напряжение (видеосигнал), изменяющееся в соответствии с изменением величин зарядовых пакетов, последовательно поступающих в зону плавающего затвора выходного устройства (рис. 3.5). Этим же рисунком можно проиллюстрировать работу линейного ФПЗС.

Для работы матричного ФПЗС требуется двумерный массив МОП-фотоприемников. В первом приближении матричный фотоприемник можно представить как комбинацию из соответствующего количества линейных фотоприемников. Основная особенность его заключается в способе вывода зарядовых пакетов наружу [7]. Принцип работы матричного фотоприемника иллюстрируется рисунком 3.6.

Массив фоточувствительных элементов образуется металлическими шинными электродами, пересекающими весь фотоприемник по горизонтали. Эти электроды также объединены в три фазы, аналогично линейному фотоприемнику. Однако, в этом случае образовалась бы линейка длинных горизонтальных элементов и вся структура оказалась бы модификацией линейного фотоприемника с широкими элементами. Чтобы сформировать действительно двумерную матрицу фоточувствительных элементов потребовалось создание специальных легированных областей – стоп-каналов (рис. 3.7). Эти стоп-каналы представляют собой участки полупроводниковой подложки, на которых формируется потенциальный барьер между потенциальными ямами. Таким образом, одна длинная потенциальная яма под фазным электродом превращается в большое количество потенциальных ям, ограниченных с обеих сторон стоп-каналами [7].

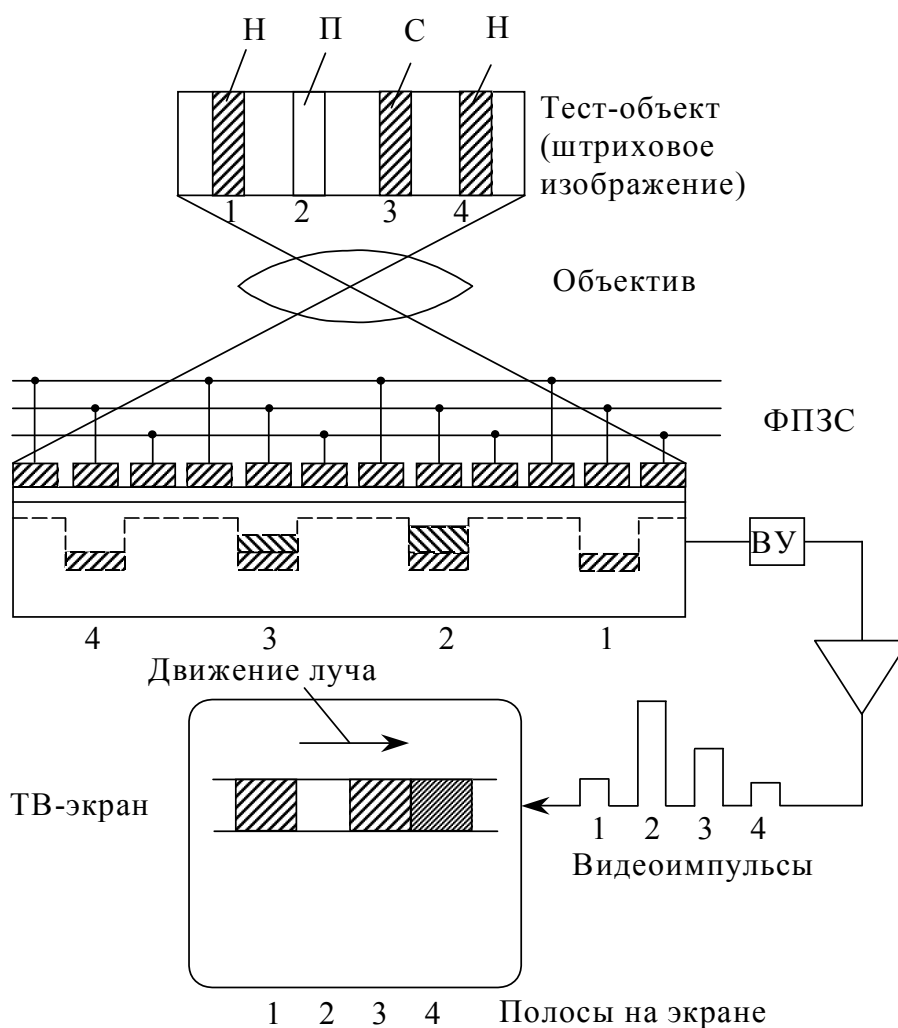


Рисунок 3.5 – Формирование видеосигнала на линейном ФПЗС

Накопление в такой структуре производится аналогично линейному фотоприемнику. На один из фазных электродов подается управляющий потенциал, обеспечивающий формирование потенциальных ям. В течение определенного времени (время накопления) производится экспозиция светового потока, фотогенерация и формирование зарядового рельефа в элементах.

После накопления производится процесс переноса, который существенно отличается от переноса в линейном фотоприемнике. Процесс переноса производится построчно. Для этого в приборе имеется вспомогательный регистр переноса, аналогичный по структуре линейному фотоприемнику. Этот регистр примыкает к основному массиву фоточувствительной матрицы (рис. 3.6). Процесс переноса производится построчно. При первом акте переноса сигнал с нижней самой ближней к выходному регистру строки переносится параллельно в выходной регистр. Затем этот сигнал последовательно переносится в выходном регистре в сторону выходного устройства, детектируется и выводится наружу. Для обеспечения синхронизации скорость вывода всех зарядовых пакетов выходного регистра должна соответствовать скорости переноса одной строки основной фоточувствительной матрицы (секции накопления).

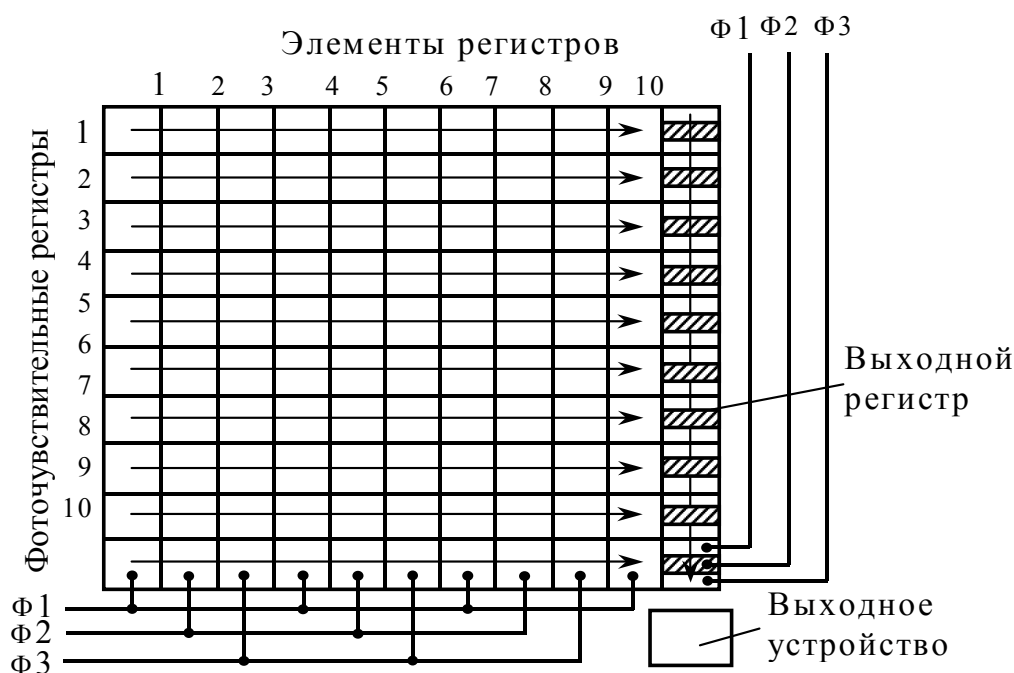


Рисунок 3.6 – Простейший матричный ФПЗС

Для работы фотоприемника в стандартном телевизионном режиме требуется, чтобы соблюдались основные параметры видеосигнала, а именно: частота кадров – 25 Гц, чересстрочная развертка и 625 строк (575 активных) строк. Это выполнено следующим образом. Число строк в фотоприемнике 288. Для реализации чересстрочной развертки в разных

полях накопление производится под разными фазами. Таким образом, общее число строк (активных) составляет 576. Частота переноса в секции накопления, а также цикл работы выходного регистра составляет 15625 Гц или 64 мкс, что соответствует параметрам строчной развертки. Общее время вывода всех строк плюс формирование кадровых гасящих импульсов составляет 40 мс или 25 Гц, что соответствует параметрам кадровой развертки. Таким образом, сигнал с матричного ФПЗС полностью соответствует действующему телевизионному стандарту.

Еще одна особенность работы ФПЗС также связана с переносом. Дело в том, что при переносе оптическое окно фотоприемника остается открытым и в процессе переноса также возможна фотогенерация. Это может привести к нежелательным смазам изображения, особенно в области ярких объектов в поле зрения [7]. Для уменьшения негативного эффекта смаза изображения предложены несколько вариантов (рис. 3.8).

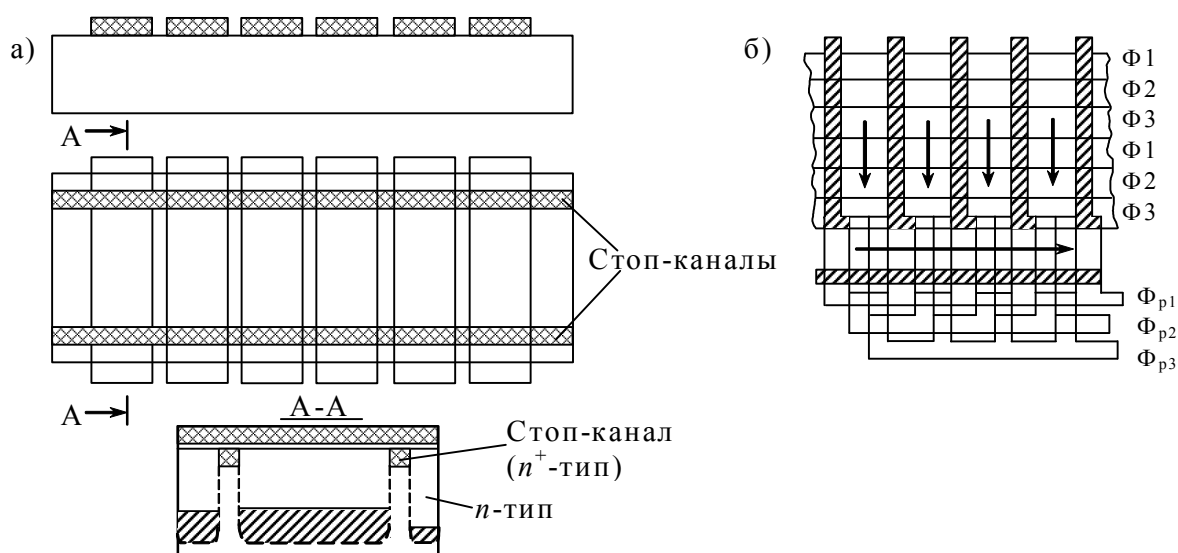


Рисунок 3.7 – Области стоп-каналов в ФПЗС: а – матричный ФПЗС с открытой секцией накопления, б – матричный ФПЗС с кадровым переносом

На рисунке 3.8, а приведена простейший матричный ФПЗС с открытой секцией накопления, совмещенной с секцией переноса. Здесь смаз проявляется наибольшим образом.

На рисунке 3.8, б приведена схема матрицы с кадровым переносом. Здесь матричная часть фотоприемника разделена на две равных части. Верхняя зона (секция накопления) предназначена для формирования зарядовых пакетов. Для этой зоны существует открытый оптический канал или окно прозрачное окно для поступления через него светового потока. Нижняя часть матрицы называется секцией переноса (хранения или памяти). Эта секция используется в качестве буфера для хранения и переноса зарядового рельефа, сформированного секцией накопления. Работа фотоприемника осуществляется следующим образом. Сначала

осуществляется накопление зарядовых пакетов в результате фотогенерации в секции накопления. Затем производится быстрый перенос накопленных зарядовых пакетов в секцию переноса. Секция накопления освобождается и начинает накапливать сигнал следующего поля видеосигнала. А в это же самое время зарядовые пакеты из секции памяти построчно и со строчной частотой выводятся через выходной регистр к выходному устройству.

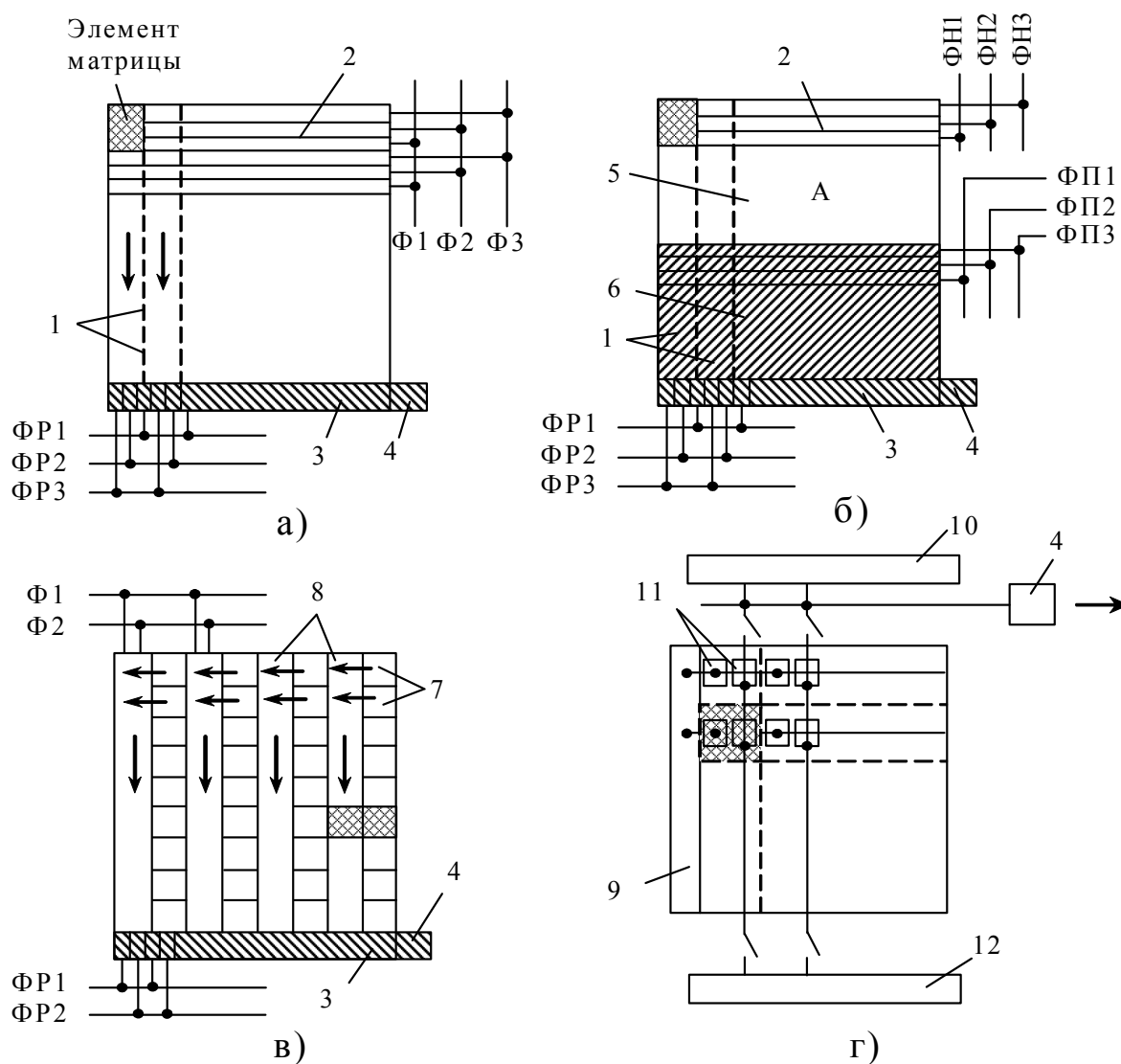


Рисунок 3.8 – Матричные ФПЗС:

а – матрица с регулярной структурой без разделения областей накопления и переноса; б – матрица с переносом кадров; в – матрица со строчно-кадровым переносом; г – прибор с инжекцией заряда;

1 – стоп-каналы; 2 – электроды; 3 – сдвиговый выходной регистр;

4 – выходное устройство; 5 – область накопления; 6 – область памяти;

7 – сверхчувствительные элементы; 8 – сдвиговые регистры, защищенные от света;

9 – строчный регистр; 10 – столбцовый регистр; 11 – сдвоенные МОП-емкости; 12 – опорное напряжение

Матрица с кадровым переносом проста по структуре, но имеет несколько недостатков:

- общее число элементов матрицы удваивается, при этом удваивается и площадь кристалла;
- число актов переноса увеличивается, поэтому увеличивается и неэффективность переноса и шум переноса;
- смаз устраняется не полностью, т.к. по-прежнему присутствует перенос в секции накопления, открытой для света.

На рисунке 3.8, в приведена схема матрицы со строчно-кадровым переносом. Здесь секции накопления и переноса совмещены. Вертикальные фоточувствительные области в них чередуются с экранированными от света регистрами считывания. Область накопления разрезана на вертикальные столбцы, между которыми вставлены сдвиговые регистры. Изображение в такой матрице проецируется на весь кристалл, хотя фоточувствительной является только часть площадки, не занятая сдвиговыми регистрами. Зарядовые пакеты, накопленные в ячейках секции накопления одновременно переносятся в соседние элементы сдвигового регистра и далее переносятся в сторону выходного регистра и выходного устройства. А в это же самое время в элементах секции накопления формируются зарядовые пакеты следующего поля.

Такие матрицы полностью свободны от смаза, однако технологически сложнее, т.к. требуют создания слоя маски для формирования секции накопления. Однако, практически все современные матричные фотоприемники имеют строчно-кадровую структуру.

3.2 Технические параметры и характеристики матричных фотоприемников на ФПЗС

Основным параметром, определяющим качество матричного фотоприемника является его разрешающая способность. Она целиком определяется форматом матрицы или количеством фотоприемных элементов. Разрешающую способность обычно определяют методом наблюдения специальных таблиц или штриховых мишен. Выражается разрешающая способность в количестве линий, наблюдаемых на мониторе по каждой координате. Чем больше линий наблюдается на мониторе, тем выше разрешающая способность.

Для стандартных телевизионных камер формат изображения ограничен телевизионным стандартом. В этом случае количество элементов по вертикали жестко ограничено значением 575 активных строк. Учитывая тот факт, что элементы изображения целесообразно выполнять квадратными, а соотношение сторон телевизионного изображения составляет 4:3, то количество элементов по горизонтали в стандартных камерах, как правило, составляет 750. Исходя из этого, формат матрицы для

стандартной камеры составляет 750x576 элементов или 0,43 Мпиксела. Однако технологически существует возможность выпускать фотоприемники значительно большего формата, но они уже не будут соответствовать телевизионному стандарту. Такие ФПЗС выпускаются для телевидения высокой четкости, электронных фотоаппаратов, систем обработки изображений, научных исследований и астрономии. На конец 2007 года максимальный формат матриц составлял 160 Мпикселей. Параметры некоторых выпускаемых ФПЗС приведены в таблице 3.1 [8].

Чувствительность определяется двумя параметрами – вольтовой чувствительностью, т.е. крутизной свет-сигнальной характеристики фотоприемника и пороговой чувствительностью – величиной минимального регистрируемого светового потока.

Чувствительность ФПЗС в первую очередь определяется физическим принципом работы этого фотоприемника, т.е. явлением внутреннего фотоэффекта в полупроводниках. Основным параметром внутреннего фотоэффекта является величина квантового выхода. Квантовый выход – это отношение величины полученных носителей заряда (электронно-дырочных пар) к количеству попавших на полупроводник фотонов. Средним значением квантового выхода для ФПЗС является величина 0,5-0,6 в диапазоне видимых длин волн [8].

Вольтовая чувствительность кроме квантовой эффективности определяется площадью фоточувствительного элемента. При прочих равных более высокой чувствительностью будет обладать ФПЗС с более крупными пикселями. Кроме того, вольтовая чувствительность определяется крутизной характеристики выходного устройства ФПЗС.

Чувствительность телевизионных камер на ФПЗС определяется эффективностью накопления заряда и помехой, которая складывается из двух составляющих: детерминированных помех и флуктуационных шумов [9]. Детерминированные помехи состоят из коммутационной помехи (наводки от импульсных напряжений на электродах матрицы) и геометрического шума (неоднородностей темнового тока и чувствительности элементов матрицы ФПЗС). Флуктуационный шум представляет собой совокупность следующих шумов: фотонных, темнового тока, фонового заряда, минимально необходимого для эффективного переноса, переноса входного и выходного устройств.

Рассмотрим собственные шумы ФПЗС: фотонные шумы, шумы темнового тока и шумы переноса. Помимо этих составляющих необходимо также учитывать шумы встроенного в телевизионную камеру усилителя, включающие в себя шумы входной цепи и транзистора [10, 11].

Уровень шумов ФПЗС принято оценивать среднеквадратическим числом шумовых электронов $\bar{N}$, представляющих собой среднеквадратическое отклонение числа носителей в каждом зарядовом пакете, переносимом в ФПЗС.

Таблица 3.1 – Параметры некоторых выпускаемых ФПЗС

Наименование матрицы	Кол-во пикселей	Размер диагонали, мм	Эффективные пиксели (HxV)	Частота кадров, Гц	Размер пиксела, мкм
Sony					
ICX419ALL	440K	8	752x582	30	8,4x8,4
ICX229AK	440K	4	752x582	50	4,2x4,2
ICX238AKE	380K	3	768x494	50	3,1x3,1
ICX205AK	1,4M	8	1392x1040	15	4x4
ICX252AK	3,2M	8	2078x1558	15	3x3
Texas Instrument					
TC253SPD-30	325K	6,08	656x496	60	7,4x7,4
TC285SPD-30	1M	11,2	1004x1002	20	8x8
Dalsa					
FTT1010M	1M	16,8	1024x1024	60	12x12
FTF2020M	4M	34,44	2048x2048	30	12x12
FTF3020C	6M	44,4	3072x3072	20	12x12
FTF4027M	11M	43,3	4008x2672	7,5	9x9
FTF4052M	22M	60,1	4008x5344	3,6	9x9
FTF5056C	33M	59,9	4992x6668	2	7,2x7,2
Kodak					
KAI-0340	VGA	5,9	640x480	110/210	9x9
KAI-1011	1M	12,9	1008x1018	15/30	9x9
KAI-2020	1,9M	14,8	1600x1200	15/30	7,4x7,4
KAI-4021	4,2M	21,4	2048x2048	8/15	7,4x7,4
KAI-16000	16M	43,4	4872x3248	1/3	7,4x7,4
KAF-1602	1,6M	16,6	1536x1024	2,2	9x9
KAF-16802	16,6M	51,9	4080x4080	0,5	9x9
KAF-39000	39M	61,3	7216x5412	0,9	6,8x6,8
НПП «Пульсар»					
MPM756IL-11	440K	10,5	756x581	30	11x11
MPM1000IL-17	1M	17,3	1024x1024	100	12x12
ЦНИИ «Электрон»					
ФППЗ 32М	0,45M	20,7x15,7	768x580	33	27x27
ISD-075AP	1,6M	17,12x18,2	1225x1300	3	14x14
ФППЗ 12М1	1,2M	13,3x15	1024x1152	16	13x13

Природу фотонного шума составляют флуктуации квантов в световом потоке, облучающем фоточувствительную поверхность. За фотонный шум можно принять среднеквадратическое значение числа фотоэлектронов N_{ph} ,

накопленных на элементе за полное время накопления, т.е. за время кадра или полукадра. Тогда в расчете на один зарядовый пакет [12]

$$\bar{N}_\phi = \sqrt{N_{ph}} = \sqrt{N_0 \theta T_\kappa S_\phi} \approx 2,83 \cdot 10^8 \sqrt{E_\phi \theta T_\kappa S_\phi},$$

где N_0 – количество квантов с длинами волн в пределах спектральной чувствительности ФПЗС, упавших на единицу площади, θ – квантовый выход, э/квант, T_κ – время кадра или полукадра (зависит от типа ФПЗС), S_ϕ – площадь электрода, E_ϕ – освещенность фотопреобразователя.

Темновой ток, являющийся результатом термической генерации носителей заряда, заполняющих обедненную область, сопровождается дополнительными дробовыми шумами, уровень которых в расчете на зарядовый пакет можно определить по формуле

$$\bar{N}_\tau = \sqrt{\frac{I_\tau}{e \cdot f_0}},$$

где I_τ – темновой ток; f_0 – тактовая частота, e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Источниками шумов переноса являются флуктуации зарядов, захватываемых ловушками. Можно показать, что уровень шумов переноса определяется как [13]

$$\bar{N}_\pi = 30\sqrt{n},$$

где n – число трехфазных переносов.

Очевидно, что число шумовых электронов $\bar{N}_\pi$ будет максимальным для пакетов, наиболее удаленных от выходного регистра.

Тепловой шум входной цепи встроенного усилителя зависит от величины ее емкости, являющейся одновременно выходной емкостью ПЗС $C_{\text{вых}}$. Тогда

$$\bar{N}_{\text{в.ц}} = \sqrt{\frac{k_0 T C_{\text{вых}}}{e}},$$

где k_0 – постоянная Больцмана, $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; T – абсолютная температура.

