

*К. т. н. В. П. РЕВА, С. В. КОРИНЕЦ, А. Г. ГОЛЕНКОВ, С. В. САПОН, А. М. ТОРЧИНСКИЙ,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСКИЙ, д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ*

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ПЗС-ФОТОМАТРИЦЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖЕНИЕМ

Описаны принципы работы фотоматриц видимого излучения и ближнего инфракрасного диапазона, спроектированных на основе приборов с зарядовой связью с электронным умножением (ПЗС-ЭУ), и обсуждена архитектура построения таких матриц. Приведено краткое описание технологии изготовления фотоматриц ПЗС-ЭУ, а также некоторые параметры спроектированных и изготовленных экспериментальных образцов фотоматриц формата 640×512.

Ключевые слова: ПЗС-фотоматрицы, электронное умножение, ближний ИК-диапазон, видимое излучение.

В последнее десятилетие в технике получения изображений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах оптического спектра в условиях сверхнизкой освещенности появились новые решения — приборы с зарядовой связью с электронным умножением (**ПЗС-ЭУ**), основанные на использовании лавинного умножения носителей в ПЗС-фотоматрицах. Применение лавинного умножения усиливает фотосигнал в тысячи раз и позволяет регистрировать единичные фотоны. Благодаря этому стало возможным получение качественных изображений при меньших затратах на изготовление приборов ночного видения (например, электронно-оптических преобразователей). Матрицы ПЗС-ЭУ являются твердотельным аналогом фотоэлектронных преобразователей и изготавливаются по унифицированным технологическим процессам интегральной технологии. Изображения, полученные камерой с такой матрицей, имеют обычный вид и не требуют специальной подготовки оператора для распознавания объектов в отличие, например, от тепловизионных камер видения.

Принцип работы ПЗС-ЭУ

После изобретения в 1969 г. В. Бойлем и Дж. Смитом приборов с зарядовой связью (см., напр., [1]) возникла проблема повышения их чувствительности. Основное функциональное назначение фоточувствительных ПЗС заключается в преобразовании фотосигналов в последовательность пакетов электрических зарядов с их последующей обработкой для получения и хра-

нения изображений. Ограничение чувствительности обычных ПЗС обусловлено тем, что при преобразовании заряда в напряжение в выходном каскаде шум выходного усилителя, в зависимости от выходной емкости, составляет десятки электронов, что и ограничивает чувствительность ПЗС. Уменьшение же выходной емкости (для уменьшения числа шумовых электронов) затруднительно из-за геометрических (конструктивно-технологических) ограничений технологий их изготовления [2].

Увеличение фоточувствительности ПЗС-матриц оказалось возможным при использовании эффекта лавинного умножения электронов, переносящих зарядовые пакеты. Этот эффект впервые описан в [3]. Идея увеличения фотогерированного заряда за счет лавинного умножения электронов до преобразования его в напряжение была выдвинута в 1991 г. [4], а впервые реализована в 2001 г. [5].

Заряд может быть увеличен за счет образования между двумя затворами ПЗС области с сильным электрическим полем: когда электроны проходят через эту область, их энергия возрастает, и при их рассеянии на кристаллической решетке возможно появление дополнительных «сигнальных» электронов вследствие ударной ионизации [6, 7].

Для реализации процесса умножения электронов в конструкции ПЗС-ЭУ имеется дополнительный электрод, на который подается относительно высокое напряжение, не используемое в обычных ПЗС. Его величина зависит от кристаллографической ориентации материала подложки (в данном случае кремний) и находится в пределах 30—50 В.

Авторы выражают благодарность А. С. Станиславскому и С. Е. Духнину за помощь в проведении ряда экспериментов.

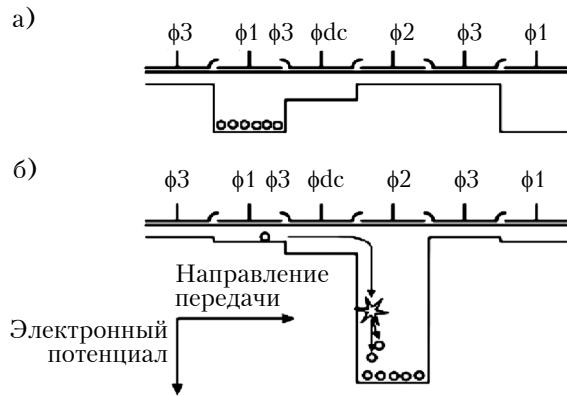


Рис. 1. Процесс лавинного умножения в ПЗС-ЭУ с трехфазной структурой [8]: ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 — электроды фаз горизонтального регистра переноса заряда; ϕ_{dc} — электрод, находящийся под постоянным напряжением

