

УДК 681.772.7

М.П. Бороненко, П.Ю. Гуляев

## Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения

Описана телевизионная измерительная система на базе высокоскоростной видеокамеры с наносекундным электронным затвором и микроканальным фотоумножителем. Обнаруженная нелинейность системы обусловлена архитектурой CMOS сенсора приемника изображений. Экспериментально полученные данные позволяют ввести для данной видеокамеры калибровочную шкалу с погрешностью не более 2%, связывающую яркость пикселей регистрируемого изображения и яркостную температуру, соответствующую тепловому излучению эталонной лампы.

**Ключевые слова:** электронно-оптический преобразователь, CMOS сенсор, высокоскоростные видеокамеры, яркостная температура.

В настоящее время телевизионные измерительные системы (ТИС) на базе фотодиодных матриц (ФДМ) с параллельной обработкой сигнала надежно зарекомендовали себя в приборах и технике физического эксперимента [1, 2]. Они практически не имеют альтернатив при исследовании быстротекущих процессов горения и взрыва [3], тепломассопереноса в гетерогенных потоках плазмы [4, 5], впрыска топлива [6], космических снимков [7], индуцированных лазером фототермических явлений [8] и пр. Таким образом, актуальной проблемой является разработка ТИС с такими параметрами быстродействия, чувствительности и динамического диапазона, которые позволят осуществлять регистрацию температурных полей с высоким пространственно-временным разрешением. Для решения этой задачи была взята ТИС на основе ФДМ производства компании Micron Technologies CMOS MT9M413, оснащенная микроканальным фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), наносекундным оптическим затвором (ЭОЗ) NanoGate с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП), позволяющими использовать видеокамеру в качестве высокоскоростного микропиометра.

**Математическая модель оптоэлектронного канала.** В общем случае матричные твердотельные приемники сигналов обеспечивают преобразование в электрический видеосигнал двумерное оптическое изображение, спроецированное на его светочувствительную поверхность. Считывание сигнала происходит по истечении выбранного времени экспозиции. Особенность рассматриваемой ТИС состоит в том, что она может регистрировать излучение слабой интенсивности за счет усиления в микроканальных пластинах, а быстродействие и многокадровая экспозиция обеспечиваются электронным затвором. Пространственное разрешение 30 пар линий на 1 мм, кадровая частота до 14000 кадров в секунду, экспозиция от 20 нс до 20 мкс. Функциональная схема ТИС приведена на рис. 1.

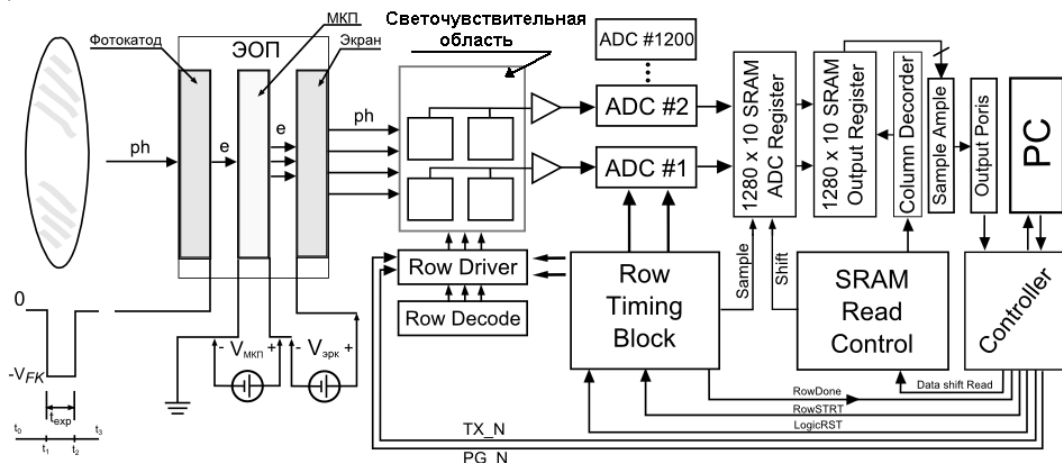


Рис. 1. Функциональная схема работы ТИС

Оптическое излучение объекта через объектив видеокамеры попадает на фотокатод ЭОП. Ток фотокатода равен  $i_{fk} = \eta\Phi(t)$ , где  $\eta$  – чувствительность фотокатода, выражаемая обычно в микроамперах на люмен,  $\Phi(t)$  – световой поток, который можно считать постоянным в течение малых времен накопления  $t_n$ .