Рассмотренные источники шумов в ФПЗС являются независимыми. Поэтому полный шум в выходном сигнале определяется суммой дисперсий числа электронов, вносимых всеми источниками [14]

$$\bar{N} = \sqrt{\bar{N}_\phi^2 + \bar{N}_\tau^2 + \bar{N}_\pi^2 + \bar{N}_{\text{в.ц}}^2}.$$

Тогда шумовое напряжение матрицы ФПЗС находится по формуле

$$\bar{U}_\text{м} = \frac{e}{C_{\text{вых}}} \bar{N}.$$

Шумы встроенного усилителя, выполненного на МОП-транзисторе, складываются из тепловых шумов канала и поверхностного шума, спектральная плотность которых

$$G(f) = 4k_0 \cdot T \cdot R_{\text{ш}} \cdot (1 + f' / f),$$

где $R_{\text{ш}}$ – шумовое сопротивление транзистора; $f' = 10^4 \div 10^5$ Гц.

Соответствующее шумовое напряжение встроенного усилителя

$$\overline{U}_{\text{yc}}^2 = \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} G(f) df = 4k_0 \cdot T \cdot R_{\text{ш}} \cdot [f_{\text{в}} - f_{\text{н}} + f' \ln(f_{\text{в}} / f_{\text{н}})].$$

Суммарное значение шума матрицы и усилителя

$$\overline{U}_{\text{ш}} = \sqrt{\overline{U}_{\text{yc}}^2 + \overline{U}_{\text{м}}^2}.$$

Имеет значение также коэффициент использования светового потока. Коэффициентом использования светового потока называют отношение площади фоточувствительных элементов матрицы к общей площади кристалла. Наибольшее значение этот коэффициент имеет в матрицах с строчно-кадровым переносом, у которых на кристалле возникают зоны, которые не участвуют в фотоэлектрическом преобразовании. Это несколько снижает значение коэффициента использования (до двух раз). Однако это уменьшение с лихвой компенсируется дальнейшим усилением сигнала. Кроме того, использование последних достижений – микролинз (см. рис. 3.9) над каждым фоточувствительным элементом – позволяет увеличить значение коэффициента использования.

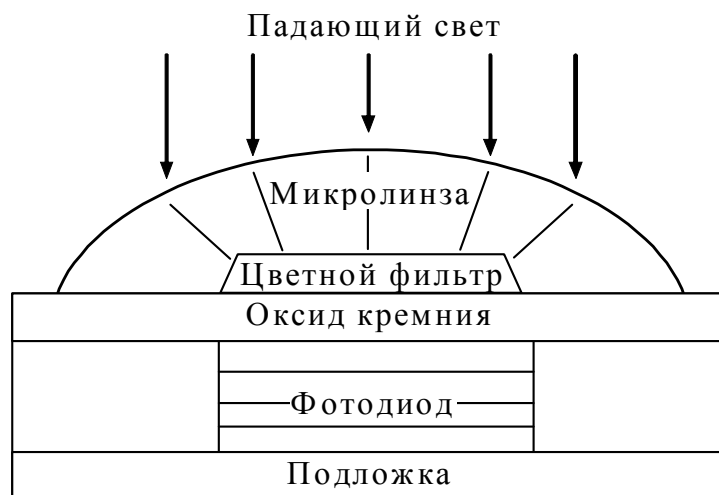


Рисунок 3.9 – Принцип использования микролинзы

Спектральная чувствительность ФПЗС определяется материалом подложки, т.е. кремнием. В первом приближении она соответствует спектральной чувствительности любого кремниевого фотоприемника, т.е. диапазон примерно от 0,4 до 1,1 мкм и максимум примерно 0,8 мкм [15]. Однако наличие металлических и оксидных слоев над полупроводником

создает эффект интерференционного светофильтра (график истинной спектральной чувствительности ФПЗС показан на рисунке 3.10).

Пороговая чувствительность зависит от состава и величины собственных шумов фотоприемника.

Наиболее существенный вклад вносят фотонный шум, шум темнового тока, шум установки узла детектирования заряда, шум выходного устройства, шум переноса. Практически все виды шумов уменьшаются при снижении рабочей температуры кристалла.

Существует также детерминированный геометрический шум, вызванный разбросом параметров отдельных пикселей. Здесь следует выделить такие источники, как неравномерность чувствительности и неравномерность темнового тока от элемента к элементу. Кроме того, следует учитывать искажения, связанные с неэффективностью переноса.

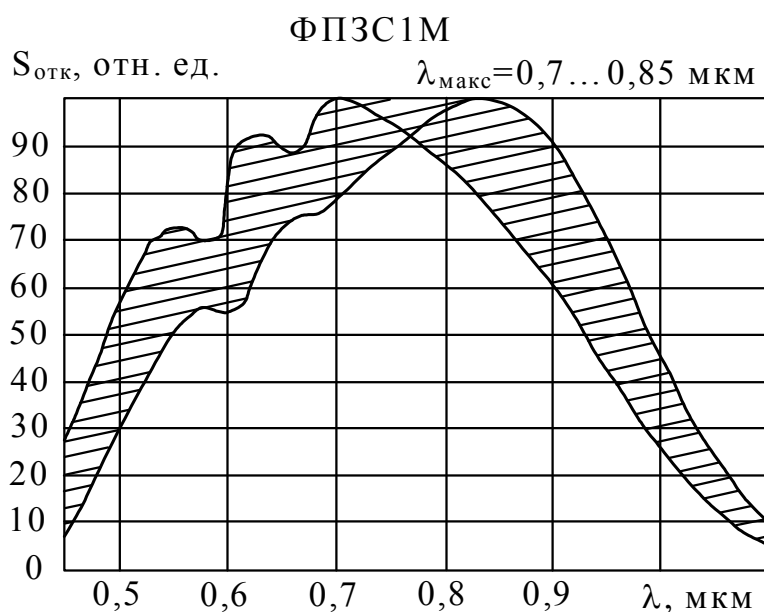


Рисунок 3.10 – Спектральная чувствительность кремниевого фотоприемника

Динамический диапазон работы фотоприемника представляет собой отношение максимального зарядового пакета к величине суммарного шума. При этом максимальное значение зарядового пакета соответствует максимально возможному значению освещенности. Величину суммарного шума принято считать минимальному сигнальному зарядовому пакету, который соответствует пороговой освещенности (при отношении сигнала к шуму, равному 1). В ФПЗС максимальное значение зарядового пакета определяется, в основном, размером фоточувствительного элемента. Для большинства приборов это значение составляет несколько сот тысяч электронов, в отдельных случаях — более миллиона электронов. Минимальное значение зарядового пакета, соответствующее значению

шума обычно составляет несколько сотен или десятков электронов. В некоторых случаях это значение можно понизить до единиц электронов. Имеет также значение наличие автоматических регулировок чувствительности фотоприемника, которые помогают расширить динамический диапазон сверху за счет уменьшения чувствительности. Таким образом, динамический диапазон имеет довольно существенный разброс 100 – 1000000 (40 – 120 дБ).

4 Фотоприемники на базе КМОП

4.1 Краткие теоретические сведения

Приборы с зарядовой связью, появившиеся в 1969 году привели к твердотельной революции в телевидении. В результате практически все телевизионные преобразователи изображения стали выполняться по твердотельной полупроводниковой интегральной технологии. Однако, технологические особенности ПЗС не позволяли выполнить телевизионную камеру и устройства обработки на одном кристалле, т.к. разные части камеры выполнялись по разным технологиям. В результате телевизионная камера на ФПЗС состоит, как минимум, из четырех интегральных микросхем: матричного ФПЗС, синхрогенератора, преобразователя уровней и видеопроцессора (видеоусилителя). Технически камера выполнялась на одной печатной плате, габариты которой и определяли размеры устройства в целом. Перейти на новый уровень миниатюризации и обеспечить новые функциональные возможности можно было только в случае преодоления барьера между технологиями изготовления ФПЗС и других интегральных микросхем.

Качественным шагом в дальнейшей интеграции является появление новых матричных фоточувствительных приборов – КМОП-фотоприемников. Основное отличие этих фотоприемников от ПЗС является использование другого метода реализации развертки. Как известно, ФПЗС использует перенос зарядовых пакетов по цепочке от места их формирования до выходного устройства ФПЗС (преобразователя заряда в напряжение). В КМОП-фотоприемниках используется координатная адресация к каждому элементу зарядового рельефа, полученного в результате фотогенерации. Схема КМОП-фотоприемника первого поколения приведена на рисунке 4.1 [8].

Структура фотоприемника очень напоминает структуру микросхем динамической памяти, которая состоит из конденсаторов, содержащих информационный заряд, адресных шин и схемы управления адресацией. В микросхемах памяти используются дискретные (бинарные) значения емкости, характерные для кодирования цифровой информации. Доступ к конденсаторам осуществляется путем двухкоординатной шинной структуры. В КМОП-фотоприемниках величина заряда в конденсаторах пропорциональна среднему значению освещенности изображения, проецируемого на этот элемент. Поэтому для передачи информации о величине освещенности в данном элементе необходимо передать заряд с конденсаторов на считывающее устройство. Для этого и используется система из двух координатных шин, с помощью которых конденсатор подключается к выходному устройству. Основным недостатком такой схемы является большая емкость координатных шин относительно емкости

конденсатора фоточувствительной ячейки. В результате, сигнал с конденсатора приходит на считывающее устройство ослабленным и чувствительность такого фотоприемника оказалась невысокой.

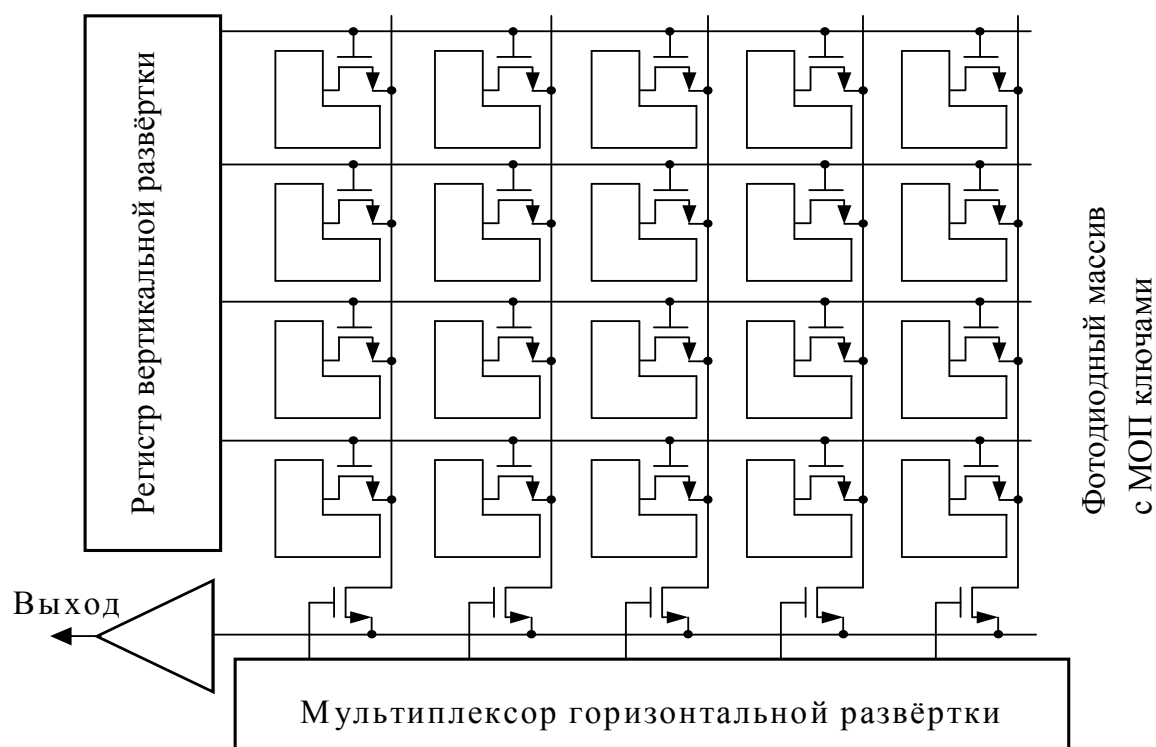


Рисунок 4.1 – Структурная схема КМОП-фотоприемника первого поколения

Тем не менее, новый прибор обладал весьма существенными преимуществами:

- Технология изготовления фотоприемной матрицы оказалась совместимой с технологией изготовления большинства интегральных приборов (логических элементов, процессоров, памяти, усилителей и АЦП). Это позволило в рамках одной микросхемы создать высокоинтегрированное устройство формирования и обработки изображений.
- Произвольный доступ к элементам фоточувствительной матрицы позволил использовать гибкое управление режимами работы фотоприемника.
- Технология КМОП (комплиментарные структуры металл-окисел-полупроводник) освоена большинством производителей интегральных микросхем. Поэтому в отличие от ФПЗС их стали разрабатывать и выпускать большое число фирм. Это привело к быстрому развитию и совершенствованию этих приборов и уменьшению их стоимости.

Основной недостаток КМОП-технологии был преодолен в 1993 году с изобретением технологии активного пиксела [8]. Речь идет о введении усилительного каскада в каждый фоточувствительный элемент матрицы (рис. 4.2). В этом случае рядом с каждым фоточувствительным элементом присутствует усилитель, в простейшем случае однотранзисторный истоковый повторитель. Теперь емкость считывания и емкость видеошины оказывается разделенной этим усилителем. Емкость считывания в таком приборе примерно равна емкости фоточувствительной ячейки ФПЗС. С учетом встроенного усилителя коэффициент преобразования заряда в напряжение стал даже выше чем в приборах на ПЗС. В результате чувствительность и шумовые характеристики КМОП-фотоприемников сравнялись и даже превысили показатели ФПЗС. По мере усложнения технологии КМОП-фотоприемников усложнялась также и схемотехника встроенных усилителей активных пикселей.

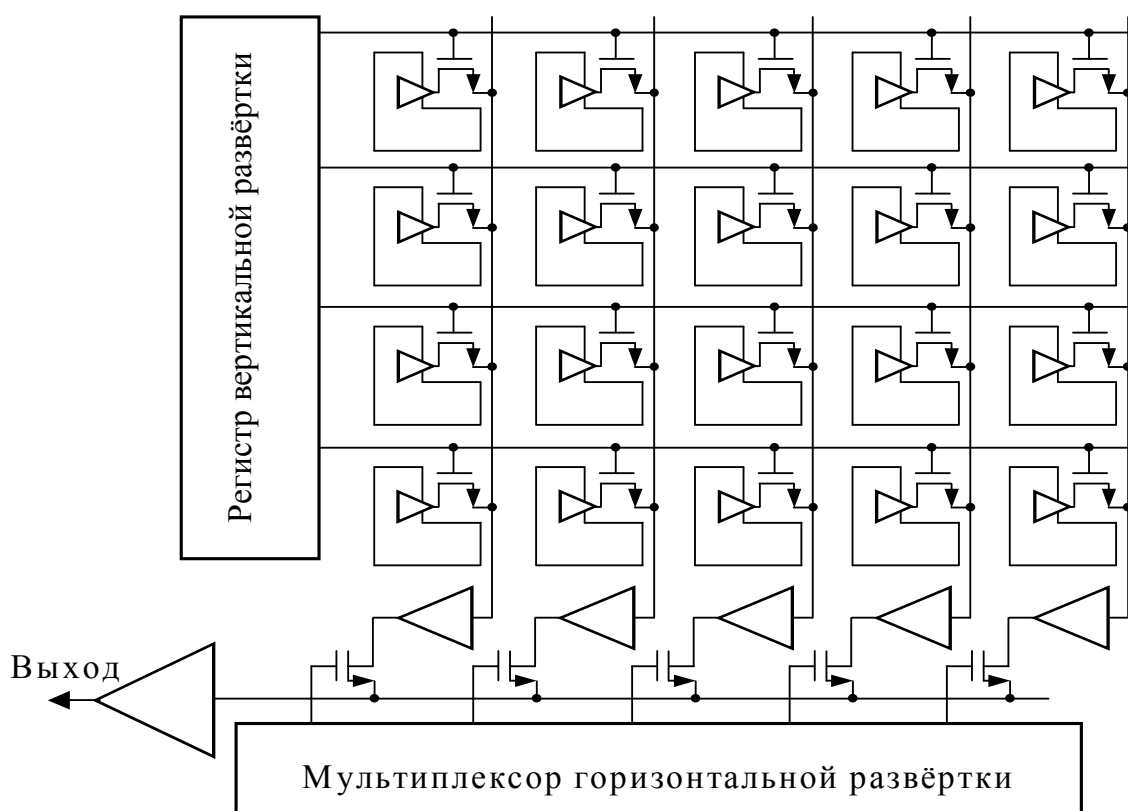


Рисунок 4.2 – Структурная схема КМОП-фотоприемника с технологией активного пиксела

Еще одно важное направление развития КМОП-фотоприемников было связано с интеграцией различных узлов телевизионной камеры и устройств обработки непосредственно в кристалл фотоприемника благодаря единству КМОП-технологии. Одним из первых шагов в этом направлении была интеграция АЦП.

Одним из преимуществ КМОП-фотоприемников перед ФПЗС стала возможная высокая частота опроса элементов структуры, значительно превышающая аналогичный показатель у ФПЗС [8]. Поэтому при такой высокой скорости опроса важно успеть вывести и оцифровать информацию. Требования к аналоговой части и АЦП оказываются весьма жесткими. Единственным выходом является распараллеливание процесса обработки путем введения нескольких АЦП на кристалл фотоприемника. На рисунке 4.3 приведена структурная схема фотоприемника со встроенными АЦП на каждый столбец. В этом случае полоса частот аналогового видеосигнала а также частота выборок АЦП значительно уменьшаются. Коммутация выходных сигналов осуществляется в цифровом виде.

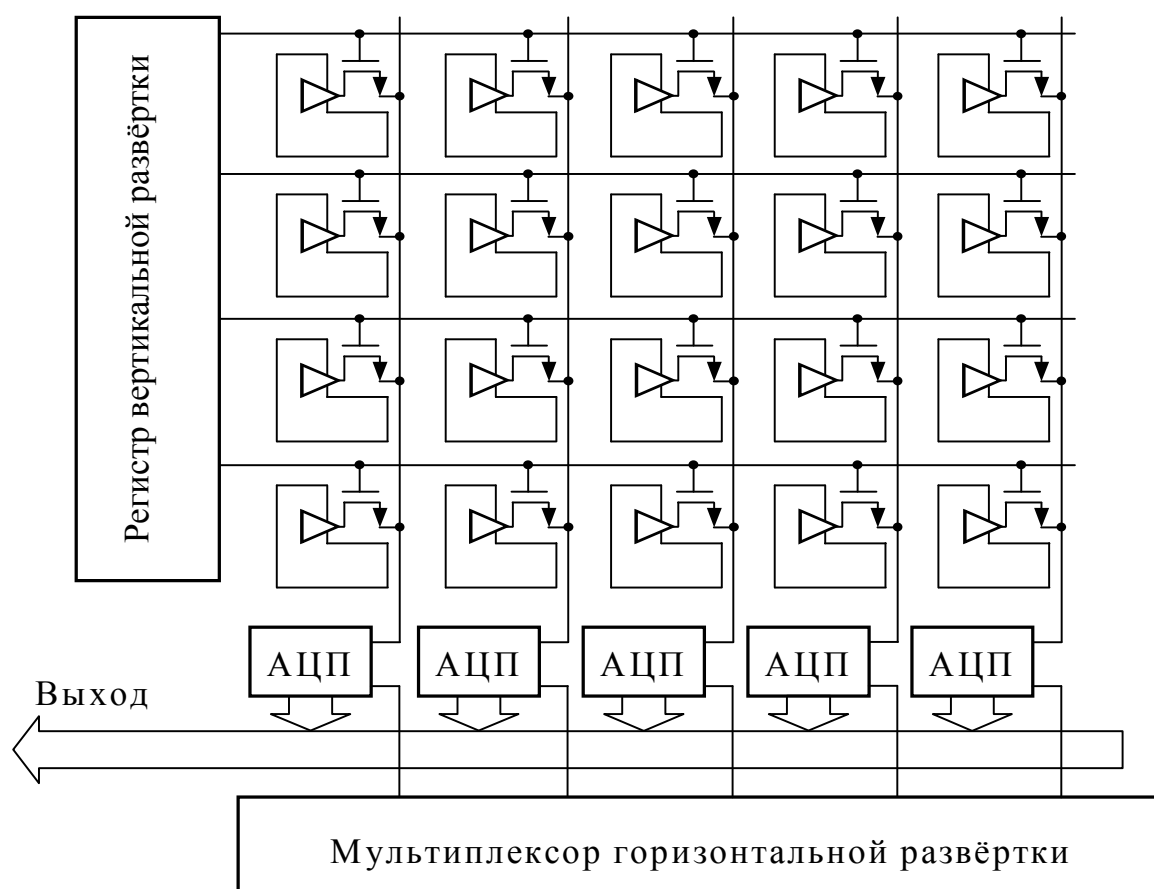


Рисунок 4.3 – Структурная схема КМОП-фотоприемника с активным пикселем и интегрированными АЦП

В ближайшее время следует ожидать появления КМОП-фотоприемников с активным цифровым пикселем. В этом случае каждый фоточувствительный элемент будет содержать не только усилитель, но и АЦП.

Универсальность КМОП-технологии позволяет создать новый тип электронных устройств, характеризующихся функциональной законченностью благодаря интеграции всех или большинства

функциональных узлов устройства на одном кристалле. Это направление получило название системы на кристалле (*System on Chip, SoC*). Развитие КМОП-фотоприемников идет по этому же пути. На кристалл фотоприемника интегрируются большинство узлов для построения цифровой системы обработки изображения. К таким узлам кроме собственно фотоприемной матрицы с активными пикселями относятся управляемый генератор развертки, цифровой и аналоговый видеопроцессоры, АЦП, кодер композитного цветного видеосигнала, АЦП и блок управления.

К таким приборам относится и КМОП-фотоприемник OV5610 фирмы *Omni Vision*, который используется в исследуемой камере [16]. Структурная схема этого фотоприемника приведена на рисунке 4.4. Его основу составляет фотоприемная матрица размером 2640x1960 элементов. Имеются встроенный видеоусилитель с регулируемым коэффициентом усиления, регулировка баланса белого, 10-разрядный АЦП, компенсатор уровня черного и цифровой видеопорт. Аналоговый видеопорт в данной микросхеме отсутствует, так как формат кадра не совпадает со стандартным телевизионным сигналом. Вся схема тактируется от одного общего генератора, с помощью которого формируются все необходимые для работы прибора тактовые последовательности. Управление режимами работы прибора производится программно с использованием встроенных регистров управления, доступ к которым обеспечивается с помощью приборного последовательного интерфейса *I2C*.

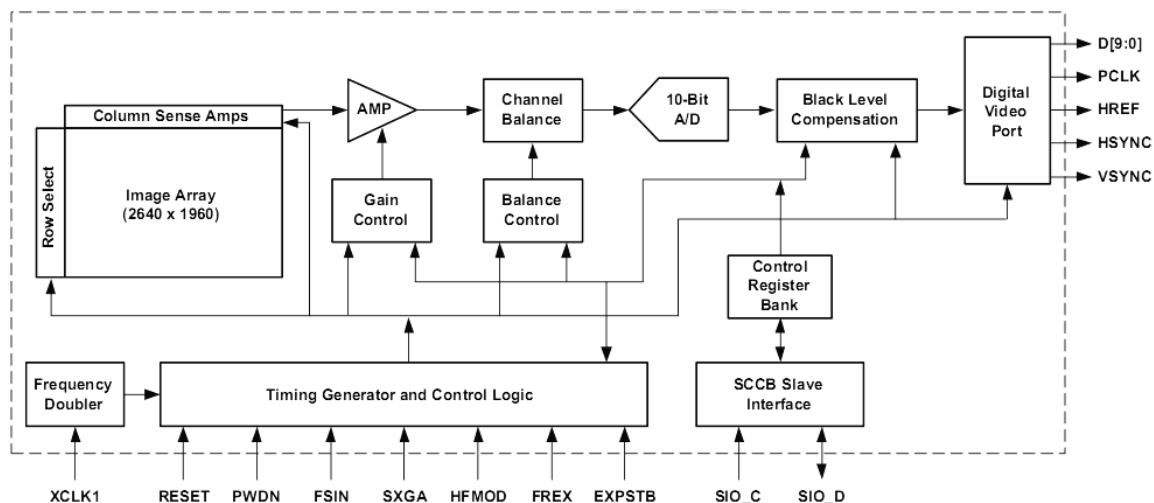


Рисунок 4.4 – Структурная схема КМОП-фотоприемника OV5610

4.2 Основные параметры и характеристики КМОП-фотоприемников

Разрешающая способность определяется числом светочувствительных элементов и их геометрическим размером. Технология изготовления КМОП микросхем является наиболее

совершенной интегральной технологией. Размеры элементов на кристалле в настоящее время значительно меньше одного микрометра, а количество элементов на кристалле составляет несколько миллиардов. Однако, фоточувствительный элемент принципиально не может быть очень маленьким. Ограничения связаны с длиной волны принимаемого излучения. Так, линейный размер фоточувствительных элементов большинства КМОП-фотоприемников составляет $3\div 10$ мкм, а теоретическим пределом в настоящее время считается размер 1,5 мкм.

При таких параметрах число фоточувствительных элементов составляет в настоящее время несколько десятков мегапикселей. В перспективе нет никаких проблем для создания КМОП-фотоприемников с размером матрицы несколько сотен или даже тысяч мегапикселей.

Возможность изменения режимов работы фотоприемника позволяет выполнять сложение сигналов отдельных пикселей, а также выбирать из общего массива рабочее окно произвольного расположения и размера.

Чувствительность фотоприемника определяется следующими факторами: коэффициентом сбора светового потока, квантовой эффективностью и собственными шумами.

