

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им.М.В.КЕЛДЫША  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

А.М.Овчинников, А.А.Ильин,  
М.Ю.Овчинников

**Принцип работы и  
устройство активно-пиксельных датчиков**

Москва

2003

## **Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков.**

А.М.Овчинников, А.А.Ильин, М.Ю.Овчинников. Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, Москва, 2003г., 30 страниц, 11 рисунков, 1 таблица, библиография: 21 наименований

Приборы на основе активно-пиксельных матриц пока не получили широкого распространения в России, поэтому информация об этих устройствах практически отсутствует в отечественных источниках. Работа представляет собой обзор некоторых публикаций, выполненных за рубежом в области активно-пиксельных технологий. Рассматриваются физические принципы работы и устройство активно-пиксельного сенсора, разработанного на базе КМОП-технологий, а также структура датчика в целом. Приведены примеры датчиков и результаты их работы. Проведено сравнение ключевых параметров активно-пиксельных датчиков и приборов зарядовой связи, а также выделены достоинства и недостатки приборов на базе активно-пиксельных сенсоров. Обзор поможет читателю получить первичные знания об активно-пиксельных приборах, их устройстве и применении.

**Ключевые слова:** активно-пиксельная матрица, КМОП-технология, сенсор

**Principles of Operation and Design of the Active-Pixel Sensors, A.M. Ovchinnikov, A.A.Ilyin, M.Yu.Ovchinnikov, Preprint of KIAM RAS, Moscow, 2003, 30 pages, 11 Figures, 1 table, 21 references**

Sensors based on the active-pixel matrix are not common used yet in Russia, their details are not available as well. The issue reviews a several papers on physical principles of operation and design of the active-pixel sensors (APS) developed abroad on the basis of the CMOS-technology. The design of sensors is considered also. A number of examples and results of their operation are presented. Key-parameters of APS and CCD-based sensors are compared. Advantages and drawbacks of APS are shown. The review allows readers to collect a starting knowledge in a new branch of the modern sensors and their applications.

**Key words:** Active-pixel matrix, CMOS-technology, sensor

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	4
2. Принцип работы активно-пиксельного датчика	5
2.1. Микролинзы и набор цветных фильтров	9
2.2. «Плюсы» и «минусы» уменьшения размера пикселя	12
3. Примеры активно-пиксельных датчиков	13
3.1 Активно-пиксельный датчик заряженных частиц MIMOSA	14
3.2 Активно-пиксельный датчик рентгеновского излучения DEPFET	17
4. Устранение искажений в активно-пиксельных датчиках, возникающих из-за шумов	19
5. Сравнение активно-пиксельных датчиков с приборами на основе зарядовой связи	22
6. Вместо выводов	24
7. Благодарности	28
8. Список литературы	29

## 1. ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени во всех цифровых фотоаппаратах и видеокамерах в качестве светочувствительных элементов использовались приборы с зарядовой связью, так называемые, ПЗС-матрицы. Изготовление подобных матриц всегда было технологически сложным процессом с большим процентом отбраковки (тем большим, чем больше размер матрицы) и осуществлялось ограниченным числом производителей, причем, сравнительно небольшими партиями. Все это определяло и до сих пор определяет высокую стоимость матриц, нелинейно возрастающую при увеличении их размеров, и как следствие, - удорожание фотоаппаратов с высоким разрешением.

В настоящее время наряду с традиционными ПЗС начинают использоваться активные пиксельные датчики CMOS APS (CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor, APS - Active Pixel Sensor), основанные на сенсорах, созданных на комплиментарных структурах металл-окисел-полупроводник (КМОП) [1-3]. Комплиментарная структура - это чип, построенный по схеме, в которой р-канальные и n-канальные полевые транзисторы используются парами и взаимно дополняют друг друга.

Каждый пиксель активно-пиксельного сенсора изображения в отличие от ПЗС-матриц содержит не только фотодетекторный элемент (фотодиод или фотозатвор (photogate)), но также и активно-транзисторную схему («обвязку») для считывания сигнала с пикселя. Технология КМОП позволяет интегрировать всю систему формирования изображения, включая массив светочувствительных элементов и управляющие схемы, на одном кристалле кремния. Преимущества такой структуры были известны в теории с 60-х годов, но их не удавалось реализовать вплоть до 1993 года, когда впервые Лаборатория реактивного движения NASA (Jet Propulsion Laboratory) успешно внедрила активно-пиксельную технологию.

Датчики, основанные на активно-пиксельных матрицах, находят все более широкое применение в странах Западной Европы, Юго-Восточной Азии, США, в медицине, науке, камерах слежения, в космической промышленности, игрушках [4]. В России такие приборы пока не получили широкую известность и не используются даже в том объеме, в котором нашли применение приборы, основанные на технологии накопления заряда.

## **2. ПРИНЦИП РАБОТЫ АКТИВНО-ПИКСЕЛЬНОГО ДАТЧИКА**

Рассмотрим, как работает активно-пиксельный датчик. Функциональная схема работы представлена на рис.1. Схема является довольно общей и служит для объяснения принципиальной работы активно-пиксельной камеры.

При открытом затворе фотоны собираются на сенсоре, то есть происходит накопление фотонов в каждом пикселе датчика - при помощи линзы, установленной на каждом пикселе, концентрируются в фоточувствительную область пикселя (структура различных типов чувствительных элементов пикселя представлена на рис.5). При этом происходит фильтрация цвета (подробнее см. ниже в разделе о светофильтрах), то есть в одном пикселе происходит накапливание красных фотонов, в другом - синих и в третьем – зеленых. Фотон, попадая на фотодетектор фотодиода, выбивает электроны, которые накапливаются в, так называемых, потенциальных ямах, накопленные электроны создают разность потенциалов. По синхронизирующим сигналам с генератора импульсов происходит одновременное считывание накопленных зарядов - всех или из отдельных пикселей, указанных оператором. Полученный сигнал слишком мал для самостоятельного использования, поэтому он проходит через усилитель. После этого происходит обработка аналогового сигнала и преобразование аналогового сигнала в цифровой. Затем в цифровом



