

О.С. Вахромеева, А. А. Манцетов, К.А.Шиманская

Характеристики чувствительности телевизионных камер на матричных приборах с зарядовой связью

Рассмотрены различные определения чувствительности твердотельных фотоэлектрических преобразователей. Получены выражения для интегральной и пороговой чувствительности матричных ПЗС. Произведены расчеты чувствительности для ряда матричных ПЗС, подтвердившие адекватность полученных выражений, показано влияние времени накопления и охлаждения на пороговую чувствительность.

Матричные приборы с зарядовой связью, телевизионные камеры, интегральная чувствительность, пороговая чувствительность, темновой ток.

Современные ТВ камеры в подавляющем большинстве используют в качестве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) твердотельные преобразователи на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) или же на основе приборов с координатной адресацией, так называемых однокристалльных комплиментарных металл-оксид-полупроводник (КМОП) камер [1]. Несмотря на значительный прогресс однокристалльных ТВ камер, выполненных по КМОП технологии, фотоэлектрические характеристики камер на основе матричных ПЗС пока еще существенно превосходят аналогичные характеристики КМОП камер.

В общем случае матричные ПЗС предназначены для формирования электрического видеосигнала, адекватного двумерному оптическому изображению, спроецированному на его светочувствительную поверхность. Качество изображения, формируемого ТВ камерами, определяется фотоэлектрическими характеристиками матричных ПЗС, в частности их чувствительностью. Таким образом, для оценки чувствительности ТВ камеры необходимо знать чувствительность твердотельного ФЭП.

Несмотря на различие подходов, большинство авторов выделяют именно чувствительность как одну из основных характеристик ТВ камеры. Чувствительность обычно указывают как значение освещенности на объекте в люксах, обеспечивающее заданные параметры качества выходного видеосигнала. При этом должна быть указана цветовая температура источника света - температура нити накаливания в градусах Кельвина, например, наиболее типичные источники света типа "А" с цветовой температурой $T = 2854^\circ \text{К}$ или же галогеновая лампа с $T = 3200^\circ \text{К}$. Однако характеристика спектральной чувствительности матричного ПЗС существенно отличается от кривой видности зрительного анализатора. Спектральная характеристика ПЗС простирается в инфракрасную область спектра вплоть до длины волны 1,1 мкм. В результате ТВ камера преобразует в видеосигнал световой поток с длинами волн не только в видимой области, но и в инфракрасной. Это позволяет обеспечить наблюдение в условиях наличия излучения в ближней инфракрасной зоне, когда глаз человека уже ничего не видит.

Используя этот факт, недобросовестные рекламодатели указывают значение пороговой чувствительности, близкое или равное нулю люкс. При переходе от освещения лам-

пой накаливания к естественному освещению, заявленное значение пороговой чувствительности в люксах увеличивается, т. е. чувствительность ухудшается в несколько раз за счет отсутствия инфракрасного излучения. Чтобы этого не происходило, измерения чувствительности следует проводить при установке перед объективом светофильтра, отсекающего инфракрасную область спектра [2].

Также при измерении чувствительности необходимо указывать, какое отношение сигнал-шум принимается за заданный параметр качества выходного видеосигнала. Например, раньше под минимальной освещенностью понималась такая, при которой сохраняется полная разрешающая способность камеры, то есть отношение сигнал-шум должно составлять примерно 34-36 дБ. В настоящее время минимальная освещенность трактуется как освещенность, при которой можно различить только крупные детали изображения, что соответствует отношению сигнал-шум 20-24 дБ. В космической и военной технике часто под пороговой чувствительностью понимается освещенность, при которой амплитуда полезного сигнала равна размаху шумовой дорожки, то есть отношение сигнал-шум составляет 6 раз (15,5 дБ). В связи с этим значения чувствительности также могут отличаться в 5 – 10 раз [3]. Помимо этого не строго определено само понятие отношения сигнал-шум. Так обычно под отношением сигнал-шум понимают отношение сигнала в белом к шуму на черном. Однако в ПЗС шумы не являются аддитивными, и к собственным шумам на белом добавляется фотонный шум. То есть отношении сигнал-шум, измеренное как отношение сигнала в белом к шуму на белом окажется существенно ниже.

