

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВИДЕОКАМЕР НА ПЗС И КМОП ФОТОПРИЕМНИКАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В. Сеулеков

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
г. Барнаул

Статья посвящена обзору преимуществ и недостатков ПЗС и КМОП матриц, рассматриваются характеристики видеокамер для изучения быстропротекающих процессов.

**Ключевые слова:** КМОП, ПЗС, сенсор, фотодиод, высокоскоростная видеокамера.

В настоящее время актуальны задачи, связанные с регистрацией и визуализацией быстропротекающих процессов [2, 9, 16]. Эти процессы можно условно разбить на три группы:

1. съемка с частотой до 500 кадров/с (исследования объектов животного мира, большинство машин и механизмов, краш-тесты автомобилей, баллистические исследования);

2. съемка с частотой до 40 000 кадров/с (физика, химия горения и взрыва, космическая и авиационная техника, бионика и т.д.);

3. съемка с частотой до нескольких миллионов кадров/с (исследования излучения лазеров, быстрого горения и взрыва, диагностика плазмы и пр.) [8].

В цифровых видеокамерах для преобразования свет-сигнал используются полупроводниковые датчики. В настоящее время распространены два типа датчиков: ПЗС (прибор с зарядовой связью, англ. Charge Coupled Device, CCD) и КМОП (комплементарный металлооксидный полупроводник, англ. Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS).

В ПЗС- и КМОП-матрицах для преобразования света в электрический сигнал изображения используются фотодиоды. Однако их принцип работы существенно различается.

В приборах с зарядовой связью падающий свет, регистрируемый фотодиодом каждого пикселя, преобразуется в электрический заряд. Заряд пикселя перемещается в вертикальную «транспортную шину», расположенную сбоку от пикселя. Прилагаемое напряжение затем перемещает заряды по вертикальным и горизонтальным транспортным шинам, пока они не достигнут усилителя. На выходе получается аналоговый сигнал с различным напряжением (в зависимости от количества

света, попавшего на пиксель). Перед обработкой этот сигнал пересылается на отдельный (вне чипа) аналого-цифровой преобразователь, и получившиеся цифровые данные преобразуются в байты, представляющие строку изображения, полученного сенсором (рисунок 1) [10].

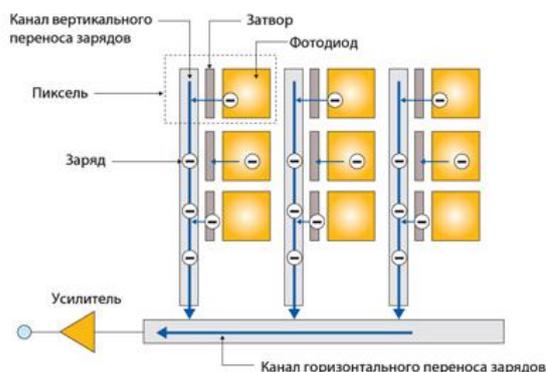


Рисунок 1 – Структура ПЗС-матрицы

Так как ПЗС передаёт электрический заряд, который обладает низким сопротивлением и меньше подвержен помехам других электронных компонентов, результирующий сигнал, как правило, содержит меньше различных шумов по сравнению с сигналом КМОП-сенсоров [14].

Информация с каждой чувствительной ячейки считывается последовательно, что не позволяет сделать следующий кадр до того как считываются все данные прошлого кадра (в данный момент от этой проблемы частично избавились, увеличив буфер памяти). Это не позволяет использовать матрицу в процессе автофокуса и потоковой видеозаписи, потому данные матрицы постепенно вытесняются технологией КМОП (CMOS), матрицы которых

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВИДЕОКАМЕР НА ПЗС И КМОП ФОТОПРИЕМНИКАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

могут производить видеозапись и автофокусировку посредством самой матрицы.

