

Особенности получения ТВ-изображений при ограниченных потоках фотонов

06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0716587

Казначеев С. А.

УДК 681.772.7; 621.383.724

Россия, ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ"

kazn_sa@mail.ru

Введение

Развитие приёмных ТВ-устройств сопровождается постоянным повышением требований к их чувствительности. Результатом прогресса кремниевых матричных ПЗС-приёмников оптического изображения, стало создание фоточувствительных матриц с внутренним электронным умножением - *electron multiplying CCD (EMCCD)*, способных работать при чрезвычайно низких уровнях освещённости порядка 10^{-4} - 10^{-5} люкса [1]. Такие матрицы позволяют реализовать субфотонные режимы работы, при которых в каждый пиксель матрицы в среднем за время экспозиции попадает менее одного фотона.

Возможность регистрировать с помощью *EMCCD* одиночные фотоны актуальна в микробиологии, когда исследуемые процессы сопровождаются собственным свечением биологических объектов, в астрономии, когда требуется реализовать короткие экспозиции, в физике элементарных частиц, в высокоскоростной спектроскопии, при видеонаблюдении в условиях весьма низких освещённостей и ряде других применений.

Получаемые при таких потоках излучения ТВ-изображения обладают рядом особенностей. Они имеют ярко выраженную дискретность, что придаёт им характер близкий к геометрическому шуму; в них практически отсутствуют области равной яркости, что, как правило, затрудняет непосредственное визуальное восприятие информации и анализ их информационного содержания.

Цель работы - теоретически показать возможность регистрации субфотонных изображений и экспериментально продемонстрировать возможность продвижения телевизионных приёмных устройств в область рабочих значений освещённости 10^{-4} люкса.

1. Особенности регистрации субфотонных изображений

Статистические свойства фотонного шума и процесса регистрации излучения обычно рассматривают исходя из полуклассической теории фоторегистрации. В ней рассматривают только процессы взаимодействия излучения с фоточувствительным материалом в предположении отсутствия пространственно-временных флуктуаций интенсивности излучения. При этом статистика фоторегистрации соответствует статистике дискретных независимых событий, описываемой распределением Пуассона, для которого вероятность наблюдения заданного числа фотоотсчётов во временном интервале от t до $t+\tau$ определяется выражением [2]

$$P(N, t, t+\tau) = \frac{(\bar{N})^N}{N!} \cdot e^{-\bar{N}}, \quad (1)$$

где N – число фотоотсчётов; τ – время экспозиции; $\bar{N}$ – среднее число фотоотсчётов во временном интервале $(t, t+\tau)$. При этом значение отношения сигнал-шум пропорционально квадратному корню из среднего числа регистрируемых фотонов в пикселе матрицы.

Анализ зависимостей распределения вероятности показывает, что флуктуации количества зарегистрированных фотонов в пикселе изображения проявляются как разброс одиночных фотонов по пикселям при малых значениях среднего количества регистрируемых фотонов. Такие изображения называют субфотонными.

В работе проводилось моделирование субфотонных изображений в программе *MATLAB*. Случайный процесс, представляющий регистрацию фотонов, моделируется с использованием встроенной функции *poissrnd*, генерирующей псевдослучайные целые числа, соответствующие распределению Пуассона, в качестве параметра функции выступает среднее количество фотонов, зарегистрированных в пикселе за время экспозиции – $\bar{N}$.

На рис. 1, в качестве примера, представлены картины трёх изображений однородного пространственного распределения, полученные в результате моделирования при средних значениях количества фотоэлектронов в пикселе 0,1; 0,01 и 0,001, соответственно.