Иногда для уточнения понятия минимальной освещенности используют так называемую «шкалу IRE». В этой шкале максимальный полезный видеосигнал 0,7 В принимается за 100 единиц IRE. Полный видеосигнал с амплитудой 1 В содержит 0,3 В синхросигнала и 0,7 В сигнала изображения. Различные производители указывают чувствительность ТВ камер для разных значений по шкале IRE от 20 до 50. При таком снижении амплитуды видеосигнала качество изображения снижается до приемлемого.

Чувствительность телевизионной камеры также зависит от крутизны ее светосигнальной характеристики, представляющей собой зависимость видеосигнала от освещенности сцены – чем больше крутизна, тем больше чувствительность при выбранном пороге. В связи с неоднозначностью выбора порогового уровня производители в качестве параметра, характеризующего чувствительность, часто используют другие показатели. Для вещательного стандарта разложения таким параметром может быть напряжение видеосигнала при заданном уровне освещенности, типе источника света, светосиле объектива и уровне шума. Другим параметром является выходное напряжение, нормированное на экспозицию (В/лк·с). Размерность этой характеристики отражает действие закона взаимозаменяемости освещенности и времени накопления. Выходной сигнал определяется общим числом фотонов, накопленных в элементах ПЗС [4].

На значение чувствительности, как было показано выше, влияет также время накопления. Обычно в документации чувствительность указывается для максимального времени накопления. Однако во многих ТВ камерах время экспозиции изменяется от номинального значения 20 мс как в сторону уменьшения до десятков микросекунд, так и в сторону увеличения до десятков и сотен секунд.

Чувствительность обычно указывают для максимальной четкости. Вместе с тем заявленная четкость проверяется при большой освещенности и большом отношении сигнал-шум. При уменьшении освещенности всегда имеет место снижение четкости. Поэтому при оценке чувствительности следует учитывать и этот фактор [2].

В известных работах [2], [3] чувствительность рассматривается в основном качественно, отсутствуют строгие определения и выводы соответствующих выражений, нет примеров расчета для конкретных матричных ПЗС и ТВ камер на их основе.

В связи с изложенными несоответствиями и неоднозначностями задача анализа характеристик чувствительности становится весьма актуальной.

Определим для ФЭП понятия интегральной, спектральной, пороговой и контрастной чувствительности [5].

Интегральной чувствительностью ФЭП будем называть отношение выходного видеосигнала к освещенности на светочувствительной поверхности или на объекте при заданных условиях - времени накопления, цветовой температуре источника освещения и т.п.

Спектральная характеристика чувствительности ФЭП определяется как зависимость от длины волны излучения λ величины накопленного и переданного на выход фотогенерированного зарядового пакета. Теоретически она характеризует зависимость чувствительности ФЭП или ТВ камеры от длины волны принимаемого излучения.

Для оценки способности приемника излучения обнаруживать предельно малые освещенности вводится величина, называемая порогом чувствительности или же пороговой чувствительностью. Пороговая чувствительность – это минимальный световой поток, создающий на выходе ФЭП заданное отношение сигнал-шум.

Контрастная чувствительность ФЭП – это минимальный контраст, формирующий на выходе перепад видеосигнала с заданным отношением сигнал-шум.

Получим выражения для расчета интегральной, пороговой и спектральной чувствительности.

Допустим, что на светочувствительный элемент спроецировано оптическое изображение, которое описывается в общем случае спектральной плотностью энергетической освещенности $\Phi(\lambda, t, x, y)$, где t – текущее время; x, y – пространственные координаты.