В конструкции ПЗС-матрицы существует проблема, называемая «тянущиеся продолжения». Они возникают, когда очень яркий падающий свет за счет утечки попадает на вертикальную транспортную шину и создает избыточный заряд, который проявляется на изображении как яркая вертикальная полоса. Подобная структура также требует высоких напряжений для попеременного открывания и закрывания затворов, которые должны иметься в составе всех пикселей для управления временной последовательностью потока зарядов. Мощность, потребляемая ПЗС-матрицами, особенно велика для формата высокой четкости (например, 1080p), когда требуется быстрое считывание большого числа пикселей [10, 13].

ПЗС дают наилучшее качество изображения (по квантовой эффективности и шумам) и обеспечивают гибкость с точки зрения затрат при разработке системы. Они продолжают господствовать там, где требуется наилучшее качество изображения, например, в большинстве промышленных, научных и медицинских применений [1, 15].

В КМОП датчиках каждый пиксель имеет свой преобразователь заряда в напряжение (рисунок 2), и датчик часто содержит схемы для оцифровки, благодаря чему на выход микросхемы поступает цифровой сигнал. Эти дополнительные функциональные узлы отнимают площадь кристалла, доступную для сбора падающего света. Кроме того, однородность выходов (output's uniformity, ключевой фактор качества изображения) у этих датчиков хуже, так как каждый пиксель имеет свой преобразователь. Но, с другой стороны, КМОП датчик требует меньше внешних схем для выполнения основных операций.

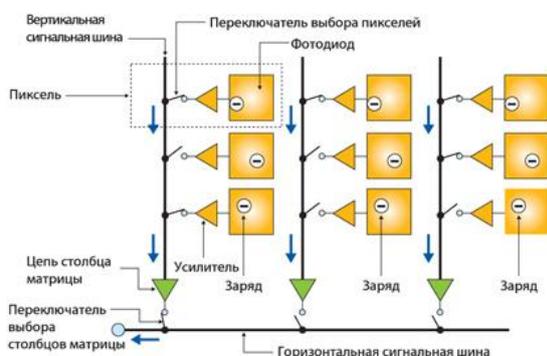


Рисунок 2 – Структура КМОП-матрицы

Проблема с тянущимися продолжениями здесь отсутствует, так как падающий свет не оказывает воздействия на электрический сигнал. Вместо затворов в КМОП-матрице используются переключатели и внутренние цепи, управляющие последовательностью выходных сигналов. Использование внутренних переключателей позволяет существенно снизить потребляемую мощность при ускорении процесса одновременного считывания большого числа пикселей. Эффективность считывания оказывается вполне достаточной для поддержки прогрессивного разложения HD изображений. В одночиповых КМОП-датчиках становится принципиально возможным одновременное считывание сигналов R, G и B [10].

КМОП датчики обеспечивают большую интеграцию (больше функций на кристалле), меньшую рассеиваемую мощность (на уровне кристалла) и меньший размер системы за счёт качества изображения и гибкости. Они хорошо подходят для малогабаритных изделий, в которых качество изображения не является первостепенным, как, например, камеры для видеонаблюдения, периферийные устройства для компьютеров, игрушки, факсы и некоторые автомобильные применения [15].

Стоимость кристаллов для обоих типов датчиков (ПЗС и КМОП) примерно одинакова. Раньше сторонники датчиков КМОП утверждали, что они намного дешевле, так как их можно изготавливать на тех же технологических линиях, что и большинство микросхем логики и памяти высокой плотности. Это оказалось не так. Чтобы получить хорошее качество изображения, для производства КМОП датчиков требуются специальные технологические процессы, характерные для устройств обработки смешанных сигналов низкой плотности. КМОП-датчики также требуют больше кремния на пиксель. КМОП-камера может содержать меньше компонентов и потреблять меньшую мощность, но она может также потребовать применения схем обработки сигнала для компенсации потерь качества изображения.