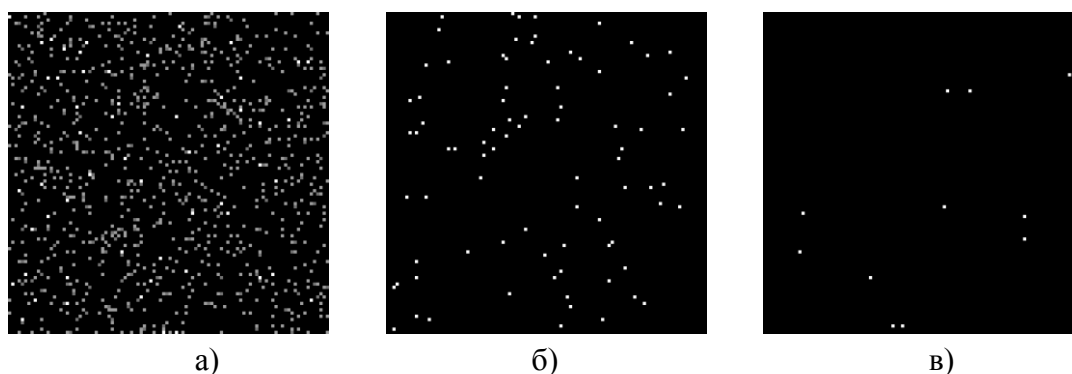


Рис. 1 Примеры изображений, получаемых при различных средних значениях потоков фотонов

На рис. 2 даны примеры трёх изображений синусоидальной пространственной миры. Формат изображений 100x100, период численно равен 10 пикселям.

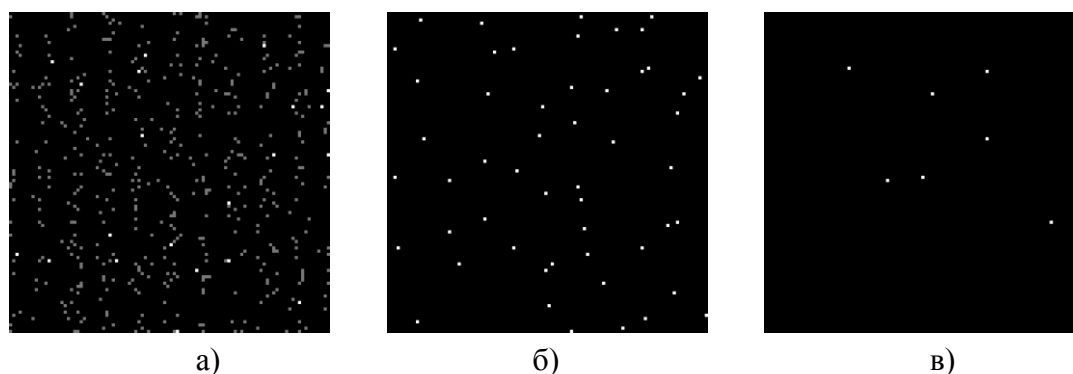


Рис. 2 Изображения синусоидальной миры, реализованные при заданных величинах фотонного потока.

На рис. 2. а) при среднем числе фотонов, приходящихся на пиксель, равном 0,1 визуально ещё можно наблюдать пространственную периодичность синусоидальной миры. Однако, на рис. 2. б) и 2. в) при потоках фотонов 0,01 и 0,001 фотона на пиксель, соответственно, периодичность визуально практически незаметна. Поэтому для оценки информационного содержания субфотонных изображений в работе использовался метод корреляционного сопоставления тестового изображения и его субфотонного аналога.

Результаты расчёта коэффициента корреляции в зависимости от величины среднего потока фотонов приведены на рис. 3. Зависимость, приведенная на рис. 3, указывает на тенденцию снижения информационного содержания изображений по мере снижения интенсивности фотонного потока.

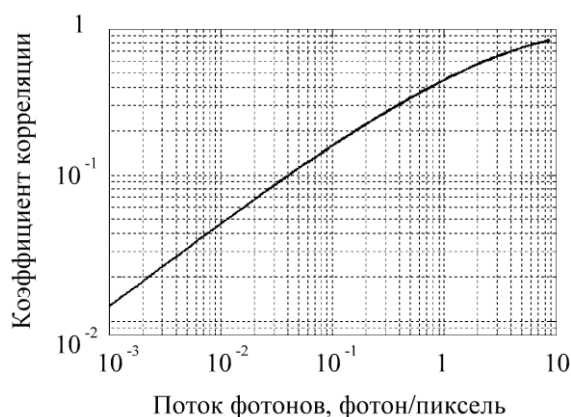


Рис. 3 Зависимость коэффициента корреляции от величины потока фотонов.