Для простоты вычислений будем считать, что плотность освещенности равномерна по пространству и не изменяется во времени: $\Phi(x, y, t, \lambda) = \Phi(\lambda)$. Способность светочувствительного элемента преобразовывать световой поток в накопленный заряд характеризуется квантовым выходом, т.е. отношением числа электронов к числу фотонов, упавших на светочувствительный элемент. Квантовый выход тоже будем считать равномерным в пределах светочувствительной ячейки $\Theta(x, y, \lambda) = \Theta(\lambda)$ и равным нулю за ее пределами, что соответствует прямоугольной форме действующей апертуры. Также будем считать, что коэффициент сбора входит в квантовый выход. В общем случае выражение для определения количества накопленных электронов за время T в светочувствительном элементе размером $\Delta x \Delta y$ примет вид [5]

$$n_e(x, y, t, \lambda) = \frac{1}{hc} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \int_0^T \int_0^{\Delta x} \int_0^{\Delta y} \lambda \Theta(x, y, t, \lambda) \Phi(x, y, t, \lambda) dx dy dt d\lambda,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·град - постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; $\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}$ – диапазон спектральной чувствительности ФЭП.

Осуществив интегрирование по координатам x, y и времени t с учетом изложенных выше допущений, получим:

$$n_e = \frac{1}{hc} AT \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \lambda \Phi(\lambda) \Theta(\lambda) d\lambda,$$

где $A = \Delta x \Delta y$ – площадь светочувствительного элемента.

Будем считать, что световой поток является монохроматичным с длиной волны λ_0 . То есть объект освещается источником света, спектральная плотность энергетической светимости которого описывается δ -функцией $\Phi(\lambda) = \Phi_0 \delta(\lambda - \lambda_0)$. Тогда общее число накопленных электронов будет равно

$$n_e = \frac{1}{hc} AT \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \lambda \Phi_0 \Theta(\lambda) \delta(\lambda - \lambda_0) d\lambda,$$

а заряд накопленных электронов соответственно составит

$$Q = q n_e = \frac{q \lambda_0}{hc} \Theta(\lambda_0) AT \Phi_0, \quad (1)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд одного электрона.

Выражение $\frac{q \lambda_0}{hc} \Theta(\lambda_0) = S(\lambda_0)$ – принято трактовать как спектральную чувствительность ФЭП на длине волны λ_0 . С учётом этого можно записать выражение (1) в известном виде

$$Q = S(\lambda_0) AT \Phi_0.$$

Преобразование зарядового пакета в напряжение происходит на емкости выходного устройства C . Видеосигнал, переданный на выход через истоковый повторитель с коэффициентом передачи K , составит

$$U = K \frac{Q}{C},$$

т.е. выходной видеосигнал ФЭП становится равным

$$U = K \frac{1}{C} S(\lambda_0) AT \Phi_0, \quad (2)$$

откуда интегральная чувствительность

$$S_U = K \frac{S(\lambda_0) AT}{C} = \frac{U}{\Phi_0}.$$

Таким образом (2) устанавливает связь выходного видеосигнала матричного ПЗС с входным монохроматическим световым потоком, т.е. описывает интегральную чувствительность ПЗС.

Для случая немонохроматического светового потока со спектральной плотностью энергетической освещенности $\Phi(\lambda)$ и заданной спектральной чувствительностью ПЗС $S(\lambda)$ выражение, описывающее выходной видеосигнал, принимает вид

$$U = AT \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda. \quad (3)$$

Воспользуемся полученными результатами, чтобы определить интегральную чувствительность для случая, когда освещенность выражена в люксах.