Коэффициентом использования светового потока называют отношение площади фоточувствительных элементов матрицы к общей площади кристалла. Наибольшее значение этот коэффициент имеет в матрицах с пассивными пикселями. При использовании технологии активных пикселей на кристалле возникают зоны, содержащие усилительные элементы. Эти зоны не участвуют в фотоэлектрическом преобразовании. Это несколько снижает значение коэффициента использования (до двух раз). Однако это уменьшение с лихвой компенсируется дальнейшим усилением сигнала. Кроме того, использование микролинз над каждым фоточувствительным элементом, как и для ФПЗС, позволяет увеличить значение коэффициента использования.

Квантовая эффективность является величиной, зависящей от материала подложки фотоприемника. В целом, квантовая эффективность ФПЗС и КМОП-фотоприемников совпадает. Для большинства приборов квантовая эффективность составляет величину 0,5-0,6 для видимого диапазона длин волн.

Параметры некоторых выпускаемых КМОП-сенсоров приведены в таблице 4.1 [8].

Состав собственных шумов КМОП-фотоприемников несколько отличаются от ФПЗС. Наиболее существенный вклад вносит фотонный шум, шум темнового тока, шум установки узла детектирования заряда. Значительно меньший вклад вносит шум выходного устройства (благодаря технологии активных пикселей). Совершенно отсутствует шум переноса. Практически все виды шумов уменьшаются при снижении рабочей

температуры кристалла. При наличии встроенного АЦП следует учитывать шум квантования.

Таблица 4.1 – Параметры некоторых выпускаемых ФПЗС

Наименование сенсора	Кол-во элементов	Тип, размер	Эффективные элементы (НхV)	Частота кадров, Гц	Размер элемента, мкм
Sony					
IMX006	1,33М	1/3,2	1296х985	15	3,45х3,45
IMX011	2,13М	1/3	1656х1249	15	2,925х2,925
IMX007AQ	12,4М	1,8	4288х2848	5	5,49х5,49
Sharp					
PJ24P3BA0ET	3,27М	1/3,2	2096х1560	3	2,2х2,2
PJ23R3BA0ET	4,06М	1/2,5	2332х1740		2,5х2,5
PJ23T3BA0ET	6,20М	1/2,5	2872х2160		2,05х2,05
PJ23U3BA0ET	7,40М	1/2,5	3096х2328		1,9х1,9
PJ21V3BA0ET	8,50М	1/1,8	3320х2496	5	2,2х2,2
PJ21W3BA0ET	10,6М	1/1,7	3696х2776		2,05х2,05
Panasonic					
MN39960	7,38М	4/3	3136х2352	3	5,6х5,6
Samsung					
S5K4AAF	1,31М	1/4	1280х1024		2,8х2,8
S5K3C1FX	3,15М	1/3	2048х1536		2,25х2,25
S5K2E1FX	5,16М	1/2,5	2616х1960	10	2,2х2,2
Micron					
MT9M112	1,31М	1/4	1280х1024	15	2,8х2,8
MT9M413	1,31М	20 mm	1280х1024	500	12х12
MT9T012	3,17М	1/3,2	2056х1544	15	2,2х2,2
MT9E001	7,99М	1/2,5	3264х2448		1,75х1,75
Philips					
FXA1012	2,09М	2/3	1616х1296	5	5,1х5,1
Canon					
EOS 10(704F)	6,29М	22,7х15,1	3072х2048	3	7,4х7,4
EOS 350D	8,00М	22,2х14,8	3456х2304	3	6,4х6,4
EOS 5D(706P)	12,8М	35 mm	4368х2912	3	8,2х8,2
EOS 1DsII	16,6М	35 mm	4992х3328	4	7,2х7,2
Kodak					
KAS-3100	3,15М	1/2,7	2048х1536	12	2,7х2,7
KAS-5000	5,04М	1/1,8	2592х1944	6	2,7х2,7

Существует также детерминированный геометрический шум, вызванный разбросом параметров отдельных пикселей. Геометрический

шум проявляется в виде вертикальной структуры, которая хорошо проявляется при малых уровнях освещенности. Именно этот шум является фактором, ограничивающим пороговую чувствительность КМОП-фотоприемников.

Благодаря технологии активных пикселей вольтовая чувствительность КМОП-фотоприемников может достигать значений сотен мкВ/электрон. С учетом квантовой эффективности значение чувствительности к световому потоку может достигать значений сотен мкВ/фотон. При дальнейшем совершенствовании КМОП-фотоприемников и использовании криогенного охлаждения может быть достигнут режим счета фотонов.

Спектральная чувствительность зависит от типа используемого полупроводника. Так же как и в ФПЗС в большинстве случаев используется кремний. Поэтому спектральная чувствительность представляет собой диапазон от 0,4 до 1,1 мкм с максимумом в области 0,8 мкм. Использование технологии светодиодов и интегральных светофильтров может сузить этот диапазон до нужной величины.

Динамический диапазон работы фотоприемника представляет собой отношение максимального зарядового пакета к величине суммарного шума. При этом максимальное значение зарядового пакета соответствует максимально возможному значению освещенности. Величину суммарного шума принято считать минимальному сигнальному зарядовому пакету, который соответствует пороговой освещенности (при отношении сигнала к шуму, равному 1). Так же, как и в ФПЗС в КМОП-фотоприемниках максимальное значение зарядового пакета определяется, в основном, размером фоточувствительного элемента. Для большинства приборов это значение составляет несколько сот тысяч электронов, в отдельных случаях – более миллиона электронов. Минимальное значение зарядового пакета, соответствующее значению шума обычно составляет несколько десятков электронов. В некоторых случаях это значение можно понизить до единиц электронов. Таким образом, динамический диапазон достигает значений 10000 – 1000000 (80 ÷ 120 дБ). В последнем случае целесообразно использовать логарифмический преобразователь, который может быть выполнен непосредственно на кристалле прибора.

Весьма существенным параметром является частота вывода информации. Этот параметр определяется частотой опроса пикселей, которая в КМОП-фотоприемниках достигает значений 50 ÷ 100 МГц, что значительно превышает возможности ФПЗС. Кроме того, в КМОП-фотоприемниках легко организовать параллельное считывание сигналов путем интеграции на кристалл фотоприемника нескольких АЦП. В этом случае частота вывода информации увеличивается в число раз, соответствующее количеству АЦП. Теоретически, АЦП можно поставить

на каждый столбец пикселей. Есть несколько приборов, у которых количество АЦП соответствует количеству пикселей.

С тактовой частотой непосредственно связано значение кадровой частоты. Чем больше пикселей имеет КМОП-фотоприемник, тем меньше будет частота кадров при неизменной тактовой частоте.

Эксплуатационные характеристики КМОП-сенсоров в настоящее время существенно лучше, чем у ФПЗС.

В первую очередь это объясняется возможностью интеграции в одном кристалле массива фотоприемников и большей части периферийных блоков, обеспечивающих работу массива фотоприемников. В результате, камера на основе КМОП-фотоприемника может быть однокристалльной. Соответственно, габариты и масса камер на КМОП-фотоприемников значительно меньше.

КМОП-фотоприемники значительно менее требовательны к электропитанию. Для работы КМОП-фотоприемника обычно необходим один источник напряжения 5 или 3,3 В. Для ФПЗС требуется несколько источников более высокого напряжения. Потребляемая мощность КМОП-фотоприемников во много раз меньше, чем у ФПЗС.

КМОП-фотоприемники, имеющие цифровой выход, хорошо интегрируются в цифровые устройства, в том числе и малогабаритные. В частности, такие устройства нашли применение в веб- и сетевых камерах, мобильных телефонах, КПК и multifunctional устройствах.

Функциональные возможности КМОП-фотоприемников определяется встроенной периферией. Кроме адаптации уровня освещенности появляется возможность ограничения интересующей зоны кадра. При этом реализуется обмен числа действующих элементов фотоприемника на кадровую частоту.

Сохраняется возможность использования электронного затвора. Но в отличие от ФПЗС, в большинстве КМОП-фотоприемников реализуется бегущий электронный затвор, т.к. считывание сигнала с КМОП-фотоприемников осуществляется построчно. Время накопления в различных строках хоть и одинаково, но смещено. Движущиеся объекты при этом могут геометрически искажаться.

В КМОП-фотоприемник могут быть встроены элементы цифровой обработки изображений, например, медианной фильтрации. Все чаще в фотоприемник встраивается устройство аппаратного сжатия изображения, например, в стандартах *JPEG* и *JPEG2000 (Wavelet)*.

5 Телевизионные камеры на ФПЗС

Структурная схема телевизионной камеры на ФПЗС приведена на рисунке 5.1.

Основу камеры составляет матричный ФПЗС. В качестве примера рассмотрим камеру стандартного разрешения на основе элементной базы фирмы Sony. В камере используется фотоприемник производства *SONY* типа *ICX039* форматом 750x576 элементов.

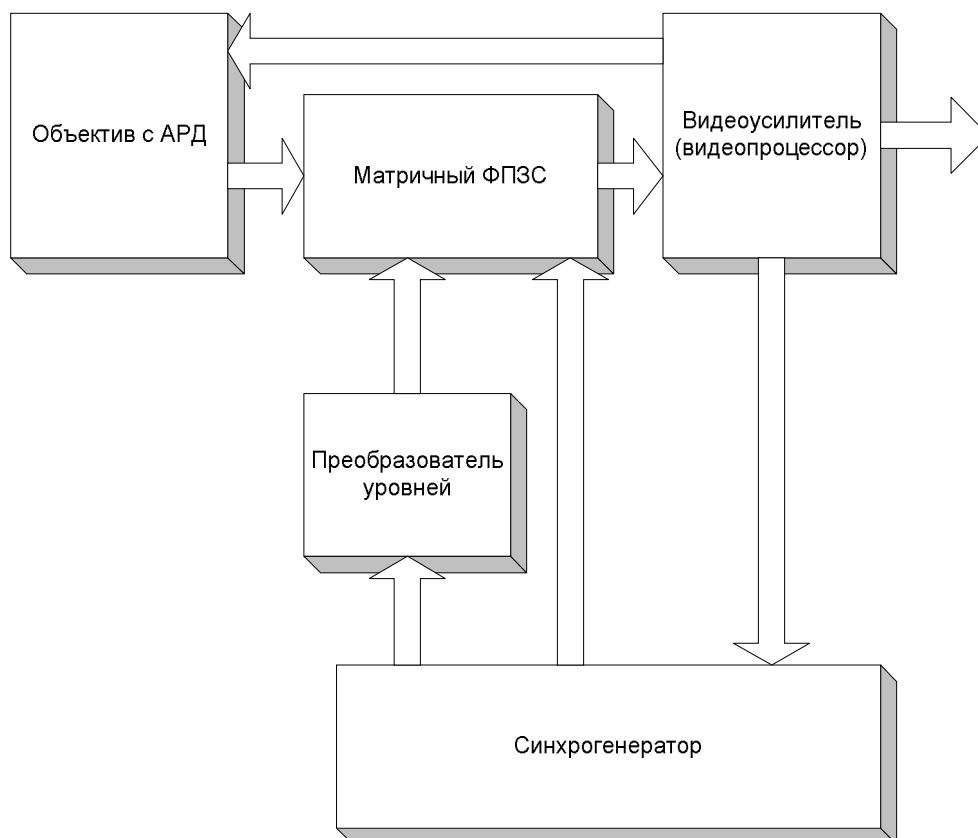


Рисунок 5.1 – Структурная схема камеры на ФПЗС

Управляет работой матричного фотоприемника синхрогенератор *CXD2400*. Синхрогенератор вырабатывает все необходимые для работы ФПЗС сигналы в виде последовательности импульсов. При этом часть сигналов с уровнями напряжений КМОП (0 или 5 В) подаются непосредственно на ФПЗС. Но часть сигналов (электроды фаз переноса) требуют других уровней напряжения. Для получения таких уровней сигналы с синхрогенератора поступают на ФПЗС через специальный преобразователь уровней *CXD1250*.

Видеопроцессор *CXA1310* служит для усиления выходного аналогового видеосигнала с ФПЗС, замешивания в него синхроимпульсов и выполняет другие функции для получения видеосигнала в соответствии с действующим телевизионным стандартом. Кроме того, видеопроцессор

выполняет функции управления автоматической регулировки чувствительности, используя при этом три контура управления:

- регулировку времени накопления;
- регулировку коэффициента усиления видеоусилителя;
- управление диафрагмой объектива (при наличии объектива с функцией АРД).

Все эти микросхемы также производятся фирмой *SONY*.

Структурная схема матричного ФПЗС приведена на рисунке 5.2 [17]. Этот ФПЗС имеет строчно-кадровую организацию, поэтому в его составе присутствуют отдельные элементы накопления, вертикальные регистры сдвига и горизонтальный регистр сдвига.

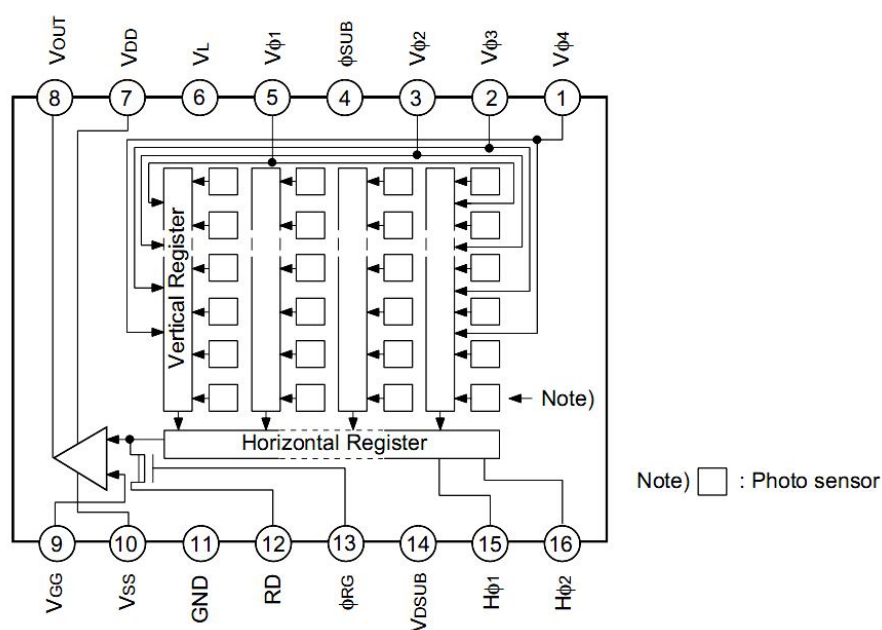


Рисунок 5.2 – Структура матричного ФПЗС

Отличием данного ФПЗС является организация процесса переноса заряда. Перенос зарядов в вертикальных регистрах объединен с переносом заряда из элементов накопления. Этим процессом управляют четыре фазы, на которые подаются сигналы управления $V_{\phi 1}$ – $V_{\phi 4}$. Процесс переноса в горизонтальном сдвиговом регистре производится по двухфазной схеме с использованием сигналов $H\phi 1$ и $H\phi 2$. Кроме этих сигналов используется еще отдельный сигнал управления для выходного устройства RG (управление транзистором сброса).

Управление работой ФПЗС иллюстрируется временными диаграммами (см. рис. 5.3) [17], на которых показан процесс формирования сигналов накопления. Они отличаются при формировании нечетных и четных полей. Это объясняется тем, что в нечетных и четных полях участвуют разные элементы секции накопления, но перенос осуществляется одними и теми же транспортными регистрами.

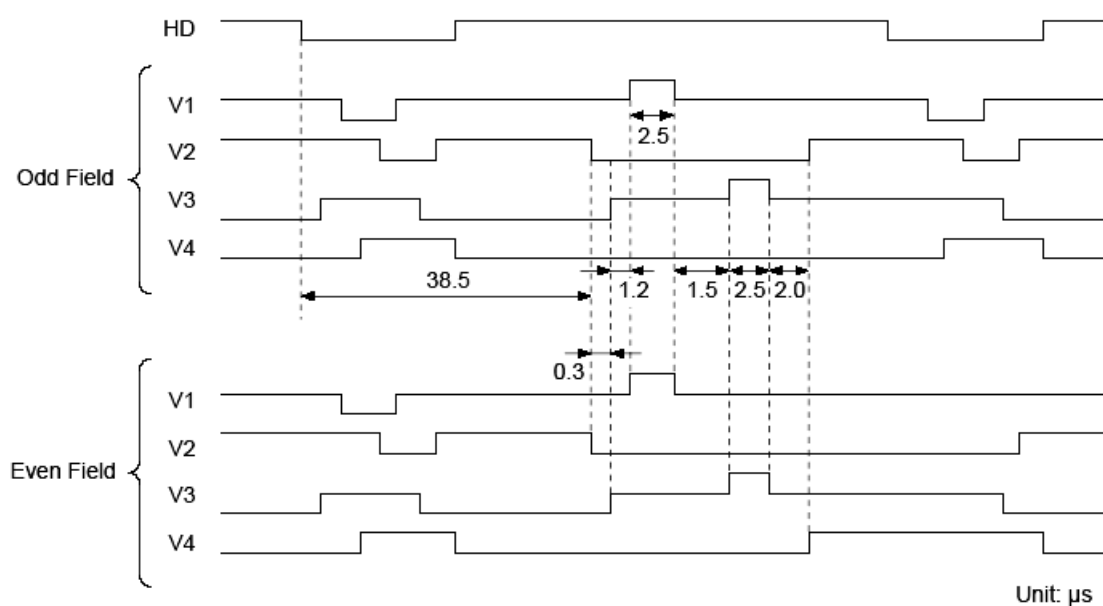


Рисунок 5.3 – Временные диаграммы управления работой ФПЗС

На рисунке 5.4 показаны последовательности сигналов (перенос нечетного (строки 1÷313) и четного (строки 314÷625) полей), привязанных к кадровой частоте VD [17]. Активными сигналами для этого процесса являются четыре сигнала фаз переноса по вертикали ($V1÷V4$).

На рисунке 5.5 приведена последовательность сигналов, привязанных к строчной частоте HD [17]. Здесь присутствуют также сигналы фаз переноса по вертикали $V1÷V4$, совпадающие по частоте со строчными синхроимпульсами, но отличающиеся по фазе. Кроме того, присутствуют сигналы переноса горизонтального транспортного регистра $H1$ и $H2$. Эти сигналы имеют частоту в 500 раз выше, т.к. используемый фотоприемник имеет 500 элементов в строке. Кроме того, присутствует сигнал управления транзистором сброса выходного устройства RG , который по частоте совпадает с сигналами фаз переноса горизонтального регистра.

Не стоит забывать, что телевизионная камера на ФПЗС, как фотоприемник на основе внутреннего фотоэффекта, имеет относительно небольшое отношение сигнала к шуму. Обычно оно не превышает 50 дБ. Такое отношение объясняется сравнительно небольшим значением максимального накопленного зарядового пакета в отдельном элементе ФПЗС и значительной величиной суммарного шума ФПЗС, который складывается из нескольких составляющих. Следовательно, если не предпринимать никаких мер по регулировке чувствительности, динамический диапазон работы такого фотоприемника также невелик. Это привело бы к тому, что телевизионная камера работала бы в очень небольшом диапазоне освещенностей.

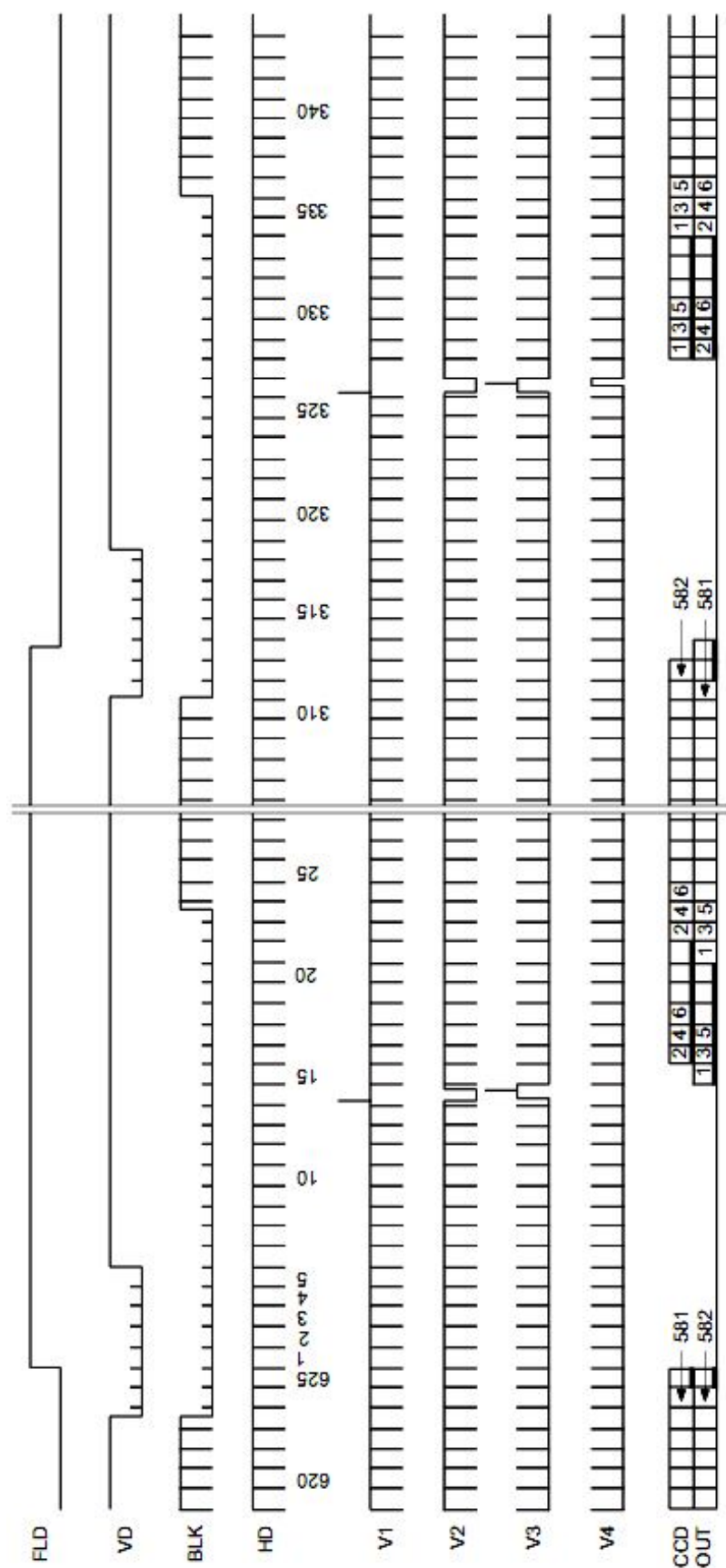


Рисунок 5.4 – Последовательности сигналов, привязанных к кадровой частоте VD

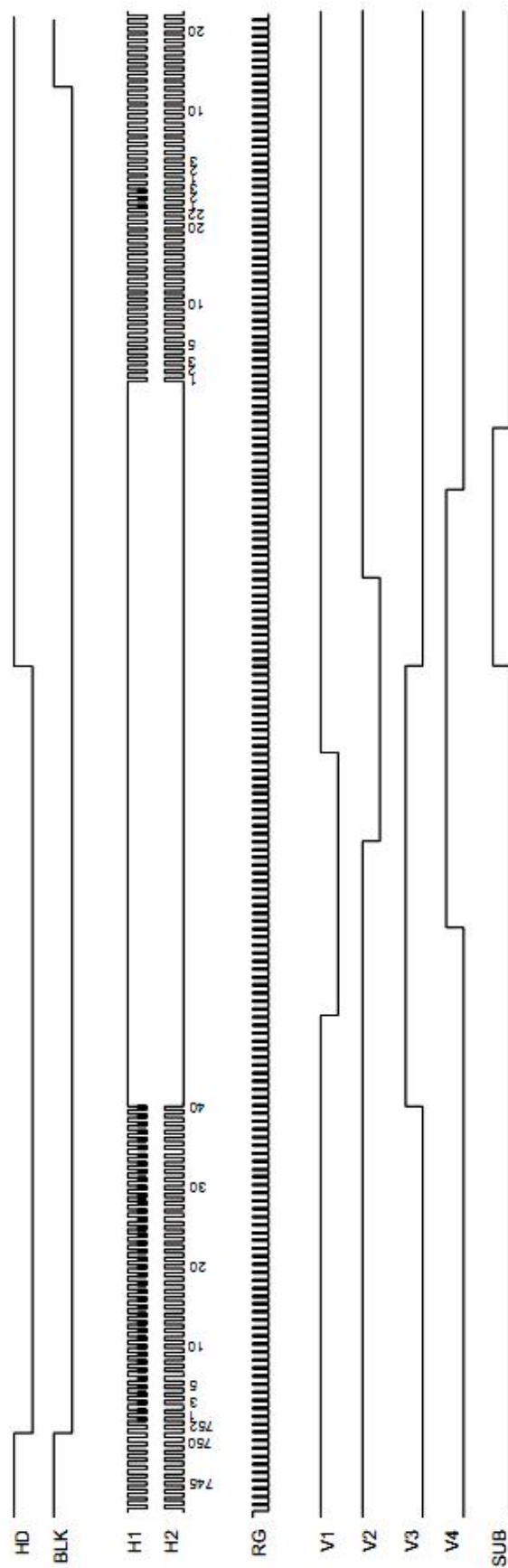


Рисунок 5.5 – Последовательность сигналов, привязанных к строчной частоте HD

При выходе значения освещенности за нижний предел этого диапазона отношение сигнала к шуму стало бы недопустимо малым. Качество изображения становится неудовлетворительным при отношении сигнала к шуму менее 10. В результате, диапазон освещенностей в нерегулируемых камерах составил бы порядка 30 – 50.