В результате эмиссии электронов из фоточувствительного слоя катода оптическое изображение объекта, проецируемое на фотокатод, трансформируется в поток электронов на входе МКП и усиливается до величины  $I_{fk} = \mu\eta\Phi$ , а затем попадает в ускоряющее поле и на экран ЭОП. Благодаря люминесценции экрана из-за бомбардировки его фотоэлектронами электронное изображение преобразуется в видимое. Зависимость интенсивности  $I_L$  свечения от плотности тока электронного пучка  $I_{fk}$  и приложенного напряжения  $U$  выражается формулой

$$I_L = kf(j_{fk})(U - U_0)^q,$$

где  $q$  – для разных люминофоров принимает значение от 1 до 3 (в нашем случае  $q=1$ );  $k$  – константа, зависящая от природы люминофора;  $f(j_{fk})$  – функция, выражающая зависимость интенсивности свечения от плотности тока пучка электронов;  $U_0$  – минимальное напряжение, необходимое для прохождения электроном поверхностного слоя. Световой поток, излучаемый люминофором, определяется выражением

$$F = \frac{kf(j_{fk})(U - U_0)^q \cdot S}{dt},$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности.

Считывание сигнала с экрана ЭОП происходит фоточувствительной областью матрицы CMOS (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник), показанной на рис. 2.

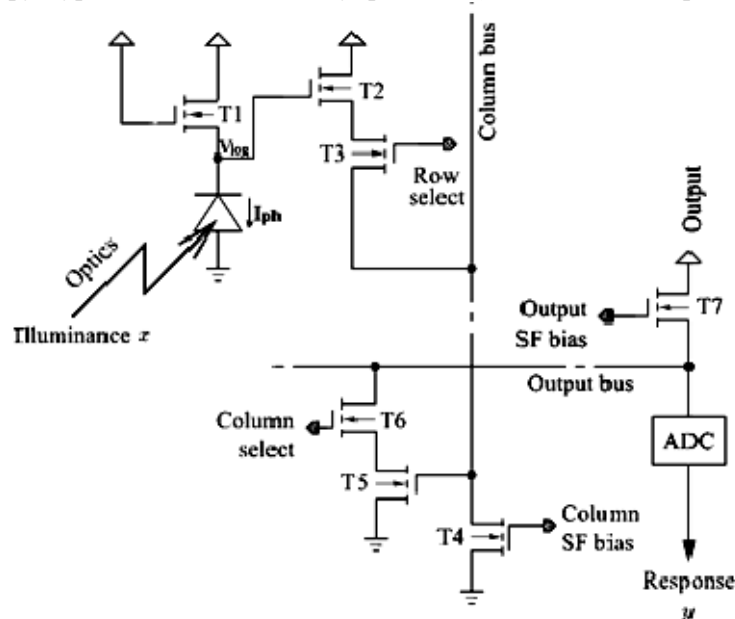


Рис. 2. Архитектура логарифмического CMOS-сенсора

Сенсор изображений состоит из набора фотоприемников – пикселей, которые образуют прямоугольную матрицу, элементарной ячейки (пикселя) которая главным образом включает фотодиод, и трех транзисторов. При обратном запирающем включении диода контактная разность потенциалов увеличивается, и ток основных носителей практически прекращается. При освещении фотодиода светом с энергией квантов  $E_{ph}$ , превышающей ширину запрещенной зоны собственного полупроводникового материала, в объеме полупроводника генерируются пары неравновесных носителей тока. В контактом электрическом поле  $p$ – $n$ -перехода образовавшийся заряд претерпевает пространственное разделение пар: основные заряды остаются в объеме той области, где они возникли; неосновные свободно проходят через  $p$ – $n$ -переход, так как для них контактное поле является ускоряющим. Таким образом, неосновные заряды создают внутри  $p$ – $n$ -перехода дополнительный фототок  $I_{ph}$ :

$$I_{ph} = S_D n e \frac{P_\lambda}{h\nu},$$

где  $S_D$  – площадь диода;  $P_\lambda$  – плотность светового потока на длине волны;  $\eta$  – эффективность преобразования фотонов в электроны.