Таблица 1 – Сравнение свойств матриц ПЗС и КМОП

Свойство	ПЗС	КМОП
Выходной сигнал пикселя	Пакет электронов	Напряжение
Выходной сигнал устройства	Напряжение (аналоговый)	Биты (цифровой)

Коэффициент заполнения	Высокий	Умеренный
Несогласованность усилителей	Неприменимо	Умеренная
Системный шум	Низкий	От умеренного до высокого
Сложность системы	Высокая	Низкая
Сложность датчика	Низкая	Высокая

Таблица 2 – Сравнение параметров матриц ПЗС и КМОП

Параметр	ПЗС	КМОП
Чувствительность	Умеренная	Немного лучше
Динамический диапазон	Высокий	Умеренный
Однородность	Высокая	От низкой до умеренной
Скорость	От умеренной до высокой	Наибольшая
Получение неполного изображения	Ограниченное	Неограниченное
Антиблэинг	От хорошего до отсутствующего	Хороший
Управление и питание	Сложное, высокие напряжения	Простое, низкие напряжения
Потребление энергии	Значительное (особенно для больших матриц)	Низкое

Приведенные в таблицах 1 и 2 преимущества и недостатки ПЗС- и КМОП-матриц [15] позволяют определить сферы их применения. Для получения максимально качественных изображений с минимумом шумов лучше использовать ПЗС-матрицы. Однако при необходимости вести высокоскоростную съемку оптимальным выбором будет КМОП-матрица.

Для съемки научных экспериментов, регистрации быстропротекающих процессов в технике, наладки и контроля технологических процессов в производстве широко использу-

ются высокоскоростные видеокамеры на базе КМОП-матриц.

Рассмотрим представленные на современном рынке высокоскоростные видеокамеры.

Скоростная видеокамера Phantom v1610 [7].

Производитель AMETEK Vision Research, США.

Тип матрицы КМОП.

Таблица 3 – Скорость записи (с опцией FAST)

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1280 x 800	16 600
768 x 768	25 300
512 x 512	49 100
256 x 256	135 300
128 x 128	312 800
128 x 16	1 000 000

Гпикс./с при макс. разрешении 16.

Размер пикселя 28 мкм.

Размер сенсора 35,8 мм x 22,4 мм.

Глубина цвета 12 бит.

Чувствительность монохромная ISO 43 700 Т.

Чувствительность цветная ISO 3 900 Т.

Внутренняя память (Гб) 24, 48, 96.

Внешняя память CineMag (Гб) 256, 512.

Время записи при скорости съемки 10 000 кадр/с, разрешении 1280 x 800 и внутренней памяти 98 Гб составляет 6,2 с.

Минимальное время экспозиции электронного затвора (с опцией FAST) 500 нс.

Размеры (мм) 280 x 190 x 177,5.

Вес 7,9 кг.

Скоростная видеокамера высокого разрешения NAC Memrecam HX-3/HX-1 [6].

Производитель NAC Image Technology Inc., Япония.

Тип матрицы КМОП.

Таблица 4 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
2560 x 1920	2 000
1920 x 1080	4 670
1280 x 960	7 690
768 x 576	20 230
512 x 512	32 410
320 x 240	105 800
320 x 96	246 880
320 x 24	740 660
320 x 8	1 333 200

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВИДЕОКАМЕР НА ПЗС И КМОП ФОТОПРИЕМНИКАХ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Гпикс./с при макс. разрешении 9,83.  
 Оптический формат 35,2 мм.  
 Разрядность АЦП 8 / 10 / 12 бит.  
 Чувствительность монохромная ISO 40 000 (режим высокой скорости).  
 Чувствительность цветная ISO 10 000 (режим высокой скорости).  
 Чувствительность монохромная ISO 10 000 (режим высокого разрешения).  
 Чувствительность цветная ISO 2 500 (режим высокого разрешения).  
 Минимальное время экспозиции электронного затвора 200 нс.  
 Объем памяти (Гб) 16, 32, 64, 128.  
 Размеры (мм) 100 x 140 x 333.  
 Вес 5,5 кг.  
 Дополнительно: наличие двухкадрового режима (короткий интервал времени между двумя кадрами для PIV <125 нс); внутренний корпус закрыт от попадания пыли.  
 Скоростная видеокамера Optronis CR1000x3 [6].  
 Производитель Optronis GmbH, Германия.  
 Тип матрицы КМОП.