Процесс реализации ударной ионизации в структурах ПЗС-ЭУ возможен в различных конструктивных решениях, например со скрытым каналом, с виртуальной и обычной фазой и др. На **рис. 1** этот процесс показан для трехфазной структуры, которая была использована при разработке и исследовании матриц ПЗС-ЭУ в данной работе.

Быстрое распространение в последние годы использования ПЗС-ЭУ в системах видения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, а также применение, например, в астрономии, при спектроскопических исследованиях, в системах безопасности и др., обусловлено возможностью регистрации с их помощью излучения вплоть до нескольких фотонов и получения изображений в условиях низкой и сверхнизкой освещенности (до 10^{-4} лк, облачная ночь, в обычных фото-ПЗС — до $5 \cdot 10^{-2}$ лк) [9–11].

Коэффициент умножения для одной ячейки ПЗС-ЭУ составляет доли процента. Большие его значения в отдельных каскадах могут привести к необратимым процессам в микросхемах вплоть до разрушения. Поэтому для заметного усиления слабых сигналов (увеличения электронных пакетов) применяют многокаскадное последовательное усиление, когда число каскадов достигает нескольких сотен и даже тысяч. Если коэффициент усиления в одном каскаде умножения $K \approx 1,025$, то при числе каскадов $N = 300$ общий коэффициент умножения $K_{ЭУ} \approx 1650$ при высокой скорости считывания информации.

При всей своей привлекательности использования матриц ПЗС-ЭУ в приборах регистрации сигналов в условиях низкой освещенности технологии ПЗС-ЭУ имеют ряд недостатков, сдерживающих их распространение. Например, в системах видения и регистрации слабых потоков излучения матрицы ПЗС-ЭУ желательно

использовать при температурах, ниже комнатной. Снижение температуры сенсора на 20°C дает примерно десятикратное уменьшение темновых токов, а значит, и повышение пороговой чувствительности. Для понижения температуры ПЗС-ЭУ используются, как правило, термоэлектрические устройства, которые могут обеспечить снижение температуры примерно на 30°C при однокаскадном исполнении.

Следует отметить, что в связи с повышенной сложностью изготовления матриц ПЗС-ЭУ их стоимость может быть в несколько раз выше, чем обычных. Кроме этого, поддержание постоянного высокого напряжения на электродах регистра умножения сказывается и на жизненном цикле, и на энергопотреблении матриц ПЗС-ЭУ. Однако, несмотря на это, для получения изображений в видимой и ближней инфракрасной областях спектра в условиях низкой и сверхнизкой освещенности ПЗС-ЭУ-матрицы незаменимы.

Результаты исследований

Твердотельные матричные ПЗС-ЭУ, кроме случаев использования последовательных регистров умножения, по своей архитектуре не отличаются от фоточувствительных ПЗС-приборов [12]. В настоящей работе при изготовлении схем ПЗС-ЭУ формата 640×512 (размер одного чувствительного элемента 16×16 мкм) использовалась n -канальная МОП-технология с двухслойным диэлектриком ($\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2$) и скрытым ка-

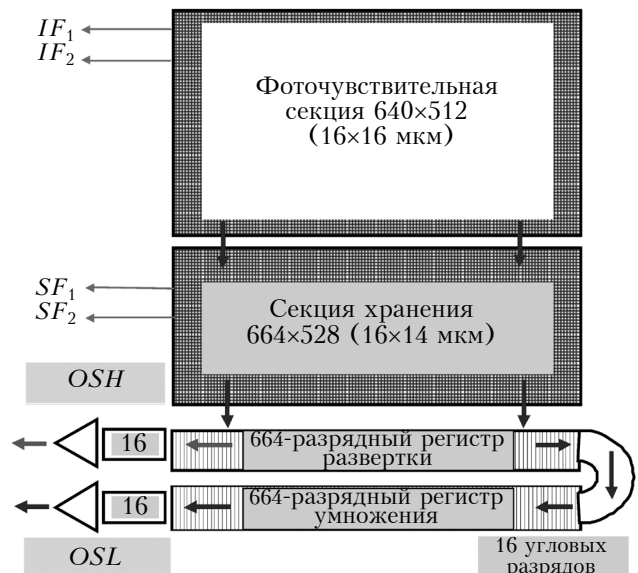


Рис. 2. Блок-схема матричного ПЗС-ЭУ формата 640×512 :