Рис.1. Роль КМОП-датчика в цифровой камере

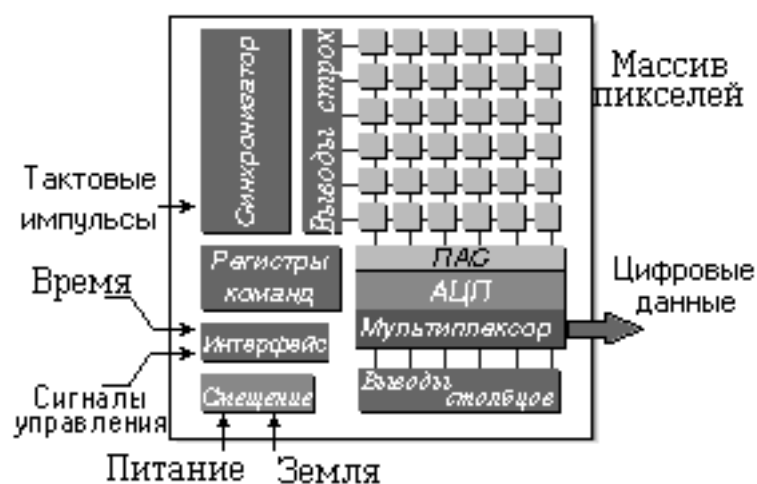


Рис.2. Архитектура КМОП датчика

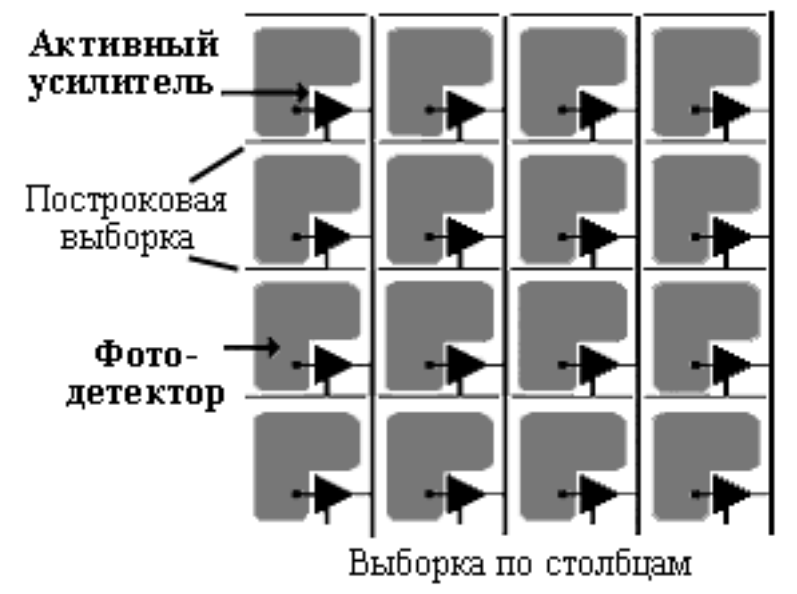


Рис.3. Структура КМОП-сенсора (схема)

процессоре сигналов или с помощью специального программного обеспечения происходит интерполяция и коррекция цветов, разумеется, если рассматриваемая нами камера не является монохромной. Затем полученные данные преобразуются в формат, с которым можно работать пользователю, и выводятся на экран монитора, либо записываются на электронно-магнитные носители.

Структура активно-пиксельного датчика представлена на рис.2. Каждый из массива пикселей имеет выводы на сетку металлических проводников, что позволяет временным, считывающим и выходным сигналам проходить по всем ячейкам. Выводы данной сетки подсоединены к считывающим и декодирующим элементам, которые располагаются вне массива пикселей. Такая архитектура позволяет считывать данные со всего массива пикселей, с некоторых частей этого массива и с отдельных пикселей с использованием простой XY адресации, что невозможно в ПЗС-матрицах. Структура КМОП-сенсора и его увеличенная фотография представлены на рис.3 и рис.4.

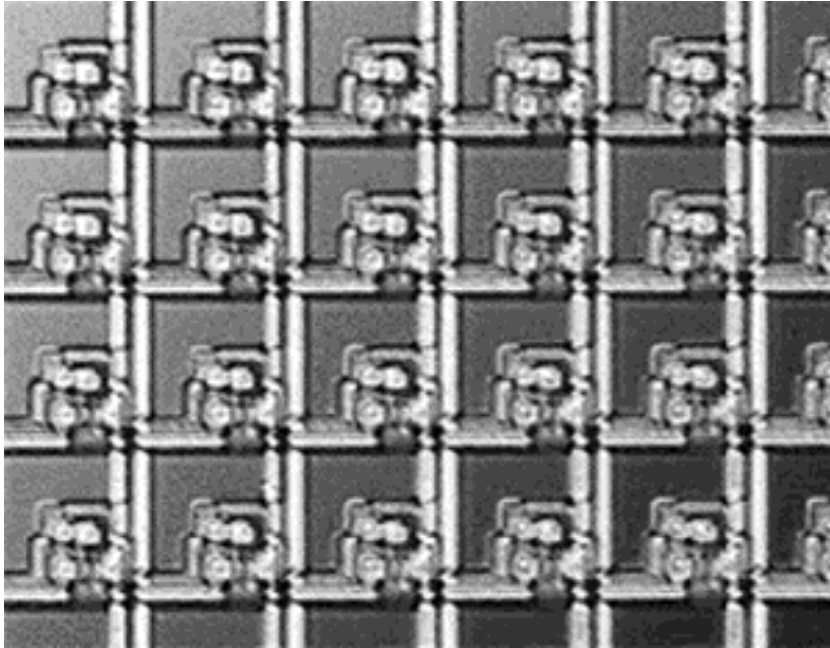


Рис.4. Структура сенсора (увеличенная фотография).

Реальный размер одной ячейки приблизительно равен 15 мкм

Согласно принятой терминологии, активный пиксель – это пиксель, содержащий рассеивающий мощность элемент. В большинстве случаев в роли активного элемента выступает MOSFET в усилительной или буферной конфигурации. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) - это тип транзистора, основанный на структуре металл-оксидного полупроводника. Ток между эмиттером и коллектором протекает через инверсный слой, управляемый напряжением на базе. Наличие только одного транзистора типа MOSFET, играющего роль только переключателя, не делает пиксель “активным”.

В прежние времена MOSFETs изготавливался как “слоеный пирог” из алюминия (металл) и оксида кремния (оксид) на подложке из кремния (полупроводник). В настоящее время алюминий в большинстве случаев заменяется на поликристаллический кремний, но прежнее название сохранено. Другими словами, сейчас разрабатывают и работают с POSFET-транзисторами (P-polycrystalic) и с датчиками изображения CPOS



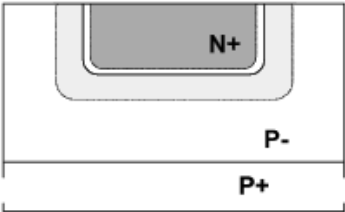

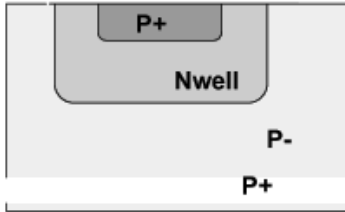
Photodiode	Photo gate	Photo transistor (BJT)
		
<p>p-n переход или p-i-n переход</p>	<p>Инверсный слой (P-) - подложечный переход</p>	<p>Переход исток-подложка + внутренний усилитель</p>

Рис.5. Структура чувствительного элемента фотодатчиков

(Complementary Polycrystalline Oxide Semiconductor).

