

КМОП видеорегастраторы - новое поколение техники высокоскоростной съемки.

М.С Семин

2019 г

Развитие КМОП технологии фотоприемных матриц позволило создавать на них фото и видео регистраторы быстрых процессов. Так на X конференции РАРАН ВРЦ РАРАН, проходившей в Сарове, отечественными предприятиями «ВИДЕОСКАН» (разработчик камер и мультикамерных комплексов) и «РТК ИНПЕКС» (разработчик КМОП матриц) был представлен макет восьмикадровой камеры с кадровой частотой более 15 МГц. В последствии с этим макетом проводились натурные эксперименты, в том числе, в ИФВ РФЯЦ ВНИИЭФ и Нижегородском институте ИПФ РАН (см. Рис. 1, 2). В этих испытаниях данный макет КМОП камеры подтвердил не только техническую возможность создания многокадровых видеорегастраторов, но и эффективность их применения в различных экспериментах с быстропротекающими процессами, где ранее, пожалуй единственным инструментом, оставались камеры на ПЗС матрицах с электронно-оптическим затвором — ЭОП-ПЗС камеры.

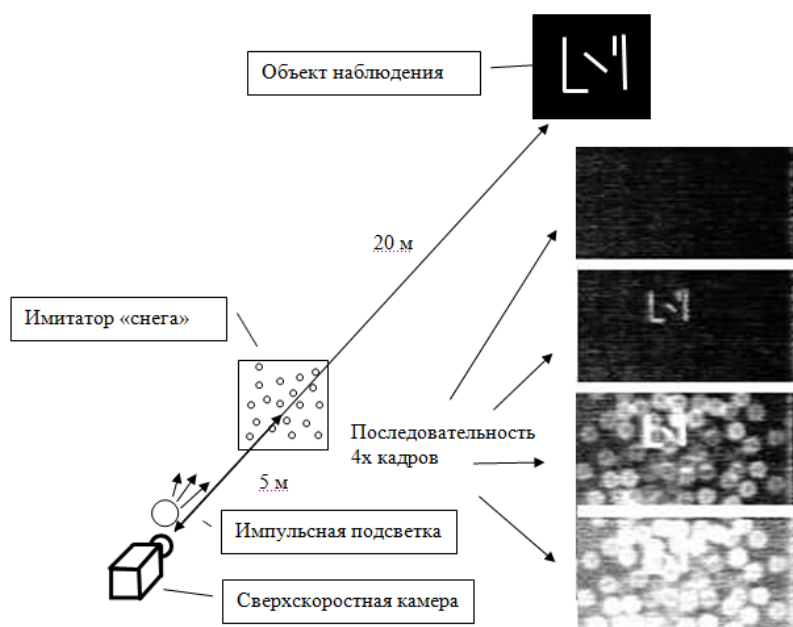


Рис. 1. Выделение объекта за преградой (имитатор снега) за счет временного разделения световых потоков от объекта и преграды. Кадровый период 66 нс
Эксперимент демонстрировался в ходе X конференции РАРАН ВРЦ РАРАН 2017 г.

