

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

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины
E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МАТРИЦ ПЗС С ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖЕНИЕМ

Исследованы чувствительность и основные электрические характеристики разработанных матриц приборов с зарядовой связью и электронным умножением с прямой засветкой формата 576×288 и 640×512 при комнатной температуре и низкой освещенности. Характеристики, полученные при освещенности $5 \cdot 10^{-4}$ люкс (свечение звездного неба при легкой облачности) и 10^{-2} люкс (свечение звездного неба и четверти Луны), соответствуют параметрам электронно-оптических преобразователей поколения 2⁺, что предполагает возможность использования таких матриц в приборах ночного видения.

Ключевые слова: ПЗС-фотоматрицы, электронное умножение, чувствительность, дальность обнаружения, идентификация объектов, прямая засветка, низкие освещенности.

Приборы ночного видения гражданского и специального назначения, ключевыми элементами которых являются электронно-оптические преобразователи (ЭОП), широко используются в условиях малой и сверхмалой освещенности в областях спектра от видимого до ближнего инфракрасного (ИК). Несмотря на прогресс в области создания неохлаждаемых тепловизионных приемников ИК-излучения, ЭОП остаются наиболее массовыми системами для визуального наблюдения в темное время суток [1]. Такие устройства необходимы для регулирования движения и вождения автотранспорта в ночных условиях, в спектроскопии при изуче-

нии атмосферы удаленных планет, в охранных системах, телевидении в условиях низкой освещенности и др. Номенклатура приборов ночного видения на основе ЭОП сегодня насчитывает десятки разновидностей, что позволяет сделать необходимый выбор в зависимости от условий наблюдения объектов (например, дальность, коэффициент отражения, контраст, размер объекта и др.), при этом их стоимость находится в диапазоне от нескольких сотен до 10–12 тысяч USD [2].

В охранных системах и системах вождения в ночных условиях обычно используются ЭОП, активно развиваемые с 1940-х годов по настоящее время [1–4]. ЭОП

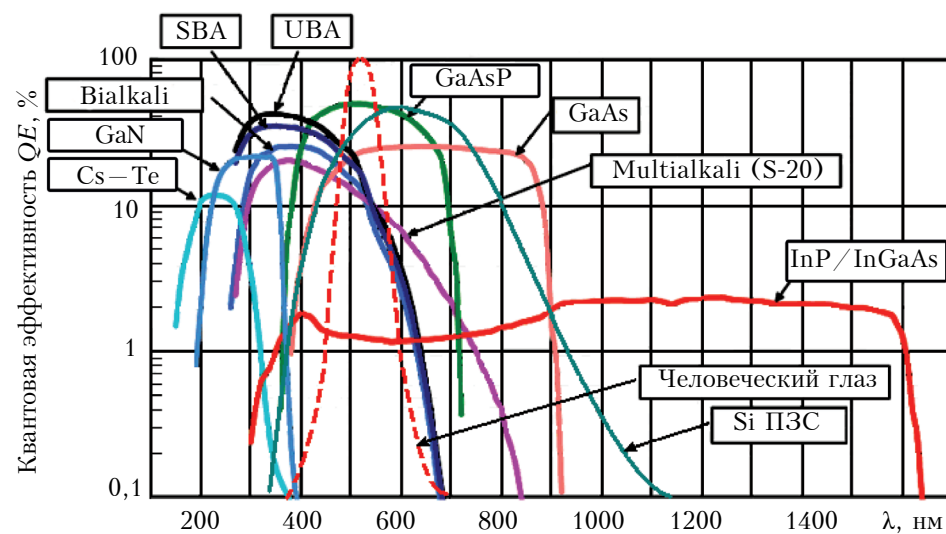


Рис. 1. Спектральные зависимости квантовой эффективности QE фотокатодов различного типа [5] и кремниевых ПЗС с прямой засветкой, а также чувствительность человеческого глаза

являются электровакуумными приборами, квантовая эффективность их фотокатодов обычно не превышает 50% (рис. 1), а красная граница фоточувствительности, как правило, меньше 0,9 мкм. Чувствительность фотокатодов лишь частично, в зависимости от используемого материала, перекрывается со спектральной областью чувствительности человеческого глаза в условиях низкой освещенности.