Таблица 5 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1280 x 1024	1 000
1024 x 768	1 500
800 x 600	2 000
600 x 400	4 000
400 x 300	6 000
320 x 200	10 000
160 x 100	20 000

Размер пикселя 8 мкм.  
 Размер сенсора 10,24 мм x 8,19 мм.  
 Разрядность АЦП 8 бит.  
 Чувствительность монохромная 3,8 В/Лк.с.  
 Минимальное время экспозиции электронного затвора 2 мкс.  
 Объем памяти (Гб) 2, 4, 8, 16.  
 Напряжение питания 12 В.  
 Размеры (мм) 145 x 95 x 78,5.  
 Вес 1,05 кг.  
 Дополнительные опции: драйвер для LabView, SDK для программирования, переходник Canon EF/EF-S с удаленным управлением фокусом и диафрагмой

Скоростная видеокамера Fastvideo-500M [5].  
 Производитель НПО Астек, Россия  
 Тип матрицы КМОП, модель LUPA-1300-2

Таблица 6 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1280 x 1024	500
800 x 600	1 300
624 x 480	2 000
360 x 280	5 000
320 x 240	6 400
240 x 180	10 000

Гпикс./с при макс. разрешении 0,68.  
 Размер пикселя 14 мкм.  
 Размер сенсора 17,92 мм x 14,34 мм.  
 Коэффициент заполнения 40 %.  
 Разрядность АЦП 10 бит.  
 Чувствительность 25 Вольт/Люкс.  
 Неоднородность светочувствительности PRNU < 1 %.  
 Коэффициент преобразования на выходе 34 мкВ/электрон.  
 Заряд насыщения 30 000 электронов.  
 Количество шумовых электронов < 37.  
 Динамический диапазон: стандартный 57,8 дБ, расширенный – до 90 дБ.  
 Темновой ток 170 мВ/с при 30°С.  
 Минимальное время экспозиции электронного затвора при работе на частоте 500 Гц с полноэкранным разрешением составляет от 2 мкс до 3 мс, при размере окна 240 x 180 минимальная выдержка составляет 400 нс.  
 Напряжение питания 5 В.  
 Размеры (мм) 60 x 60 x 180 (без объектива).  
 Вес 0,5 кг (без объектива).  
 Дополнительно: возможность выбора произвольного окна сканирования (шаг по горизонтали 24 пикселя, шаг по вертикали 1 пиксель); возможность полного перепрограммирования видео сенсора во время межкадровой задержки; подключение к компьютеру по протоколу Full Camera Link; программное обеспечение Fastvideo Lab на русском языке для Windows XP/Vista/7.

Скоростная видеокамера ВидеоСпринт [11].  
 Производитель: НПК ВИДЕОКАН, Россия  
 Тип матрицы: КМОП

Таблица 7 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1280 x 1024	488
1280 x 500	1 000
1280 x 250	2 000
1280 x 25	20 000
1280 x 10	50 000
1280 x 2	250 000

Размер пикселя 12 мкм.  
 Размер сенсора 15,3 мм x 12,3 мм.  
 Разрядность АЦП 10 бит.  
 Разрядность видеофайлов, записываемых стандартным ПО 8 бит.  
 Время записи до 8,04 с на максимальной частоте при объеме памяти 6 Гб.  
 Время экспозиции от 2 мкс до 33 мс, возможно оснащение камеры электронно-оптическим модулем (спектральный диапазон 380-800 нм) для реализации экспозиций от 20 нс до 20 мкс.

Вес 2,8 кг.

Цена базового комплекта (без объектива, объем памяти 2 Гб) 290 000.