Фототок  $I_{ph}$ , достаточно мал, чтобы нагрузочный транзистор Т1 работал в подпороговой области. При этом напряжение на фотодиоде уменьшается логарифмически с линейным увеличением освещенности  $I_0^{T1} = I_{D0}$ :

$$V_{PD} = V_{DD} - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{D0}} \right) - |V_{th}|.$$

Нагрузочный МДП-транзистор Т1 работает в режиме слабой инверсии. Из-за экспоненциальной вольт-амперной характеристики фотодиода, выходное напряжение на затворе Т2 логарифмически зависит от фототока  $I_{ph}$ . Напряжение на затворе транзистора Т2 имеет вид

$$V_G^{T2} = V_{log} = V_{DD} - n^{T1} V_t \ln \left( \frac{I_{ph} + I_s}{I_0^{T1}} \right) - V_0^{T1},$$

где  $I_0^{T1}$  – ток, соответствующий пороговому напряжению;  $V_{DD}$  – напряжение питания;  $V_t$  – температурный потенциал;  $V_0^{T1}$  – пороговое напряжение;  $I_s$  – ток утечки (ток насыщения обратного смещения). Таким образом, три транзистора пикселя непрерывно преобразуют падающий свет в напряжение, которое пропорционально логарифму интенсивности света [9, 10]. Эта схема преобразователя в активном пикселе не требует сброса и работает непрерывно.

Когда Т3 подан сигнал, то подобный переключатель выключен для всех других пикселей в столбце и напряжение на затворе  $V_G^{T5}$  транзистора Т5, равняется напряжению истока  $V_S^{T2}$  транзистора Т2. Транзисторы Т2 и Т4 имеют тот же самый ток истока утечки, когда Т3 включен, и поскольку оба работают в насыщении, разность их напряжения на затворе и порогового напряжения  $V_G^{T2} - V_T^{T2}$  и  $V_G^{T4} - V_T^{T4}$  линейно зависит от отношения текущих усилений  $K^{T2}$  и  $K^{T4}$ :

$$V_G^{T5} = V_G^{T2} - V_T^{T2} - \sqrt{\frac{K^{T4}}{K^{T2}}} (V_{GS}^{T4} - V_T^{T4}).$$

Каждый пиксель сенсора содержит, помимо самой оптической матрицы, собственный усилитель, аналогово-цифровой преобразователь и логические устройства. Все пиксели выбранной строки соединены с их соответствующими шинами столбца и с помощью транзистора Т7 последовательно подключаются к общей шине, на которой видеосигнал равен

$$V_{ADC} = V_G^{T5} - V_T^{T5} - \sqrt{\frac{K^{T7}}{K^{T5}}} (V_{GS}^{T7} - V_T^{T7}).$$

Затем сигнал каждого пикселя преобразуется в цифровой вид, и видеофайл несжатых цифровых данных сохраняется в персональном компьютере в формате \*.avi разрядностью 8 бит:

$$y = \text{round}(\text{clip}(F_{ADC} + G_{ADC} V_{ADC})).$$

После этого изображение представляет собой матрицу яркости пикселей  $\{y_{ij}\}$ , значение пикселя которой пропорционально логарифму поверхностной плотности потока излучения – энергетической освещенности  $x$ . Таким образом, математическая модель передаточной функции данной измерительной системы носит логарифмический характер:

$$y_i = a + b \cdot \ln(c + x_i).$$

**Экспериментальная установка и методика калибровки.** Для применения измерительной системы для исследования быстротекущих процессов была проведена дополнительная калибровка. При этом была выявлена нелинейная зависимость величины регистрируемого сигнала от времени экспозиции. Экспериментальное исследование отклика измерительной системы проводилось при неизменной освещенности объектива на разных временах накопления с помощью эталонной лампы ТРУ 100-2350 [3]. В зависимости от времени экспозиции двумерное изображение вольфрамовой нити, получаемое видеокамерой, получается разной яркости. Экспериментальный стенд и калибровочный график, построенный по экспериментальным данным, представлены на рис. 3, а и б соответственно. Экспериментальная кривая, как и теоретическая, носит логарифмический характер.