В последние два десятилетия успешно развиваются устройства видения с матрицами приборов с зарядовой связью (ПЗС) с внутренним электронным умножением (ЭУ) [6–10]. Такие устройства предназначены для наблюдений в условиях слабой освещенности и регистрации одиночных фотонов, а при дневном освещении их можно использовать, как обычные фотоматрицы фото- и видеокамер (отключено умножение). Благодаря эффекту лавинного умножения зарядовых пакетов до их преобразования в выходной сигнал, в таких приборах может быть обеспечено усиление фотосигнала в тысячи раз, что позволяет существенно улучшить отношение сигнал/шум вплоть до возможности регистрации единичных фотонов. Управляющая электроника ПЗС-ЭУ несколько сложнее, чем, например, в ЭОП поколений 2⁺ и 3⁺, но в них отсутствуют фотокатоды и микроканальные пластинки, они значительно более компактны.

Целью настоящей работы была оценка чувствительности разработанных приборов с зарядовой связью с внутренним электронным умножением в сравнении с вакуумными электронно-оптическими приборами и возможности их использования без охлаждения в устройствах ночного видения.

Исследовались разработанные фотоматрицы формата 576×288 и 640×512, спроектированные с использованием архитектуры покадрового переноса (frame transfer) по 1,5-мкм проектным нормам с размерами фоточувствительных ячеек 20×30 и 16×16 мкм соответственно и изготовленные по *n*-канальной технологии со «скрытым» каналом, четырьмя уровнями поликремниевых электродов и двумя уровнями металлизации [10].

Особенности применения приборов ночного видения

Различные условия наблюдения (освещенность объекта наблюдения, которая зависит как от фазы Луны, так и от географической широты, пропускание атмосферы, контраст между фоном и объектом, его размеры и др.) определяют особенности применения приборов ночного видения [11].

В условиях полной Луны плотность лунного излучения сравнима с плотностью свечения ночного неба в ближней ИК-области спектра. Свечение ночного неба (СНН) является достаточным для использования приборов ночного видения, функционирующих в спектральной области $\lambda = 0,50 - 1,05$ мкм (рис. 2). Практически в этой же спектральной области спектр излучения безлунного ночного неба близок к спектру излучения абсолютно черного тела ($T = 2856$ К) [1].

Интенсивность СНН в видимой области спектра примерно равна интенсивности звездного света, а в инфракрасной области значительно ее превосходит, поэтому ночное небо не является темным даже если исключить свет от звезд [13].

Плотность потока фотонов (см. рис. 2) в областях спектра, где фоточувствительны фотокатоды ЭОП и кремниевые детекторы, сильно зависит от длины волны излучения. Светимость атмосферы в ближней ИК-области спектра слабо зависит от фазы Луны, которая вносит основной вклад в коротковолновом диапазоне спектра. Кроме того, освещенность в ближней ИК-области спектра значительно меньше зависит от атмосферного поглощения по сравнению с видимым диапазоном [12]. Эти два обстоятельства и определяют эффективность применения приборов ночного видения в ближнем ИК-диапазоне спектра.

Для измерения уровня освещенности используются люксметры, спектральная чувствительность которых почти такая же, как и у глаза стандартного наблюдателя (дневное и сумеречное зрение). Поскольку спектральные чувствительности люксметров и исследуемых приборов ночного видения могут между собой не совпадать, при их сравнении желательно учитывать также спектральные зависимости свечения ночного неба, высоты Луны над горизонтом, квантовой эффективности ПЗС-ЭУ $\eta(\lambda)$, коэффициентов отражения наблюдаемых объектов $R(\lambda)$, коэффициентов пропускания атмосферы $t_{\text{атм}}(\lambda)$, объектива $t_{\text{об}}(\lambda)$, времени накопления и т. п. Фактически, необходимо принимать во внимание энергетические характеристики излучения, попадающего на чувствительные элементы исследуемого прибора, и для определения дальности