При выходе значения освещенности за верхний предел нарушится линейность свет-сигнальной характеристики. В лучшем случае видеосигнал достигнет уровня белого и более повышаться не будет. В худшем случае можно получить искажения сигнала вследствие расплывания изображения в зонах превышения максимально возможного уровня сигнала (блюминг).

Один из вариантов построения камеры на ФПЗС на основе описываемых выше микросхем приведен на рисунке 5.6 [18].

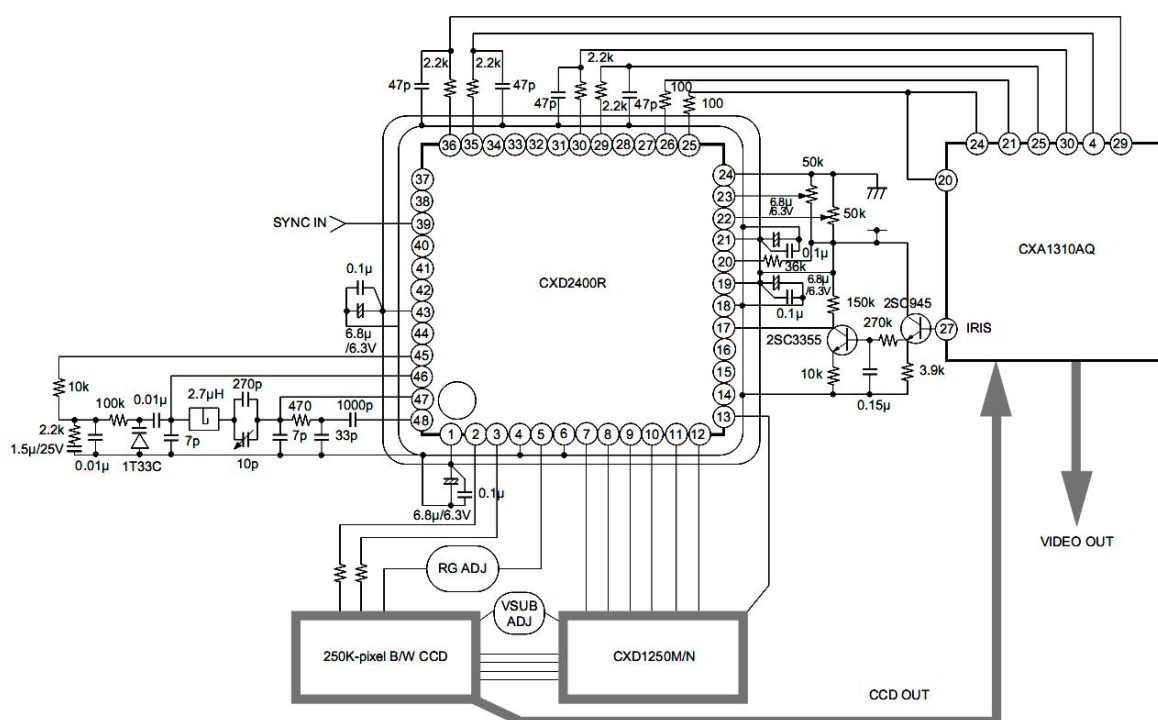


Рисунок 5.6 – Один из вариантов построения камеры на ФПЗС

6 Телевизионные камеры на КМОП

Телевизионные камеры на базе матричных КМОП-фотоприемников технически выполнить значительно проще, чем на базе матричных ФПЗС. В отличие от последних, КМОП-фотоприемники выполняются по универсальной технологии КМОП. Поэтому большинство элементов телевизионной камеры выполнены на одном кристалле вместе с самим фотоприемником.

Тем не менее, существует некоторое различие в применении КМОП-фотоприемников в зависимости от их особенностей работы.

Возможные варианты камер на основе КМОП-фотоприемников могут быть следующими:

- Телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с аналоговым выходом.
- Телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с цифровым выходом.
- Телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом.
- Телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом и встроенной обработкой видеосигнала.
- Телевизионная камера низкого разрешения.
- Камерные модули.

Деление это несколько условно, так как многие образцы выпускаемых промышленностью КМОП-фотоприемников способны работать в нескольких режимах работы.

6.1 Телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с аналоговым выходом

Такие камеры являются прямыми конкурентами стандартных камер на ФПЗС. Они предназначены в качестве источников аналогового видеосигнала и подключаются к видеовходам аналогового видеоборудования. Особенностью современных КМОП-фотоприемников с аналоговым выходом является наличие встроенного цифрового канала обработки видеоданных.

Типичным в этом смысле является фотоприемник *OV7949* производства *Omni Vision*. Этот фотоприемник предназначен для работы в двух стандартах цветности (*PAL* и *NTSC*). Аналоговый сигнал с КМОП-матрицы поступает на встроенный АЦП (рис. 6.1) и далее в цифровом виде обрабатывается с помощью встроенного сигнального процессора [19]. Уже обработанный сигнал поступает на выходной ЦАП, с

которого уже аналоговый видеосигнал выходит наружу. В аналоговом виде выполняется только регулировка усиления сигнала перед его поступлением на вход встроенного АЦП. Остальная обработка производится в цифровом виде. В частности, производится автоматический баланс белого, полная регулировка чувствительности, гамма-коррекция, апертурная коррекция, а также формирование выходного цветного видеосигнала.

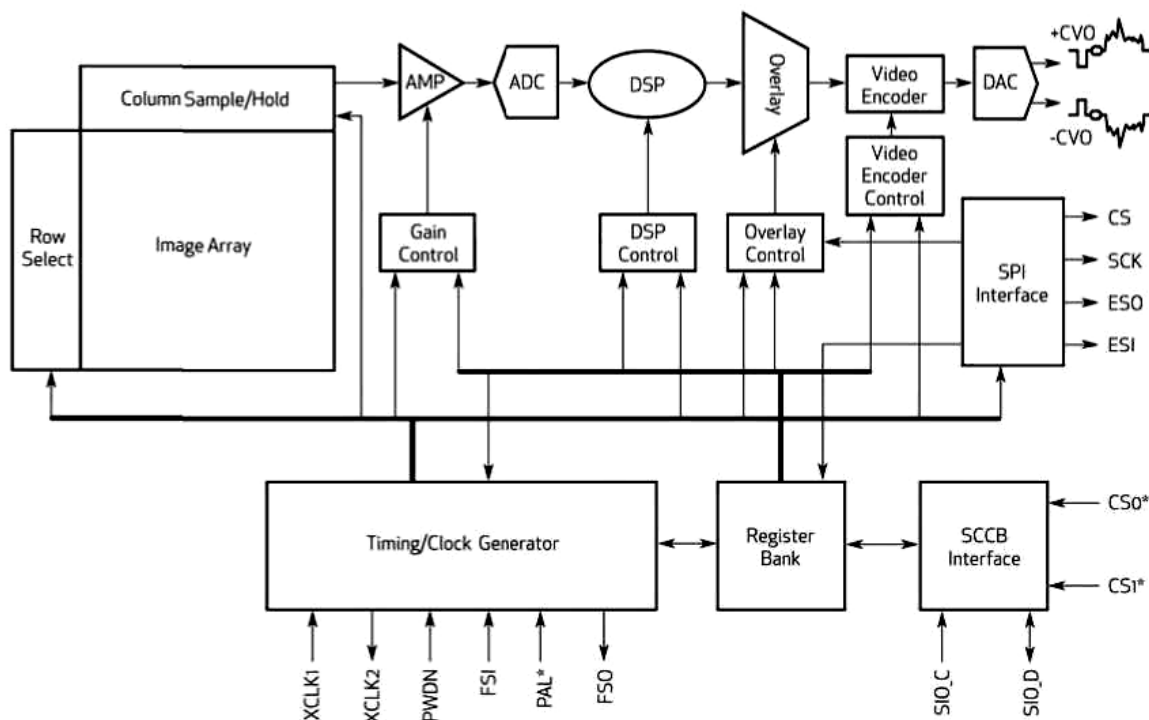


Рисунок 6.1 – Блок-схема фотоприемника OV7949

Похожим образом выполнена камера MT9V135 (рис. 6.2) производства Micron (теперь отделение фирмы, производящее фотоприемники имеет другое название – *Aptina*) [20].

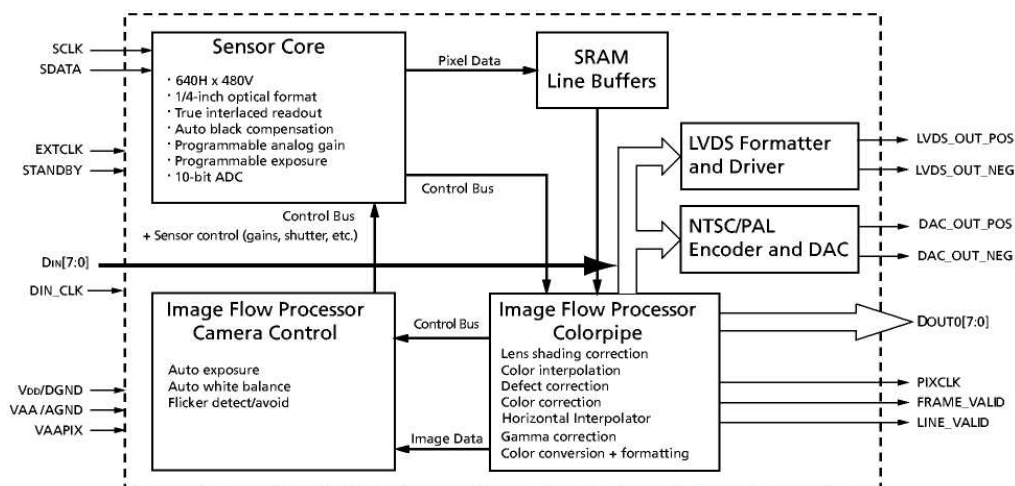


Рисунок 6.2 – Блок-схема камеры MT9V135

Функционально она аналогична предыдущей. Цветной сигнал формируется с использованием цветовой схемы Байера (рис. 6.3) [20].

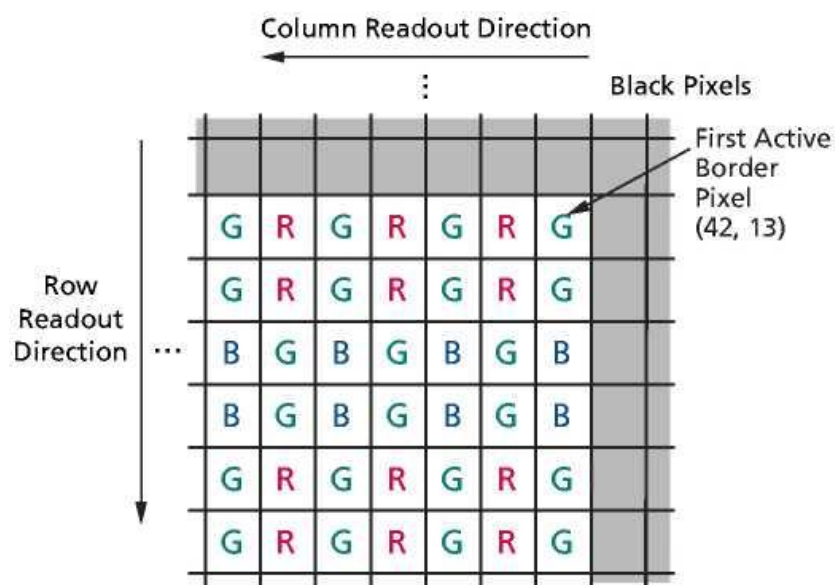


Рисунок 6.3 – Цветовая схема Байера

Интегральные светофильтры позволяют получить спектральную чувствительность в каждом канале примерно похожую на спектральную чувствительность глаза (рис. 6.4) [20].

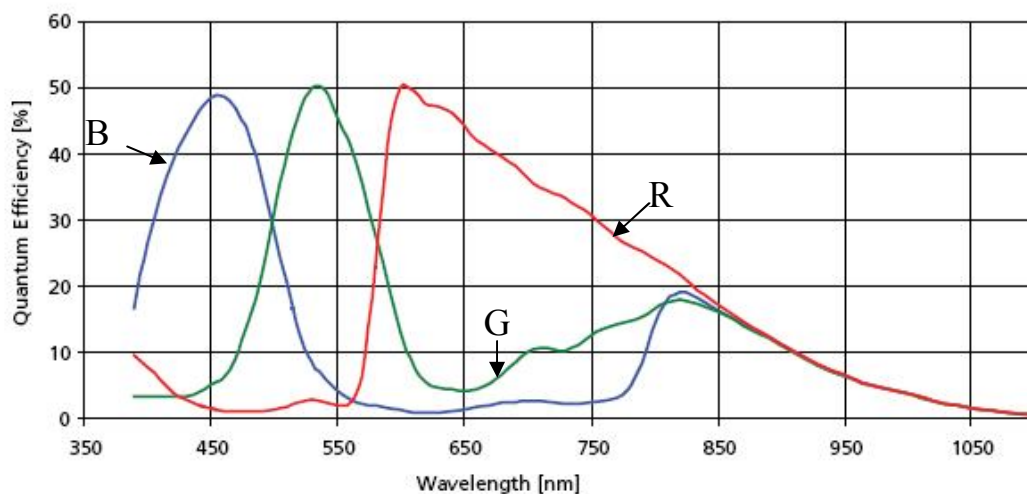


Рисунок 6.4 – Спектральные чувствительности интегральных светофильтров

Как известно, КМОП-фотоприемники имеют более высокую степень защиты от пересветки. Дополнительно к этой принципиальной особенности наличие встроенной системы регулировки чувствительности позволяет создать КМОП-камеры со сверхшироким динамическим диапазоном вплоть до 100 дБ внутри кадра. Этому способствует, в частности, система адаптивной коррекции свет-сигнальной характеристики. Для этого

используется характеристика, состоящая из трех сегментов (рис. 6.5) [21]. Параметры этих трех сегментов могут изменяться программно.

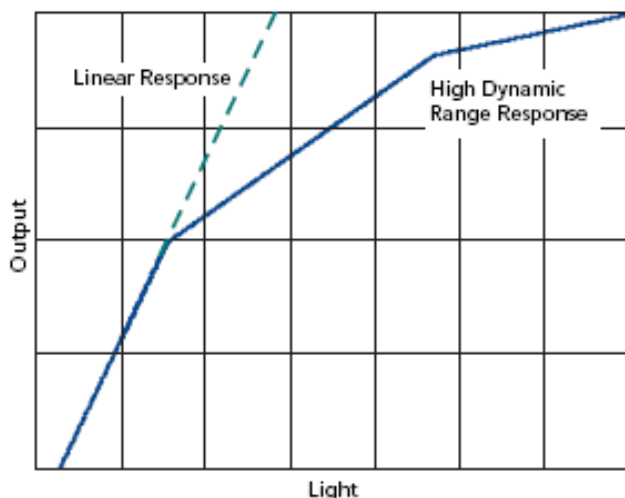


Рисунок 6.5 – Свет-сигнальная характеристика КМОП-камеры MT9V135

Типичная схема включения такого КМОП-фотоприемника (она же в первом приближении и схема камеры) приведена на рисунке 6.6 [20].

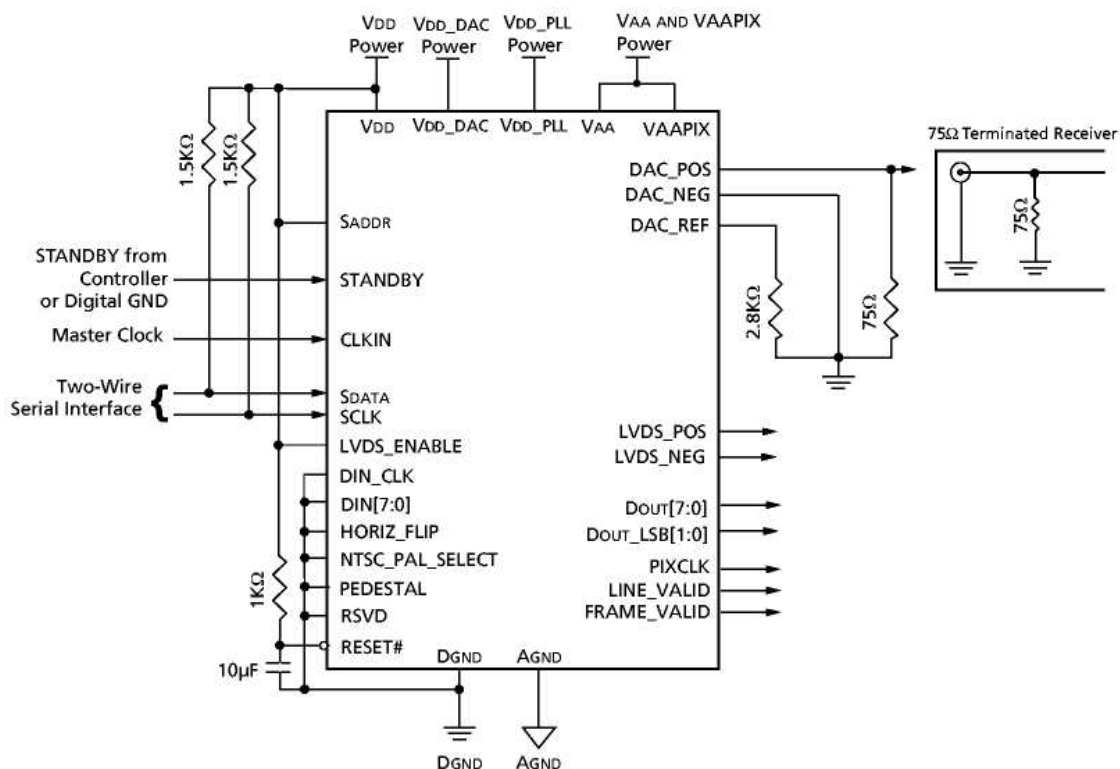


Рисунок 6.6 – Схема включения КМОП-фотоприемника MT9V135

Из этой схемы видно, что для создания простой телевизионной камеры на КМОП необходима только микросхема самого фотоприемника и минимальное количество пассивных элементов. В этом случае

используются настройки фотоприемника по умолчанию, а также крайне ограниченный выбор предварительных установок (например, выбор стандарта *PAL* или *SECAM* производится подачей логического уровня 0 или 1 на вход *NTSC_PAL_SELECT*). Такая камера работать будет, но ожидать оптимальных настроек во всех режимах работы в этом случае не приходится. Значительно лучше, если используется возможность управления режимами работы камеры снаружи либо вручную, либо автоматически. Для этого в фотоприемнике предусмотрен последовательный интерфейс *I2C*, с помощью которого можно обеспечить доступ к внутренним регистрам управления работой фотоприемника. С помощью этих регистров можно управлять работой практически всех внутренних устройств фотоприемника. Чтобы воспользоваться этой возможностью следует подключить внешний процессор, который будет иметь доступ к внутренним регистрам через интерфейс *I2C* (рис. 6.6).

Как правило, фотоприемники, предназначенные для работы в качестве стандартных камер с аналоговым видеосигналом, не имеют выходного цифрового порта для вывода цифрового видеосигнала. Для работы с цифровым видеосигналом существуют другие фотоприемники.

В некоторых случаях цифровой выход имеется, например, в том же *MT9V135*. Служит он для дополнительной внешней обработки цифрового сигнала. Причем, при необходимости его можно завести обратно в фотоприемник и использовать совместно с основным видеосигналом (рис. 6.7).

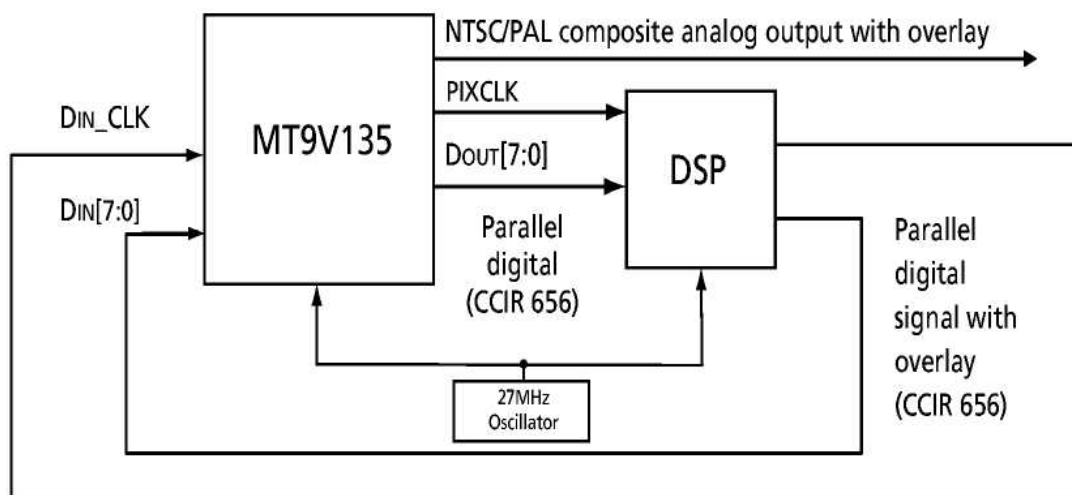


Рисунок 6.7 – Схема применения КМОП-фотоприемника MT9V135 с цифровым сигнальным процессором

Существуют и предельно простые варианты таких фотоприемников. Например, микросхема законченной однокристалльной камеры *OV* имеет всего лишь 9 выводов.

6.2 Телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с цифровым выходом

Такие камеры чаще используются в составе более сложных устройств, предназначенных для работы с цифровым видеосигналом.

В данном случае под цифровым видеосигналом подразумевается такой сигнал, который подчиняется одному из общепринятых стандартов цифрового видеосигнала, например *ITU-R BT.601* или *ITU-R BT.656*. При использовании таких стандартов обеспечивается наиболее удобный интерфейс с другими цифровыми устройствами, которые используются для обработки цифрового видеосигнала.

Например, к такой камере легко подключить специализированный сигнальный процессор *Texas Instruments TMS320DM642* или микросхему аппаратного сжатия видеосигнала в стандарте *MPEG-2 Conexant CX23416*.

Абсолютное большинство КМОП-фотоприемников стандартного разрешения имеют именно такой интерфейс. В качестве примера можно привести микросхему КМОП-фотоприемника *MT9V023* (рис. 6.8), из которой видеосигнал передается с использованием параллельного цифрового интерфейса [22]. Но не следует забывать, что наличие цифрового интерфейса для передачи цифрового видеосигнала, как правило не отменяет управление режимами работы камеры через последовательный интерфейс *I2C*.

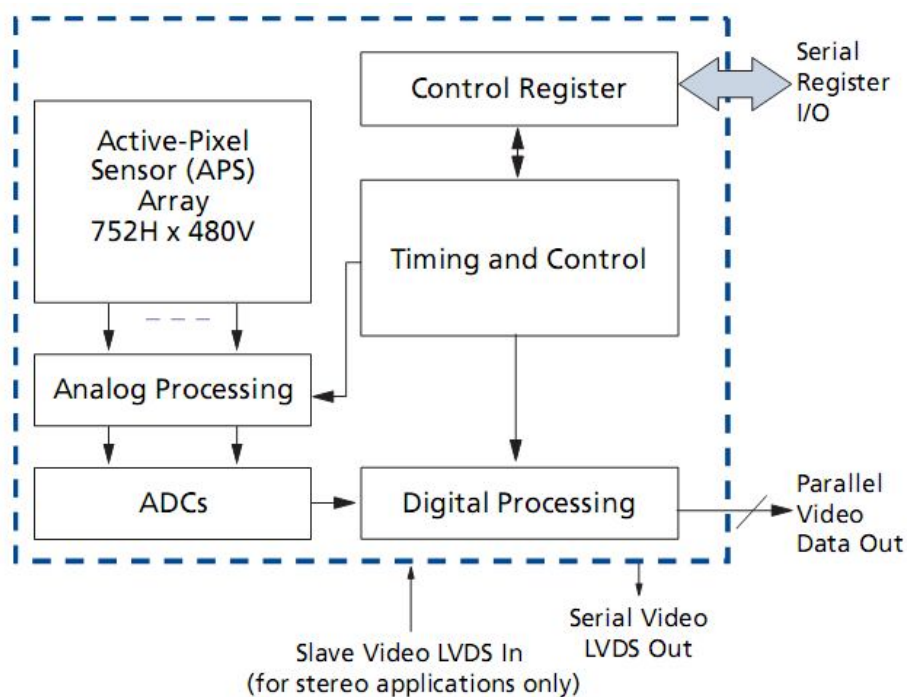


Рисунок 6.8 – Блок-схема КМОП-фотоприемника *MT9V023*

Еще один интерфейс обязан своим появлением активным внедрением видеотехнологий в автомобильные системы. В частности, можно отметить

использование телевизионных камер в системах охраны (встроенные видеосерверы), системах помощи движению задним ходом, безопасности движения (слежение за пересечением осевой линии, стереоскопический датчик измерения расстояния до препятствий для активации подушек безопасности) и некоторых других технологий. Особенности использования телевизионных устройств в транспортных средствах требуют минимизации соединительных проводов, а следовательно, переходу к последовательной шине передачи данных.

Такая шина получила название *LVDS* и используется сейчас во многих приложениях, не только связанных с транспортом.

В связи с этим появились устройства, имеющие возможность работать с этой шиной. К ним можно отнести уже упоминавшуюся микросхему *MT9V023*.

На рисунке 6.9 приведен пример использования микросхем КМОП-фотоприемников *MT9V022* в составе стереоскопической пары с передачей сигналов от обоих устройств по одной шине *LVDS*.