IF_1, IF_2 — электроды фазы 1 и фазы 2 фоточувствительной части матрицы; SF_1, SF_2 — электроды фазы 1 и фазы 2 области сохранения; OSH (5 мВ/электрон), OSL (1,2 мВ/электрон) — усилители регистров считывания и умножения (в скобках указаны значения коэффициентов преобразования)

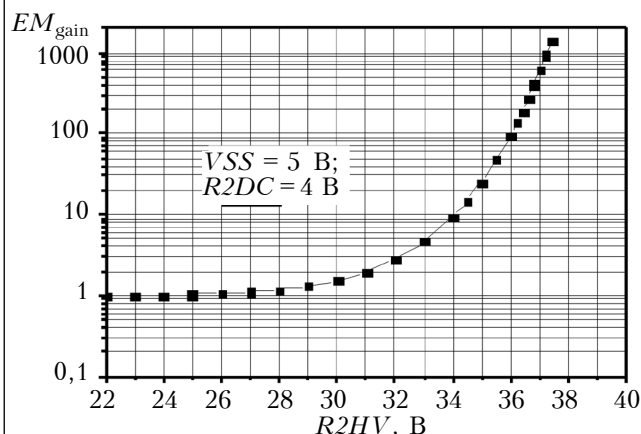


Рис. 3. Зависимость коэффициента умножения от приложенного напряжения усиления для матрицы ПЗС-ЭУ формата 640×512

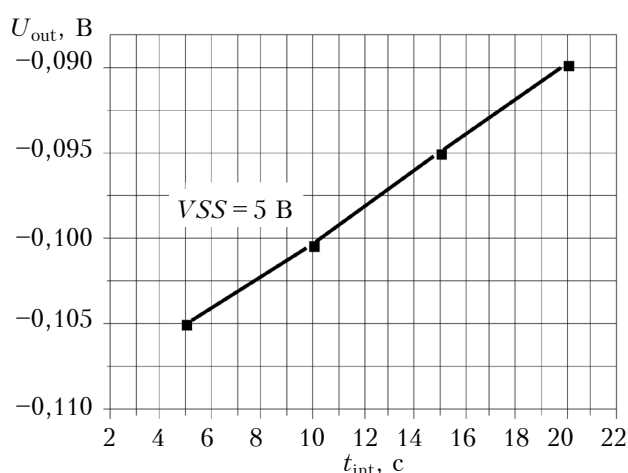


Рис. 4. Зависимость среднего темнового выходного сигнала матрицы ПЗС-ЭУ формата 640×512 от времени накопления (в отсутствие освещенности) при $T = 20^\circ\text{C}$

налом n -типа с проектными нормами 2,5 мкм, четырьмя уровнями поликремния и двумя уровнями металла. Матрица ПЗС-ЭУ спроектирована по архитектуре с переносом кадра (*frame transfer CCD*). Частота вывода видеосигнала $\nu \approx 11$ МГц, что достаточно для получения частоты кадров $f \approx 25$ Гц.

Матрица ПЗС-ЭУ состоит из двух секций: фоточувствительной и секции сохранения информации об уровне сигналов, а также последовательных регистров развертки и умножения (рис. 2). Последовательные регистры имеют дополнительные служебные разряды — угловые для изменения направления переноса и выходные для синхронизации функционирования схемы. Для возможности использования матрицы ПЗС-ЭУ в качестве обычной ПЗС-матрицы сделан дополнительный вывод.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента умножения EM_{gain} от приложенного напряжения усиления $R2HV$ при регулируемом посто-

янном напряжении смещения подложки матрицы $VSS = 5$ В и постоянном напряжении регистра умножения $R2DC = 4$ В. Здесь видно, что при $R2HV < 28$ В коэффициент EM_{gain} практически равен 1, а при увеличении $R2HV$ от 28 до 37 В значение EM_{gain} резко возрастает, достигая 1000.