Представляет интерес рассмотреть возможность регистрации субфотонных изображений с помощью ПЗС-матриц с внутренним электронным умножением - *electron multiplying CCD (EMCCD)*.

2. ПЗС-матрицы с внутренним электронным умножением.

Основным фактором, препятствующим получению субфотонных изображений с помощью традиционных ПЗС-устройств, является, так называемый, шум считывания [3], который ограничивает возможность реализации требуемого отношения сигнал-шум. Поэтому традиционно основные усилия разработчиков были направлены на снижение шума считывания. Сегодня наилучшие образцы ПЗС-матриц обладают величиной шума считывания, приближающейся к нескольким шумовым электронам.

Главной особенностью ПЗС-матриц с внутренним электронным умножением является возможность умножить сигнальный заряд, т. е. увеличить уровень сигнала ещё до процесса считывания зарядовых пакетов, поэтому шумы считывания в *EMCCD* матрицах отходят на второй план. Это обстоятельство открывает принципиально новые возможности для повышения отношения сигнал-шум при весьма низких уровнях освещённости. Такие устройства переводят в практическую плоскость вопрос о возможности регистрации ТВ-камерами субфотонных потоков [4].

Структурная схема фоточувствительной *EMCCD* матрицы приведена на рис. 4. Её структура близка к структуре традиционных ПЗС-устройств с кадровым переносом (*frame transfer*).

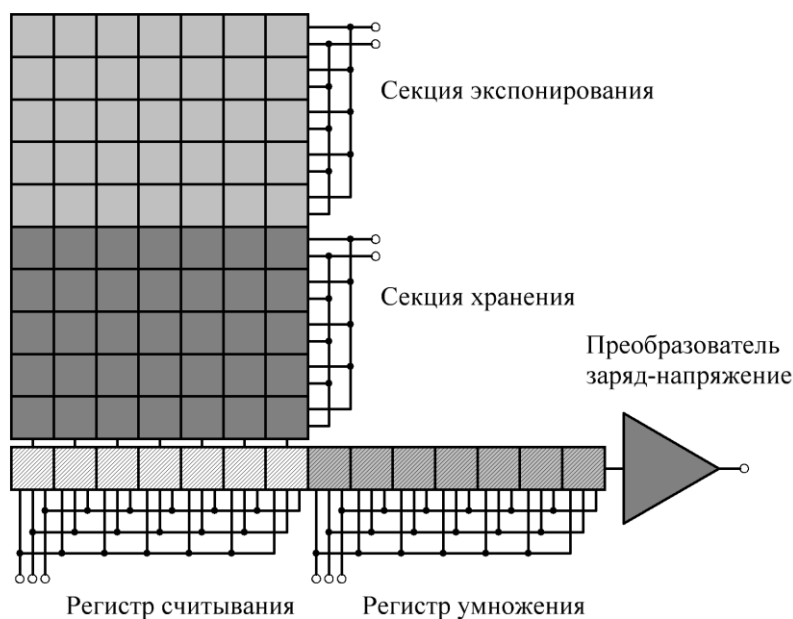


Рис.4 Структурная схема ПЗС матрицы с внутренним электронным умножением

Матрица включает в себя секцию экспонирования изображения, секцию хранения электронного изображения и регистр считывания. Отличительной особенностью *EMCCD* устройств является наличие дополнительного регистра - регистра умножения. По структуре регистр умножения близок к регистру считывания, но использует систему электродов с более высоким напряжением тактирующих импульсов. Повышенное напряжение позволяет инициировать лавинный пробой, который приводит к умножению сигнального заряда.

Лавинное умножение происходит при переходе заряда из ячейки в ячейку. При каждом таком переходе в результате лавинного умножения исходный заряд увеличивается незначительно, примерно на 1,5-2 %, однако после прохождения нескольких сотен ячеек регистра умножения общий (результатирующий) коэффициент умножения может достигать величин около ста и выше [5]. Отметим, что при низких значениях коэффициента лавинного умножения процесс электронного умножения является малошумящим, что позволяет увеличивать сигнальный заряд при практически неизменном шуме на выходе матрицы. Таким образом, если пиксель фоточувствительной матрицы регистрирует отдельный фотон, то на вход преобразователя заряд-напряжение поступает сигнальный заряд около ста и более электронов, по сравнению с которым шум считывания становится второстепенным, что и позволяет повысить отношение сигнал-шум.