Освещенность на светочувствительной поверхности матричного ПЗС определяется следующим отношением:

$$E_{\text{CCD}} = k \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\lambda)v(\lambda)d\lambda, \quad (4)$$

где $k = 638 \text{ лм/Вт}$; $v(\lambda)$ - кривая видности зрительного анализатора. Нормирование спектральной плотности энергетической светимости источника излучения позволяет получить относительное спектральное распределение данной величины

$$\Phi'(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda_m)},$$

где λ_m - длина волны света, на которой спектральная плотность энергетической светимости достигает своего максимального значения. Тогда выражение (4) преобразуется к виду

$$E_{\text{CCD}} = k\Phi(\lambda_m) \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi'(\lambda)v(\lambda)d\lambda.$$

Отсюда

$$\Phi(\lambda_m) = \frac{E_{\text{CCD}}}{k \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi'(\lambda)v(\lambda)d\lambda}. \quad (5)$$

С другой стороны, в соответствии с (3)

$$U = \frac{KAT}{C} \Phi(\lambda_m) \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi'(\lambda)S(\lambda)d\lambda. \quad (6)$$

Подставив (5) в (6), получим

$$U = E_{\text{CCD}} \frac{KAT}{C} \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi'(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{k \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi'(\lambda)v(\lambda)d\lambda}. \quad (7)$$

Заметим, что при этом бесконечные пределы интегрирования были заменены на диапазон спектральной чувствительности ПЗС. Это объясняется тем, что диапазон спектральной чувствительности матричного ПЗС шире диапазона спектральной чувствительности зрительного анализатора и интегрирование нулевой функции не дает вклада в значение интеграла.

Найдем выходной сигнал матричного ПЗС при заданной освещенности на объекте. Освещенность на объекте при яркости источника L

$$E_{SH} = \frac{\pi L}{\rho}, \quad (8)$$

где ρ - коэффициент отражения. Освещенность на объекте и на ПЗС связаны следующим соотношением:

$$E_{\text{CCD}} = E_{\text{SH}} \frac{\theta^2 \tau \rho}{4(1+m)^2}, \quad (9)$$

где θ - относительное отверстие объектива; τ - коэффициент пропускания объектива; ρ - коэффициент отражения объекта; m - масштаб изображения, определяемый отношением размера изображения, спроецированного на ПЗС, к размеру объекта.

Таким образом, с учетом зависимости освещенности за объективом при заданной освещенности на объекте и в соответствии с формулами (7) - (9) выходной видеосигнал матричного ПЗС

$$U = E_{\text{SH}} \cdot \frac{\theta^2 \tau \rho}{4(1+m)^2} \cdot \frac{KAT}{C} \cdot \frac{q}{hc} \cdot \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi'(\lambda) \lambda \Theta(\lambda) \Theta(\lambda_{\max}) d\lambda}{k \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi'(\lambda) \nu(\lambda) d\lambda}.$$

Выражение для интегральной чувствительности ПЗС при заданной освещенности на матричном ПЗС определится как

$$S_U = \frac{U}{E_{\text{CCD}}}.$$

С использованием полученных выражений был проведен расчет чувствительности по методике, используемой фирмой SONY, а также расчет интегральной чувствительности. Расчет по методике фирмы SONY проводился для сравнения расчетных результатов со значениями, приводимыми фирмой изготовителем. Интегральная чувствительность рассчитывалась при цветовой температуре источника $T = 3200^\circ \text{K}$ и времени накопления $T = 20$ мс. Для матричных ПЗС с чересстрочным разложением расчет проводился для режима накопления поля.

Результаты расчетов и сравнительный анализ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип матричного ПЗС	Значения чувствительности, приводимые фирмой, мВ	Расчетные значения	
		Значения чувствительности, полученные по методике фирмы SONY, мВ	Значения интегральной чувствительности, мВ/лк
ICX429AL	5500	5500	690
ICX429AL с фильтром ИК-отсечки	1120	1074	135
ICX423AL	-	5600	700
ICX423AL с фильтром ИК-отсечки	1000	1800	225
ICX259AL	3200	2700	340

ICX259AL с фильтром ИК-отсечки	720	655	82
ICX415AL	-	1830	230
ICX415AL с фильтром ИК-отсечки	650	530	70

Полученные расчетным путем значения для матричных ПЗС фирмы SONY практически совпали со справочными данными, приведенными на указанные типы ПЗС. Из этого можно сделать вывод, что методика расчетов верна, и она позволяет количественно сравнивать полученные значения интегральной чувствительности для различных преобразователей.