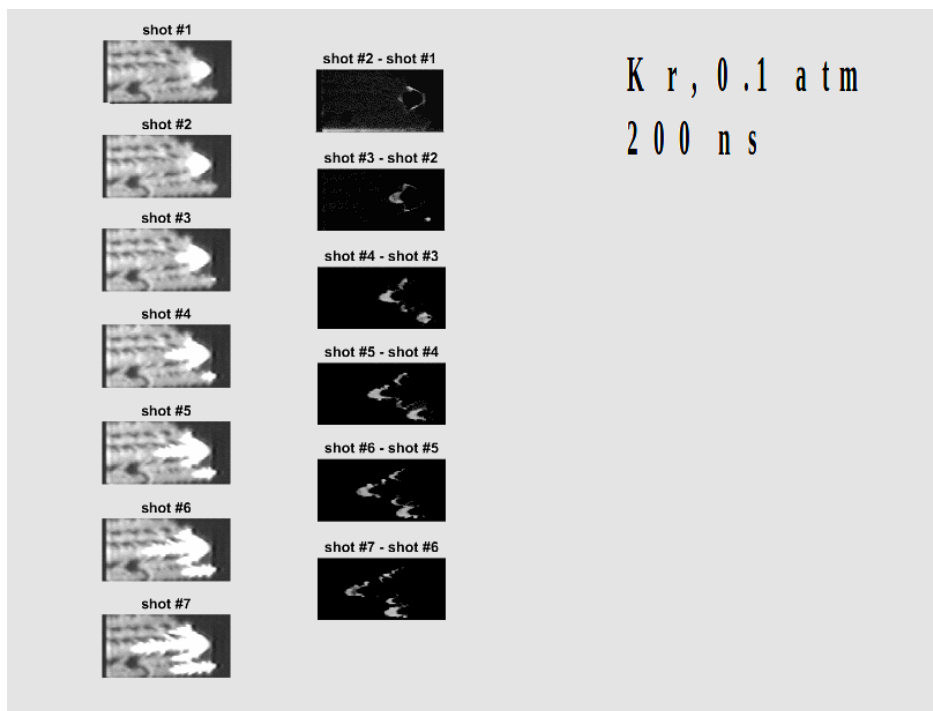


Рис. 2. Развитие разряда инициированного ТГц излучением в газовой среде. Левая колонка последовательность кадров с периодом 200 нс. Правая колонка разность изображений соседних кадров. Автор ИПФ РАН.

В этой связи представляет интерес сравнение технических возможностей ЭОП-ПЗС регистраторов и регистраторов на КМОП матрицах с точки зрения требований к качеству получаемых изображений.

Технические возможности регистраторов и, соответствующие им, технические параметры принципиально зависят от решаемых задач, среди которых можно выделить две:

- задачу выявления объектов на темном фоне, например, звезд ночью
- и задачу обнаружения и измерения характеристик малоcontrastных объектов на светлом фоне, как это имеет место в радиографии.

Сравнение ЭОП-ПЗС и КМОП регистраторов, предназначенных для решения первой задачи, сводится к сравнению значений их классических параметров - уровню шума считывания или темного поля и динамическому диапазону воспринимаемых яркостей.

Сравнение же технических возможностей, конструкторских решений и технических ограничений ЭОП-ПЗС и КМОП регистраторов, предназначенных для решения второй задачи,

имеет много аспектов, поэтому в данном условно зададимся и примем к рассмотрению следующие требования к качеству получаемых изображений, а именно:

- пространственное разрешения по полю изображения - 1000x1000 пикселей;
- число регистрируемых быстрых кадров в серии - 16 кадров;
- возможность разрешения объектов, различающихся по яркости более чем на — 1%, в возможно большем диапазоне яркостей.

Интерпретация этих требований в требования к техническим характеристикам самих видеорегистраторов определяет следующий список технических требований к параметрам видеорегистраторов:

- размерность матрицы в числе пикселей по осям - 1000x1000 пикселей;
- число регистрируемых быстрых кадров в серии - 16 кадров;
- линейным размером пиксела (шаг пикселей по полю матрицы);
- квантовой эффективности, определяемой как обратная величина числа фотонов, пришедших в площадь пиксела к числу образовавшихся при этом электронов (фотоэлектронов);
- емкостью накопителя фотоэлектронов (зарядовая емкость) в электронах;
- диапазоном яркостей от минимального уровня до насыщения, воспринимаемых входным окном ЭОП для ЭОП-ПЗС камер и КМОП матрицей для КМОП камер;
- способом синхронизации.

Из всего этого списка только два первых параметра имеют значения, напрямую определяемыми заданными требованиями к качеству получаемых изображений. Значения остальных технических параметров видеорегистраторов могут быть определены исходя из следующего.

Требование к качеству изображения по уровню контрастного разрешения объектов наблюдения, определяется как:

$$K = (Y_{\text{ф}} - Y_{\text{об}}) / Y_{\text{ф}}, \text{ где}$$

$Y_{\text{ф}}$ и $Y_{\text{об}}$ - яркость фона, на котором находится объект, и яркость самого объекта.