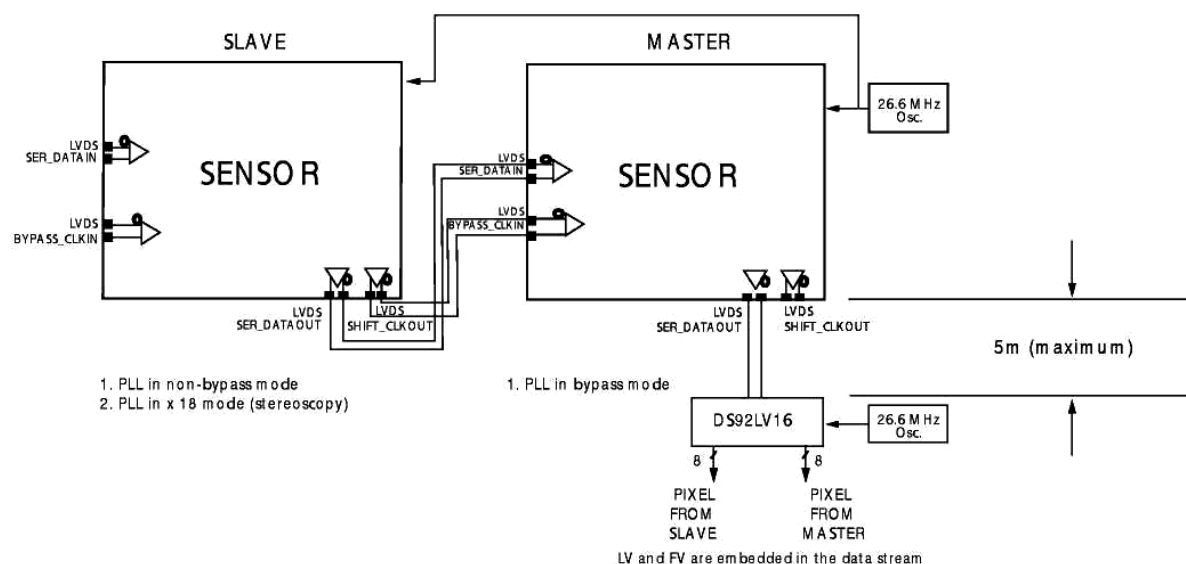


Рисунок 6.9 – Использование КМОП-фотоприемников *MT9V022* в составе стереоскопической пары

Существует и другой вариант совместного использования двух и более КМОП-фотоприемников. Например, для КМОП-фотоприемника *OV5610* существует режим, при котором фотоприемник может быть включен в режим *MASTER* или *SLAVE*. В первом из этих режимов фотоприемник является формирователем импульсов синхронизации, во втором случае – их приемником (рис. 6.10).

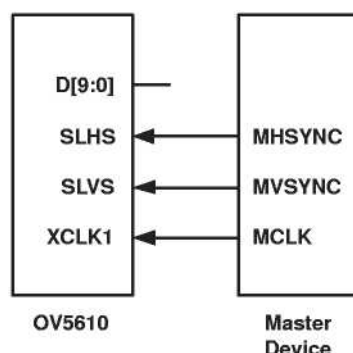


Рисунок 6.10 – Подключение КМОП-фотоприемника OV5610 в режиме *SLAVE*

Схемотехника КМОП-камер с цифровым видеовыходом также достаточно проста и требует лишь подключения к шине цифрового интерфейса либо параллельного, либо последовательного (рис. 6.11). Во многих случаях требуется также подключить внешний тактовый генератор или резонатор. В большинстве случаев параллельный интерфейс является 8-разрядным. Таким образом, тактовая частота для такого интерфейса составит 27 МГц.

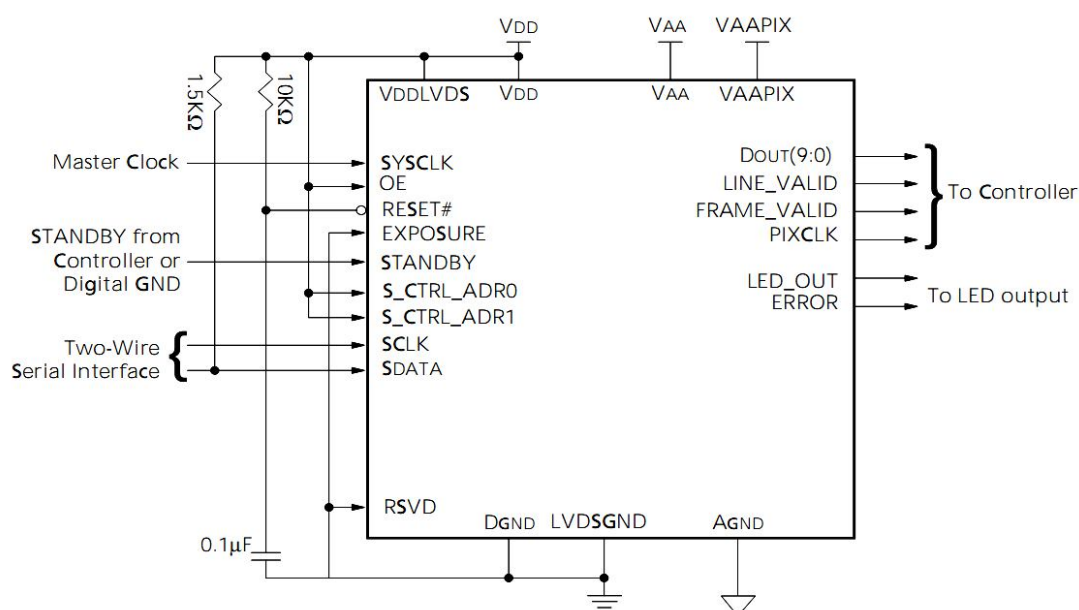


Рисунок 6.11 – Подключение КМОП-камер к шине цифрового интерфейса

6.3 Телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом

Камеры на КМОП-фотоприемниках очень быстро преодолели барьер стандартного разрешения и перешли на уровень камер высокого разрешения. Это связано с той же самой особенностью технологии КМОП – хорошей технологичностью.

Обычно такие фотоприемники используются в фотоаппаратах. Это связано с тем, что при работе в мегапиксельном режиме резко уменьшается частота смены кадров. Ограничение это связано с работой АЦП и выходного устройства камеры. На сегодняшний день достигнута скорость вывода информации по цифровой шине из КМОП-фотоприемника на уровне нескольких десятков мегагерц. Дальнейшее наращивание тактовой частоты привело бы к усложнению схемотехники КМОП-фотоприемника. Но главная причина ограничения тактовой частоты заключается в резком увеличении электропотребления микросхемы фотоприемника, что приводит к повышению температуры кристалла. Последнее приведет к резкому ухудшению качества изображения вследствие возрастания шумов.

На сегодняшний день скорость смены кадров $25\div 30$ в секунду обеспечивается в КМОП-фотоприемниках форматом 1,3 Мп (1280x1024) или 2 Мп (1920x1024) без каких-либо дополнительных мер. Для этого используется тактовая частота 48 МГц, вполне достижимая в большинстве приборов.

Однако, в случае необходимости, можно воспользоваться и специальными высокоскоростными КМОП-фотоприемниками, которые предназначены для высокоскоростной съемки. К таким фотоприемникам относится *MT9M413*. Основные его параметры таковы:

- число элементов – 1280x1024;
- число кадров в секунду при разрешении 1280x1024 – до 500;
- число кадров в секунду при разрешении 1280x128 – до 4800;
- скорость вывода информации – до 655 миллионов пикселей в секунду;
- для таких скоростных характеристик отличается небольшой потребляемой мощностью – до 500 мВт;
- цветное или черно-белое исполнение;
- 10-разрядный АЦП.

Блок-схема камеры представлена на рисунке 6.12. Ее особенностью является применение одновременно десяти каналов вывода информации и десяти АЦП.

Стандартные КМОП-камеры высокого разрешения имеют, как правило, один канал вывода информации.

Камеры высокого разрешения позволяют переключать разрешение в меньшую сторону за счет прореживания элементов или путем вырезания активного окна. Поскольку в обоих случаях достигается уменьшение количества элементов в кадре, то повышается скорость кадров.

При прореживании происходит исключение элементов по одной или обоим координатам. Например, по схеме, изображенной на рисунке 6.13 происходит прореживание вдвое по каждой координате.

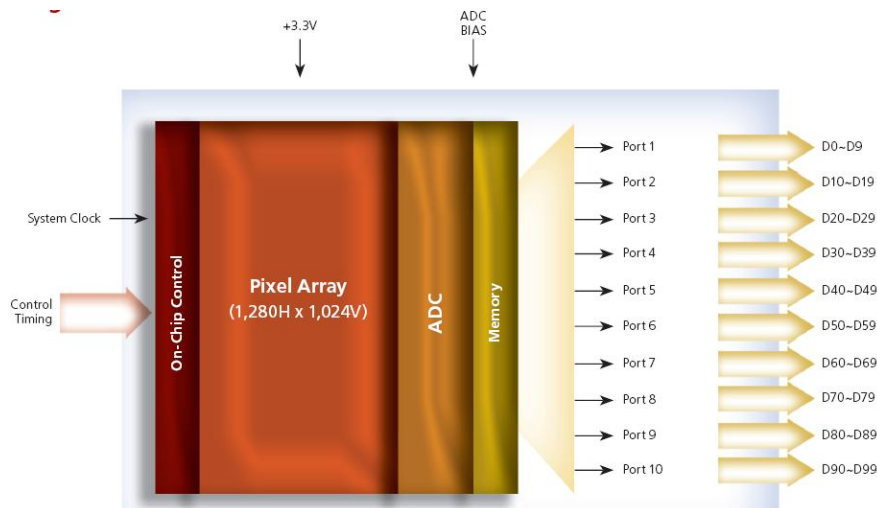


Рисунок 6.12 – Блок-схема камеры на КМОП-фотоприемнике *MT9M413*

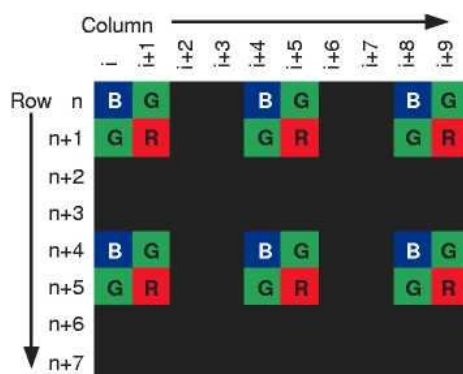


Рисунок 6.13 – Уменьшение разрешения камеры в 2 раза по строкам и столбцам

В режиме выделения активного окна можно в любом месте матрицы указать положение и размер этого окна (см. рис. 6.14). Более того, это окно можно передвигать от кадра к кадру. При этом будет реализовываться эффект поворотной камеры, но без использования механических поворотных устройств.

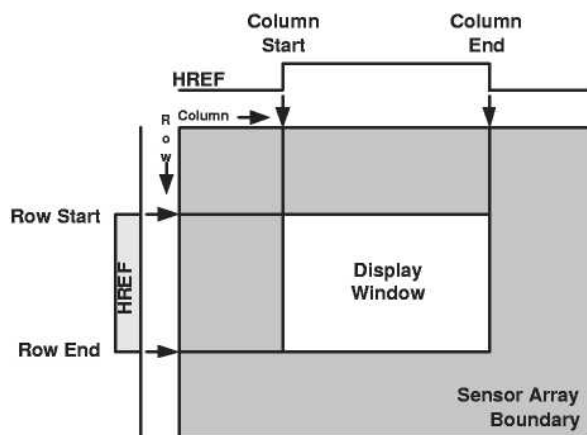


Рисунок 6.14 – Режим выделения активного окна на матрице

6.4 Телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом и встроенной обработкой видеосигнала

Обработка видеосигнала является одной из наиболее трудоемких вычислительных операций. Однако, она необходима практически в любой системе, связанной с формированием и передачей изображения. По этой причине эта задача является стандартной и производители камер посчитали необходимым интегрировать устройство, позволяющее ее решить в состав камеры.

Обычно под обработкой изображения подразумевается ряд операций, связанных с преобразованием цветовых систем, фильтрацией шумов и масштабированием получаемых изображений. На первом этапе решались именно эти задачи. В настоящее время имеется целый ряд КМОП-фотоприемников со встроенными процессорами обработки сигнала изображения, работающими в реальном масштабе времени. Примером может служить уже упоминавшаяся микросхема однокристальной КМОП-камеры стандартного разрешения *OV7949* (рис. 6.1).

Другой задачей, связанной с цифровыми изображениями и видеосигналами является задача сжатия информации. Для решения этой задачи появились однокристальные КМОП-камеры со встроенным процессором сжатия изображений в стандарте *JPEG*. Таким однокристальным решением является КМОП-фотоприемник *MT9D111*. Его блок-схема изображена на рисунке 6.15.

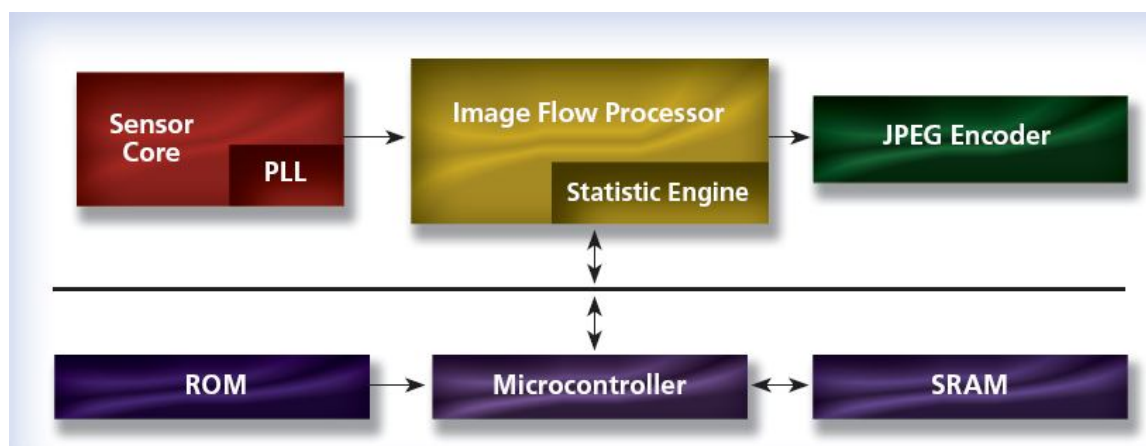


Рисунок 6.15 – Блок-схема однокристального КМОП-фотоприемник *MT9D111*

Микросхема, предназначенная для работы прежде всего в составе цифровых фотоаппаратов, имеет формат 1600x1200 элементов и позволяет работать со скоростью до 15 кадров в секунду. При полном разрешении гарантируется сжатие в формате *JPEG* в реальном времени. В формате 800x600 скорость смены кадров возрастает до 30 кадров в секунду, что позволяет использовать этот фотоприемник в качестве телевизионного.

6.5 Телевизионная камера низкого разрешения

Существуют несколько применений, в которых используются специальные камеры с малым количеством элементов и, соответственно, малым разрешением.

К таким применениям можно отнести следующие:

- устройства с предельно низкой стоимостью – электронные игрушки, одноразовые фотоаппараты, мобильные устройства бюджетного уровня.
- телевизионные применения, требующие предельно малых габаритов фотоприемного узла даже в ущерб качеству изображения.
- применения, ориентированные на предельно высокие скорости смены кадров.
- применения, принципиально не требующие высокого разрешения.

Рассмотрим несколько таких устройств.

Однокристалльная камера OV6920 (рис. 6.16) ориентирована на использование в медицинских эндоскопических приборах. Для этого потребовалось создать устройство с предельно малыми габаритами.

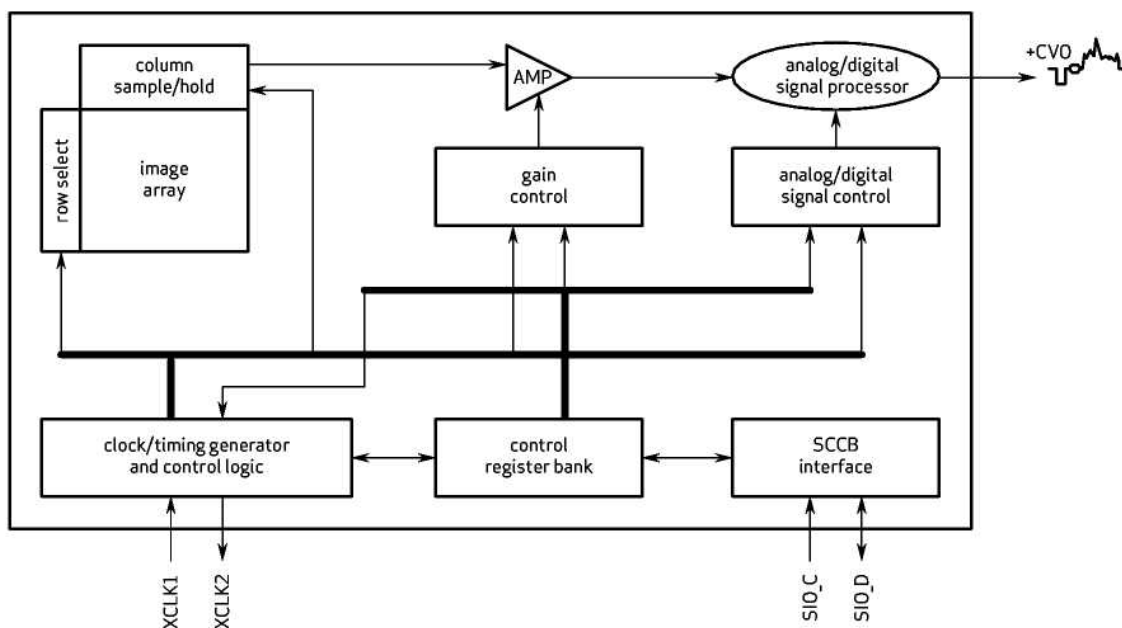


Рисунок 6.16 – Блок-схема однокристалльной камеры OV6920

Размер фоточувствительной области составляет 1/18 дюйма. При этом размер кристалла составляет 2,3 x 2,1 мм, что позволяет установить его в камерный модуль диаметром 4 мм. Размер элемента для этой матрицы составляет всего 2,5 x 2,5 мкм.

В отличие от большинства КМОП-фотоприемников здесь отсутствует цифровая часть, АЦП и ЦАП. Число элементов этого фотоприемника

составляет 320x240, но на выходе сигнал интерполируется до стандартного телевизионного сигнала *NTSC*. Таким образом, сигнал можно подключать непосредственно к аналоговому телевизионному монитору.

Примером КМОП-фотоприемника с низкой разрешающей способностью и цифровым выходом является *OV6630* (цветная) и *OV6130* (черно-белая) однокристальные камеры (рис. 6.17). Среди особенностей кроме крайне низкой цены можно отметить наличие расширенных возможностей подключения цифрового сигнала по 4, 8 и 16-разрядной шине. Используется прежде всего в недорогих веб-камерах.

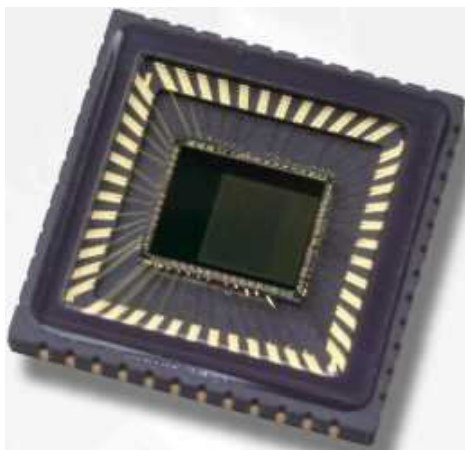


Рисунок 6.17 – Корпус однокристальной камеры

Еще одним примером КМОП-сенсора низкого разрешения является специализированная камера *OV810* (рис. 6.18). Этот черно-белый КМОП-сенсор имеет разрешение всего 112x112 элементов. Предназначен он не для формирования видеосигнала с последующей визуализацией изображения, а для узких задач систем технического зрения.

Камера имеет встроенный микроконтроллер, ОЗУ и ПЗУ, специализированный сопроцессор, выход на жидкокристаллический дисплей. ПЗУ микроконтроллера и специализированный сопроцессор запрограммированы под одну из задач системы технического зрения.

Производитель этого сенсора предлагает его использовать для следующих приложений:

- распознавание отпечатков пальцев в системах биометрической идентификации;
- распознавание букв и цифр в системах идентификации различной цифровой и текстовой информации;
- распознавание лица человека (в недалеком будущем).

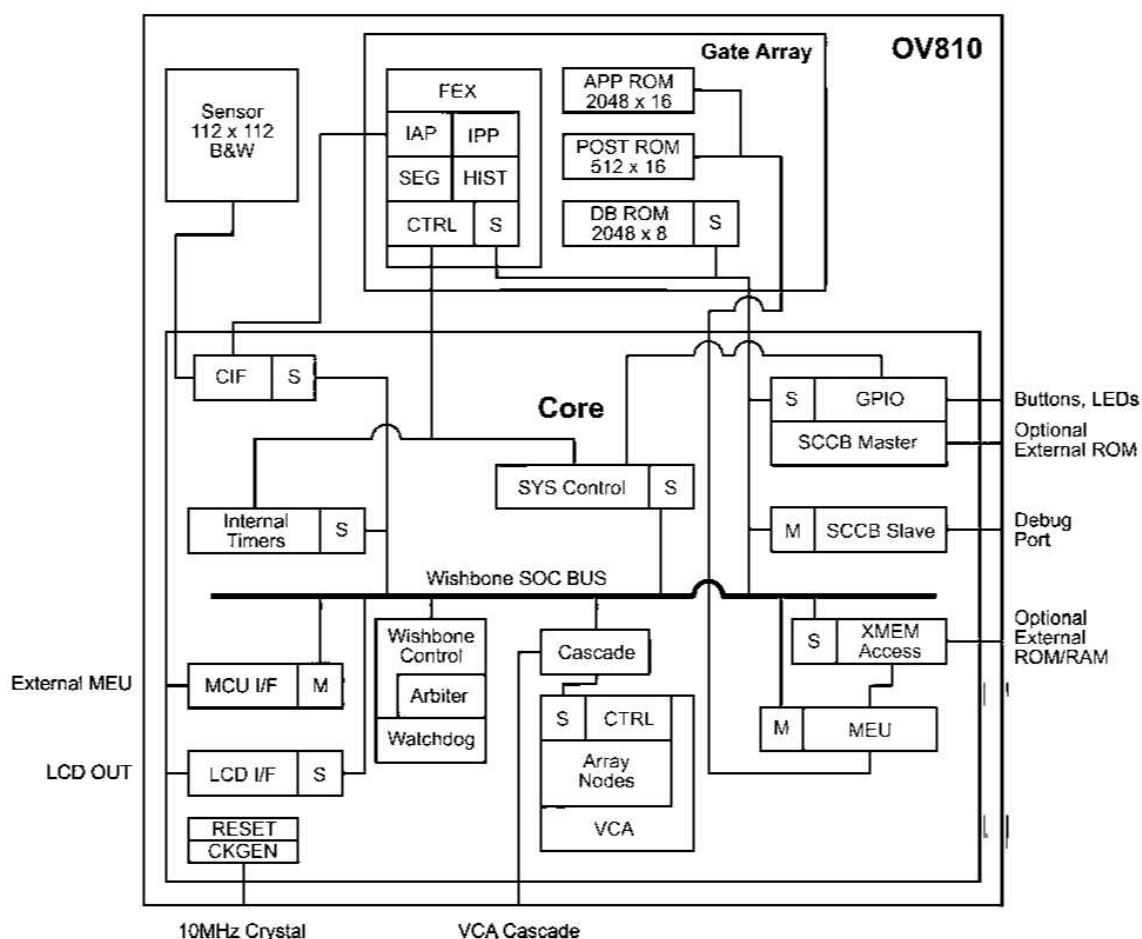


Рисунок 6.18 – Блок-схема КМОП-сенсора OV810

6.6 Камерные модули

Микросхемы КМОП-фотоприемников являются практически законченными электронными устройствами. Однако для их использования требуется оптическая система и корпус. В ряде случаев производители предлагают законченные камерные модули, включающие в себя эти элементы.

Как правило, подключение этих модулей достаточно простое и осуществляется прямо к приемному устройству (аналоговому или цифровому видеовходу). Многие из таких модулей стандартизованы и предлагаются прежде всего для многофункциональных мобильных устройств – мобильных телефонов, смартфонов, карманных компьютеров, ноутбуков и веб-камер. Что касается электронных фотоаппаратов и видеокамер, то там камерные модули используются реже, в основном в аппаратах начального уровня.

Камерные модули могут иметь различное разрешение и различные функциональные возможности. Определяются они прежде всего типом используемой в камерном модуле микросхемы КМОП-фотоприемника. Большое количество модулей выпускается фирмой *ESS Technology*.

Типичным камерным модулем стандартного разрешения является *ES2196M* (рис. 6.19).

Модуль имеет в своем составе оптическую систему и может быть установлен непосредственно на печатную плату устройства, например, мобильного телефона. Внутренняя структура этого фотоприемника является упрощенной. Все настройки режимов производятся в аналоговом виде с использованием внутренних ЦАП. Аналого-цифровое преобразование осуществляется непосредственно перед выводом видеосигнала наружу. Формат фотоприемника 640x480 элементов.