Таким образом, активный пиксель есть единичный элемент твердотельной решетки, обладающий фотоэлектрической передаточной функцией при действии светового электромагнитного излучения. При этом у каждого пикселя появлялся свой считывающий транзисторный усилитель (readout amplifier transistor), что позволяет “преобразовывать” заряд в напряжение непосредственно на пикселе. Усиливающие же схемы могут быть расположены в любом месте чипа, а не только на светочувствительной области. Это позволяет создавать несколько каскадов усиления по всему сенсору. Так, например, в темных условиях усилители могут «вытягивать» изображение целиком, а в иных случаях могут усиливать лишь определенные цвета или области изображения.

## 2.1. МИКРОЛИНЗЫ И НАБОР ЦВЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Микролинзы концентрируют свет в фоточувствительную часть каждого пикселя. Это позволяет увеличить фактор заполнения (fill-factor).

Металлический непроницаемый слой не позволяет фотонам проникать в кремниевую подложку, создавая дополнительный заряд, и тем самым наводя

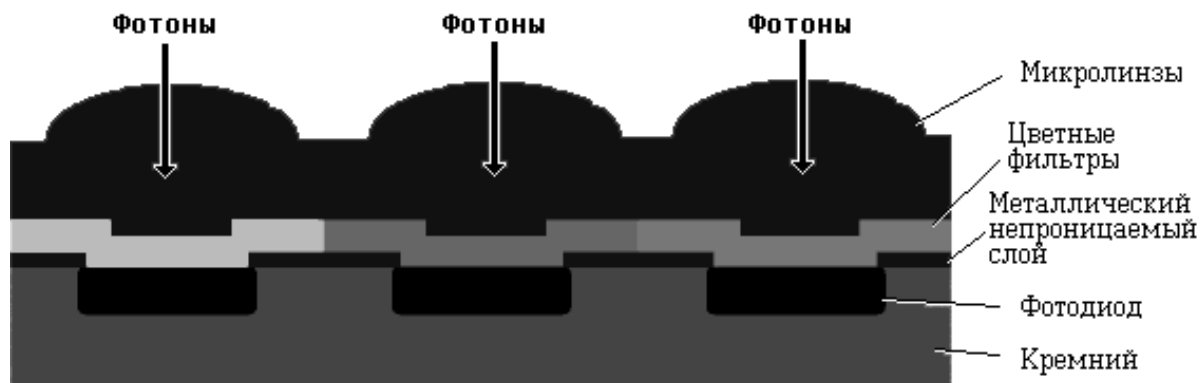


Рис.6. Структура микролинз и набора цветных фильтров

помехи (шумы) на выходной сигнал с каждого пикселя. Структура микролинза – цветной фильтр – фотодиод представлена на рис.6.

На своем пути фотоны света проходят сквозь массив цветных фильтров (color filter array), где начинается процесс получения цвета для, по сути своей, «монохромного» чипа. В действительности, «панхроматический» более подходящий термин, с тех пор как сенсоры стали способны работать со всем спектром. Слово «монохромный» пришло из телевидения и имеет смысл черного и белого.

Выбор цвета из света, падающего на сенсор, означает способность к отдельному выделению красных (red = R), зеленых (green = G) и синих (blue = B) фотонов. Для этого каждый пиксель цветного сенсора имеет красный, зеленый или синий фильтр в соответствии со специальной конфигурацией. Такой порядок или очередность фильтров может изменяться, но конфигурация массива цветных фильтров фирмы «Bayer»

```
G R G R G R G R G R
B G B G B G B G B G
G R G R G R G R G R
B G B G B G B G B G
```

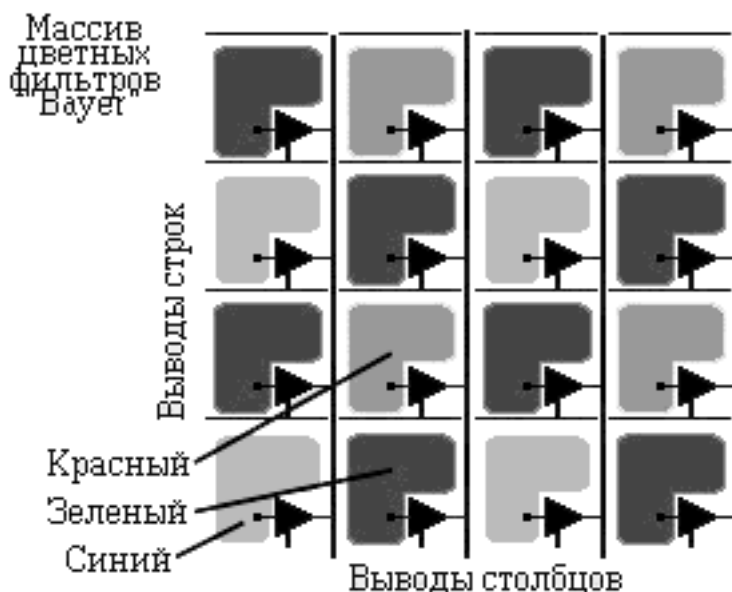


Рис.6. Схематичное изображение расположения цветных фильтров фирмы «Bayer» на активно-пиксельном сенсоре

которая была давно разработана и является повторяющейся матрицей 2x2 (на схеме, представленной выше, изображена повторяющаяся последовательность данной матрицы), получила наиболее широкое распространение (рис.6).

Когда датчик изображения считывает линию за линией, последовательность пикселей будет такой: GRGRGR и т.д. Другая же считанная линия будет выглядеть так: BGBGBG и так далее. Такой выход называется последовательным RGB (sequential RGB = sRGB) сигналом.

С того времени, когда каждый пиксель был сделан восприимчивым только к одному цвету (одной спектральной линии), общая чувствительность цветного сенсора стала приблизительно в 3 раза ниже по сравнению с монохромным (панхроматичным) сенсором. В результате монохромные сенсоры больше подходят для применения в областях с малым освещением, например в камерах наблюдения в службе безопасности. Вот почему человеческий глаз в темноте «переключается» и видит в черно-белом диапазоне [5].