Произведем теперь расчет пороговой чувствительности на матричном ПЗС, выраженной в люксах, с учетом известных шумов ПЗС и значений интегральной чувствительности.

Согласно указанному выше - $U = ES_U$. Следовательно, с учетом этого выражение для отношения сигнал-шум можно записать в виде

$$\Psi = \frac{U_c}{U_{ш}} = \frac{ES_U}{K \frac{\overline{n_{ш}} q}{C}} = \frac{CES_U}{K \overline{n_{ш}} q},$$

где $\overline{U_{ш}}$ - среднеквадратическое напряжение шума на выходе матричного ПЗС; $\overline{n_{ш}}$ - среднеквадратическое число шумовых электронов.

Отсюда пороговая чувствительность

$$E = \frac{K \overline{n_{ш}} q \Psi}{C_{OUT} S_U}.$$

Среднеквадратическое значение шумов на выходе ПЗС может быть найдено как

$$\overline{n_{ш}} = \sqrt{\overline{n_p}^2 + \overline{n_z}^2 + \overline{n_{DC}}^2 + \overline{n_{TR}}^2 + \overline{n_{OUT}}^2 + \overline{n_{VT}}^2},$$

где n_p - фотонные шумы; n_z - шумы непустого нуля; n_{DC} - шумы темнового тока; n_T - шумы переноса; n_{OUT} - шум установки потенциала узла детектирования заряда; n_{VT} - шум выходного гальванометрического транзистора.

Определим собственные шумы на черном. Фотонные шумы при этом отсутствуют. В ПЗС с объемными каналами переноса непустой ноль не вводится и соответствующая составляющая шумов отсутствует. Уровень темнового тока современных ПЗС также весьма мал и при применении охлаждения может составлять единицы электронов на потенциальную яму за секунды. Шумы переноса в объемном канале также составляют единицы электронов. Шум установки потенциала узла детектирования заряда устраняется схемой ДКВ.

Таким образом уровень шумов современных ПЗС, работающих на частотах считывания 5...10 МГц составляет менее десятка электронов.

Примем, что шумы ПЗС составляют 6 электронов, т. е. $\overline{n_{ш}} = 6$, а отношение сигнал-шум зададим равным $\Psi = 10$, что соответствует удовлетворительному качеству изобра-

жения. При этом под Ψ будем понимать отношение сигнала в белом к шуму на черном. Значения пороговой чувствительности на матричном ПЗС, а также значения освещенности на объекте при относительном отверстии объектива $\theta = 1:1.4$, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип матричного ПЗС	Пороговая чувствительность, лк	Значение освещенности на объекте, лк
ICX259AL	0.002	0.02
ICX259AL с фильтром ИК-отсечки	0.01	0.1
ICX429AL	0.001	0.01
ICX429AL с фильтром ИК-отсечки	0.006	0.06
ICX423AL	0.001	0.01
ICX423AL с фильтром ИК-отсечки	0.0035	0.035
ICX415AL	0.0035	0.035
ICX415AL с фильтром ИК-отсечки	0.011	0.1

Однако следует отметить, что в малокадровых системах при очень большом времени накопления основополагающими являются шумы темнового тока, определяемые выражением

$$\overline{n_{DC}} = \sqrt{n_{DC}} = \sqrt{\frac{1}{q} j_{DC} T A}, \quad (11)$$

где j_{DC} - плотность темнового тока. В свою очередь плотность темнового тока можно записать в следующем виде [6]

$$j_{DC} = \frac{q n_i W}{2\tau} + \frac{q S_0 n_i}{2} + \frac{q D_n n_i^2}{L_n N_A}, \quad (12)$$

где первое слагаемое – ток, обусловленный объемной генерацией в обедненном слое; второе слагаемое – ток поверхностной генерации; третье слагаемое – диффузионный ток генерации неосновных носителей в электронейтральной части подложки, поступающий через область обеднения в инверсионный слой; n_i - собственная концентрация носителей; W – глубина обедненного слоя; τ - время жизни неосновных носителей; S_0 - скорость поверхностной рекомбинации; D_n - коэффициент диффузии; L_n - диффузионная длина; N_A - концентрация акцепторной примеси.