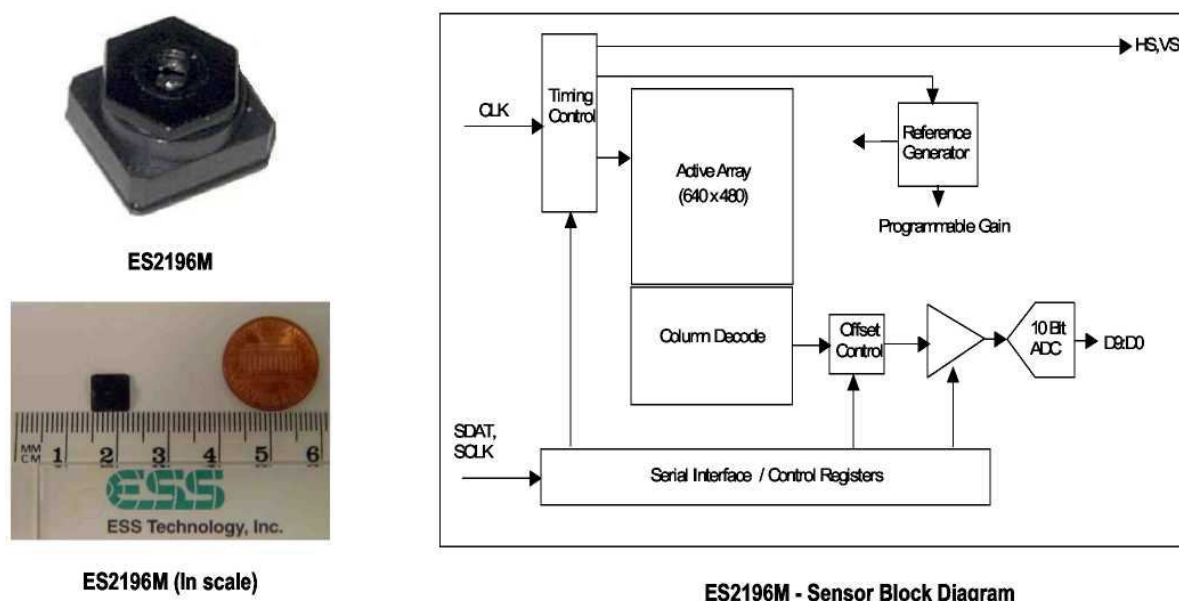


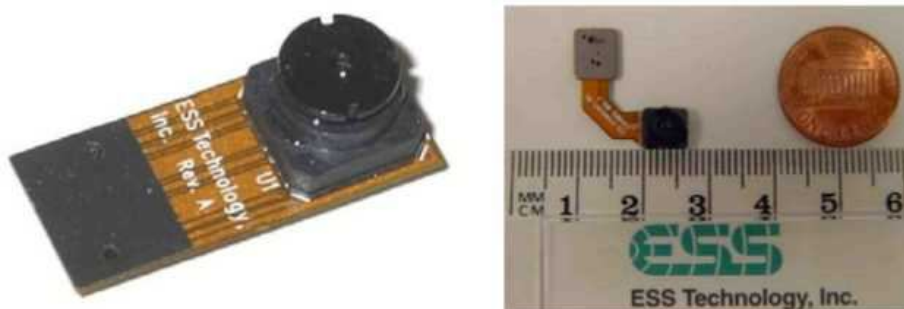
Рисунок 6.19 – Камерный модуль *ES2196M*, его размер и блок-схема

Более совершенным является камерный модуль *ES2199M* (рис. 6.20), который базируется на другом КМОП-фотоприемнике, имеющим в своем составе более богатый выбор регулировок [23]. Формат фотоприемника составляет 640x480 элементов, но выходной сигнал может масштабироваться в меньшую сторону, например, до формата 320x240. Встроенный процессор обеспечивает все необходимые регулировки камеры в цифровом виде. Вывод информации производится в стандарте *ITU-R 656*, что позволяет подключить его к любому устройству, работающему в этом формате. Кроме того, в модуле используется аппаратное сжатие в формате *JPEG*.

В отличие от предыдущего варианта этот модуль имеет подключение в виде гибкого плоского шлейфа, что может значительно упростить конструкцию устройства, в которое такой модуль устанавливается.

Дальнейшим развитием камерных модулей является переход к высокому разрешению. Типичным представителем таких модулей является модуль *ES2216M* (рис. 6.21). Внешне он аналогичен модулю стандартного разрешения 640x480 *ES2196M*, но имеет разрешение 1280x1024 [24]. В

отличие от прототипа этот модуль имеет два встроенных АЦП, которые работают параллельно. Следовательно, скорость вывода информации также возрастает. Одинаковые размеры и электрические подключения позволяет выполнить замену модуля *ES2196M* на модуль *ES2216M* без значительных изменений в конструкции и схемотехнике.

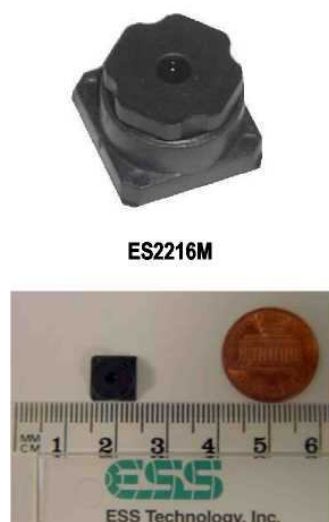


ES2199M

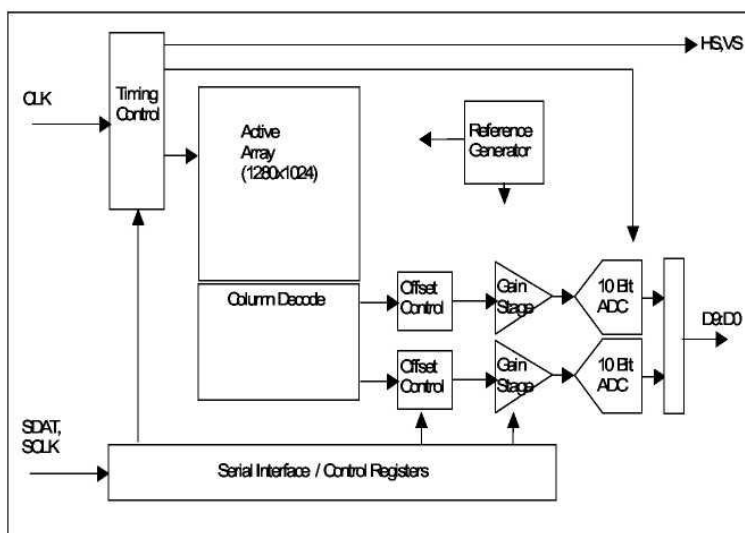
ES2199M (In scale)

Рисунок 6.20 – Камерный модуль *ES2199M* и его размер

Значительно более совершенным модулем является *ES2268M* (рис. 6.22). Он также имеет разрешение 1280x1024 элемента [25]. Модуль подключается к плате посредством гибкого шлейфа. Имеется встроенный процессор управления режимами работы камеры. В состав модуля входит блок аппаратного сжатия в формате *JPEG*. Скорость смены кадров при разрешении 1280x1024 составляет до 27 в секунду, что позволяет использовать модуль в составе телевидения высокой четкости.



ES2216M (In scale)



ES2216M - Sensor Block Diagram

Рисунок 6.21 – Камерный модуль *ES2216M*, его размер и блок-схема

Существенным преимуществом модуля является наличие высококачественного встроенного трехлинзового объектива, который управляется электроникой модуля. Объектив имеет возможность работы в режиме макрообъектива.



ES2268M

ES2268M (In scale)

Рисунок 6.22 – Камерный модуль *ES2268M* и его размер

Подключение к внешней плате осуществляется либо через параллельный восьмиразрядный интерфейс, либо через последовательный интерфейс. В первом случае можно использовать стандартный сигнал *ITU-R 601* либо еще несколько вариантов вывода цифрового сигнала. Последовательный интерфейс можно использовать в режиме *UART* (аналог компьютерного интерфейса *COM*).

Камерные модули предлагают также и производители микросхем КМОП-фотоприемников. Причем, это могут быть не только модули, предназначенные для встраивания в серийные изделия, но и, так называемые, оценочные модули. Внешний вид такого модуля приведен на рисунке 6.23 [26].



Рисунок 6.23 – Внешний вид оценочного модуля на КМОП-фотоприемнике

Оценочные модули предлагаются для быстрого ознакомления с этими фотоприемниками и представляют собой печатную плату с установленным на ней фотоприемником, всеми необходимыми компонентами, устройствами или интерфейсами управления и контрольными точками. Примерная схема типичного оценочного модуля приведена на рис. 6.24.

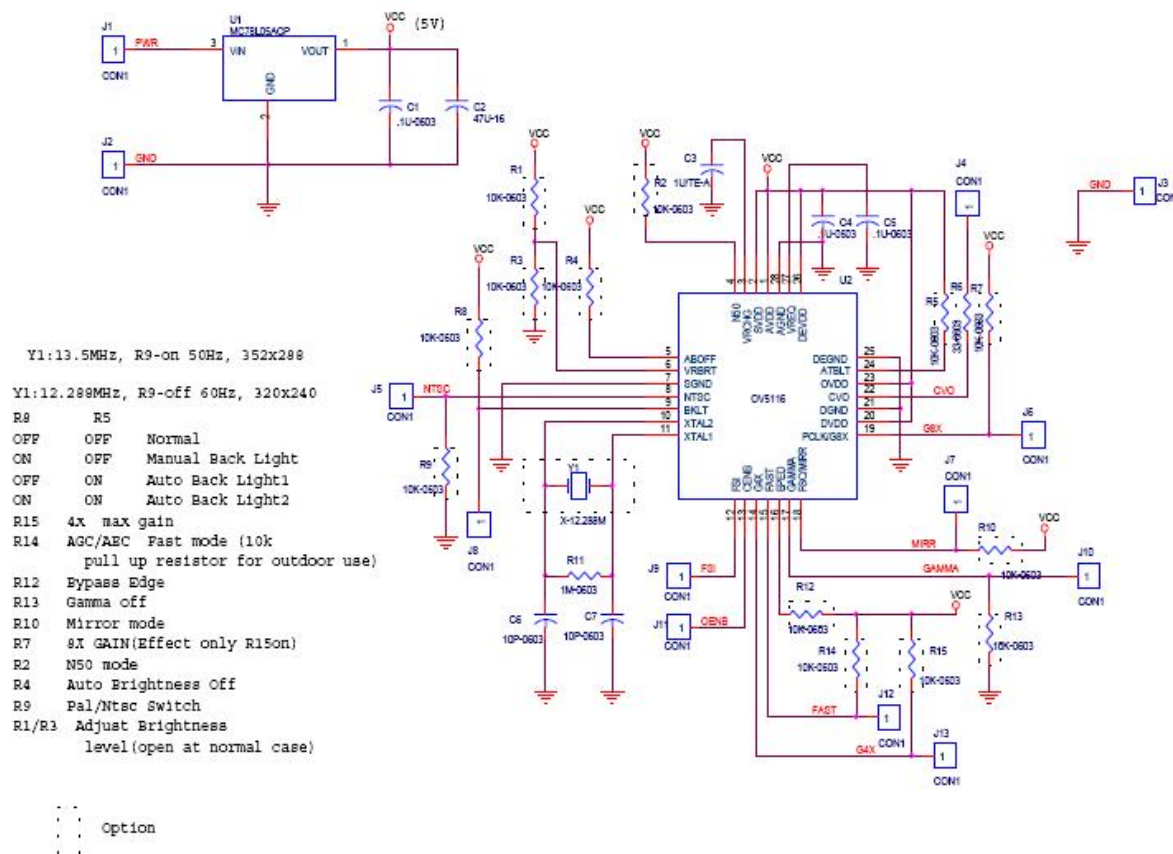


Рисунок 6.24 – Схема оценочного модуля на КМОП-фотоприемнике

Для ознакомления с работой КМОП-фотоприемников с цифровым выходом требуется более сложный оценочный модуль, в состав которого входит блок преобразования цифрового интерфейса, например, в интерфейс *USB* (рис. 6.25).

Использование камерных модулей может существенно уменьшить габариты устройства. Например, модуль *MT9V113* выполнен на базе фотоприемника форматом 640x480 элементов, имеющем размер 1/11 дюйма. Размер элемента такого фотоприемника составляет 2,2x2,2 мкм [27]. Структурная схема этого модуля представлена на рисунке 6.26. Модуль имеет в своем составе микроконтроллер, который управляет режимами его работы. Размер модуля составляет 4x4 мм и высота 2,5 мм (рис. 6.27). Таким образом, на печатной плате такой модуль займет минимальное место.

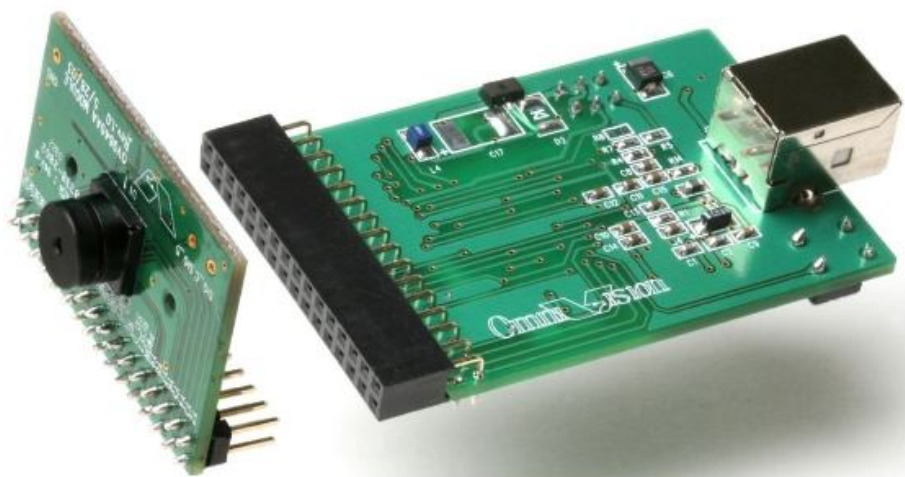


Рисунок 6.25 – Внешний вид оценочного модуля на КМОП-фотоприемнике с цифровым выходом

Применение камерных модулей значительно упрощает конструирование аппаратуры. Однако, следует помнить, что производители таких модулей не могут использовать большое разнообразие оптических систем. Обычно производятся модули с оптическими системами, которые наиболее востребованы в массовых применениях. Несколько упрощает выбор оптической системы вариант камерного модуля, у которого установлен не объектив, а одно из универсальных креплений объектива, например M12 или CS.

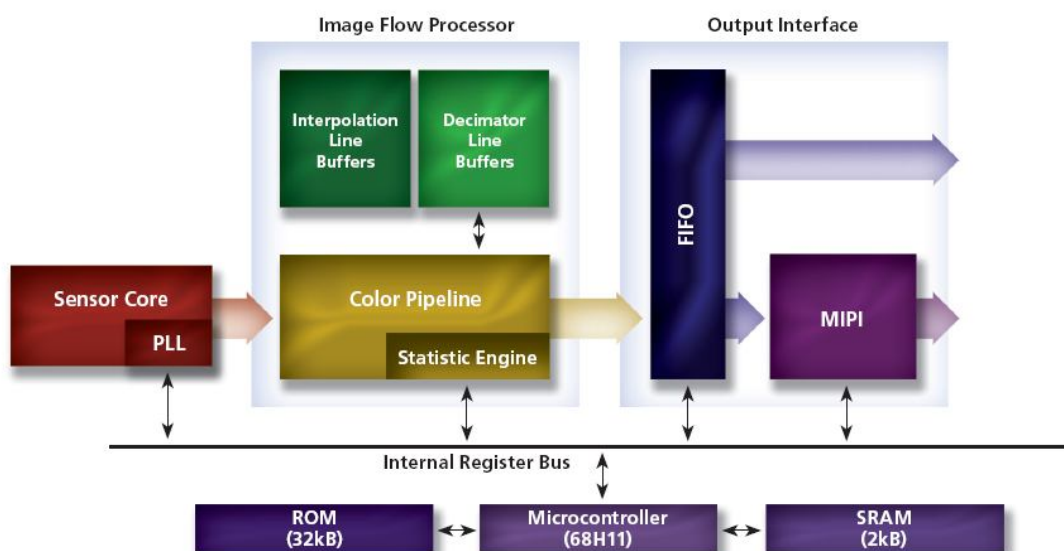


Рисунок 6.26 – Структурная схема камерного модуля MT9V113

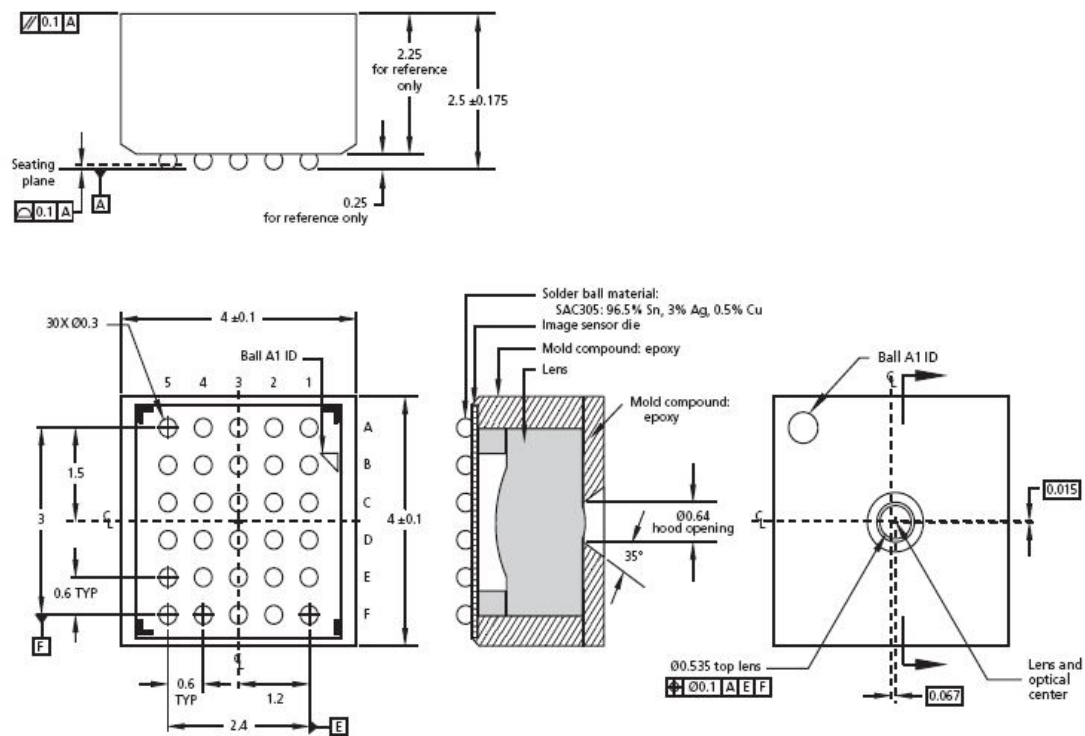


Рисунок 6.27 – Габаритные размеры камерного модуля MT9V113

7 Оптические системы твердотельных телевизионных камер

Оптическая система является важным и неотъемлемым элементом телевизионной камеры, от характеристик которой в значительной мере зависят общие характеристики не только камеры, но и ТВ-системы в целом. Объектив, представляющий собой систему линз, характеризуется рядом параметров. Рассмотрим те параметры, которые необходимо учитывать в первую очередь при выборе объективов для телекамер.

Формат объектива (*Format Of The Lens, Image Size*) – это, по сути, обозначение того размера матричного приемника оптического излучения (МПОИ) видеокамеры, с которой данный объектив предназначен работать. Другими словами, формат – это приблизительная длина (выраженная в дюймах) диаметра сфокусированного на поверхности МПОИ изображения. Можно также отметить, что формат объектива одновременно является диагональю вписанного в эту окружность прямоугольника, имеющего обычно соотношение сторон 3:4 (поверхность МПОИ представляет собой такой прямоугольник) [28].

Одним из требований конструктивной совместимости объектива и видеокамеры является приемлемость сочетаний их форматов.

Простейшим и наиболее часто встречаемым вариантов является соответствие формата объектива формату видеокамеры. Однако при необходимости можно использовать и некоторые другие сочетания, принимая во внимание соответствующие особенности [29].

На рисунке 7.1 показаны примеры трех различных сочетаний размера матрицы и соответствующего параметра объектива. В первом стандартном случае (рис. 7.1, а) достигается полное использование поверхностей как объектива, так и матрицы. Если формат матрицы меньше соответствующего параметра объектива (рис. 7.1, б), то матрица используется полностью, в отличие от объектива. Как результат мы получим сужение угла обзора объектива при некотором улучшении качества изображения. Это происходит потому, что в этом случае используется только центральная часть объектива, технологическая точность изготовления которой обычно выше, чем на краях. Использование матрицы большего формата, чем та, на которую рассчитан объектив (рис. 7.1, в), приведет к формированию неприемлемого изображения, так как поверхность матрицы будет использоваться не полностью и по краям появится черное поле.

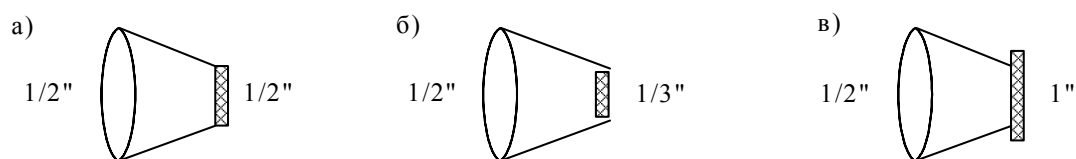


Рисунок 7.1 – Соотношение форматов матрицы и объектива

Фокусное расстояние объектива (*Focal Length*) является одним из важнейших параметров, определяющим угол обзора объектива (*Angle Of View*). От последнего, в свою очередь, зависят не только размеры наблюдаемой зоны, но и качество формируемого изображения, возможность различать мелкие детали. Соотношение между углом обзора и фокусным расстоянием зависит также от формата матрицы. В таблице 7.1 приведены данные, позволяющие оценить значение угла обзора в горизонтальной плоскости для объективов с разным фокусным расстоянием для матриц наиболее популярных форматов 1/4" (3,4 x 2,4 мм), 1/3" (4,8 x 3,6 мм), 1/2" (6,4 x 4,8 мм).

Таблица 7.1 – Значение угла обзора в горизонтальной плоскости

Формат матрицы	Фокусное расстояние, мм						
	2,8	4	6	8	12	16	50
	Угол обзора, град.						
1/4"	64	48	33	25	17	13	4
1/3"	78	59	42	32	22	16	5
1/2"	94	74	54	42	28	21	6

Для любой матрицы выбор объектива следует производить, исходя из заданного или заранее рассчитанного угла обзора камеры, связанного с фокусным расстоянием соотношением

$$f = \frac{b_{\phi}}{2 \operatorname{tg}(\beta_0/2)}, \quad (7.1)$$

где b_{ϕ} – ширина фотопреобразователя, β_0 – угол обзора в горизонтальной плоскости.

Аналогично

$$f = \frac{h_{\phi}}{2 \operatorname{tg}(\alpha_0/2)},$$

где h_{ϕ} – высота фотопреобразователя, α_0 – угол обзора в вертикальной плоскости.

При предварительном выборе углов β_0 и α_0 следует учитывать, что на краях поля зрения изображение получается менее резким и ярким, чем в центре, причем это явление зависит как от фокусного расстояния, так и от относительного отверстия D/f . Для определения угла резкого изображения β_p можно воспользоваться эмпирическим соотношением [30]:

$$\operatorname{tg} \beta_p \approx \frac{0.12 - 0.15}{(D/f) \sqrt{f/100}}. \quad (7.2)$$

На основании выражений (7.1) и (7.2) окончательно устанавливается необходимый угол обзора объектива и его фокусное расстояние, по которому из справочных таблиц выбирается подходящий объектив [31].

В зависимости от значения угла обзора объективы могут подразделяться на следующие типы:

- стандартный или нормальный (угол обзора 30 град.);
- широкоугольный (угол обзора около 60 град.);
- сверхширокоугольный (угол обзора более 80 град.);
- телеобъективы (углы обзора единицы градусов).

Приведенное деление достаточно условное, поскольку в общем случае объектив может иметь любое значение фокусного расстояния и угла обзора соответственно. Однако различные фирмы-производители обычно выпускают объективы с одинаковыми (например, 6, 8, 12 мм) или близкими (3,6; 3,8; 4 мм) значениями фокусного расстояния.

До сих пор речь шла о наиболее распространенных объективах, имеющих фиксированное фокусное расстояние (*Fixed Focal Length*). На практике зачастую возникает задача использования телекамеры, позволяющей изменить угол обзора при настройке или в процессе эксплуатации. Для этой цели могут использоваться объективы с переменным фокусным расстоянием или, как их еще называют, вариообъективы.

По возможности изменять фокусное расстояние объективы можно подразделять на следующие типы:

- с ручной регулировкой фокусного расстояния (*Vary-Focal Lenses*);
- с переменным фокусным расстоянием, регулируемым в процессе работы (*Zoom Lenses*).

Вариообъективы с ручным управлением обеспечивают подстройку угла обзора видеокамеры на оптимальное изображение; обычно они позволяют изменять фокусное расстояние примерно в 2 раза, однако в последнее время появились вариообъективы, допускающие изменение фокусного расстояния и до 20 раз.

Тем не менее, если в этом нет острой необходимости, следует избегать использования вариообъективов с ручным управлением, поскольку достаточно сложно создать объектив, сохраняющий свои высокие оптические характеристики, если его линзы могут изменять свое положение.

Методика фокусировки объективов видеокамер рассмотрена в работе [32].

Вариообъективы с сервоуправлением, иначе трансфокаторы (*Motorized Zoom*), позволяют изменять фокусное расстояние в значительных пределах: минимальная кратность составляет 6 раз, а максимальная у современных объективов может достигать 34. Вариообъективы могут применяться на объектах, где при видеонаблюдении требуется время от времени дистанционно изменять масштаб контролируемого изображения, сосредотачивая внимание на удаленных предметах, или наоборот, переходя к панорамному наблюдению. Некоторые из подобных объективов имеют

функцию предустановки (*Presets*), которая обеспечивает автоматическую установку по сигналу тревоги на заранее заданное фокусное расстояние.