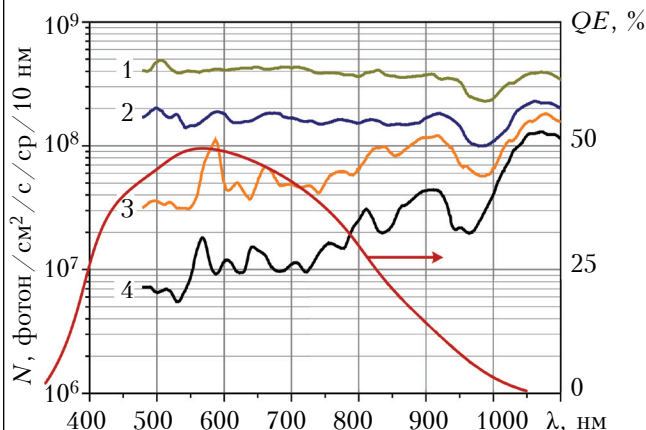


Рис. 2. Плотность потока фотонов N в ночное время в зависимости от фаз Луны [12] и типичная спектральная зависимость квантовой эффективности QE Si ПЗС-структур с прямой засветкой:

- 1 – СНН + 0,89 Луны; 2 – СНН + 0,5 Луны;
- 3 – СНН + 0,25 Луны; 4 – только СНН

сти обнаружения, распознавания и идентификации объекта сравнивать уровни сигналов с шумовыми характеристиками самой фоточувствительной матрицы.

Предположим, что отраженное от объекта наблюдения излучение обусловлено свечением ночного неба в диапазоне длины волны от λ_1 до λ_2 . Тогда число сгенерированных электронов n_c в одном фоточувствительном элементе ПЗС-ЭУ с учетом коэффициента пропускания оптической системы $\tau_{оп}$, показанной на рис. 3, определяется выражением

$$n_c = \frac{A_d \tau}{4(F\#)^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda) \tau_{атм}(\lambda) \tau_{оп}(\lambda) R(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где A_d — площадь фоточувствительного элемента ПЗС-ЭУ.

Предполагается, что коэффициент отражения наблюдаемых объектов $R(\lambda)$ не зависит от угла падения света (подобно плотности мощности ламбертовского источника излучения, когда энергетическая светимость излучающей поверхности не зависит от угла и направления излучения).

На рис. 3 $A_{об}$ — площадь объекта наблюдения, проецируемая оптической системой на фоточувствительный элемент, она соответствует мгновенному полю зрения одного дискретного приемника излучения; $S_{оп} = \pi D^2/4$ — площадь входного зрачка диаметром D ; l — расстояние от объекта до объектива; $\Omega_0 = S_{оп}/l^2$ — телесный угол (поле зрения), в пределах которого излучение от объекта поступает на входной зрачок оптической системы площадью $S_{оп}$; $\Omega = A_{об}/l^2 = A_d/f^2$ — мгновенное поле зрения одного чувствительного элемента. Диафрагменное число $F\#$ для тонких линз при относительно малых плоских углах зрения ($\theta/2 < 15^\circ$) рассчитывается как $F\# = 0,5 \sin \theta/2 \approx f/D$ ($f \geq 2D$).

Оценим размеры площади $A_{об}$ при использовании стандартного стеклянного объектива Nikon AF

Nikkor 50 mm с диафрагменным числом $F\# = 1,8$ ($f = 50$ мм).

Для матрицы 576×288 с размерами чувствительного элемента $L_d = 20 \times 30$ мкм (соответствует разрешающей способности 50 штр./мм) для угла $\Omega = A_{об}/l^2 = A_d/f^2 = 1,6 \cdot 10^{-7}$ ср и дистанции 200 м получим $L_{об} = (A_{об})^{1/2} = 8$ см. Для матрицы 640×512 с размерами чувствительного элемента 16×16 мкм (≈ 63 штр./мм) эта величина составит $L_{об} = 6,5$ см.

Исследование чувствительности матриц ПЗС-ЭУ

Расчет пороговой чувствительности может быть сделан лишь для конкретных условий наблюдения объекта. Для примера рассмотрим два варианта освещенности — звездное небо при наличии легкой облачности (рис. 2, кривая 4, освещенность $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс); звездное небо и четверть Луны (кривая 3, $E_v \approx 10^{-2}$ люкс).