Важной особенностью *EMCCD*-матриц является использование, так называемого, обратного освещения матрицы. Обратное освещение матрицы устраняет потери, обусловленные прохождением излучения через электроды, которые характерны для прямой засветки ПЗС структуры, и тем самым приблизить квантовую эффективность *EMCCD*-матриц к теоретическому пределу [6,7]. Возможность изменения толщины поглощающего слоя при обратном освещении в сочетании с просветляющими покрытиями, позволяет также оптимизировать спектральную кривую квантового выхода.

3. Шумовые свойства *EMCCD* матриц

В рассматриваемых устройствах кроме фотонного шума существуют собственные шумы. Поэтому для определения потенциальных возможностей *EMCCD* устройств необходим учёт всех составляющих шумовых сигналов. ПЗС-матрицы характеризуют отношением сигнал-шум, которое определяется выражением [8]

$$\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} = \frac{S}{\sqrt{\sigma_R^2 + g_T \cdot \tau + \sigma_{CIC}^2 + S}}, \quad (2)$$

где, S – среднее значение сигнального заряда, электрон; g_T – скорость процесса термогенерации (электрон на пиксель в секунду); τ – время экспозиции, сек; σ_R – шум считывания, электрон^{1/2}; σ_{CIC} – среднеквадратичное значение наведённого шумового заряда, электрон^{1/2}.

Для *EMCCD* матриц выражение (2) принимает вид

$$\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} = \frac{S}{\sqrt{\sigma_R^2 / M^2 + F_{ш}^2 \cdot (g_T \cdot \tau + \sigma_{CIC}^2 + S)}}, \quad (3)$$

где M – результирующий коэффициент умножения; $F_{ш}$ – фактор шума процесса умножения.

Формула (3) показывает, что высокие значения M позволяют существенно уменьшить влияние шума считывания, т.е. именно того фактора, который принципиально ограничивает чувствительность традиционных ПЗС-устройств. Другие виды шумовых составляющих подавляют другими способами.

Шум, обусловленный процессом термогенерации, может быть существенно подавлен при охлаждении *EMCCD* сенсора. Наведённый в нём шумовой заряд, зависящий от количества переносов сигнального заряда из ячейки в ячейку, при тщательном подборе формы управляющих импульсов переноса, составляет незначительную среднюю величину менее 10^{-6} электрона на каждый перенос [9].

Зависимости отношения сигнал-шум для *EMCCD* матрицы от величины среднего значения сигнального заряда при различных условия работы, представлены на рис. 5. Для расчёта использованы значения параметров *EMCCD* матрицы типа *CCD97*, характерные для режима работы близкого к телевизионному [10].

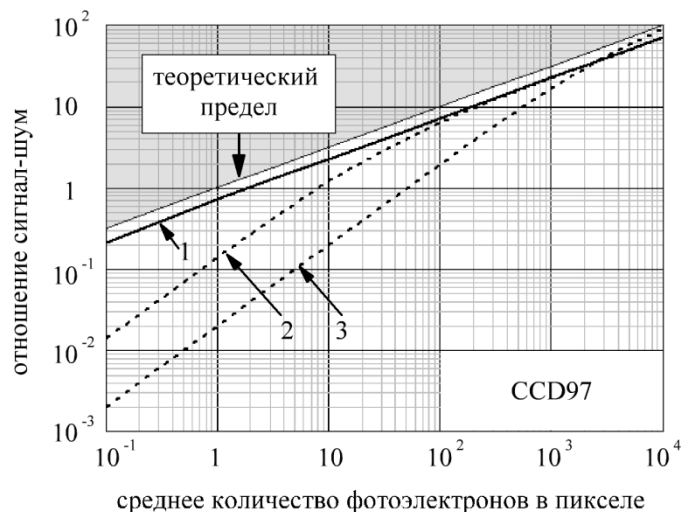


Рис. 5 Отношение сигнал-шум, как функция среднего числа сигнальных фотоэлектронов в зарядовом пакете. 1 – с умножением при температуре минус 40°C; 2 - с умножением при температуре 20°C; 3 - без умножения при температуре 20°C.