## 2.2. «ПЛЮСЫ» И «МИНУСЫ» УМЕНЬШЕНИЯ РАЗМЕРА ПИКСЕЛЯ

Чем больше пиксель, тем больше света он сможет собрать. Большие пиксели лучше работают в условиях плохой освещенности. Для одинакового количества пикселей из больших получается чип большего размера, а соответственно и более дорогой. Чем больше видимая область, тем больше линзы. Соответственно, они стоят дороже. С другой стороны, пиксели меньшего размера позволяют создавать чипы меньшего размера и, соответственно, они стоят дешевле. Это же относится и к линзам.

Когда архитектура КМОП активного пикселя была впервые реализована, использовались большие пиксели размером 40 микрон по длине и по ширине. Такие пиксели все еще используются для съемки рентгеновских лучей и в других специальных областях. Постепенно разработчики достигли размера в 20, потом в 12, а затем и в 10 микрон, после чего толщина пикселя в сенсорах промышленного производства достигла 7.9 микрон. Такой размер позволял применять общепринятую 1/3-дюймовую оптику.

Тем не менее, все еще существуют ограничения на уменьшение размера пикселя. Во-первых, маленькие пиксели менее чувствительны к свету (хотя эту проблему можно решить при помощи микролинз). Во-вторых, при достижении размера приблизительно в 5 микрон, оптический элемент, присутствующий на пикселе, значительно удорожает его общую стоимость. Хотя малогабаритная оптика стоит меньше, микролинзы, которые позволяют сохранить приемлемые характеристики, имеют слишком большую стоимость. В-третьих, изготовление таких маленьких пикселей требует более дорогой технологии производства, что также увеличивает конечную стоимость сенсора, даже если сам чип мал.

### 3. ПРИМЕРЫ АКТИВНО-ПИКСЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

В настоящее время активно-пиксельные датчики используют при проведении видеоконференций между персональными компьютерами, в цифровых фото и видеокамерах, медицинских инструментах, игрушках и в автомобилестроении. Разнообразие КМОП-архитектур объясняется возможностью сенсоров выполнять большое число различных функций.

Первая корпорация, которая получила эксклюзивную лицензию на новый тип датчика изображений, разработанного в JPL была Photobit.

Первый фотоаппарат, разработанный на основе КМОП-микросхем, был представлен фирмой Vivitar и назывался ViviCam-3000 [1]. При весьма достойном разрешении 960x800 пикселей и добротном наборе функций он был выставлен по цене камер более низкого уровня - до 600 долларов. Однако большое количество искажений вынуждало применять весьма сложную схему предварительной обработки для выделения картинки из исходного сигнала. Эта схема включала в себя: четырехцветный сенсор RGBT (кроме традиционных Red - красного, Green - зеленого, Blue - синего цветов дополнительно использовался Teal - сине-зеленый), 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь для каждого цвета, сложное программное обеспечение, занимавшее 2 Мбайт встроенной оперативной памяти камеры (из доступных 2,5 Мбайт), специальный процессор, выполнявший за 20-30 с (таким был минимальный интервал между последовательными кадрами) более 600 миллионов инструкций в процессе перевода изображения из 10-битового RGBT-формата в требуемый 8-битовый RGB-формат. Программное обеспечение этой камеры также производило сжатие получаемых изображений по методу Wavelet [6].

В будущем КМОП-матрицы неизбежно будут иметь существенно более высокое качество съемки и большая часть в настоящее время необходимой математической обработки станет излишней. Учитывая уникальность

показателя цена/качество, не приходится сомневаться в исходе конкурентной борьбы КМОП против ПЗС.

Статьи об активно-пиксельных датчиках в западной научной литературе в основном описывают устройство, особенности реализации и характеристики опытных приборов, уже созданных или находящихся в стадии разработки. Описания серийно изготавливаемых приборов можно найти в Интернете. Такая информация, как правило, носит рекламный характер. Рассмотрим конкретные датчики с активными пикселями, которые можно подразделить на типы:

- MAPS - Monolithic Active Pixel Sensor
- HAPS - Hybrid Active Pixel Sensor

MAPS-детектор изготавливается так, что электроника считывания изображения и управления интегрированы на одном чипе. Представитель этого семейства – описанный ниже датчик MIMOSA.

HAPS-приборы состоят из нескольких чипов, которые выполняют различные функции; например один чип содержит матрицу пикселей, другой усиливает сигнал и т.д. Прибор, построенный по такому принципу, - это рентгеновский датчик, использующий матрицу DEPFET [7].

### **3.1. АКТИВНО-ПИКСЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ MIMOSA**

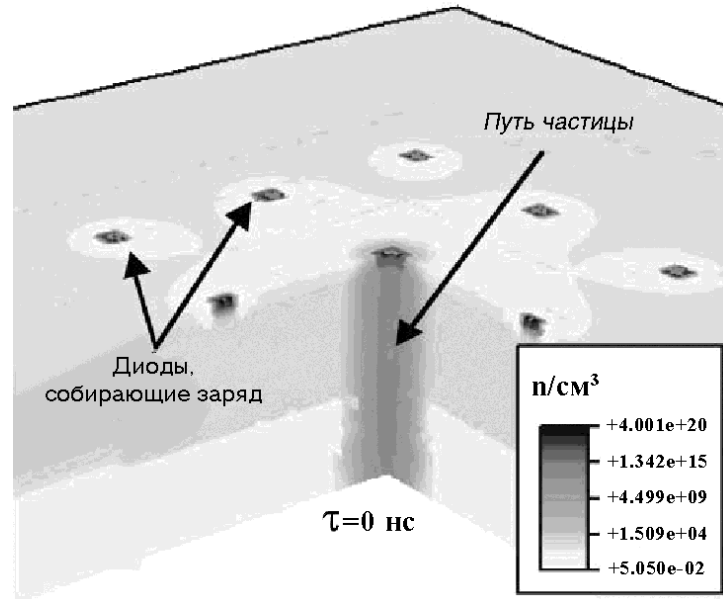
Описываемый далее датчик является координатно-чувствительным детектором для трекинга заряженных частиц, обладающих высокой энергией. Его название расшифровывается как Minimum Ionising Particles MOS Active Pixel (MIMOSA). Этот датчик и его применение описаны во многих статьях, например, в [8-10]. Прибор относится к типу MAPS, то есть его электроника для регистрации частицы и считывания интегрирована на одной и той же подложке из кремния.

Чувствительным элементом датчика является фотодиод. Сбор заряда в таком детекторе происходит относительно быстро и занимает около 100 нс.