Габаритные размеры вариообъективов с сервоуправлением могут значительно превосходить размеры видеокамеры, поэтому нередко для крепления используется специальное резьбовое отверстие в объективе.

При выборе объектива необходимо принимать во внимание его разрешающую способность, которая не должна существенно ухудшать разрешающую способность фотопреобразователя и, следовательно, системы в целом. Решение этой задачи, вообще говоря, должно производиться путем построения частотно-контрастных характеристик фотопреобразователя и объектива, а также других звеньев системы, их перемножения и затем нахождения результирующей разрешающей способности m_p на известном уровне отсчета Δ [33]. Для упрощения решения поставленной задачи можно ориентировочно воспользоваться паспортными данными фотографической разрешающей способностью объектива $N_{об}$, предварительно выразив ее в телевизионных линиях (твл) согласно формуле

$$m_{об} = 2h_{ф} N_{об},$$

где $h_{ф}$ – высота изображения на фотопреобразователе; $N_{об}$ – разрешающая способность объектива, $мм^{-1}$.

Практически желательно, чтобы $m_{об} > (1,5-2,0)m_p$, причем значение m_p должно учитывать пространственно-частотные искажения не только фотопреобразователя, но и остальных звеньев системы (канала связи, кинескопа и др.). При выполнении этого неравенства потеря разрешающей способности за счет объектива при использовании 1/3" матриц составляет в среднем (10-15)% [33].

Относительное отверстие объектива определяет тот световой поток, который, пройдя через объектив, достигает поверхности ПЗС-матрицы. Относительное отверстие численно равно отношению эффективного диаметра объектива к его фокусному расстоянию. Значение относительного отверстия объектива отображается в виде дроби, например, 1:1,2. В технической литературе для обозначения относительного отверстия широко используется упрощенная запись, по сути, соответствующая обратной величине, например, F1.2 (в англоязычной литературе ее обозначают как *Aperture*).

Чем меньше значение достижимого относительного отверстия, тем лучше, поскольку при этом система видеокамера-объектив оказывается более чувствительной. Например, объектив с F1.4 лучше объектива с F2.0, поскольку первый позволяет получить лучшее изображение в условиях малой освещенности.

Для снижения значения относительного отверстия используют так называемые асферические объективы (*Aspheric Lens*), поверхность которых существенно отличается от сферической. Усложнение изготовления

подобных объективов сказывается на их более высокой стоимости, больше и вносимые объективом искажения. Однако при этом система видеокамера-объектив становится существенно более чувствительной (например, использование асферических объективов с $F0.8$ позволяет повысить результирующую чувствительность примерно в 3 раза по сравнению с использованием объективов с $F1.4$).

Выше были рассмотрены наиболее важные параметры и характеристики объективов с точки зрения их выбора для телевизионных систем наблюдения. Свойства объективов как оптических элементов могут определяться также и другими параметрами и характеристиками. Более подробно они рассмотрены в специальной литературе, например в [34].

Диафрагма. По типу диафрагмы (*Iris*), т.е. механизма регулировки проходящего на ПЗС-матрицу светового потока, объективы подразделяются на:

- Объективы с фиксированной диафрагмой (*Without Iris*). Наиболее дешевые (при прочих равных параметрах), но не обладающие возможностью подстройки к уровню освещенности на объекте. Используются, как правило, в помещениях со стандартным уровнем освещенности. Адаптация к изменению уровня освещенности достигается, главным образом, за счет электронного затвора камеры.

- Объективы с ручной регулировкой диафрагмы (*Manual Iris*). Позволяют вручную при монтаже камеры установить значение диафрагмы, дающее возможность работать во всем диапазоне изменения освещенности. В дальнейшем при эксплуатации этот параметр не изменяется. Используется обычно в помещениях с ограниченным диапазоном изменения освещенности.

- Объективы с автоматической регулировкой диафрагмы («АРД», *Auto-Iris*). Наиболее дорогой вид объективов, однако, обладающий способностью автоматически адаптироваться к изменяющемуся уровню освещенности. В сочетании с электронным затвором это дает возможность осуществлять наблюдения в широком диапазоне изменения освещенности (прежде всего на улице). Для таких объективов дополнительным параметром является вид управляющего сигнала – видео («*Video*») или постоянный ток («*DC*» или «*DD*»). В первом случае объектив должен содержать усилитель видеосигнала для формирования сигнала управления достаточной мощности. Во втором – соответствующие усилители находятся в телекамере, поэтому объектив будет проще, меньших габаритов и дешевле. В любом случае этот параметр должен учитываться с точки зрения совместимости камеры и объектива.

Расширение динамического диапазона регулировок диафрагмы достигается максимально плотным закрытием объектива. С этой целью используют встроенный нейтрально-серый фильтр-пятно (*ND Spot Filter*), размещенный в центральной части объектива. При открытом зрачке

объектива небольшое нейтрально-серое пятно в центральной части фильтра практически не влияет на прохождение светового потока (остальная часть фильтра прозрачная). Однако при заключительной фазе закрывания диафрагмы нейтрально-серое пятно существенно уменьшает световой поток.

Особенности настройки объективов с автодиафрагмой рассмотрены в работах [35, 36].

Можно предположить, что вместо объективов с автодиафрагмой, можно было бы с успехом использовать объектив с фиксированной диафрагмой, перед которым устанавливается «прыгающий» нейтрально-серый фильтр. Такое решение имеет следующие преимущества: объектив дешевле, нет искажений, нет конфликтов с электронным затвором, нет проблем с согласованием по цепям управления, не требуется тонкая настройка объектива.

Отметим, что вариообъективы с сервоуправлением выпускаются двух типов:

- с автоматической регулировкой диафрагмы;
- с дистанционным управлением диафрагмы.

Каждое из этих решений имеет свои преимущества и недостатки:

- при использовании объектива с автодиафрагмой оператору не нужно в течение суток подстраивать яркость изображения;
- в случае дистанционно управляемой диафрагмы качество изображения можно получить лучше, чем при использовании объектива с автодиафрагмой.

Глубина резкости (*Depth Of Field*) – зона перед фокусируемой областью и за ней, в пределах которой все предметы на изображении остаются сфокусированными. Необходимо иметь ввиду следующее:

- глубина резкости тем больше, чем больше значение относительного отверстия объектива;
- короткофокусные объективы имеют большую глубину резкости, чем длиннофокусные;
- с увеличением расстояния до объекта глубина резкости увеличивается;
- протяженность зоны резкости за сфокусированным объектом больше, чем перед ним.

Необходимо отметить, что фокусировка при обычном освещении и при инфракрасной подсветке различаются, поэтому при использовании в системе охранного телевидения ИК-прожекторов следует устанавливать компромиссную фокусировку или использовать специальные объективы. Здесь можно отметить, что существуют объективы со встроенными по периметру диодами ИК-подсветки; это в ряде случаев может оказаться весьма удобным при их эксплуатации в условиях недостаточной освещенности.

Стоит также упомянуть еще один параметр, нередко указываемый в технических характеристиках на объектив – это *MOD* (*Minimum Object Distance*), т.е. минимальное расстояние до объекта, при котором воспроизводимое объективом изображение оказывается сфокусированным. Это расстояние в зависимости от модели объектива может составлять от десятков сантиметров до нескольких метров, широкоугольные объективы, как правило, имеют меньшее значение этого параметра, чем длиннофокусные объективы.

Способ монтажа объектива. В настоящее время выпускаются объективы с задним отрезком 12.5 мм (тип *CS*) и 17.5 мм (тип *C*). Современные камеры обычно имеют *CS*-тип крепления, и с ними можно использовать оба типа объективов, однако при использовании объективов *C*-типа для получения резкого изображения между камерой и объективом необходима установка специального переходного кольца *C/CS* (*C/CS adapter*) толщиной 5 мм (рис. 7.2).

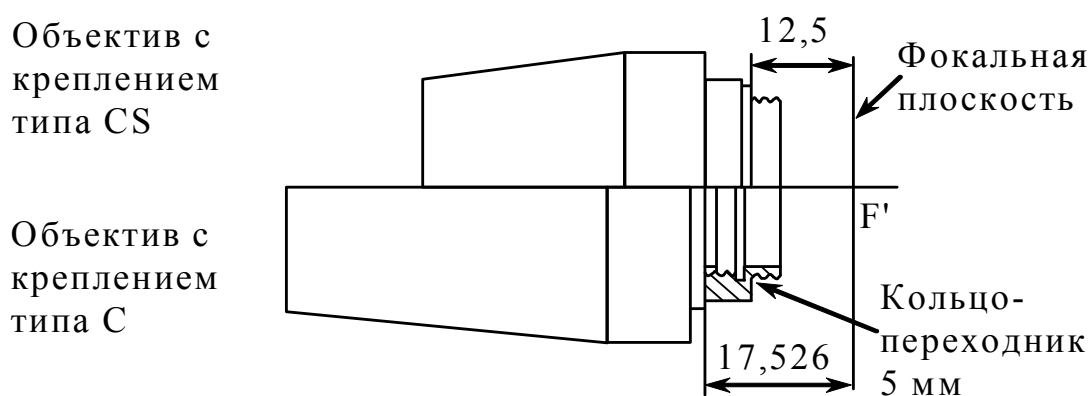


Рисунок 7.2 – Объективы *C*-типа и *CS*-типа

Использовать объективы *CS*-типа с камерами *C*-типа нельзя, поскольку в этом случае невозможно совместить фокальную плоскость объектива с плоскостью установки матрицы ПЗС.

В таблице 7.2 показана совместимость объективов и камер с разным способом крепления.

Таблица 7.2 – Совместимость объективов и камер с разным способом крепления

	Способ крепления			
	C	C	CS	CS
Камера	C	C	CS	CS
Объектив	C	CS	CS	C
Совместимость	+	–	+	+

Некоторые видеокамеры имеют встроенное резьбовое кольцо с большим ходом, что позволяет отказаться от использования кольца *C/CS* и гарантирует хорошую фокусировку (функция *Back Focus*).

Параметры, определяющие технические характеристики объективов, представлены на рисунке 7.3.

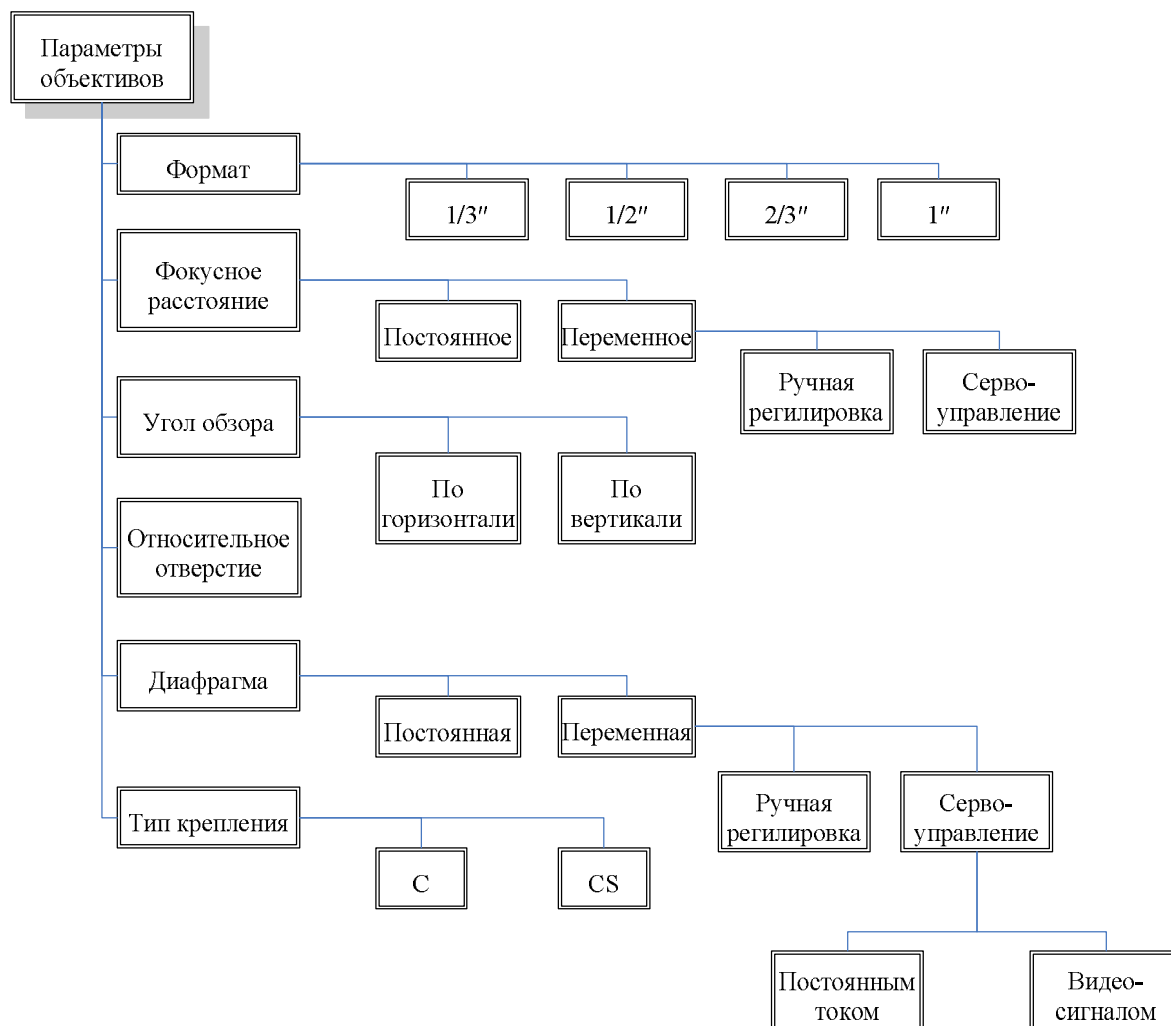


Рисунок 7.3 – Параметры, определяющие технические характеристики объективов

Микрообъективы. В охранном телевидении кроме стандартных объективов используются микрообъективы для бескорпусных и миниатюрных видеокамер. При их выборе следует помнить, что они могут быть выполнены из стекла, либо из пластмассы (оптические качества которой, естественно, хуже, чем у стекла; кроме того, пластмасса стареет, подвержена деформациям). Следует отметить, что несмотря на свои небольшие размеры, существуют микрообъективы и с автодиафрагмой.

Используемые для видеокамер со скрытой установкой объективы типа «игольное ушко» (*Pin-Hole*), как правило, имеют существенно худшее значение относительного отверстия по сравнению с обычными микрообъективами. Однако при использовании специальных объективов (до 5 линз) производители указывают в технической документации достаточно высокие параметры и для объективов *Pin-Hole*.

Внешне аналогично традиционным объективам *Pin-Hole* выглядят как объективы с вынесенным зрачком. Однако они существенно отличаются: их преимущество в том, что при юстировке таких объективов, например в стене, не требуется точное «попадание» в центр отверстия.

Более того, само отверстие является частью оптической системы такого объектива, играя роль диафрагмы. Таким образом, исключаются затемнения по краям экрана видеомонитора, которые сопровождают неточную юстировку объективов *Pin-Hole*.

Объективы с конусной формой особенно удобны для скрытой установки, поскольку они допускают монтаж видеокамеры не только перпендикулярно стене, но и под некоторым углом к ней.

8 Системы на кристалле

При всем многообразии задач, стоящих перед устройствами формирования и обработки видеосигнала можно выделить целый ряд задач, решение которых приводит к массовому спросу на эти устройства. В свою очередь, массовый спрос на определенную продукцию приводит к оптимизации технико-экономических показателей оборудования. Одним из основных путей повышения технической эффективности и снижения себестоимости является создание специализированной элементной базы с высокой степенью интеграции.

Современная технология проектирования и производства электронных микросхем позволяет создавать высокоинтегрированные специализированные микросхемы, которые оптимизированы для решения узкого круга задач. Однако, для высокой экономической эффективности подобной продукции необходимо, чтобы эти задачи носили массовый характер. Именно такие интегральные схемы носят название системами на кристалле.

Применительно к телевизионным системам и устройствам обработки изображения можно выделить целый ряд задач, которые при своем массовом характере могут быть решены с использованием систем на кристалле. Технические направления, требующие решения подобных задач являются следующие:

- однокристалльные телевизионные камеры с расширенными возможностями;
- цифровые фотоаппараты;
- цифровые видеокамеры;
- устройства воспроизведения видеосигнала с оптических дисков;
- видеоподсистема персональных компьютеров;
- портативные multifunctional устройства, способные записывать и воспроизводить видео (коммуникаторы, смартфоны, карманные компьютеры и пр.);
- измерительные модули на основе матричных фотоприемников.

Несмотря на различное назначение, большая часть упомянутых групп устройств может быть создана на основе примерно одинакового состава блоков. Эти блоки могут быть размещены на одном кристалле, который будет упакован в один корпус интегральной микросхемы. При этом важным условием является сходство технологического процесса при формировании на одном кристалле различных блоков.

Если в качестве фотоприемника выступает КМОП-фотоприемник, то эта проблема снимается, так как фотоприемник изготавливается по той же самой технологии (КМОП), по которой изготавливаются и большинство

других электронных устройств (АЦП, аналоговые устройства, память, процессор, интерфейсы).

ФПЗС выпускаются с использованием технологии, которая несовместима с КМОП. По этой причине разместить его на одном кристалле с другими блоками представляется проблематичным. В лучшем случае может быть создана гибридная микросхема, в корпусе которой располагаются как минимум два связанных между собой кристалла. В дальнейшем мы такие варианты рассматривать не будем.

Простейшим примером системы на кристалле может служить любой современный КМОП-фотоприемник стандартного разрешения с аналоговым видеовыходом, в частности *OV7949* (рис. 6.1) или *OV6920* (рис. 6.16). Любое из этих устройств является законченным изделием, практически не требующим внешних дополнительных компонентов. В результате телевизионная камера может быть выполнена на основе всего лишь одной интегральной микросхемы.

Однако большинство современных телевизионных устройств являются цифровыми и видеосигнал в них обрабатывается в цифровом виде. Типичными примерами таких устройств являются цифровые фотоаппараты и видеокамеры. Тенденция к универсальности привела к тому, что и те и другие устройства способны формировать и сохранять как статические изображения, так и видеопоследовательности. Поэтому отличия в их структуре довольно небольшие. Типичная блок-схема этих устройств представлена на рисунке 8.1.

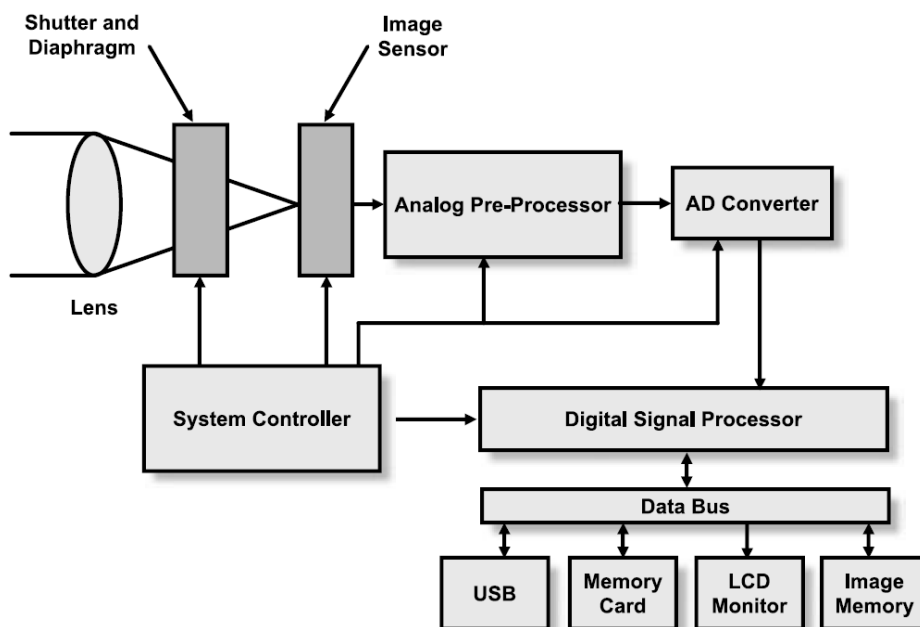


Рисунок 8.1 – Блок схема цифрового фотоаппарата и видеокамеры [37]

В настоящее время подобные аппараты могут быть построены на основе двух основных электронных компонентах, которые условно

разделяются на аналоговый блок предварительной обработки (*analog frontend*) и блок цифровой обработки (*digital backend*) (рис. 8.2). При этом каждый из этих блоков можно отнести к системе на кристалле.

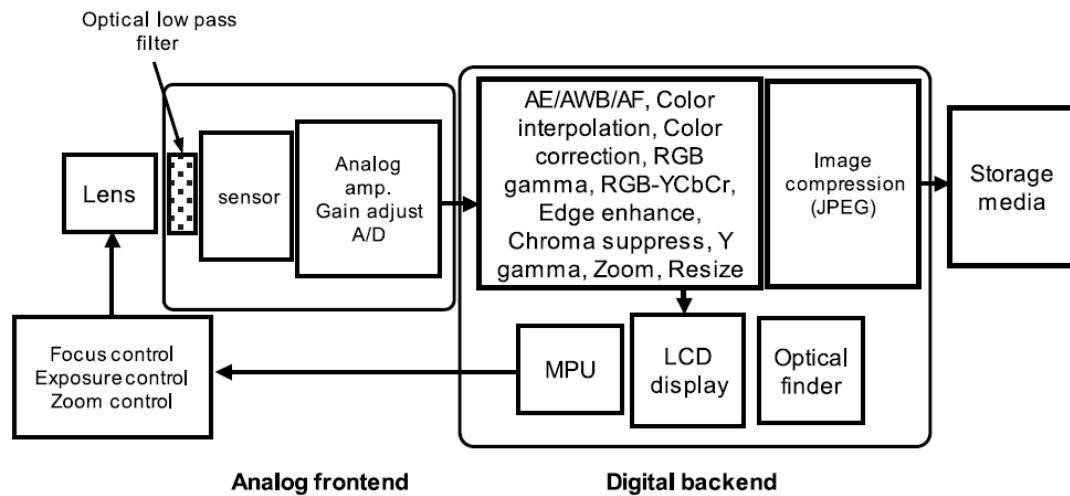


Рисунок 8.2 – Типичное разделение функций между двумя системами на кристалле [37]

Интеграция блоков в направлении создания систем на кристалле производится с двух сторон.

С одной стороны основные традиционные производители фотопреобразователей (такие как *Sony*, *Omni Vision*) развивают свою продукцию путем интеграции в фотоприемники других блоков, входящих в систему. В этом случае происходит наращивание возможностей блока предварительной обработки (*analog frontend*).

С другой стороны производители цифровых сигнальных процессоров (*Texas Instruments*, *Analog Devices*, *NXP*) выпускают специализированные высокопроизводительные сигнальные процессоры, ориентированные на обработку цифрового видео, в том числе и телевидения высокой четкости. В этом случае происходит расширение функций блока цифровой обработки (*digital backend*). В качестве примера такой элементной базы можно отметить специализированный видеопроцессор *TMS320DM6430* производства фирмы *Texas Instruments* (рис. 8.3). В него интегрированы практически все узлы цифровой видеосистемы кроме фотоприемника и памяти. Встроенный цифровой видеопорт позволяет подключать к нему напрямую КМОП-фотоприемник. Основную задачу обработки видео выполняет высокопроизводительное ядро сигнального процессора, ориентированного прежде всего на задачи сжатия цифрового видеосигнала. Обработанное изображение или видео сохраняется на твердотельном носителе (*flash*-памяти) или передается наружу с использованием сетевого интерфейса.

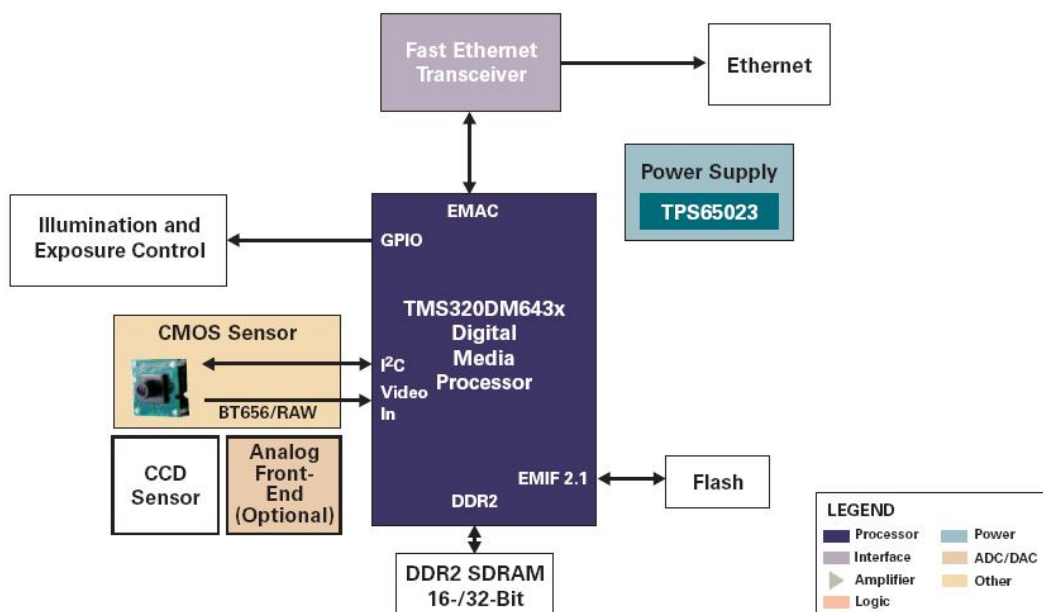


Рисунок 8.3 – Система на кристалле на основе специализированного цифрового сигнального процессора [38]

Следует отметить, что этот и подобные процессоры могут быть использованы для широкого круга задач обработки цифровых изображений и видеосигналов. Остальные перечисленные здесь типы устройств цифровой видеотехники также могут базироваться на основе этой элементной базы.