Видно, что при охлаждении сенсора до температуры минус 40°C, отношение сигнал-шум *EMCCD* матриц приближается к теоретическому пределу. Это позволяет говорить о возможности регистрации субфотонных изображений

4. ТВ-устройство на базе *EMCCD* матрицы.

Производство ТВ-устройств на базе *EMCCD* матриц весьма ограничено. В число производителей ТВ-устройств входят ведущие зарубежные фирмы: «*E2V Technologies*», «*Andor Technology*» (Великобритания) и «*Hamamatsu Photonics*» (Япония). Эти фирмы позиционируют свою продукцию как устройства для крупных научных центров и лабораторий. Стоимость их продукции весьма высока. Последнее обстоятельство делает актуальной задачу разработки и создания собственных устройств, адаптированных для решения конкретных задач.

На кафедре Электронных приборов «НИУ «Московский энергетический институт» было создано ТВ-устройство на базе *EMCCD*-матрицы типа *CCD97* [11], внешний вид которого представлен на рис. 6.

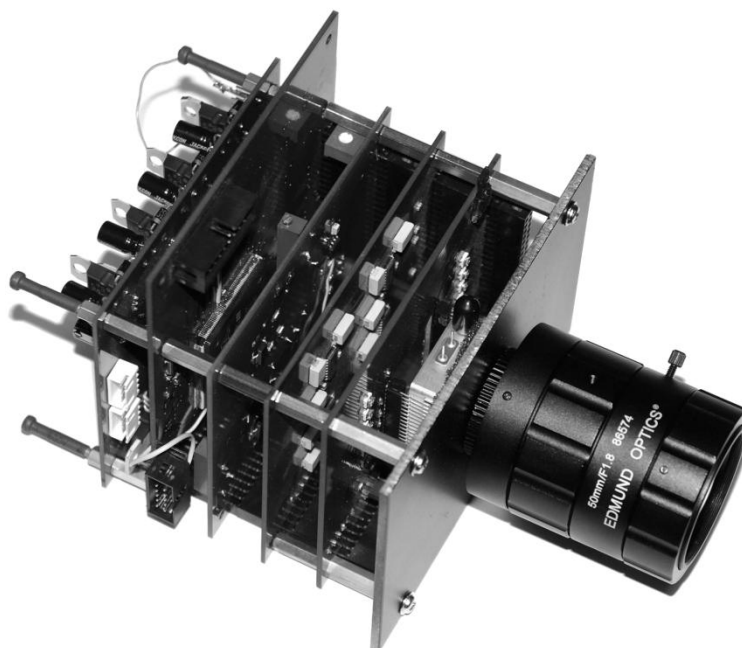


Рис. 6. Внешний вид ТВ-устройства на базе *EMCCD* матрицы

Рис. 7 иллюстрирует эффект внутреннего электронного умножения используемой *EMCCD* матрицы. Здесь представлены два изображения, полученные при одинаковой освещённости при различных значениях коэффициента умножения рис. 7 а) - 3 и рис. 7 б) - 80.

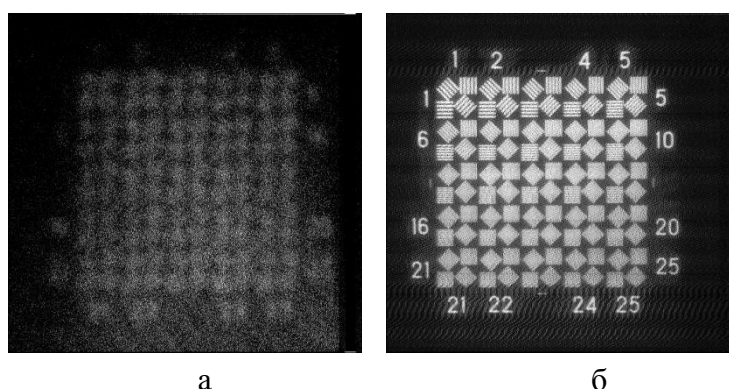


Рис. 7. Изображение тест-объекта, полученное с коэффициентом умножения 3 (а) и 80 (б)