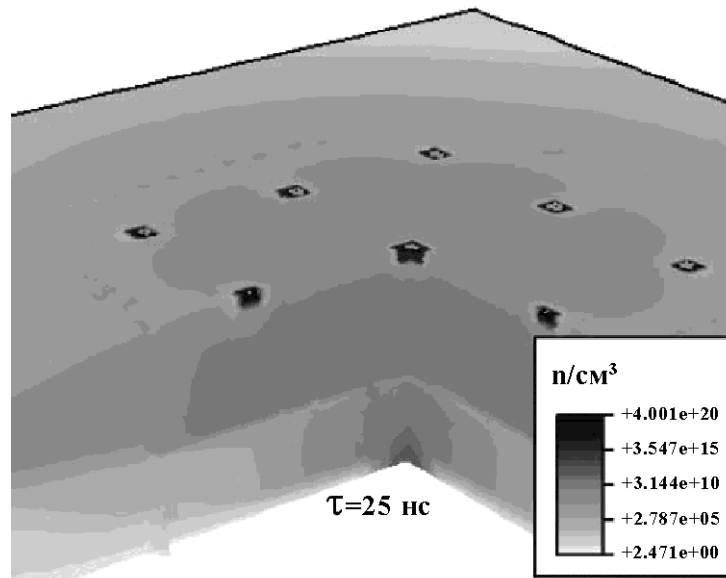
Сенсор состоит из 4-х независимых массива пикселей, каждый из которых содержит 4096 пикселя, собранных в 64 столбца и 64 строки. Сам пиксель имеет размер 20 мкм по длине и ширине. Отдельные пиксели опрашиваются последовательно с частотой 2.5 МГц и внешний 12-битовый АЦП оцифровывает построчно аналоговый сигнал из каждого пикселя. Данные из 2 последовательных кадров (8092 частей) содержатся в ОЗУ. Опрос прекращается после того как появляется частица. С задержкой в 1.6 мс после окончания считывания, сигнал с каждого пикселя вычисляется по абсолютной величине как разница между данными из последовательных кадров, то есть до и после прибытия. Оба кадра синхронизированы по циклу сброса. Такой метод считывания, похожий на коррелированное дублирование, исключает смещение постоянной составляющей дисперсии между пикселями, убирает главный источник шума - так называемый kTC noise (шум сброса), который появляется во время очистки пикселя и эффективно подавляет другие коррелированные шумы. После этого сигнал, полученный под действием частицы, легко снимается [8].

Свободные электроны, созданные пролетающей частицей, собираются фотодиодом (рис.7) от тонкого частично обедненного эпитаксиального кремниевого слоя, допускающего 100%-ный фактор заполнения (fill-factor).

Критические параметры КМОП-сенсора - время и эффективность собирания заряда. Эти факторы, несмотря на бесспорные преимущества КМОП-детектора, могут ограничивать их действия. В работе [10] было проведено трехмерные моделирования процесса сбора заряда. Вследствие тепловой диффузии, более 1000 электронов концентрируются в группе пикселей 3×3 за время 100 нс в толстом 15-микронном эпитаксиальном слое. Результаты моделирования были сравнены с измерениями, выполненными на опытном образце MIMOSA при использовании в качестве источника



(a)



(b)

Рис.7. Моделирование распространения заряда при пролете одной частицы. Концентрация плотности электронов во время пролета частицы (a) и на 25 нс позднее (b)

возбуждения или быстрого инфракрасного лазера или пучка частиц высокой энергии.



### 3.2. АКТИВНО-ПИКСЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ DEPFET

Датчик DEPFET является датчиком рентгеновского излучения, который принадлежит семейству КМОП и позволяет измерить положение, время прибытия и энергию с достаточно высокой точностью в диапазоне от 0.1 до 30 keV [7,11,12]. DEpleted P-channel Field Effect Transistor (DEPFET) является низкошумовым пиксельным датчиком, разрабатываемым совместно Университетом г. Бонна и лабораторией полупроводников Института им.Макса Планка в Мюнхене.

Этот прибор относится к семейству HAPS и для него используется DEPFET-матрица размером 64×64 пикселей. Размер одного пикселя 50×60 мкм. Чувствительная область этого прибора составляет 3.2×3.84 мм. Обычный цикл считывания информации со всех 4096 пикселей составляет около 1 мс.

В DEPFET-датчике полевой транзистор интегрирован в кремниевую основу с высоким сопротивлением. Подложка датчика (рис.8) толщиной 300 микрон обедняется так, что потенциальный минимум для электронов формируется внутри силиконовой прослойки под каналом полевого транзистора.[13] Зарядовые сигналы, сгенерированные в подложке, собираются во «внутренний выход» и напрямую модулируют транзисторный ток, индуцируя дополнительный заряд в *p*-канале полярного транзистора. Накапливая сигнальные электроны также как и термически сгенерированные электроны, потенциальный минимум увеличивается со временем и должен быть «очищен». Были созданы и успешно опробованы два типа механизма «очистки». В методе «непрерывной очистки» собранные электроны непрерывно удаляются с помощью «механизма пробоя» [14]. Метод «импульсной очистки» использует короткий положительный импульс, приложенный к выделенному *p*-контакту, для периодической очистки

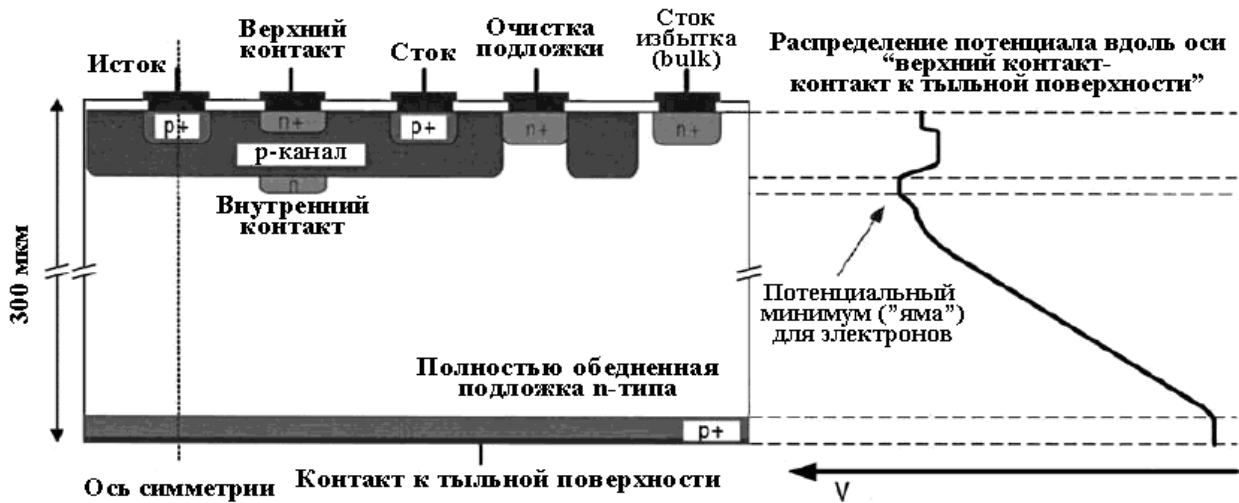


Рис.8 Кольцевой импульсный DEPFET в разрезе. Потенциал, распределенный вдоль оси «верхний вход – контакт к тыльной поверхности», показывает потенциальный минимум для электронов под каналом полевого транзистора

«внутреннего выхода». Для единичных пикселей фототипа эквивалентный шумовой заряд (equivalent noise charge (ENC)), измеренный при комнатной температуре (300K), в зарядах электронов  $e$  составляет  $22e$  для метода «непрерывной очистки» и  $ENC=19e$  для метода «импульсной очистки» [7,15].