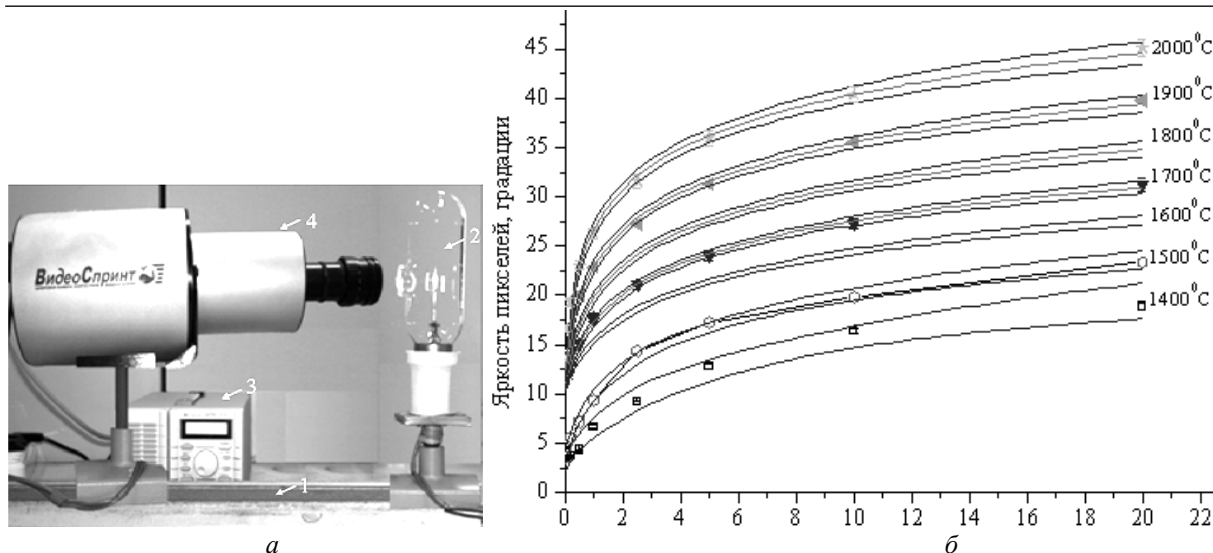


Рис. 3. Калибровочный стенд – а: 1 – оптическая скамья; 2 – эталон ТРУ1100-2350; 3 – источник тока; 4 – ТИС; б – семейство калибровочных кривых

Изображение, вольфрамовой нити накала было представлено в шкале серого. Все аппроксимированные по экспериментальным данным кривые являются логарифмическими функциями яркости пикселей изображения в зависимости от времен накопления. При этом погрешность аппроксимации не превышает 2%. В зависимости от подаваемого на эталонную лампу ТРУ 100-2350 с источника тока PSH-2035, вольфрамовая нить лампы имеет различную температуру. Поставив в соответствие яркость пикселей изображения и температуру лампы, можно ввести новую шкалу, позволяющую по яркости пикселей изображения судить о температуре регистрируемого видеокамерой на данной экспозиции светящегося объекта. Введенная шкала описывается линейной функцией и позволяет использовать данную оптоэлектронную измерительную систему в качестве микропирометра для быстротекущих процессов.

**Выводы.** Практическое применение ТИС наносекундного разрешения с оптоэлектронным трактом, включающим последовательное преобразование ФЭУ-ОЭЗ-ЭОП-ФДМ, имеет ряд следующих специфических особенностей:

1. Зависимость выходного видеосигнала от интенсивности оптического излучения носит существенно нелинейный характер и для применения в измерительных системах требуется предварительная калибровка по соответствующим эталонам.
2. Калибровка по температурному эталону выявила логарифмическую зависимость чувствительности ТИС от времени накопления, что позволяет получить линейное преобразование яркостной температуры в цифровой сигнал и обеспечить большой динамический диапазон измерения.
3. Использование наносекундного ЭОЗ практически не влияет на метрологические характеристики ТИС, но существенно расширяет функциональные возможности измерения треков нагретых частиц, что особенно важно при исследовании коллективного движения двухфазных потоков [11, 12].