Оценим чувствительность матриц ПЗС-ЭУ с прямой засветкой и площадью чувствительного элемента 20×30 мкм при $\tau_{об} = \tau_{атм} \approx 0,9$, $R \approx 0,6$, $F\# = 1,8$ и использовании указанного выше объектива ($f = 50$ мм). В соответствии с формулой (1) получим, что число электронов, генерируемых одним фоточувствительным элементом, составляет примерно $50 e^-/с$ при $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс и $250 e^-/с$ при $E_v \approx 10^{-2}$ люкс, что при частоте кадров $25 c^{-1}$ соответствует $2 e^-/пиксел/кадр$ и $10 e^-/пиксел/кадр$.

Из полученных оценок чувствительности могут быть сделаны заключения о дальности обнаружения, распознавания и идентификации наблюдаемого объекта.

Для анализа возможностей применения разработанных матриц ПЗС-ЭУ в системах наблюдения в условиях малой освещенности проводилась экспериментальная оценка чувствительности матриц, которая основывалась на сравнении показаний люксметров и критерии Джонсона [2, 14] (с использованием стандартной тестовой та-

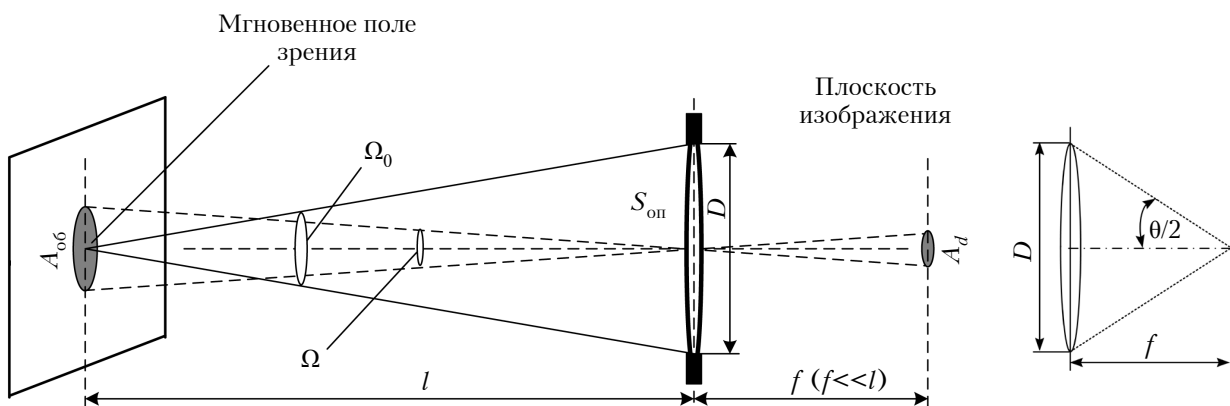


Рис. 3. Схематическое изображение оптической системы

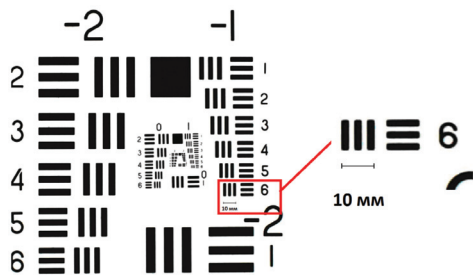


Рис. 4. Тестовая таблица для оценки параметров ПЗС-ЭУ (вынесены размеры одного из элементов таблицы, использованных для оценки дальности обнаружения и идентификации объектов наблюдения)

блицы 1951 USAF resolution target test chart, **рис. 4**) для минимального размера пар линий, различаемых наблюдателем (одна пара состоит из темной и светлой линии). Такое разрешение дает 50%-ю вероятность дискриминации объекта по указанному параметру.

Применение ПЗС-ЭУ наиболее эффективно при числе возбужденных фотоэлектронов в пикселе $n_c < 100$, т. е. при фазе Луны $\leq 0,5$ [1], когда отношение сигнал/шум для ПЗС-ЭУ в несколько раз больше, чем для обычных ПЗС [9]. При уменьшении числа фотоэлектронов в пикселе (снижении освещенности) это отношение растет.