DEPFET-датчик предполагается использовать в проекте XEUS (X-ray Evolving Universe Spectroscopy mission) изучения спектра Вселенной с помощью рентгеновских лучей [12,16]. Запуск спутника предполагается в 2010 г. Проект рассматривается как часть программы ESA's Horizon 2000 в рамках проекта Международной Космической Станции (МКС).

Другое применение этого датчика - система Bioscope, предназначенная для биомедицинских приложений [7].

На рис.9 представлено рентгеновское изображение маленькой гайки из латуни, полученное с помощью датчика DEPFET (диаметр отверстия около

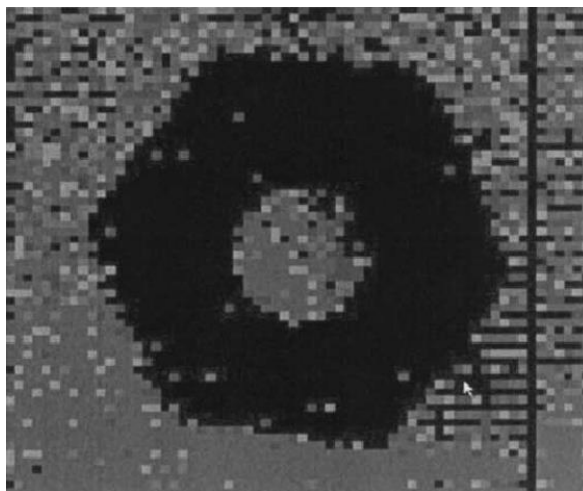


Рис 9. Рентгеновское изображение маленькой гайки (диаметр отверстия составляет 1 мм), полученное с помощью датчика DEPFET

1 мм). Гайка расположена непосредственно перед детектором и освещается источником  $\gamma$ -излучения  $^{55}\text{Fe}$ . при отсутствии оптической фокусировки изображения. На рисунке представлены измерения отдельных пикселей, без какой бы то ни было математической обработки измерений. Пороговое значение заряда было выбрано  $900e$ , что соответствует  $7\sigma$  от шума измерений. Наличие большого количества шумов в активно-пиксельных датчиках является одной из основных проблем. Рассмотрим ее подробнее.

#### **4. УСТРАНЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ В АКТИВНО-ПИКСЕЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ИЗ-ЗА ШУМОВ**

Шумом называется [17] любой источник неопределенности сигнала. Параметр, описывающий относительную величину шума, определяется отношением сигнал/шум ( $S/N$ ) и измеряется в децибелах -  $20\log(S/N)$ . Так, например, соотношение сигнал/шум, равное 60 дБ, означает, что сигнал в 1000 раз больше шума. Из формулы становится ясно, что большей величине  $S/N$  соответствует меньший шум, то есть более качественный сигнал. Можно выделить следующие некоторые типы шумов:

1) *Фотонный шум*. Является следствием дискретной природы света.

2) *Шум темнового сигнала*. Даже при отсутствии на входе матрицы светового сигнала (например, плотно закрытый светонепроницаемой крышкой объектив) на выходе системы будут так называемые темновые кадры. Основной составляющей темнового сигнала является термоэлектронная эмиссия. С понижением температуры уровень темнового сигнала снижается. Заметим попутно, что определенное снижение этого шума возможно за счет более эффективного охлаждения матрицы.

3) *Шум считывания*. Когда сигнал, накопленный в элементе (ячейке), считывается из матрицы, преобразуется и усиливается, то в каждом элементе появляется дополнительный шум — шум считывания. Это базовый уровень шума, присутствующий в изображении даже с нулевым уровнем экспозиции, когда матрица находится в полной темноте и шум темнового сигнала тоже равен нулю.

4) *Шум сброса* или кТС-шум. Перед вводом сигнального заряда в детектирующий узел необходимо вывести предыдущий заряд, для чего используется транзистор сброса. Электрический уровень сброса зависит только от температуры и емкости детектирующего узла, что вносит шум.

Естественно, что с совершенствованием технологий уровень шума станет снижаться, однако абсолютного нуля он не достигнет в силу природы используемых сейчас светоприемников.

Устранение искажений в активно-пиксельных приборах продемонстрируем на примере детектора заряженных частиц, описанного в [18]. Прибор состоит из прямоугольной матрицы  $512 \times 490$  активных пикселей размером  $14 \times 14$  микрон каждый. Характеристики каждого из активных пикселей не являются строго одинаковыми [19]. Вариации характеристик пикселя приводят к появлению на изображении шума (рис.10 (a)). Такой тип шума зависит только от положения пикселя и не зависит от