Из приведенных на рис. 4 данных видно, что значение среднего темнового выходного сигнала U_{out} исследуемой матрицы ПЗС-ЭУ (а значит, и число шумовых электронов) линейно зависит от

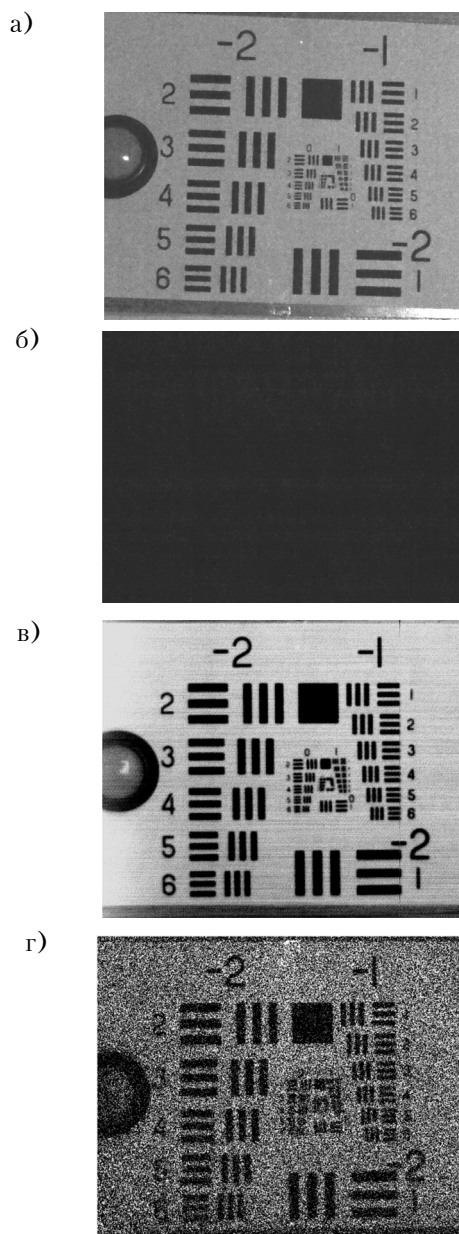


Рис. 5. Изображения, полученные с помощью стандартной камеры Nikon D3100 (а, б) и макета камеры с матрицей ПЗС-ЭУ 640×512 с $EM_{\text{gain}} = 500$ при $T = 20^\circ\text{C}$ (в, г) при экспозиции 0,1 с и различной освещенности объекта/матрицы ПЗС-ЭУ: а, в — 0,3 лк / 0,015 лк; б, г — 0,01 лк / $5 \cdot 10^{-4}$ лк (В левой части тестовой таблицы настройки изображений находится люксметр)

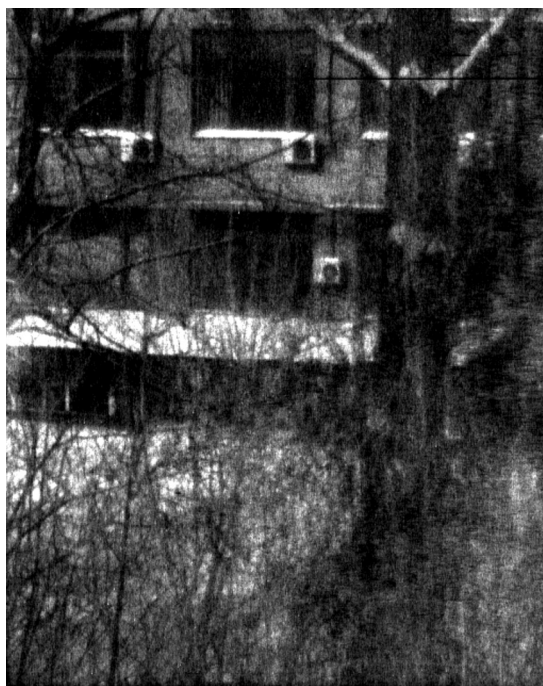


Рис. 6. Изображение, полученное с помощью разработанной матрицы ПЗС-ЭУ ночью при освещенности около $5 \cdot 10^{-4}$ лк

времени накопления t_{int} . При обычной освещенности (днем) шумовое напряжение такого уровня не сказывается на качестве получаемого изображения. В случаях же низкой и сверхнизкой освещенности и использовании больших значений коэффициентов умножения ($EM_{\text{gain}} = 100 - 1000$) темновые токи могут существенно влиять на качество получаемых изображений.