Однако задание только этой величины оказывается недостаточным, поскольку значения яркости фона и объекта для каждого пиксела изображения сопровождаются ошибкой, обусловленной статистикой числа зарегистрированных фотонов, поэтому следует еще определить и величину - отношения контраста над стандартной ошибкой уровней яркости объекта фона - « $\sigma_{\text{фона}}$ ». Эта величина, назовем ее дельта-сигма « δ/σ », определяется как

отношение разности средних значение яркостей объекта и фона к стандартной ошибке яркости фона:

$$\delta/\sigma = (Яф- Яоб) / \sigma_{фона}$$

Исходя из значений этих величин требуемое, для выполнения условий наблюдения, число фотоэлектронов «Nmin», а, следовательно, и величину зарядовой емкости пикселей матрицы в количестве электронов - «C[e]» можно определить из соотношений:

$$\delta = Nmin \times K \text{ и } \sigma = \sqrt{Nmin},$$

тогда

$$C[e] = Nmin = \left(\frac{\delta}{\sigma \times K} \right)^2 \quad (1)$$

Значения среднего числа фотоэлектронов «Nmin» накапливаемых в пикселях матрицы в зависимости от величин необходимого контрастного разрешения и параметра дельта-сигма приведены в Таблице 1.

Таблица 1

$\frac{\delta}{\sigma}$	K						
	0,25%	0,5%	1,0%	2,0%	4,0%	8%	16%
1.5	360000	90000	22000	5600	1400	350	90
2.0	640000	160000	40000	10000	2500	625	160
2.5	1000000	250000	62000	16000	4000	1000	250
3.0	1500000	360000	90000	22000	5600	1400	350

Из соотношения (1) следует, что требования к величине зарядовой емкости регистратора для задач радиографии находятся в квадратичной зависимости от контрастной чувствительности и величины дельта-сигма.

Важным следствием необходимости накопления как можно большего числа фотоэлектронов является требование регистрации, по возможности, каждого события взаимодействия первичных квантов с флюоресцентным экраном, и, если вернуться к Таблице 1, то в ней следует интерпретировать число фотоэлектронов «Nmin» именно как число «прошедших регистрацию» в фотоприемной матрице первичных квантов.

Способность регистратора фиксировать события, взаимодействия первичных квантов с флюоресцентным экраном зависит от свойства экрана, светосилы объектива переноса

изображения, размеров светочувствительных площадок пикселей матрицы, квантовой эффективности фотоприемной матрицы преобразовывать фотоны в электроны.

Последние три фактора относятся к фоторегистрирующей камере, при этом, именно размер пиксела определяет, как требования к объективу, так и способность захвата большего или меньшего числа фотонов. Так при равной светосиле объективов световой поток, приходящий в светочувствительные области пикселей матриц, пропорционален квадрату их линейных размеров.

Еще одним из важнейших параметров регистраторов является возможность получения изображений как самых темных объектов входного изображения, для которых необходимо выполнять условие контрастного разрешения (см. Таблицу 1), так и самых ярких объектов в изображении, яркость которых граничит с уровнем насыщения регистратора. Назовем этот параметр диапазоном контрастного разрешения - «Dk»:

$$Dk = N_{\max} / N_{\min}, \text{ где}$$

N_{\max} и N_{\min} - число фотоэлектронов в пикселах матриц для яркого и темного объектов.

Таким образом нижняя граница диапазона контрастного разрешения определяется значением « N_{\min} » (см. Таблицу 1), а верхняя граница техническими ограничениями:

- для ЭОП-ПЗС регистратора - максимальным числом носителей в зарядовом пакете;
- для КМОП регистратора - предельным значением напряжения « U_{\max} » на зарядовой емкости, вызываемого « N_{\max} » электронами. При этом для КМОП регистраторов, точнее для конструкции пиксела уже существующего макета КМОП матрицы, величина зарядовой емкости в Фарадах ограничена условием обеспечения уровня шума сброса емкости - KTC -шума меньше уровня фотонного шума.

Значение динамического диапазона контрастного разрешения можно определить из следующих соотношений:

$$\sigma_{\text{KTC}} = (k T C[\Phi])^{1/2} / q,$$

$$N_{\max} = (U_{\max} C [\Phi]) / q \text{ и}$$

$$N_{\min} = (\sigma_{\text{KTC}} / S)^2$$

где :

σ_{KTC} — KTC -шум;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура матриц;

$C[\Phi]$ — значение зарядовой емкости накопления в Фарадах;

q — заряд электрона;

S — коэффициент равный отношению величин шума сброса емкости накопления к фотонному шуму.

$$Dk = U_{\max} S^2 q / kT.$$

Подстановка в это выражение значений $U_{\max} = 1\text{В}$ и $S = 0,5$, получаем, реализуемое для КМОП регистратора, значение динамического диапазона контрастного разрешения равного 9,5. Отсюда для обеспечения контрастной чувствительности 1% при отношении дельта-сигма 2,4 количество накопленных электронов на границах диапазона контрастного разрешения должны быть равны соответственно 62 000 и 600 000, т. е. матрицы регистраторов должны иметь зарядовую емкость не менее 600 000 фотоэлектронов.