Выражение для собственной концентрации носителей n_i получим из [6]

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_g/2k_0 T},$$

где N_C - эффективная плотность состояний в зоне проводимости; N_V - эффективная плотность состояний в валентной зоне; E_g - ширина запрещенной зоны; k_0 - постоянная Больцмана; $T = 293^\circ \text{K}$ – абсолютная температура.

Произведем теперь расчет плотности темнового тока и количества темновых электронов при комнатной температуре согласно (11), (12) и пороговой чувствительности согласно (10).

При этом примем глубину обедненного слоя $W = 1$ мкм, собственную концентрацию носителей $n_i = 0.8 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, время жизни неосновных носителей $\tau = 2 \times 10^{-3} \text{ с}$, скорость поверхностной рекомбинации $S_0 = 0.1 \text{ см/с}$ [7]. Отметим, что при проведении расчетов учитывалось, что у светочувствительных элементов матричных ПЗС фирмы SONY при накоплении отсутствует поверхностный темновой ток и темновой ток подложки.

В табл. 3 приведены расчетные значения пороговой чувствительности при различных временах накопления в режиме накопления кадра. Однако при времени накопления более 100 секунд рассчитывать пороговую чувствительность для указанных матричных ПЗС нецелесообразно, так как в этом случае темновой ток становится преобладающим и превышает в несколько раз полезный сигнал.

Таблица 3

Тип матричного ПЗС	Значения пороговой чувствительности, лк			
	T = 40 мс	T = 1 сек	T = 10 сек	T = 100 сек
ICX259AL	2.35×10^{-3}	1.10×10^{-4}	3.49×10^{-5}	1.10×10^{-5}
ICX259AL с ИК фильтром	9.76×10^{-3}	4.63×10^{-4}	1.46×10^{-4}	4.61×10^{-5}
ICX429AL	1.16×10^{-3}	6.75×10^{-5}	2.13×10^{-5}	6.72×10^{-6}
ICX429AL с ИК фильтром	5.97×10^{-3}	3.45×10^{-4}	1.09×10^{-4}	3.44×10^{-5}
ICX423AL	1.14×10^{-3}	9.17×10^{-5}	2.89×10^{-5}	9.14×10^{-6}
ICX423AL с ИК фильтром	3.56×10^{-3}	2.88×10^{-4}	9.05×10^{-5}	2.87×10^{-5}
ICX415AL	3.48×10^{-3}	9.74×10^{-5}	3.07×10^{-5}	9.70×10^{-6}
ICX415AL с ИК фильтром	0.011	3.39×10^{-4}	1.07×10^{-4}	3.38×10^{-5}