При освещенности $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс телевизионные камеры на основе обычных ПЗС являются «слепыми». Если же использовать ПЗС-ЭУ, то это приведет к умножению числа сигнальных (и шумовых) электронов в чувствительном эле-

менте, а также к улучшению соотношения сигнал/шум [9]. Применение даже относительно низкоэффективного ПЗС-ЭУ с прямой засветкой и коэффициентом умножения $K \approx 10^3$ дает возможность проводить наблюдения в условиях сверхнизкой освещенности, как это продемонстрировано на **рис. 5, а** на примере изображения тестовой таблицы. Здесь можно различить достаточно мелкие детали таблицы, хотя изображение зашумлено, что обусловлено флуктуациями попадающих на чувствительный элемент потока фотонов (примерно 2 на пиксел) и шумом темнового сигнала.

При освещенности $E_v \approx 10^{-2}$ люкс камеры с обычными ПЗС в лучшем случае выдают очень зашумленное изображение. При использовании же ПЗС с электронным умножением число электронов, генерируемых фоточувствительным элементом матрицы, составляет примерно $10 e^-$ / пиксел / кадр, что позволяет даже при коэффициенте умножения $K \approx 10^2$ получить изображение тестовой таблицы достаточно хорошего качества (рис. 5, б).

При $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс камера, реализованная с применением разработанных матриц ПЗС-ЭУ, позволит обнаружить человеческую фигуру на расстоянии около 200 м. При этом в соответствии с критерием Джонсона для получения изображения используются 9×9 пикселов, что для указанной дистанции соответствует объекту размером около 0,75 м (ширина плеч человека). Примерно такими же возможностями обладают ЭОП поколения 2+ [2]. При освещенности 10^{-2} люкс

Некоторые электрические характеристики матричных ПЗС-ЭУ разных форматов

Параметр	Значение параметра для матрицы форматом	
	576×288	640×512
Пиковое выходное напряжение (нормальный режим), В	0,775	0,11
Пиковое выходное напряжение (режим умножения), В	1,96	1,97
Заряд насыщения выходного сигнала, e^- / пиксел	$324 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^3$
Зарядовая емкость регистра умножения, e^- / пиксел	$825 \cdot 10^3$	$900 \cdot 10^3$
Средний «темновой» сигнал ($T = 293$ К), e^- / пиксел / с	42	490
Шум считывания, e^- / пиксел / с	30–40	60–70

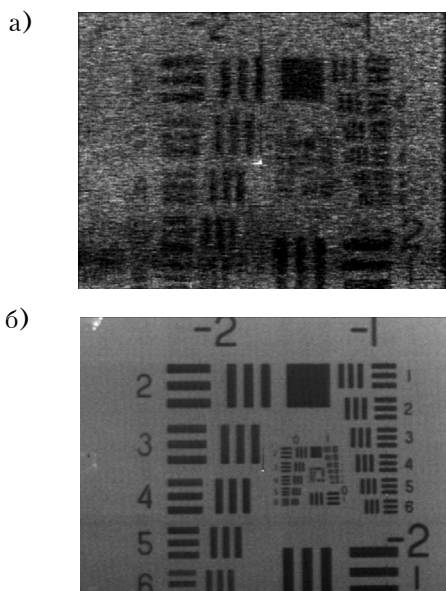


Рис. 5. Изображения тестовой таблицы для определения чувствительности ПЗС-ЭУ, полученные при различных условиях:

а – $E_v \approx 5,4 \cdot 10^{-4}$ люкс, $K \approx 10^3$;
 б – $E_v \approx 10^{-2}$ люкс, $K \approx 10^2$

на этом расстоянии может быть идентифицирована человеческая фигура.

Основные электрические характеристики матриц ПЗС-ЭУ формата 576×288 и 640×512 приведены в **таблице**.