Эти расчеты хорошо согласуются с результатами исследования макета КМОП камеры, представленными в Приложении.

Приведенные соображения позволяют перейти к сравнению технических решений задачи обеспечения, изложенных выше требований к качеству получаемых изображений на базе ЭОП-ПЗС регистраторов и регистраторов на КМОП матрицах.

Принципиальным различием ЭОП-ПЗС и КМОП регистраторов, является возможность последних регистрировать серию быстрых кадров одной матрицей, в то время как ЭОП ПЗС регистраторы реализуют принцип: одна камера — один кадр.

Из этого следует, что для построения комплекса обеспечивавшего видеорегистрацию заданного числа быстрых кадров потребуется **шестнадцать ЭОП-ПЗС камер**. При этом для обеспечения требуемого разрешения всегда можно найти ПЗС матрицу нужной размерности.

Что касается технической реализации комплекса видеорегистрации на базе КМОП матриц, то она может быть решена путем создания синтезированной апертуры состоящей из **двенадцати КМОП матриц** размерностью 300x350 пикселей, размещенных в фокальных плоскостях **4-х камер**. Относительно малая размерность предлагаемых в данном техническом решении КМОП матриц определяется сложностью производства одной большой бездефектной матрицы, тогда когда разработчик КМОП матриц предполагает технически обоснованный проект многокадровой (до 30 быстрых кадров) матрицы размерностью 300x350 пикселей с размером (шагом) 50 мкм каждый.

Наличие шума сброса в КМОП матрицах и его отсутствие в ПЗС матрицах в суммарном шуме получаемых изображений практически не имеет значения т. к. статистика суммарного

шума изображения КМОП регистратора при значении $S = 0,5$ увеличивается только в 1,1 раза. Что же касается верхней границы диапазона контрастного разрешения, то для КМОП регистраторов имеется техническая возможность его расширения за счет реализации схемы «перегиба свет-сигнальной характеристики» матрицы или добавлением еще одного 4-х камерного регистратора на КМОП матрицах с зарядовой емкостью 4-6 миллионов электронов, что обеспечит расширение диапазона контрастного разрешения до 50 — 80 крат и улучшения контрастного разрешения в верхней части диапазона до 0,25%.

Последнее решение относится к высокоэнергетической радиографии, имеющей большой поток первичных квантов, где для ЭПО-ПЗС камер проблема с подбором ПЗС матриц, имеющих такую зарядовую емкость просто не реализуема, в то время как для КМОП матриц это требование определяется на уровне разработке технического задания на разработку-изготовление КМОП матриц с требуемыми параметрами, например, в настоящее время разработчик КМОП матриц предлагает матрицу с зарядовой емкостью до 6 миллионов электронов.

В случае мало-дозовой радиографии, где на первое место выходит уже не обеспечение контрастной чувствительности, а регистрации серий изображения флюоресцентного экрана с возможно меньшим шумом, то тут, казалось бы, возможность электронно-оптических преобразователей «усиливать яркость» изображений может помочь увеличить полезный сигнал и соответственно уменьшить шумность картинки. Однако, поскольку шум сигнала обусловлен статистикой числа независимых событий такое «усиление яркости» не может улучшить эту составляющую по отношению к шуму автогенерации электронов в области катода.

Это для ЭОП-ПЗС регистраторов означает обеспечение работы электронно-оптического преобразователя в режиме, когда только приходящие на входное окно фотоны вызывают генерацию электронов на его катоде и световую вспышку на аноде. Такой режим требует тонкой настройки режима работы ЭОПа и, кроме того в этом режиме возникает проблема с динамическим диапазоном ЭОП-ПЗС регистратора.

Для КМОП регистраторов решение данной задачи заключается минимизации зарядовой емкости «С[Ф]», также решаемой на уровне разработке технического задания на разработку-изготовление КМОП матриц с требуемыми параметрами.