В качестве источника малых фотонных потоков в работе использована модель АЧТ типа М-360 фирмы «*Mikron infrared*» (США) при температурах полости от 400 до 600 °С. Изображение выходного отверстия АЧТ переносилось в плоскость тест-объекта конденсором с относительным отверстием 1,3 и линейным увеличением равным единице. Тест-объектом служила стандартная штриховая мира. Для получения изображения миры на бесконечности, использован коллимирующий объектив. Полосно-пропускающий светофильтр типа *Baader UV-IR Cut* использован для выделения из спектра излучения АЧТ видимого излучения с длинами волн от 420 до 680 нм.

Для сравнения экспериментальных и теоретических результатов использованы значения отношения сигнал – шум, рассчитанные по формуле

$$\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} = \frac{\bar{X}_b - \bar{X}_a}{\sqrt{\sigma_{X_a}^2 + \sigma_{X_b}^2}}. \quad (5)$$

Здесь $\bar{X}$ – среднее значение сигнала; σ_X – среднеквадратичное отклонение. Индекс а) относится к закрытым от освещения - опорным пикселям, а индекс б) относится центральной (рабочей) области кадра при равномерном однородном освещении. Величины измерены в относительных единицах сигнала устройства считывания.

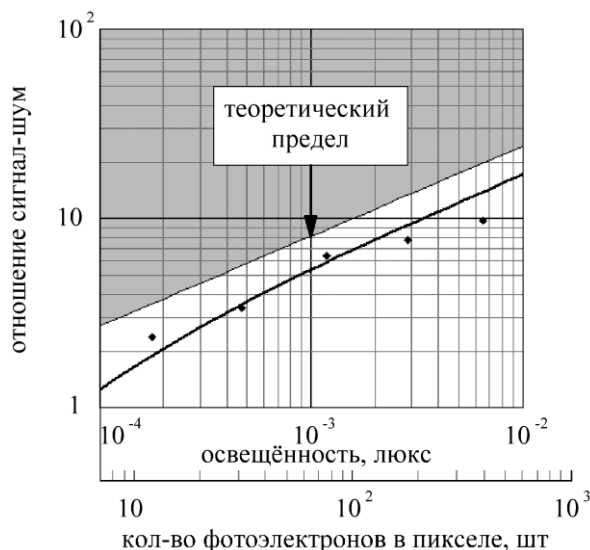


Рис. 8. Теоретическая зависимость, сплошная линия, и экспериментальные значения, точки, отношения сигнал-шум при результирующем коэффициенте умножения $M=80$

На рис. 8 представлена теоретическая зависимость отношения сигнал-шум. Здесь же нанесены экспериментальные значения, полученные при том же значении коэффициента умножения, равном 80. Видно, что внутреннее электронное умножение является эффективным средством, обеспечивающим работу ТВ-устройств в условиях малой освещенности 10^{-4} - 10^{-2} люкса.

Заключение

Рассмотрены особенности формирования изображений потоками излучения, составляющими единицы фотонов на элемент изображения. Проведено моделирование субфотонных изображений и корреляционное сопоставление моделируемых изображений с исходными образами. Показана возможность извлечения информационного содержания изображений даже при потоках менее одного фотона на элемент изображения.

Рассмотрены особенности фоточувствительных ПЗС матриц с внутренним электронным умножением (*EMCCD*), ориентированных на получение субфотонных ТВ-изображений. Для конкретного типа *EMCCD* сенсора проведен расчёт реализуемых значений отношения сигнал-шум при регистрации изображений.

Разработано и создано ТВ-устройство на базе *EMCCD* сенсора, позволившее продемонстрировать эффективность использования внутреннего электронного умножения сигнала для повышения отношения сигнал-шум. Полученные результаты показывают возможность и перспективы продвижения ТВ-устройств в область сверхнизких значений освещённости и получения (субфотонных) ТВ-изображений.