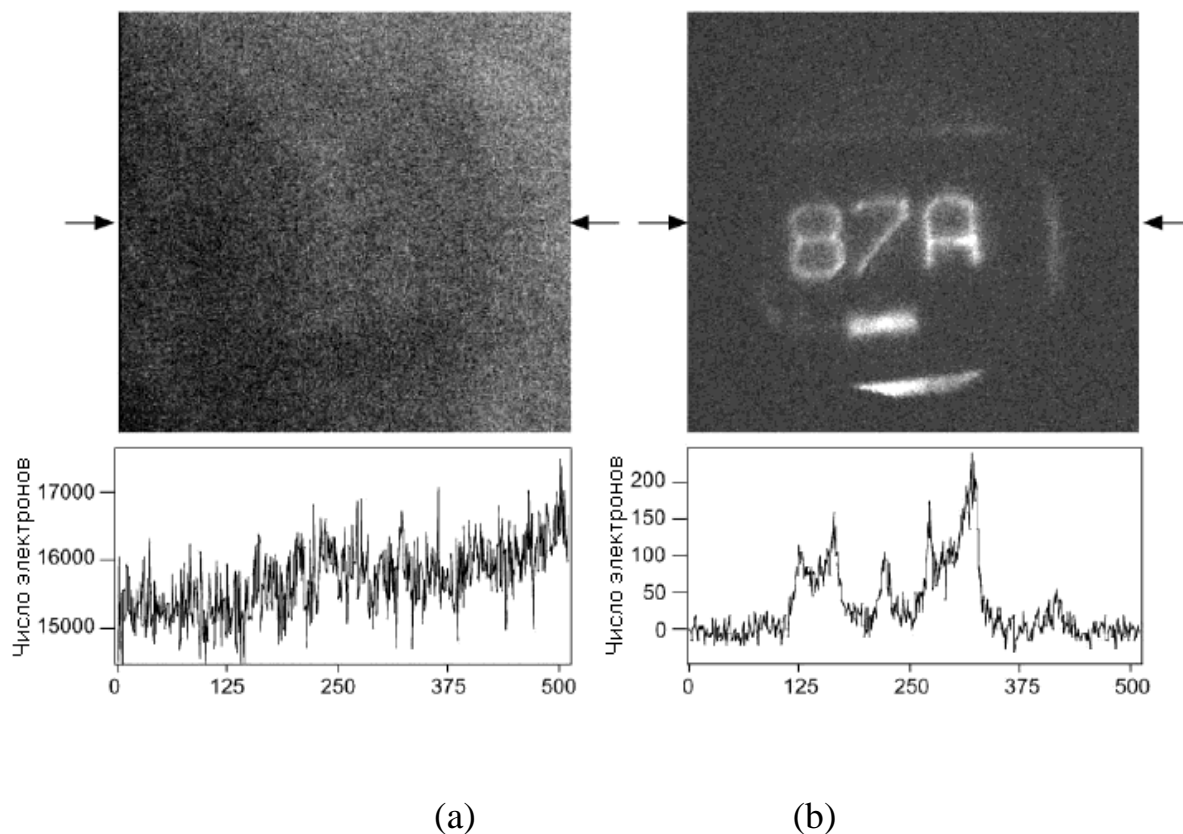


Рис.10 Применение калибровки КМОП-датчика. (a) – грубое изображение, полученное после освещения кремниевой подложки ионами; (b) – изображение подложки после коррекции

времени. Его называют fixed-pattern noise (FPN). Стандартное значение этого шума равно  $600e$ , что составляет 0.43% от уровня насыщения.

Шум FPN может быть подавлен, если заранее выявить характеристики каждого пикселя с целью последующей корректировки поступающего от него сигнала. Эта процедура называется калибровкой. На рис.10 иллюстрируется применение калибровки КМОП-датчика. На рис.10 (a) показано грубое изображение полученное после освещения кремниевой подложки ионами  $^{27}\text{Al}^+$  с энергиями 4.5 КэВ. На рис.10 (b) изображена подложка после коррекции.

Заметим, что в нашей работе не рассматриваются примеры и способы уменьшения и полного удаления всех шумов, присущих активно-пиксельным датчикам.

## 5. СРАВНЕНИЕ АКТИВНО-ПИКСЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ С ПРИБОРАМИ НА ОСНОВЕ ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗИ

Главным недостатком активно-пиксельной технологии являются помехи, возникающие из-за добавления дополнительных элементов на чип. Это - транзисторные и диодные рассеивания, эффект остаточного заряда и многие другие. Устранением таких помех разработчики занимаются уже давно. В настоящее время создатели разработчики активно-пиксельных датчиков научились непосредственно на чипе устранять шум теневого тока из заряда перед тем, как передать его с сенсора.

Подобно ПЗС, КМОП-сенсоры используют массив фотодиодов для перевода света в электрический сигнал. Этот маленький электрический заряд, генерируемый фотодиодом, накапливается в конденсаторе. Заряд слишком слабый, чтобы быть использованным для самостоятельного использования, и нуждается в усилении до приемлемого для работы с ним уровня.

Главным различием между ПЗС и КМОП-сенсором – это способ перевода накопленных зарядов в сигналы, которые подлежат обработке. ПЗС-матрица считывает пиксели непрерывно. Сохраненные заряды из каждой строки фактически сдвигаются к следующей строке (так называемая «зарядовая связь») (см. рис.11) и по общей шине заряды выводятся последовательным потоком данных. Уровень напряжения каждого пикселя в последовательном потоке повышается усилителем, установленном на чипе перед выходом, и далее направляется к внешнему или внутреннему аналого-цифровому преобразователю (АЦП), где сигналы преобразуются в массив байтов, из которых создается изображение.

Каждый пиксель в КМОП-сенсоре имеет свою собственную усилительную схему (см. рис.11 – MOS-активный пиксель), поэтому усиление сигнала происходит еще до считывания изображения.



Рис.11. Сравнение ПЗС-элемента ( CCD), MOS-пассивного пикселя и MOS-активного пикселя.

Получившийся сигнал достаточно мощный, чтобы быть использованным без какого-либо дальнейшего усиления. В отличие от ПЗС, КМОП-сенсоры часто имеют дополнительную схему обработки изображения, включая аналого-цифровые преобразователи и процессоры сжатия прямо на чипе, делая процесс считывания и обработки изображения более быстрым и простым. Все это выражается в менее мощном чипе, увеличенной надежности, уменьшенном потреблении энергии и более компактном дизайне [20].

Появилась возможность произвольного доступа к каждому пикселю сенсора - подобно тому, как работает оперативное запоминающее устройство (по параллельной схеме). Такой доступ позволяет КМОП-сенсору считывать не всю матрицу целиком, а лишь некоторые области. Этот метод называется *методом оконного считывания* (window-of-interest, windowing readout).

Представленный на рис.11 MOS-пассивный пиксель на практике представляет собой сенсор, подобный активно-пиксельному сенсору, но лишенный столь важных свойств последнего. Такие сенсоры часто называют микроканальными пластинами (МКП) или просто массивом диодов.

КМОП-сенсор способен также уменьшить размер изображения. По сравнению с ПЗС-датчиками при этом также увеличивается скорость считывания (в ПЗС-датчиках весь заряд выходит через единственный сдвиговый регистр). Кроме того, имеется возможность встраивания в каждый

пиксель аналого-цифрового преобразования и первичной обработки изображений.

Еще одно преимущество активно-пиксельной технологии состоит в том, что значительно снижается потребляемая мощность и уменьшается число составных частей, необходимых для сборки готовых изделий. Поскольку одна микросхема выполняет все функции камеры от регистрации фотонов до побитового формирования кода изображения, то устройства, основанные на технологии КМОП, отличаются повышенной надежностью.

При всех вышеописанных достоинствах главным же преимуществом КМОП-датчиков является их стоимость. КМОП - это стандартная технология изготовления микросхем, микроконтроллеров, микропроцессоров, освоенная тысячами производителей. Также, матрица пикселей может быть размещена на одной «платформе» вместе с элементами цифровой электроники, формирователем тактовых импульсов, АЦП, что является большим преимуществом над ПЗС-датчиками. И когда КМОП-кристаллы станут широко использоваться в качестве регистрирующих элементов высокоразрешающих цифровых камер, цена последних станет действительно настолько низкой, что пленочные фотоаппараты, возможно, станут раритетом.