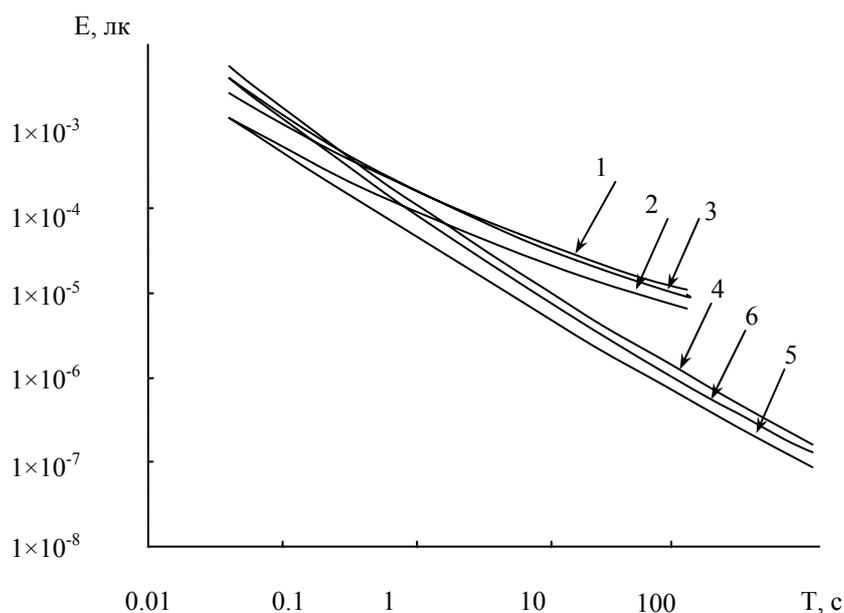
Следует отметить, что при применении охлаждения матричных ПЗС можно добиться уменьшения шумов темнового тока. Как всякий термодинамический процесс, темновой ток зависит от температуры, уменьшаясь в два раза при понижении температуры на $6..8^\circ \text{C}$. Для глубокого охлаждения используются азотные криостаты, где матричные ПЗС охлаждаются до -180°C . Для более простых систем применяется термоэлектронное охлаждение с использованием батарей на эффекте Пельтье, которые способны обеспечить перепад температур в 70°C .

В табл. 4 приведены расчетные значения пороговой чувствительности при различных временах накопления при применении охлаждения до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 4

Тип матричного ПЗС	Значения пороговой чувствительности, лк				
	T = 40 мс	T = 1 сек	T = 10 сек	T = 100 сек	T = 1000 сек
ICX259AL	4.71×10^{-3}	9.35×10^{-5}	9.41×10^{-6}	9.97×10^{-7}	1.44×10^{-7}
ICX259AL с ИК фильтром	9.76×10^{-3}	3.92×10^{-4}	3.94×10^{-5}	4.18×10^{-6}	6.05×10^{-7}
ICX429AL	1.16×10^{-3}	4.66×10^{-5}	4.70×10^{-6}	5.12×10^{-7}	8.20×10^{-8}
ICX429AL с ИК фильтром	5.97×10^{-3}	2.38×10^{-4}	2.41×10^{-5}	2.62×10^{-6}	4.20×10^{-7}
ICX423AL	1.14×10^{-3}	4.48×10^{-5}	4.58×10^{-6}	5.32×10^{-7}	1.02×10^{-7}
ICX423AL с ИК фильтром	3.56×10^{-3}	1.41×10^{-4}	1.43×10^{-5}	1.67×10^{-6}	3.19×10^{-7}
ICX415AL	3.48×10^{-3}	6.96×10^{-5}	7.03×10^{-6}	7.61×10^{-7}	1.19×10^{-7}
ICX415AL с ИК фильтром	0.011	2.43×10^{-4}	2.45×10^{-5}	2.65×10^{-6}	4.15×10^{-7}

На рисунке приведены результаты расчета пороговой чувствительности для матричных ПЗС ICX259AL (кривая 1), ICX429AL (кривая 2), ICX415AL (кривая 3) при комнатной температуре и ICX259AL (кривая 4), ICX429AL (кривая 5), ICX415AL (кривая 6) при охлаждении до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от времени накопления.



Рассмотрим теперь пороговую чувствительность с учетом фотонных шумов, т. е. определим отношение сигнал-шум как отношение сигнала в белом к шумам на белом. Для этого в выражении для $\bar{n}_ш$ необходимо учесть значение дисперсии фотонных шумов $\overline{n_p^2}$, численно равное значению сигнала $\overline{n_p^2} = n_c$.

В табл. 5 и табл. 6 приведены значения пороговой чувствительности с учетом фотонных шумов без охлаждения и с охлаждением соответственно.