Важно отметить и то обстоятельство, что в случае возможной модернизации уже работающей радиографической установки и расширением в связи с этим технических требований к регистраторам радиографических изображений по числу быстрых кадров и

разрешению, для ЭОП-ПЗС регистратора потребуется соответствующее увеличение числа камер и замены ПЗС матриц на матрицы с большим разрешением, в то время как для КМОП регистратора удовлетворение расширенных требований потребует лишь установки большего числа таких же КМОП матриц в фокальных плоскостях тех же 4-х камер и замены в них объективов на более длиннофокусные. Кроме того требование к увеличению разрешения для ЭОП-ПЗС регистратора будет означать, что в случае использования прежнего ЭОП - уменьшение площадей элементов разрешения на входном окне ЭОП; а в случае перехода на ЭОП с большим входным окном, - поиск (разработку) существенно более дорогих ЭОП, устройств переноса изображения «ЭОП=>ПЗС» и входных объективов.

При этом сразу следует отметить, что выпускаемые как отечественной промышленностью так и зарубежные ЭОПы имеют входное окно в разы меньше размеров синтезированной апертуры КМОП регистратора, а это, как было показано выше, критически уменьшает эффективность регистрации событий взаимодействия первичных квантов с флюоресцентным экраном, ограничивая возможность контрастного разрешения объектов.

Хотя данный сравнительный анализ КМОП и ЭОП-ПЗС регистраторов относился к задачам радиографии, приведенные аргументы справедливы и для широкого спектра задач регистрации быстропротекающих процессов и здесь необходимо указать на решающее преимущество КМОП видеорегистраторов перед ЭОП-ПЗС многокамерными комплексами в возможности сохранения видеозаписи предыстории процесса до момента события синхронизации, т. е. до того момента, когда «становится ясно, что процесс пошел» и есть физическое явление, которое можно использовать в качестве события синхронизации.

Все сказанное позволяет утверждать, что «после нескольких десятилетий развития технологии изготовления сенсоров для получения цифрового видеоизображения был достигнут значительный прорыв. Мы с уверенностью можем утверждать, что следующий шаг развития сенсорной технологии будет за КМОП сенсорами» [1] и, что «развитие преимуществ КМОП фотоприёмников в будущем может вытеснить из практики формирования телевизионных сигналов не только вакуумные приборы усиления слабых оптических сигналов (электронно-оптические преобразователи, ЭОП), но и ПЗС» [2].

Это будущее настало! вопрос лишь в принятии решения о финансировании этого направления. Направления обеспечения отечественной науки и техники современным инструментом, подчеркиваю, отечественной разработки.

Результаты измерения параметров макета КМОП камеры.

Результаты экспериментов, представленных в виде скриншотов их обработки в программе «ImageJ», приведены на Рис. 1; 2 и таблице.

На Рис. 1а и 2а представлены откорректированные изображения мир, полученные путем вычитания из поля с изображением мира поля фона, усредненного по четырем последовательно полученным изображениям при закрытой заслонке, а также профилограммы полей изображений мир.

На Рис. 1б и 2б представлены изображение полей фона, полученных путем вычитания усредненных полей фона из одного из исходных полей фона, а также результаты вычисления СКО полей фона на различных участках полей.

Таблица

Яркость фона	4 000	40 000
Приращение яркости мира	~ 100	~ 100
Контраст изображения мира	2.5%	0.25%
СКО фона	17	25
Различаемый контраст при значении $\delta/\sigma=2.5$	1.1%	0.15%

Величины яркостей выражены в единицах АЦП.

Данные столбца с уровнем яркости 4 000 ед. АЦП соответствуют параметрам уровня контрастной чувствительности ~1%, а уровень 40 000 ед. АЦП — уровню насыщения емкостей накопления пикселей КМОП матрицы.

Отношений данных уровней яркости равно 10, что хорошо соответствует расчетному значению динамического диапазона контрастного разрешения исследуемой КМОП матрицы.