## **6. ВМЕСТО ВЫВОДОВ**

Подведем некоторые итоги обзора. Представим их в форме таблицы. В первом столбце выделим вопросы, на которые нельзя дать однозначный ответ «да» или «нет». Вопросы, представленные в таблице, являются одними из основополагающих при выборе активно или пассивно-пиксельной технологии для практического применения, научных исследований или других задач. Во втором столбце даны варианты ответов. В третьем столбце, по возможности, даны факторы, которые необходимо учитывать при выборе ответа [21].



Предмет рассмотрения	Варианты ответов	Учитываемые аргументы
Приборы с зарядовой связью или КМОП	<p>Приборы с зарядовой связью и им подобные.</p> <p>Микроканальные пластины (массив фотодиодов).</p> <p>Активные КМОП матрицы.</p>	<p>Область применения.</p> <p>Цена.</p> <p>«Качество» технологии.</p>
КМОП-активные или пассивные матрицы	<p>Микроканальные пластины (массив фотодиодов).</p> <p>Много видов активных матриц.</p>	<p>Устойчивый и многофункциональный или простой выход.</p> <p>Шум, соотношение сигнал/шум.</p> <p>Остаточный заряд.</p>
Тип фотодатчика	<p>Фотодиод.</p> <p>Фотозатвор.</p> <p>Фотобиполярный плоскостной транзистор</p> <p>Скрытый диод.</p>	<p>Стандартный КМОП.</p> <p>Чувствительность.</p>
Сложные активные матрицы	<p>Активно-пиксельные матрицы токового режима.</p> <p>Емкостная обратная связь.</p> <p>Отмена смещения.</p> <p>Точное смещение.</p>	<p>Необходимость (требования) или размер пикселей и другие сложности.</p>

<p>1-, 2-, 3-, 4- транзисторные активные пиксели</p>		<p>Функциональность или размеры.</p>
<p>Логарифмическая характеристика пикселя</p>	<p>Линейная (классическая). Логарифмическая.</p>	<p>Высокая динамика, но низкое соотношение сигнал/шум.</p>
<p>Высокий фактор заполнения</p>	<p>Метод разработки, при котором элементы системы проектируются таким образом, что их взаимодействие основано на точно определенных характеристиках. Микролинзы.</p>	<p>Цена производства. Низкое диафрагменное число (объектива).</p>
<p>Электронный оптический затвор</p>	<p>Затвор с регулируемыми шторками. Оптический затвор. Полное отсутствие затвора. Механический затвор.</p>	<p>Подвижные элементы. Синхронное срабатывание. Очень короткое время выдержки.</p>

<p>Размер пикселя</p>	<p>Пиксель настолько маленький, насколько позволяют технологии. Чип настолько большой, насколько позволяют технологии.</p>	<p>Большее количество пикселей или меньший размер чувствительной области сенсора. Увеличение чувствительности к свету.</p>
<p>Скорость кадра</p>	<p>Цифровой / Аналоговый Высокая степень параллельности</p>	<p>Мощность в зависимости от скорости. Ширина диапазона шумов.</p>
<p>Прибор с зарядовой связью</p>	<p>1. ПЗС непрерывного режима передачи.  2. Черезстрочная ПЗС.  3. Полнокадровая ПЗС.</p>	<p>1. 100% фактор заполнения, но размазанное изображение. 2. Отсутствие смазанности, но и фактор заполнения не 100%. 3. Наилучший формат против отсутствия электронной диафрагмы.</p>

Цвет	1. Единственный чип  2. Фильтры цвета  3. Образец цвета для фильтра	1. Мультичиповая камера. 2. Воздействие фильтров на спектральную чувствительность других устройств. 3. Возможность ошибки при воспроизведении цвета.
------	---	--

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности, науки и технологии Российской Федерации (Гос.контракт № 37.700.11.0141), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 03-01-00652), Программы поддержки ведущих научных школ (проект № НШ-2003.2003.1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ряхин А.*, Цифровые фотокамеры: зимний парад // Мир ПК, 1998, № 2, с.170-177, <http://www.spnet.ru/osp/pcworld/1998/02/170.htm>
2. <http://www.3dnews.ru/reviews/peripheral/digitalphoto2/index04.htm>
3. <http://phys.web.ru/db/msg.html?mid=1173399&s=110104010>
4. *Kuehl Ch., Melf M., Diehl H., Gottzein E.* Micro- Tech.- Sensor for Attitude and Orbit Determination. AAS 03-001, 26<sup>th</sup> Annual AAS Guidance and Control Conference, 5-9 February, 2003, Breckenridge, Colorado, 18p.
5. <http://www.micron.com>
6. *Добешу И.* Десять лекций по вейвлетам. Ижевск. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001
7. *Neeser W., et al*, DEPFET - a Pixel Device with Integrated Amplification, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002, V. A 477, pp.129–136
8. *Claus G., et al*, Particle Tracking using CMOS Monolithic Active Pixel Sensor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2001, V. A 465, pp.120-124
9. *Claus G., et al*, Monolithic active pixel sensors for a linear collider, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, V. A 473, pp.83-85.
10. *Deptuch G., Winter M., Dulinski W., et al*, Simulation and Measurements of Charge Collection in Monolithic Active Pixel Sensors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2001, V. A 465, pp. 92-100
11. *Struder L.*, High-resolution Imaging X-ray Spectrometers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, V. A 454, pp.73-113
12. *Struder L.*, Wide Field Imaging Spectrometer for ESA's Future X-ray Mission: XEUS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1999, V. A 436, pp.53-67

13. *J. Kemmer, et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1990, V. A 288, p.92.
14. *Klein P., Cesura G., Fischer P., Lutz G., Neeser W., Richter R.H., Wermes N.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1997, V. A 392, p.254
15. *G. Cesura, et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1996, V. A 377, p.521
16. *XEUS Astrophysics working group*, X-ray Evolving - Universe Spectroscopy - the XEUS Scientific Case, ESA, 2000, SP-1238, p.30
17. <http://electronica.finestreet.ru/0212/?digit/digit.shtml>
18. *T. Kunihiro et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2001, V. A 470, pp.512–519
19. *K. Nagashima, et al.*, Surf. Interface Anal. 2000, V. 31, p.131
20. <http://www.extremetech.com>
21. [http://www.ittf.no/files/aktiviteter/dakforum99\\_documentation/solvik/sld013.htm](http://www.ittf.no/files/aktiviteter/dakforum99_documentation/solvik/sld013.htm)