#### Литература

1. Госьков П.И. Универсальный преобразователь изображений ПИУ-2 / П.И. Госьков, П.Ю. Гуляев, А.Г. Якунин // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 3. – С. 91–94.
2. Применение нетипового включения фотодиодной матрицы в телевизионных системах / П.И. Госьков, П.Ю. Гуляев, А.Г. Якунин, М.А. Царегородцев // Техника кино и телевидения. – 1987. – № 6. – С. 32–34.
3. A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes / D.A.Garkol', P.Yu. Gulyayev, V.V. Evstigneyev, A.B. Mukhachev // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1994. – Vol. 30, № 1. – P. 72–78.
4. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface / I.P. Gulyaev, O.P. Solonenko, P.Y. Gulyaev, A.V. Smirnov // Technical Physics Letters. – 2009. – Vol. 35, № 10. – 885 p.
5. Gulyaev I.P. Production and modification of hollow powders in plasma under controlled pressure // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 441, № 1. – P. 012033.

6. Экспериментальное исследование характеристик топливных струй дизельных форсунок / А.Е. Свистула, Д.Д. Матиевский, П.Ю. Гуляев, А.В. Еськов // Двигателестроение. – 1999. – № 1. – С. 29–31.
7. Гуляев П.Ю. Байесовское восстановление цвета цифровых изображений / П.Ю. Гуляев, Ю.П. Гуляев, А.В. Долматов // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 1997. – № 2. – С. 114–115.
8. Photothermal effects of laser heating iron oxide and oxide bronze nanoparticles in cartilaginous tissues / P.Y. Gulyaev, M.K. Kotvanova, S.S. Pavlova et al. // Nanotechnologies in Russia. – 2012. – Vol. 7, № 3–4. – P. 127–131.
9. Joseph D. Modeling, calibration and correction of nonlinear illumination-dependent fixed pattern noise in logarithmic CMOS image sensor / D. Joseph, S. Collins // IEEE Trans. instrum. meas. – 2001. – Vol. 51, № 5. – P. 996–1001.
10. Dileepan J. Modelling and calibration of logarithmic CMOS image sensors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.robots.ox.ac.uk/~mcd/publications/dileepan/DPhil.pdf>, свободный (дата обращения: 01.06.2013).
11. Бороненко М.П. Модель движения и нагрева частиц в плазменной струе / М.П. Бороненко, И.П. Гуляев, А.Е. Серегин // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2. – С. 7–15.
12. Бороненко М.П. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазматрона с постоянной подачей порошка / М.П. Бороненко, П.Ю. Гуляев, А.Л. Трифонов // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2. – С. 16–20.

---

**Бороненко Марина Петровна**

Аспирант каф. автоматизированных систем обработки информации и управления  
Югорского государственного университета (ЮГУ)  
Тел.: 8-908-880-46-21  
Эл. почта: m\_boronenko@ugrasu.ru

**Гуляев Павел Юрьевич**

Д-р техн. наук, зав. каф. физикохимии процессов и материалов ЮГУ  
Тел.: (3-467) 375-797  
Эл. почта: p\_gulyaev@ugrasu.ru

Boronenko M.P., Gulyaev P.Yu.

**A nanosecond resolution TV measuring system**

The article describes a model of transfer function of optoelectronic measuring system based on high speed camera with a nanosecond electronic shutter. The observed non-linearity is due to the architecture of the system CMOS image sensor receiver. The experimental data allow to introduce this camera calibration scale with an accuracy of 2%, the brightness of the pixels linking the registered image and the brightness temperature corresponding to thermal radiation standard lamp.

**Keywords:** electron-optical converter, CMOS Sensor, high-speed video camera, the brightness temperature.