Дополнительно: доступен волоконно-оптический интерфейс от камеры к компьютеру длиной от 10 м до 15 км.

Рассмотренные видеокамеры обладают высокой скоростью съемки, но спектральные характеристики их сенсоров обладают высокой чувствительностью только в видимом оптическом диапазоне.

Для изучения ряда процессов более информативными являются инфракрасные и ультрафиолетовые области спектра, на работу в которых ориентированы представленные ниже видеокамеры.

Видеокамера ближнего инфракрасного диапазона INTEVAC MicroVista-NIR [3].

Производитель: INTEVAC, INC., Imaging Division, США.

Тип матрицы: КМОП с обратной засветкой

Таблица 8 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1280 x 1024	30
512 x 512	150
128 x 128	2400

Размер пикселя 10,8 мкм.  
 Размер сенсора 13,8 мм x 11,06 мм.  
 Затвор построчный перенос.  
 АЦП 10 бит.

Время экспозиции от 20 мкс до 10 с.  
 Напряжение питания 12 В.  
 Размеры (мм) 50,8 x 50,8 x 76,2.  
 Вес 0,225 кг.  
 Видеокамера ближнего инфракрасного диапазона Baumer TXG14NIR [3].  
 Производитель: Baumer Optronic GmbH, Германия.  
 Тип матрицы: ПЗС.

Таблица 9 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1392 x 1040 (Full Frame HQ)	10
1392 x 1040 (Full Frame)	20
696 x 520 (Binning 2x2 HQ)	19
696 x 520 (Binning 2x2)	39

Размер пикселя 6,3 мкм.

Размер сенсора 2/3".

Затвор полнокадровый перенос, глобальный электронный.

АЦП 8 / 12 бит.

Время экспозиции от 4 мкс до 60 с.

Размеры (мм) 36 x 36 x 48.

Вес 0,09 кг.

Видеокамера для регистрации УФ излучения INTEVAC MicroVista-UV [4].

Производитель: INTEVAC, INC., Imaging Division, США.

Тип матрицы: КМОП с обратной засветкой.

Таблица 10 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1280 x 1024	30
512 x 512	150
128 x 128	2400

Размер пикселя 10,8 мкм.  
 Размер сенсора 13,80 мм x 11,06 мм.  
 Затвор построчный перенос.  
 Время экспозиции от 20 мкс до 10 с.  
 Размер потенциальной ямы 40 000 е.  
 Шум считывания 30 е.  
 Нелинейность 2 %.  
 Число бит 10.  
 Спектральный диапазон 150–1100 нм.  
 Система охлаждения пассивная.  
 Размеры (мм) 50,8 x 50,8 x 76,2.  
 Вес 0,225 кг.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВИДЕОКАМЕР НА ПЗС И КМОП ФОТОПРИЕМНИКАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Видеокамера для регистрации УФ излучения Raptor Falcon BLUE EMCCD [4].

Производитель: Raptor photonics, Северная Ирландия.

Тип матрицы: EMCCD (ПЗС с внутренним размножением электронов).

Таблица 11 – Скорость записи

Разрешение, пиксели	Скорость съемки, кадр/с
1004 x 1002	30
256 x 256	94
32 x 32	296

Размер пикселя 8 мкм.

Размер сенсора 8 мм x 8 мм.

Затвор глобальный.

Время экспозиции от 500 мкс.

Размер потенциальной ямы 30 000 е.

Шум считывания 1 е (EM gain ON) / 28 е (EM gain OFF).

Нелинейность 1 %.

Число бит 16.

Спектральный диапазон 120 – 1100 нм.

Система охлаждения термоэлектрическая до – 20° С.

Размеры (мм) 109 x 76 x 76.

Вес 0,650 кг.

Особенности: режим бинирования, антиблиминг.

Рассмотренные скоростные видеокамеры позволяют осуществить съемку различных объектов с большим временным разрешением. Это позволяет проанализировать изменение состояния объектов, даже если эти изменения происходят со значительной скоростью.