Список литературы

1. Andor Technology Ltd.: офиц. сайт. Режим доступа: www.andor.com (дата обращения 24.06.2014).
2. Гудмен Дж. Статистическая оптика: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 528 с.
3. Janesick James R. Scientific Charge-Coupled Device. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 2001. 906 p. DOI: [10.1117/3.374903](https://doi.org/10.1117/3.374903)
4. Бодров В.Н., Казначеев С.А., Обидин Г.И. Малофотонные телевизионные изображения, их реализация и проблемы // 19-я Межд. научно-техн. конф. «Современное телевидение и радиоэлектроника» (Москва, Россия, 15-16 марта 2011 г.): тр. М.: ФГУП МКБ «Электрон», 2011. С. 94-97.
5. Denvir D.J., Conroy E. Electron multiplying CCDs // Proc. SPIE 4877, Opto-Ireland 2002: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision. Session 1. 2003. DOI: [10.1117/12.463677](https://doi.org/10.1117/12.463677)
6. Jorden P.R., Downing M., Harris A. Improving the red wavelength sensitivity of CCDs // Proc. SPIE 7742, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV. 2010. DOI: [10.1117/12.862435](https://doi.org/10.1117/12.862435)
7. Williams, Jr. G.M., Reinheimer A.L., Johnson C.B., Wheeler K.D., Wodecki N.D., Aebi V.W., Costello K.A. Back-illuminated and electron-bombarded CCD low light level imaging system performance // Proc. SPIE 2551, Photoelectronic Detectors, Cameras, and Systems. 1995. DOI: [10.1117/12.218632](https://doi.org/10.1117/12.218632)
8. Low-Light Technical Note 2. The Use of Multiplication Gain in L3Vision™ Electron Multiplying CCD Sensors. A1A-Low-Light Technical Note 2. Iss. 4. E2V Technologies Ltd., July 2003. Режим доступа: http://www.e2v.com/shared/content/resources/File/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/Papers/low_light_technical_note_2.pdf (дата обращения 24.6.2014).
9. Zhang W.W., Chen Q., Zhou B.B., He W.J. Signal-to-Noise Ratio Improvement of EMCCD Cameras // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2010. Vol. 4, no. 5. P. 966-970. Режим доступа: <http://waset.org/publications/4648/signal-to-noise-ratio-improvement-of-emccd-cameras> (дата обращения 24.06.2014).
10. CCD97-00. Back Illuminated 2-Phase IMO Series Electron Multiplying CCD Sensor. A1A-CCD97BI_2P_IMO_PEL Version 2. E2V Technologies (UK) Ltd., 2011. Режим доступа: <http://www.e2v.com/resources/account/download-datasheet/1487> (дата обращения 24.06.2014).

11. Казначеев С.А., Бодров В.Н. Реализация ТВ-камеры на базе фоточувствительной EMCCD-матрицы // XIX Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, НИУ МЭИ, 28 февраля-2 марта 2013 г.): тр. М.: МЭИ, 2013. С. 199.

Features of TV-Imaging with Limited Photon Flux

06, June 2014

DOI: 10.7463/0614.0716587

S.A. Kaznacheev

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 111250, Moscow, Russian Federation

kazn_sa@mail.ru

The purpose is to prove theoretically the possibility of recording images with a strong discrete character of registering photons and demonstrate the possibility of registering such images of television receivers.

A method of images simulation and correlation comparison shows the character of reducing the information content of single photon images for which each element (pixel) of idealized photosensitive matrix registers single photon fluxes.

Calculation based on the characteristics of serial samples CCDs with internal electronic multiplication (*Electron Multiplying CCD*, EMCCD) has been performed to show that such CCD in certain operating modes can record images formed by single photoelectrons, registered in pixels of matrix for the time of exposure. The calculation was performed taking into consideration all the basic and specific noises of a receiver type inherent. It is shown that the used value of the signal-to-noise ratio approaches to the theoretical limit imposed by photon noise, when the photon flux is in compliance with the single photon images record.

On the basis of the selected type of *EMCCD* receiver a TV device has been designed and created thus enabling a record of images at ultra-low light levels of the order of 10^{-4} lx.