Проведенные исследования чувствительности разработанных и изготовленных матриц приборов с зарядовой связью с внутренним электронным умножением с прямой засветкой показали, что на их основе могут быть реализованы приборы ночного видения без охлаждения с параметрами, соответствующими вакуумным электронно-оптическим приборам поколения 2+. Разработанные устройства являются безвакуумными электронными устройствами и могут успешно применяться для контроля движения транспорта, телевидения при низкой освещенности, в охранных системах и др.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. — Москва: Физматлит, 2014.
2. Borissova D. Night Vision Devices. — Sofia: Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2015.
3. Орлов В. А., Петров В. И. Приборы наблюдения ночью при ограниченной видимости. — Москва: Военное издательство, 1989.
4. Саликов В. Л. Приборы ночного видения: история поколений // Спец. техника. — 2000. — № 2. — С. 40–48.

5. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/technology/innovation/photocathode/index.html>

6. Denvir D. J., Conroy E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD // Proc. SPIE. — 2002. — P. 4796. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.457779>

7. Seitz P., Theuwissen A. J. P. Single-Photon Imaging. — Springer, 2011.

8. Daigle O., Djazovski O., Francoeur M. et al. EMCCDs: 10 MHz and beyond // Proc. SPIE 9154, 91540B. — 2014. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.2054977>

9. Wilkins A. N., McElwain M. W., Norton T. J. et al. Characterization of a photon counting EMCCD for space-based high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets // Proc. SPIE 9154, 91540C. — 2014. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.2055346>

10. Рева В. П., Коринец С. В., Голенков А. Г. и др. ПЗС-фотоматрицы с электронным умножением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2017. — № 1–2. — С. 33–37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.33>

11. Borissova D. Night vision devices choice taking into account the external surveillance conditions // Advanced Modeling and Optimization. — 2008. — Vol. 10, N 2. — P. 213–220.

12. Derviere F. Quantum efficiency advances sensors for night vision. — Euro Photonics, 2012.

13. Vatsia M. L. Atmospheric optical environment. — United States: N. p., 1972. Web.

14. Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. — Москва: Логос, 2004.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 02.03 2018 г.*

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

Україна, м Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ЧУТЛИВІСТЬ МАТРИЦЬ ПЗЗ ІЗ ЕЛЕКТРОННИМ МНОЖЕННЯМ

Досліджено чутливість і основні електричні характеристики розроблених матриць приладів із зарядовим зв'язком і електронним множенням з прямим засвіченням при кімнатній температурі і низькій освітленості. Фотоматриці формату 576×288 і 640×512 були спроектовані з використанням архітектури покадрового перенесення (frame transfer) по 1,5-мкм проектним нормам з розмірами фоточутливих елементів 20×30 і 16×16 мкм відповідно і виготовлені по n-канальній технології з «прихованим» каналом, чотирма рівнями полікремнієвих електродів і двома рівнями металізації. Для аналізу можливостей застосування розроблених матриць ПЗЗ-ЕМ в системах спостереження в умовах малої освітленості проводилася експериментальна оцінка чутливості матриць. Вона ґрунтувалася на порівнянні показань люксметрів та критерії Джонсона з використанням стандартної тестової таблиці 1951 USAF resolution target test chart для мінімального розміру пар ліній, що розрізняються спостерігачем (одна пара складається з темної і світлої лінії). Характеристики, отримані при освітленості $5 \cdot 10^{-4}$ люкс (світіння зоряного неба при легкій хмарності) і 10^{-2} люкс (світіння зоряного неба і чверті Місяця), відповідають параметрам електронно-оптичних перетворювачів покоління 2+, що передбачає можливість використання таких матриць в приладах нічного бачення. При $E_0 \approx 5 \cdot 10^{-4}$ люкс камера, реалізована з застосуванням розроблених матриць ПЗЗ-ЕМ, дозволить виявити людську фігуру на відстані близько 200 м. При освітленості 10^{-2} люкс на цій відстані людська фігура може бути ідентифікована.

Ключові слова: ПЗР-фотоматриці, електронне множення, чутливість, дальність виявлення, ідентифікація об'єктів, пряме засвічення, низькі освітленості.