На данный момент наиболее высокими техническими характеристиками обладают американские и японские скоростные видеокамеры, однако они имеют высокую стоимость.

Отечественные видеокамеры обладают немного меньшей производительностью, зато они более доступны по цене, обладают хорошей технической документацией и сопутствующим программным обеспечением на русском языке.

Видеокамеры для инфракрасного и ультрафиолетового спектров отличаются высокой квантовой эффективностью в соответствующих областях спектра, компактными размерами и низким энергопотреблением.

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в технологии КМОП-матриц, их характеристики приближаются к характеристикам ПЗС-матриц. Однако в ряде

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №1 2013

задач КМОП-матрицы обладают существенными преимуществами, например, при необходимости произвольной выборки по координатам, при реализации процессов слежения за объектом с помощью окна (области) заданного размера, который может меняться в процессе слежения, а также при необходимости аппаратной обработки данных (в самой КМОП-матрице) в режиме реального времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CCD vs CMOS [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.teledynedalsa.com/imaging/knowledge-center/appnotes/ccd-vs-cmos/>. – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

2. Бороненко М.П. Измерение виртуальной температуры движущихся частиц высокоскоростными телевизионными CCD-камерами в режиме накопления заряда // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 58-61.

3. Видеокамеры ближнего инфракрасного диапазона [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.cameraiq.ru/catalog/cameras/ir\\_cameras/nir\\_cameras/](http://www.cameraiq.ru/catalog/cameras/ir_cameras/nir_cameras/). – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

4. Видеокамеры для регистрации УФ излучения [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.cameraiq.ru/catalog/cameras/uv\\_cameras/uv\\_series/](http://www.cameraiq.ru/catalog/cameras/uv_cameras/uv_series/). – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

5. Высокоскоростная видеокамера Fastvideo-500M [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.fastvideo.ru/products/camera/high-speed-videocamera.htm>. – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

6. Высокоскоростные видеокамеры [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.cameraiq.ru/catalog/cameras/highspeed/>. – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

7. Высокоскоростные видеокамеры Phantom [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.sedatec.ru/ru/products/863939/>. – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

8. Высокоскоростные видеокамеры фирмы Redlake [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.videomotion.ru/engine.php?content=art25>. – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

9. Долматов А.В., Маковеев А.О., Ермаков К.А., Лавриков В.В. Виртуальная тепловизионная система с микросекундным периодом регистрации // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 31-36.

10. Закат века CCD и наступление века высокой четкости [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://ru.oknotv.ru/biblio/detail.php?ELEMENT\\_ID=376&SECTION\\_ID=376](http://ru.oknotv.ru/biblio/detail.php?ELEMENT_ID=376&SECTION_ID=376). – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

11. Камера скоростной видеосъемки “Видео-Спринт” [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://videoscan.ru/page/731>. – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

12. Патрахин Ю.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Метод контроля качества горения газовоздушной смеси по контрасту цветовых компонентов пламени в топке котельного агрегата // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 92-95.

13. Пахомов С. ПЗС- и КМОП-сенсоры для цифровых фото- и видеокамер [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.compress.ru/Archive/CP/2001/12/8/>. – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

14. ПЗС матрица, КМОП матрица [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://techno-vubor.ru/Term-vid-matr.html>. – Загл. с

экрана. – (12.10.2013).

15. ПЗС против КМОП [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://dsioffe.narod.ru/articles/ccd\\_vs\\_cmos.htm](http://dsioffe.narod.ru/articles/ccd_vs_cmos.htm). – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

16. Скоростные видеозаписи [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://videoscan.ru/page/633/alb\\_id/1](http://videoscan.ru/page/633/alb_id/1). – Загл. с экрана. – (12.10.2013).

**Сеулеков Алексей Валерьевич – аспирант, тел.: (3852) 29-09-13, e-mail: it@agtu.secna.ru.**