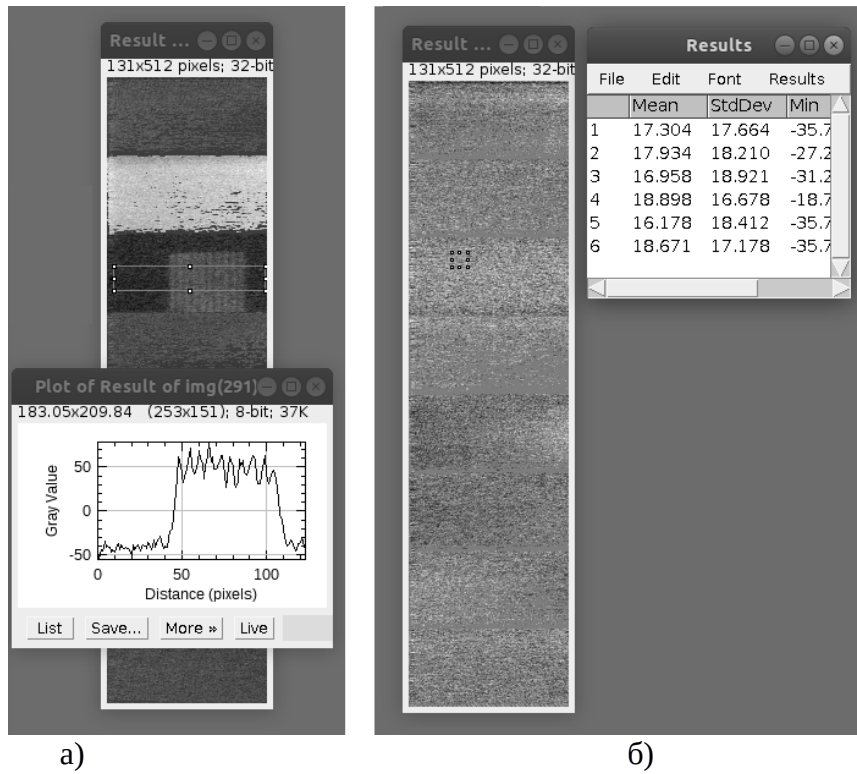


Рис. 1. Изображение и параметры полученных изображений при уровне яркости фона 4000 ед. АЦП.

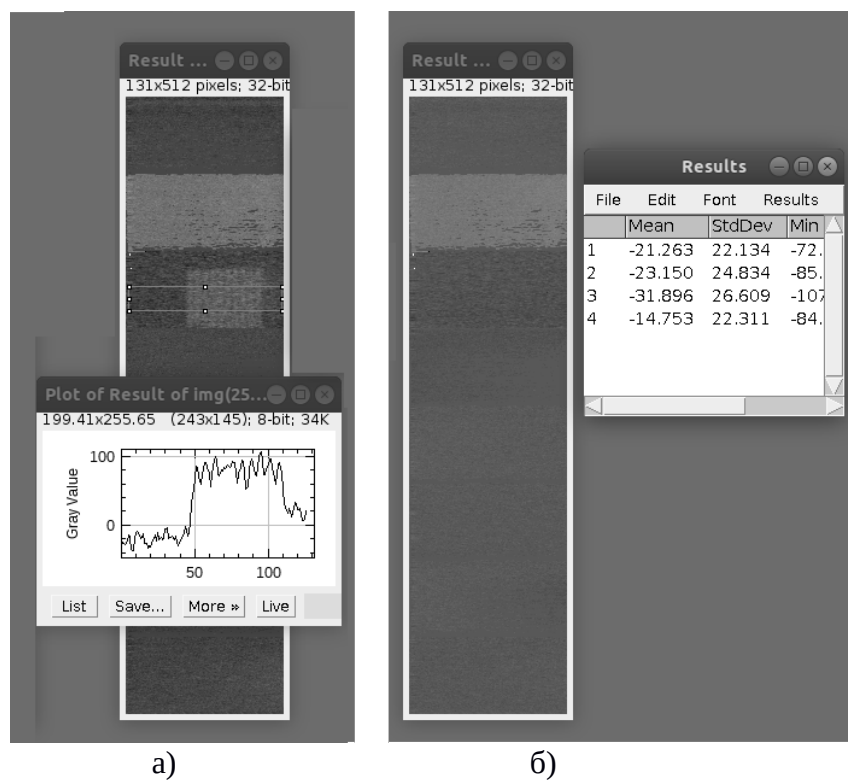


Рис. 4. Изображение и параметры полученных изображений при уровне яркости фона 40 000 ед. АЦП.

Литература

1. ООО "Компания "АЗИМУТ ФОТОНИКС", Научные цифровые камеры. Устранения ограничений при использовании научной КМОП камеры (sCMOS), Рубрика: Технологии, <http://www.azimp.ru/articles/tech/38638/>
2. ктн А. А. Манцветов, дтн А. К. Цыцулин Телекамеры на фотоприемниках, http://www.es-exp.ru/articles/tvcamera_cmos.pdf