На рис. 5 показаны изображения, полученные при различной освещенности с помощью стандартной фотокамеры Nikon D3100 и макета камеры с матрицей ПЗС-ЭУ 640×512 при использовании в обоих случаях одного и того же объектива. Здесь продемонстрировано существенное различие в детализации полученных изображений и возможность получения более полной информации об объекте наблюдения в условиях малой освещенности с помощью камеры с ПЗС-ЭУ матрицей. При этом следует отметить, что освещенность матрицы ПЗС-ЭУ зависит от качества применяемого объектива.

Для демонстрации возможностей разработанной матрицы ПЗС-ЭУ на рис. 6 приведено изображение строения, полученное при ее использовании ночью при освещенности около $5 \cdot 10^{-4}$ лк, которое невозможно получить в таких условиях с помощью фотокамеры с обычной ПЗС или КМОП-матрицей.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования экспериментальных образцов фотоматри-

цы ПЗС-ЭУ формата 640×512 показали, что повышение амплитуды тактовых импульсов регистра умножения выше 27 В приводит к возникновению эффекта электронного умножения. Коэффициент умножения разработанных матриц ПЗС-ЭУ сильно зависит от амплитуды тактовых импульсов и при 37 В его значение превышает 1000, что позволяет получать изображения в условиях малой и сверхмалой освещенности вплоть до $5 \cdot 10^{-4}$ лк.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Boyle W.S. and Smith G.E. Charge-coupled semiconductor devices // Bell Systems Techn. J. — 1970. — Vol. 49, iss. 4. — P. 587–593. — <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x>
2. Janesick J.R. Scientific charge-coupled devices. — Bellingham, WA: SPIE Press, 2001.
3. Madan S.K., Bhaumik B., Vasi J.M. Experimental observation of avalanche multiplication in charge-coupled devices // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1983. — Vol. 30, iss. 6. — P. 694–699. — <http://dx.doi.org/10.1109/T-ED.1983.21191>
4. Hynecek J. CCM-A new low-noise charge carrier multiplier suitable for detection of charge in small pixel CCD image sensors // IEEE Trans. Electron Devices. — 1992. — Vol. 39, iss. 8. — P. 1972. — 1975. — <http://dx.doi.org/10.1109/16.144694>
5. Pat. US 20010031517A1. Process for fabrication of split-gate virtual phase charge coupled devices. Jaroslav Hynecek.
6. Pool P.J., Morris D.G., Burt D.J. et al. Application of electron multiplying CCD technology in space instrumentation // Proc. SPIE. — 2005. — Vol. 5902, #59020A. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.621627>
7. O'Grady A.A. comparison of EMCCD, CCD and emerging technologies optimized for low light spectroscopy applications // Proc. SPIE. — 2006. — Vol. 6093, #60930S. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.644752>
8. Zhang W.W., Chen Q. Optimum signal-to-noise ratio performance of electron multiplying charge coupled devices // Int. J. of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. — 2009. — Vol. 3, N6. — P. 1285–1289. — International Science Index: scholar.waset.org/1999.5/2103
9. Daigle O., Djazovski O., Laurin D. et al. Characterization results of EMCCDs for extreme low-light imaging // Proc. SPIE. — 2012. — Vol. 8453, # 845303. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.926385>
10. Mackay C., Weller K., Suess F. Photon counting EMCCDs: New opportunities for high time resolution astrophysics // Proc. SPIE. — 2012. — Vol. 8453, # 845302. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.924642>
11. Rauscher B.J., Bolcar M.R., Clampin M. et al. ATLAST detector needs for direct spectroscopic biosignature characterization in the visible and near-IR // Proc. SPIE. — 2015. — Vol. 9602, # 96020D. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.2186554>
12. Hynecek J. Impactron — a new solid state image intensifier // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2001. — Vol. 48, iss. 10. — P. 2238–2241. — <http://dx.doi.org/10.1109/16.954460>

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.01 2017 г.