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.09
UDC 621.383.72

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

Ukraine, Kiev, Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
E-mail: sizov@isp.kiev.ua

SENSITIVITY OF CCD MATRICES WITH ELECTRONIC MULTIPLICATION

The sensitivity and basic electrical characteristics of the developed direct illumination matrices with charge-coupled devices and electronic multiplication were investigated at room temperatures and low illumination. Photomatrices of 576×288 and 640×512 format were designed using frame transfer architecture and 1.5-μm design rules with photosensitive cell sizes of 20×30 and 16×16 μm, respectively, and manufactured using n-channel technology with buried channel, four levels of polysilicon electrodes and two levels of metallization. To analyze the possibilities of the developed EMCCD matrices used in monitoring systems at low-light conditions, an experimental assessment of the matrices sensitivity was carried out.

The assessment was based on a comparison of the luxmeter readings and Johnson's criteria using the standard 1951 USAF resolution target test table for the minimum size of line pairs distinguished by the observer (one pair consists of a dark and a light lines). The characteristics obtained with illumination of $5 \cdot 10^{-4}$ lux (glow of the starry sky with light clouds) and 10^{-2} lux (glow of the starry sky and the quarter of the Moon) corresponds to the parameters of generation 2+ electron-optical converters, which implies the possibility to use such matrices in night vision devices. At $E_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ lux, the camera with the developed EMCCD matrices will detect a human figure at the distance of about 200 m. With illumination of 10^{-2} lux at this distance a human figure can be identified.

Keywords: CCD-photomatrix, electronic multiplication, sensitivity, range of detection, identification of objects, direct illumination, low illumination.

REFERENCES

1. Gruzevich Yu. K. *Optiko-elektronnye pribory nochnogo videniya* [Optoelectronic night vision devices]. Moscow, Fizmatlit, 2014, 276 p. (Rus)
2. Borissova D. *Night Vision Devices*. Sofia, Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2015.
3. Orlov V. A., Petrov V. I. *Pribory nablyudeniya noch'yu pri ogranichennoi vidimosti* [Observation devices at night with reduced visibility]. Moscow, Voennoe izdatel'stvo, 1989. (Rus)
4. Salikov V. L. [Night Vision Devices: the History of Generations]. *Spets. tekhnika*, 2000, no. 2, pp. 40-48. (Rus)
5. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/technology/innovation/photocathode/index.html>
6. Denvir D. J., Conroy E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD. *Proc. SPIE*, 2002, pp. 4796. <http://dx.doi.org/10.1117/12.457779>
7. Seitz P., Theuwissen A. J. P. *Single-Photon Imaging*, Springer, 2011, 354 p.
8. Daigle O., Djazovski O., Francoeur M., Laurin D. G. Doyon R. EMCCDs: 10 MHz and beyond. *Proc. SPIE* 9154, 91540B, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2054977>
9. Wilkins A. N., McElwain M. W., Norton T. J. et al. Characterization of a photon counting EMCCD for space-based high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets, *Proc. SPIE* 9154, 91540C, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2055346>
10. Reva V. P., Korinets S. V., Golenkov A. G., Sapon S. V., Torchinsky A. M., Zabudsky V. V., Sizov F. F. CCD photomatrixes with electron multiplication. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, no. 1-2, pp. 33-37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.33> (Rus)
11. Borissova D. Night vision devices choice taking into account the external surveillance conditions. *Advanced Modeling and Optimization*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 213-220.
12. Derviere F. Quantum efficiency advances sensors for night vision. *Euro Photonics*, 2012.
13. Vatsia M. L. *Atmospheric optical environment*. United States, N. p., 1972. Web.
14. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnye sistemy smotryashchego tipa* [Infrared systems of the looking type]. Moscow, Logos, 2004, 452 p.

Описание статьи для цитирования:

Сизов Ф. Ф., Голенков А. Г., Рева В. П., Забудский В. В., Коринец С. В., Торчинский А. М. Чувствительность матриц ПЗС с электронным умножением. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 2, с. 9—14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.09>

Cite the article as:

Sizov F. F., Golenkov A. G., Reva V. P., Zabudsky V. V., Korinets S. V., Torchinsky A. M. Sensitivity of CCD matrices with electronic multiplication. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 9-14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.09>