In measurements a technique for creating the controlled low photon fluxes based on the application of the blackbody model as a radiant is used.

Experimentally obtained values of signal to noise ratio correspond to the theoretically calculated values in the realized operation mode.

Conclusions are drawn concerning the application prospects of CCDs with internal electron multiplication in developing the TV devices to run under low light conditions of 10^{-4} - 10^{-2} and to receive single photon images.

Publications with keywords: [Electron multiplying CCD](#), [photon noise](#), [TV-camera](#), [low illuminance](#), [signal-to-noise ratio](#)

Publications with words: [Electron multiplying CCD](#), [photon noise](#), [TV-camera](#), [low illuminance](#), [signal-to-noise ratio](#)

References

1. Andor Technology Ltd.: website. Available at: www.andor.com , accessed 24.06.2014.
2. Goodman J.W. *Statistical Optics*. John Wiley & Sons, 1985. (Russ. ed.: Goodman J.W. *Statisticheskaya optika*. Moscow, Mir Publ., 1988. 528 p.).
3. Janesick J.R. *Scientific Charge-Coupled Device*. Bellingham, WA, SPIE Optical Engineering Press, 2001. 906 p. DOI: [10.1117/3.374903](https://doi.org/10.1117/3.374903)
4. Bodrov V.N., Kaznacheev S.A., Obidin G.I. [Photon-limited television images, their implementation and problems]. *19-ia Mezhd. nauchno-tekhn. konf. "Sovremennoe televidenie i radioelektronika": tr.* [Proc. of the 19 Int. scientific-technical conference "Modern TV and radio electronics"]. Moscow, Russia, 15-16 March, 2011. Moscow, FGUP MKB "Elektron" Publ., 2011, pp. 94-97. (in Russian).
5. Denvir D.J., Conroy E. Electron multiplying CCDs. *Proc. SPIE 4877, Opto-Ireland 2002: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision*, session 1, 2003. DOI: [10.1117/12.463677](https://doi.org/10.1117/12.463677)
6. Jorden P.R., Downing M., Harris A. Improving the red wavelength sensitivity of CCDs. *Proc. SPIE 7742, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV*, 2010. DOI: [10.1117/12.862435](https://doi.org/10.1117/12.862435)
7. Williams, Jr. G.M., Reinheimer A.L., Johnson C.B., Wheeler K.D., Wodecki N.D., Aebi V.W., Costello K.A. Back-illuminated and electron-bombarded CCD low light level imaging system performance. *Proc. SPIE 2551, Photoelectronic Detectors, Cameras, and Systems*, 1995. DOI: [10.1117/12.218632](https://doi.org/10.1117/12.218632)
8. Low-Light Technical Note 2. The Use of Multiplication Gain in L3Vision™ Electron Multiplying CCD Sensors. A1A-Low-Light Technical Note 2. Iss. 4. E2V Technologies Ltd., July 2003. Available at: http://www.e2v.com/shared/content/resources/File/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/Papers/low_light_technical_note_2.pdf , accessed 24.06.2014.
9. Zhang W.W., Chen Q., Zhou B.B., He W.J. Signal-to-Noise Ratio Improvement of EMCCD Cameras. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, vol. 4, no. 5, pp.

966-970. Available at: <http://waset.org/publications/4648/signal-to-noise-ratio-improvement-of-emccd-cameras> , accessed 24.06.2014.

10. CCD97-00. Back Illuminated 2-Phase IMO Series Electron Multiplying CCD Sensor. A1A-CCD97BI_2P_IMO_PEL Version 2. E2V Technologies (UK) Ltd., 2011. Available at: <http://www.e2v.com/resources/account/download-datasheet/1487> , accessed 24.06.2014.
11. Kaznacheev S.A., Bodrov V.N. [Implementation of TV cameras on the basis of photosensitive EMCCD-matrix]. *19 Mezhd. nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov "Radioelektronika, elektrotehnika i energetika": tr.* [Proc. of the 19 Int. scientific-technical conference of students and graduate students "Electronics, Electrical and Power Engineering"]. Moscow, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 28 February-2 March, 2013. Moscow, MEI Publ., 2013, p. 199. (in Russian).