В. П. РЕВА, С. В. КОРИНЕЦЬ, О. Г. ГОЛЕНКОВ, С. В. САПОН,
А. М. ТОРЧИНСЬКИЙ, В. В. ЗАБУДСЬКИЙ, Ф. Ф. СИЗОВ

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ПЗЗ-ФОТОМАТРИЦІ З ЕЛЕКТРОННИМ МНОЖЕННЯМ

Описано принципи роботи фотоматриці видимого випромінювання і ближнього інфрачервоного діапазону, спроектованих на основі приладів із зарядним зв'язком з електронним множенням (ПЗЗ-ЕМ), та обговорено архітектуру побудови таких матриць. Наведено короткий опис технології виготовлення фотоматриці ПЗЗ-ЕМ, а також деякі параметри спроектованих і виготовлених експериментальних зразків фотоматриці формату 640×512.

Ключові слова: ПЗЗ-фотоматриці, електронне множення, ближній ІЧ-діапазон, видиме випромінювання.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.33

UDC 621.383.72

V. P. REVA, S. V. KORINETS, A. G. GOLENKOV,
S. V. SAPON, A. M. TORCHINSKY,
V. V. ZABUDSKY, F. F. SIZOV

Ukraine, Kiev, Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

CCD PHOTOMATRIXES WITH ELECTRON MULTIPLICATION

Electron multiplication charge coupled devices (EMCCD) technology is an innovation first introduced slightly more than a decade ago. The EMCCD is an image sensor that is capable of detecting an isolated photon without an image intensifier. It is achieved by electron multiplication circuit that is built in the chip of ordinary CCD.

Cameras with EMCCD arrays overcome limitations of getting high sensitivity with high frame rate. Traditional CCD cameras can be highly sensitive in the visible part of spectrum but at the expense of low frame rate. EMCCD can operate at very faint illumination conditions both in visible and near infrared regions.

The paper presents a short technological description of EMCCD 640×512 arrays manufacturing and some parameters of the arrays that were designed and manufactured. It was shown that multiplication coefficient depends much on applied amplification voltage and can achieve 1000. Also it is shown that images can be obtained at low illumination conditions (illumination at EMCCD is near $5 \cdot 10^{-4}$ lx).

Keywords: CCD photomatrix, electronic multiplication, near infrared, visible light.

REFERENCES

1. Boyle W.S., Smith G.E. Charge-coupled semiconductor devices. *Bell Systems Techn. J.*, 1970, vol. 49, iss. 4, pp. 587-593. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x>
2. Janesick J.R. Scientific charge-coupled devices. Bellingham, WA, SPIE Press, 2001, 907 p.
3. Madan S.K., Bhaumik B., Vasi J.M. Experimental observation of avalanche multiplication in charge-coupled devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1983, vol. 30, iss. 6, pp. 694-699. <http://dx.doi.org/10.1109/T-ED.1983.21191>
4. Hynecsek J. CCM-A new low-noise charge carrier multiplier suitable for detection of charge in small pixel CCD image sensors. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1992, vol. 39, iss. 8, pp. 1972-1975. <http://dx.doi.org/10.1109/16.144694>
5. Pat. US 20010031517A1. Process for fabrication of split-gate virtual phase charge coupled devices. Jaroslav Hynecsek.
6. Pool P.J., Morris D.G., Burt D.J., Bell R., Holland A.D. et al. Application of electron multiplying CCD technology in space instrumentation. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5902, #59020A. <http://dx.doi.org/10.1117/12.621627>
7. O'Grady A.A. comparison of EMCCD, CCD and emerging technologies optimized for low light spectroscopy

applications. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6093, #60930S. <http://dx.doi.org/10.1117/12.644752>

8. Zhang W.W., Chen Q. Optimum signal-to-noise ratio performance of electron multiplying charge coupled devices. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2009, vol. 3, no.6, pp. 1285-1289. International Science Index: scholar.waset.org/1999.5/2103

9. Daigle O., Djazovski O., Laurin D., Doyon R., Artigau E. Characterization results of EMCCDs for extreme low-light imaging. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8453, # 845303. <http://dx.doi.org/10.1117/12.926385>

10. Mackay C., Weller K., Suess F. Photon counting EMCCDs: New opportunities for high time resolution astrophysics. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8453, # 845302. <http://dx.doi.org/10.1117/12.924642>

11. Rauscher B.J., Bolcar M.R., Clampin M., Domagal-Goldman S.D., McElwain M.W. et al. ATLAST detector needs for direct spectroscopic biosignature characterization in the visible and near-IR. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9602, # 96020D. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2186554>

12. Hynecsek J. Impactron - a new solid state image intensifier, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, iss. 10, pp. 2238-2241. <http://dx.doi.org/10.1109/16.954460>