Отдельно стоят телевизионные устройства не связанные с визуализацией видеосигнала. К этим устройствам можно отнести измерительные телевизионные системы и системы технического зрения. В этом случае используется проблемно-ориентированная элементная база. Например, уже упоминавшаяся микросхема *OV810* предназначена для использования в системах технического зрения, в частности для решения задач биометрии.

В некоторых случаях задача создания системы на кристалле удобнее решать не путем создания специализированной элементной базы, а с помощью микросхем программируемых логических матриц (ПЛМ). Такие микросхемы имеют очень высокую степень интеграции, но состоят из большого количества отдельных элементов, которые можно сконфигурировать в соответствии с решаемой задачей.

На рисунке 8.4 представлен пример реализации цифровой телевизионной системы на основе ПЛМ [39]. В данном случае функции искусственно разделены между двумя микросхемами ПЛМ, соединенных между собой разъемом. Эти микросхемы можно легко объединить в одну. Функциями левой микросхемы ПЛМ являются все высокоскоростные операции с потоковым видео, прежде всего сжатие. Для этого в микросхеме создается процессорный элемент, а также интерфейсы с памятью. Через

правую микросхему производится подключение практически ко всей периферии устройства.

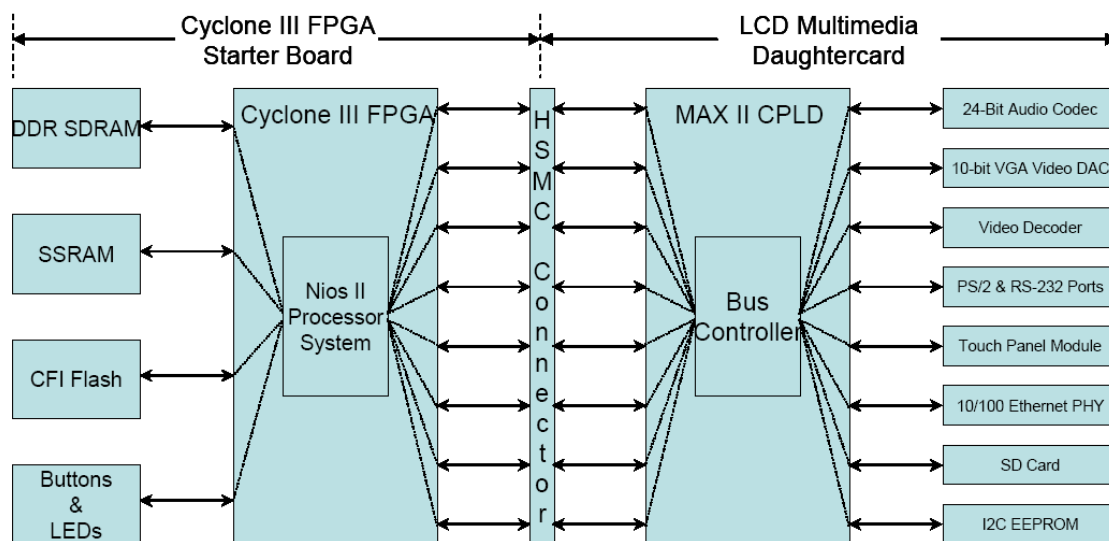


Рисунок 8.4 – Использование микросхем ПЛМ для создания систем на кристалле

Многие телевизионные измерительные системы используют сравнительно несложные алгоритмы обработки видеосигнала. Например, система, определяющая угловое или линейное положение изображений одного или нескольких малоразмерных объектов в поле зрения камеры можно выполнить с помощью устройства, структурная схема которого приведена на рисунке 8.5 [40].

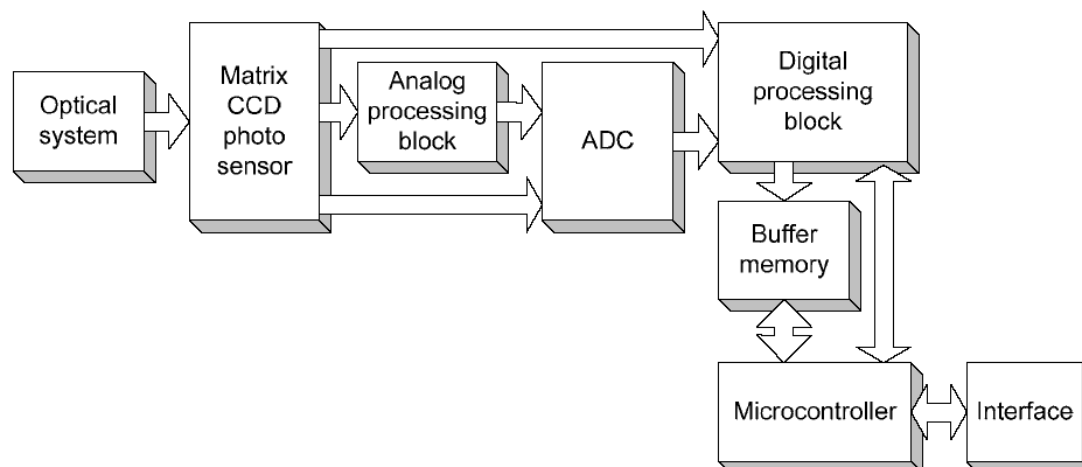


Рисунок 8.5 – Структурная схема устройства для измерения угловых и линейных координат

В этом устройстве обнаружение объектов и предварительное вычисление координат объектов выполняет система на кристалле, реализованная на микросхеме программируемой логики.

Тенденция дальнейшей интеграции цифровых устройств для обработки видео продолжается и в скором времени можно ожидать полностью интегрированные устройства, выполненные на одном кристалле.

Список использованных источников

- 1 Иванов В.Г. Твердотельная революция в телевидении. К истории начального этапа: Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения, выпуск 1, 2007. – С. 130-139.
- 2 Секен К., Томпсетт М. Приборы с переносом заряда. – М.: Мир, 1978.
- 3 Манцветов А.А., Цыцулин А.К. Телекамеры на КМОП-фотоприемниках: Вопросы радиоэлектроники. Серия «Техника телевидения», выпуск 2, 2006. – С. 70 – 89.
- 4 Терминологический словарь по элетронной технике / В.Н. Вениаминов, Г.Н. Грязин и др.; Под ред. Г.Н. Грязина и И.П. Жеребцова. – СПб.: Политехника, 2001. – 783 с.
- 5 Телевидение: Учебник для вузов / В.Е. Джакония, А.А. Гоголь, Я.В. Друзин и др.; Под ред. В.Е. Джаконии. – М.: Горячая линия–Телеком, 2002. – 640 с.
- 6 BT.656 Video Interface for ICs [Электронный ресурс]: Application Note. July 2002 AN9728.2. – Режим доступа: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an97/an9728.pdf>.
- 7 Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
- 8 Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные параметры на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле/ В.В.Березин, А.А.Умбиталиев, Ш.С.Фахми, А.К.Цыцулин, Н.Н.Шипилов; Под ред. А.А.Умбиталиева и А.К.Цыцулина. – М.: Радио и связь, 2006.
- 9 Твердотельное телевидение: Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах / Л.И. Хромов, Н.В. Лебедев, А.К. Цыцулин, А.Н. Куликов; Под ред. И.А. Росселевича. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
- 10 Миленин Н.К. Шумы в формирователях сигналов изображения на ПЗС. – Техника кино и телевидения, 1980, №6. – С. 51-57.
- 11 Шайкевич Д.В. Расчет отношения сигнал/шум в телевизионных камерах на ПЗС при заданных характеристиках источника излучения. – Техника средств связи, сер. Техника телевидения, 1984, вып. 4. – С. 88-94.
- 12 Грязин Г.Н. Основы и системы прикладного телевидения / Г.Н. Грязин; под ред. Н.К. Мальцевой. – СПб.: Политехника, 2011. – 273 с.
- 13 Однолько В.В., Ожигин А.Ф., Харитонов Г.А. Портативные камеры цветного телевидения. – М: Радио и связь, 1984. – 104 с.

14 Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов). – 320 с.

15 Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. – М.: Радио и связь, 1987.

16 OV5610 Color CMOS QXGA (5.17 MPixel) CAMERACHIPTM with OmniPixelTM Technology Preliminary [Электронный ресурс]: Datasheet OmniVision Technologies, Inc. Version 1.2, October 13, 2004. – Режим доступа: http://www.bitec-dsp.com/pb_5610.pdf.

17 Sony ICX039DLB Diagonal 8mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR Black-and-White Video Cameras [Электронный ресурс]: Datasheet E96127B99. – Режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/47365/SONY/ICX039DLB.html>.

18 Sony CXD2400R Timing Controller for CCD cameras [Электронный ресурс]: Datasheet E93308D75-PS. – Режим доступа: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/sony/a6802659.pdf>.

19 OmniVision OV7949 Product Brief [Электронный ресурс]: Version 1.2 April, 2006. – Режим доступа: http://www.tenrod.com.au/pdf/ovt/web_Brief7949V1.2.pdf.

20 MT9V135: SOC VGA Digital Image Sensor [Электронный ресурс]: Micron Technology, Inc. MT9V135_LDS_3.fm - Rev. B 3/07 EN. – Режим доступа: http://homepages.cae.wisc.edu/~ssanders/me_770/product_datasheets_and_manufacturer_data/Micron_CMOS_camera_on_chip_JBG.pdf.

21 MT9V022I77ATM (mono) MT9V022I77ATC (color) 1/3-Inch, Wide-VGA CMOS Digital Image Sensor [Электронный ресурс]: Micron Technology, Inc MT9V022_Product_Brief - Rev. A 1/06 EN. – Режим доступа: <http://www.apertina.com/assets/downloadDocument.do?id=188>.

22 MT9V023 WVGA1/3-inchStand-Alone CMOS Sensor [Электронный ресурс]: Product Flyer. Micron Technology. 02/08 EN. – Режим доступа: http://www.theimagingsource.com/downloads/mt9v023.en_US.pdf.

23 Very Small Form Factor VGA Camera Module ES2199M Product Brief [Электронный ресурс]: ESS Technology, Inc. – Режим доступа: www.esstech.com.

24 1.3 Mega-Pixel CMOS Sensor Module ES2216M Product Brief [Электронный ресурс]: ESS Technology, Inc. – Режим доступа: www.esstech.com.

25 1.3 Mega-Pixel Macro Camera Phone Module ES2268M Product Brief [Электронный ресурс]: ESS Technology, Inc. – Режим доступа: www.esstech.com.

- 26 Evaluation module [Электронный ресурс]: OmniVision Technologies. – Режим доступа: <http://www.ovt.com/uploads/evaluationmod/>.
- 27 Wafer-Level Cameras. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.aptna.com/products/wafer-level_cameras/mt9v113m02stc/#overview.
- 28 Гедзберг Ю.М. Охранное телевидение. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 312 с.
- 29 Волхонский В.В. Телевизионные системы наблюдения: Учеб. пособие. 2-е изд., доп. и перераб. СПб.: Экополис и культура, 2005. – 167 с.
- 30 Костыков Ю.В. Основы проектирования систем и аппаратуры прикладного телевидения. М.; Л.: Энергия, 1964. – 256 с.
- 31 Бабенко В.С. Оптика телевизионных устройств. – М.: Радио и связь, 1982. – 257 с.
- 32 Уваров Н.Е. Практические советы по фокусировке телевизионных камер // Резонанс. – 2003. – № 1.
- 33 Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения: Учеб. пособие для вузов. – СПб.: Политехника, 2000. – 277 с.
- 34 Дамьяновски В. CCTV. Библия охранного телевидения: Пер. с англ. М.: ООО «Ай-Эс-Эс Пресс», 2003. – 344 с.
- 35 Уваров Н.Е. Настройка системы диафрагмирования ТВ камер // Скрытая камера. – 2003. – № 8-9 (16).
- 36 О чем не пишут в даташитах // Системы безопасности. – 2003. – № 6.
- 37 Image sensors and signal processing for digital still cameras / edited by Junichi Nakamura. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group 2006.
- 38 Video and Imaging Guide [Электронный ресурс]: Texas Instruments 3Q 2008. – Режим доступа: http://www.digikey.be/Web%20Export/Supplier%20Content/TI_296/PDF/TI_Video-ImagingGuide.pdf?redirected=1.
- 39 Nios II Embedded Evaluation Kit, Cyclone III Edition User Guide [Электронный ресурс]: Altera Corporation Part Number UG-01025-1.1 August 2008. – Режим доступа: ftp://ftp.altera.com/outgoing/download/support/ip_processors/nios2/p25-36209-02_cycloneiii_3c25_niosii_user_guide.pdf.
- 40 Universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems [7133-908] S. Yaryshev, I. Konyakhin, A. Timofeev, Proceedings of SPIE, 0277-786X, v. 7133.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ И ЕЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Кафедра создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год - кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год - кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год - кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года - кафедра оптико-электронных приборов и систем.

Кафедру возглавляли:

- с 1938 по 1942 год - профессор К.Е. Солодилов;
- с 1942 по 1945 год - профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
- с 1945 по 1946 год - профессор М.А. Резунов (по совместительству);
- с 1947 по 1972 год - профессор С.Т. Цуккерман;
- с 1972 по 1992 год - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
- с 1992 по 2007 год - заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.
- с 2007 года по настоящее время - почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

История кафедры началась в 1937-38 годах с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой был К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское

бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности (ВООМП). Преподавателями кафедры стали сотрудники этого ЦКБ - М.А. Резунов, М.Я. Кругер, С.Т. Цуккерман, В.А. Егоров, Б.М. Кулежнов.

В годы Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована в Черепаново, где обязанности заведующего кафедрой выполнял профессор А.И. Захарьевский. Преподавателями кафедры по состоянию на 01.04.1945 г были профессор Чулановский, доцент Кругер, ст. преподаватель Гриневич, ассистенты Дедюлин и Погарев. После возвращения в Ленинград кафедрой в 1945-46 годах по совместительству заведовал начальник конструкторского бюро (КБ) Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) М.А. Резунов.

В начале 1947 года кафедру возглавил профессор С.Т. Цуккерман, который руководил ею до 1972 года. В 1958 году кафедра была реорганизована в кафедру специальных оптических приборов, а в 1967 году в кафедру оптико-электронных приборов (ОЭП).

Создание С.Т. Цуккерманом в предвоенные годы книги «Точные механизмы» (М.: Оборонгиз, 1941) является значительным вкладом в развитие отечественного точного приборостроения. С.Т. Цуккерман является автором более 120 научных работ и более 50 изобретений. В предвоенные, военные и послевоенные годы С.Т. Цуккерман работал над созданием прицельных устройств для зенитной и авиационной артиллерии. Он был одним из создателей серийного авиационного гироскопического прицела АСП с автоматической выработкой поправки на упреждение, который устанавливался на истребителях МиГ, а также механического ракурсного прицела для мелкокалиберной зенитной артиллерии, широко применяемого во время войны во Вьетнаме.

В 1958 г. при кафедре была организована отраслевая лаборатория «Специальные оптические приборы» с достаточно сильной группой конструкторов-разработчиков.

С.Т. Цуккерман и старший научный сотрудник А.С. Гридин руководили разработкой приборов управления по лучу (ПУЛ), предназначенных для управления движением различных подвижных объектов по прямой линии или по программе.

В начале 60-х годов старший научный сотрудник Г.Г. Ишанин занимался разработкой фотометрической аппаратуры, предназначенной для паспортизации оптико-электронных приборов и систем различного назначения.

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения, члена-корреспондента Российской академии наук (РАН), Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии профессора

М.М. Мирошникова, который, работая на кафедре ОЭП с 1969 года по 1976 год в должности профессора по совместительству, поставил и читал курс «Теория оптико-электронных приборов».

С 1972 года по 1992 год кафедрой ОЭП заведовал заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев, известный специалист в области автоматических ОЭПиС в комплексах навигации и управления авиационной и космической техникой. Соответственно тематика выполнения научно-исследовательских работ на кафедре приобрела новые направления, существенно увеличилось число тем, носящих поисковый фундаментальный характер. Были разработаны новый учебный план и программы учебных дисциплин.

Л.Ф. Порфирьев является автором 19 учебников, учебных пособий и монографий, среди которых можно выделить такие как «Теория оптико-электронных приборов и систем» (Л.: Машиностроение, 1980), «Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах» (Л.: Машиностроение, 1989). Результаты его работ можно оценить как значительный вклад в разработку общей теории оптико-электронных систем.

Л.Ф. Порфирьев как руководитель проводил достаточно жесткую кадровую политику, при которой на кафедре оставались работать только те сотрудники, которые отличались преданностью делу. При этом он оказывал всемерную поддержку сотрудникам кафедры по разработке ими различных направлений теории и практики оптико-электронного приборостроения. По результатам научно-исследовательских работ в этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Г.Н. Грязин (1983 г.), Е.Г. Лебедько (1985 г.), Э.Д. Панков (1986 г.), Г.Г. Ишанин (1988 г.), защищено много диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В этот период под руководством Э.Д. Панкова начали проводиться исследования по разработке новых оптико-электронных систем измерения взаимного положения разнесенных в пространстве объектов.

Г.Н. Грязин, перешедший на кафедру с радиотехнического факультета в конце 60-х годов, продолжил свои работы в области прикладного телевидения, в частности, по разработке систем наблюдения за быстродвижущимися объектами и быстропротекающими процессами.

С 1975 года заведующим отраслевой лабораторией стал старший научный сотрудник А.Н. Тимофеев, который продолжил исследования по разработке методов и средств контроля пространственного положения объектов с помощью ОЭП с оптической равносигнальной зоной для машиностроения, энергетики, строительства, судостроения и железнодорожного транспорта.

С 1975 года, после увольнения в запас, из Ленинградской военной инженерной краснознаменной академии (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского на

кафедру пришел работать в должности профессора С.П. Авдеев, известный специалист в области ОЭПиС космических аппаратов. Он поставил курсы и читал лекции по учебным дисциплинам «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные приборы систем управления», «Оптико-электронные приборы для научных исследований».

Существенное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре лауреата Ленинской и Государственной премий профессора Б.А. Ермакова, известного специалиста в области физической оптики и оптико-электронного приборостроения. Б.А. Ермаков работал на кафедре ОЭП с 1979 года по 1992 год в должности профессора по совместительству и поставил курс «Оптико-электронные приборы с лазерами».

В 70-80 годах под руководством доцента Е.Г. Лебедько проводились исследования законов отражения лазерного излучения от нестационарных поверхностей и протяженных объектов, исследования в области теории идентификации объектов по их излучению в сложной фоновой ситуации. Создан комплекс для лазерной локации крупногабаритных морских объектов сложной конфигурации и водной поверхности. В этих работах принимали участие доценты О.П. Тимофеев и С.Б. Лукин.

В 70-90 годах под руководством Л.Ф. Порфирьева был разработан ряд астродатчиков, систем астроориентации и космической навигации (В.И. Калинин, А.Л. Андреев, С.Н. Ярышев).

С 1992 г. заведующим кафедрой является заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Э.Д. Панков. В 1992 году кафедра была переименована в кафедру оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС).

Под руководством Э.Д. Панкова в 70-90-х годах были проведены разработки ряда оптико-электронных приборов и систем специального и гражданского применения, нашедших практическое внедрение и способствующих научно-техническому прогрессу и укреплению обороноспособности нашей страны.

В частности, исследования и разработки в области линейных и угловых измерений позволили приступить к решению общей проблемы согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах с помощью оптико-электронных систем.

В рамках указанной проблемы доцентом И.А. Коняхиным проводились исследования, результаты которых можно классифицировать как разработку теории построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации.

В то же время доцентом В.В. Коротаевым разработан ряд поляризационных приборов и измерительных установок. Теоретическим результатом работ явилась разработка методологии анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией

элементов. По результатам указанных работ В.В. Коротаев (в 1997 г.) и И.А. Коняхин (в 1998г.) защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Применение многоэлементных приемников в системах пеленгации дало толчок развитию телевизионных систем технического зрения, измерительных телевизионных систем и систем обработки изображений. Результаты этих исследований были использованы доцентом А.Л. Андреевым при постановке учебных курсов «Оптико-электронные системы с ЭВМ», «Специализированные аппаратные и программные средства ОЭП», «Автоматизированные телевизионные вычислительные комплексы», а также доцентом С.Н. Ярышевым при постановке им в 1993 году учебной дисциплины «Видеотехника».

Указанные курсы обеспечиваются лабораторным практикумом на базе рабочих мест, оснащенных персональными компьютерами, объединенными в локальную сеть. Рабочие места оснащены аппаратными и программными средствами цифровой видеозаписи и обработки изображений. В этот период Г.Н. Грязиным были подготовлены дисциплины: «Телевизионные системы», «Прикладное телевидение и телевизионно-вычислительные комплексы» (совместно с А.Л. Андреевым).

На основе обобщения методик расчета оптико-электронных систем различного назначения и принципа действия в 1981 году были развернуты работы по созданию элементов систем автоматизированного проектирования ОЭП. За период с 1981 по 1987 год под руководством И.А. Коняхина были разработаны оригинальные пакеты прикладных программ расчета параметров систем измерения пространственного положения объектов.

Развитие компьютерной техники и программного обеспечения общего назначения позволило создать проблемно-ориентированное программное обеспечение поддержки проектирования ОЭП на системотехническом уровне.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 15 монографий, 11 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 110 кандидатов наук.

На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. Наибольший вклад в изобретательскую деятельность внес Э.Д. Панков - автор 123 изобретений, из которых 33 внедрены в промышленность.

При заявлении научно-педагогической школы «Оптико-электронное приборостроение» в 2009 году были сформулированы следующие основные научно-технические результаты, достигнутые в период с 1938 по 2009 годы:

– разработаны принципы построения военных оптико-механических приборов;

- разработаны принципы построения точных механизмов;
- разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;
- разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;
- разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;
- разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;
- разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

Основоположники научной школы:

- Солодилов Константин Евгеньевич, заведующий кафедрой с 1938 г. по 1942 г., профессор;
- Цуккерман Семен Тобиасович, заведующий кафедрой с 1947 г. по 1972 г., профессор;
- Мирошников Михаил Михайлович, директор ГОИ, д.т.н., профессор, профессор кафедры ОЭП с 1967 г. по 1978 г.; член-корреспондент Российской Академии наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии.
- Порфирьев Леонид Федорович, заведующий кафедрой с 1972 г. по 1992 г., д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.
- С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Коротаев.

На кафедре была открыта подготовка по новой специализации инженеров «Оптико-электронные приборы и системы обработки видеoinформации» и новая магистерская программа «Оптико-электронные методы и средства обработки видеoinформации».

В 2007 году был создан научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения (НОЦ ОЭП).

Научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию видеоинформационных и информационно-измерительных приборов различного назначения, высокоточных приборов для измерения линейных, угловых и других физических величин в промышленности, энергетике, на транспорте, а также систем технического зрения и обработки видеоинформации. К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ широко привлекаются студенты, аспиранты, молодые специалисты, молодые кандидаты наук. Научно-образовательный центр является активным участником Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Направления научных исследований кафедры ОЭПиС в 2007-2012 годах.

Развитие теоретических основ и принципов построения оптико-электронных приборов и систем, в том числе:

- видеоинформационных измерительных систем;
- видеоинформационных систем наблюдения;
- видеоинформационных импульсных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- комплексированных телевизионно-тепловизионных систем наблюдения;
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;
- автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов;
- фотометрических систем аттестации ОЭПиС, источников и приемников оптического излучения;
- систем лазерной локации с нестационарным облучением;
- ОЭС сепарации полезных ископаемых.

По результатам исследований в этот период на кафедре были защищены 14 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Идет активное пополнение преподавательского состава молодыми кандидатами наук. В настоящее время на кафедре работает 7 кандидатов наук в возрасте до 35 лет.

Мы занимаемся разработкой оптико-электронных приборов и систем в целом:

- системотехническое проектирование,
- разработка (выбор) оптической системы,

- разработка конструкции,
- разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,
- разработка программного обеспечения,
- сборка, юстировка, настройка и испытания.

Мы учим тому, что сами умеем делать!

По итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов СПб НИУ ИТМО 2007-2011 годов кафедра занимала призовые места.

С 2011 года подготовка бакалавров, магистров и специалистов на кафедре ОЭПиС осуществляется по Федеральным государственным образовательным стандартам третьего поколения (ФГОС).

Подготовка бакалавров по направлению:

200400 «Оптехника» (профиль - Оптико-электронные приборы и системы). Срок обучения - 4 года

Подготовка магистров по направлению:

200400 Оптехника.

Магистерские программы:

– Оптико-электронные методы и средства обработки видеоинформации

– Оптико-электронные приборы и системы безопасности

Срок обучения – 2 года.

Подготовка инженеров по специальности:

200401 -Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения.

Специализация:

– Оптико-электронные информационно-измерительные приборы и системы. Срок обучения – 5,5 лет.

Подробная информация о кафедре ОЭПиС имеется на сайте кафедры:
<http://oeeps.ifmo.ru/>

**Алексей Александрович Горбачёв
Валерий Викторович Коротаев
Сергей Николаевич Ярышев**

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МАТРИЧНЫЕ
ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
И КАМЕРЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО
Зав. РИО
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

А.А. Горбачёв, С.Н. Ярышев
Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий, механики
и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