Таблица 5

Тип матричного ПЗС	Значения пороговой чувствительности, (лк)			
	T = 20 мс	T = 1 сек	T = 10 сек	T = 100 сек
ICX259AL	0.01	2.41×10^{-4}	4.47×10^{-5}	1.19×10^{-5}
ICX259AL с ИК фильтром	0.021	1.01×10^{-3}	1.87×10^{-4}	4.97×10^{-5}
ICX429AL	2.51×10^{-3}	1.30×10^{-4}	2.60×10^{-5}	7.14×10^{-6}
ICX429AL с ИК фильтром	0.013	6.63×10^{-4}	1.33×10^{-4}	3.65×10^{-5}
ICX423AL	2.51×10^{-3}	1.45×10^{-4}	3.32×10^{-5}	9.52×10^{-6}
ICX423AL с ИК фильтром	7.82×10^{-3}	4.56×10^{-4}	1.04×10^{-4}	2.99×10^{-5}
ICX415AL	7.48×10^{-3}	1.90×10^{-4}	3.78×10^{-5}	1.03×10^{-5}
ICX415AL с ИК фильтром	0.025	6.63×10^{-4}	1.32×10^{-4}	3.596×10^{-5}

Таблица 6

Тип матричного ПЗС	Значения пороговой чувствительности, (лк)				
	T = 20 мс	T = 1 сек	T = 10 сек	T = 100 сек	T = 1000 сек
ICX259AL	0.01	1.20×10^{-4}	1.20×10^{-5}	2.04×10^{-6}	2.41×10^{-7}
ICX259AL с ИК фильтром	0.021	8.36×10^{-4}	8.38×10^{-5}	8.55×10^{-6}	1.01×10^{-6}
ICX429AL	2.47×10^{-3}	9.94×10^{-5}	9.98×10^{-6}	1.03×10^{-6}	1.30×10^{-7}
ICX429AL с ИК фильтром	0.013	5.09×10^{-4}	5.10×10^{-5}	5.28×10^{-6}	6.63×10^{-7}
ICX423AL	2.44×10^{-3}	9.56×10^{-5}	9.62×10^{-6}	1.02×10^{-6}	1.45×10^{-7}
ICX423AL с ИК фильтром	7.59×10^{-3}	3.00×10^{-4}	3.02×10^{-5}	3.21×10^{-6}	4.56×10^{-7}
ICX415AL	7.43×10^{-3}	1.49×10^{-4}	1.49×10^{-5}	1.53×10^{-6}	1.90×10^{-7}

ICX415AL с ИК фильтром	0.024	5.72×10^{-4}	5.19×10^{-5}	5.33×10^{-6}	6.63×10^{-7}
---------------------------	-------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Во многих случаях, особенно при обнаружении оптического сигнала целесообразно определять отношение сигнал-шум как отношение сигнала в белом к шуму, дисперсия которого равна полусумме дисперсий шума в черном и белом. Результаты расчета пороговой чувствительности для данного случая без охлаждения и с охлаждением приведены в табл. 7 и табл. 8 соответственно.

Таблица 7

Тип матричного ПЗС	Значения пороговой чувствительности, лк			
	T = 40 мс	T = 1 сек	T = 10 сек	T = 100 сек
ICX259AL	7.90×10^{-3}	1.88×10^{-4}	4.01×10^{-5}	1.14×10^{-5}
ICX259AL с ИК фильтром	0.017	7.87×10^{-4}	1.68×10^{-4}	4.80×10^{-5}
ICX429AL	1.38×10^{-3}	7.69×10^{-5}	1.68×10^{-5}	4.90×10^{-6}
ICX429AL с ИК фильтром	7.12×10^{-3}	3.94×10^{-4}	8.61×10^{-5}	2.51×10^{-5}
ICX423AL	1.38×10^{-3}	8.60×10^{-5}	2.20×10^{-5}	6.60×10^{-6}
ICX423AL с ИК фильтром	4.30×10^{-3}	2.70×10^{-4}	6.90×10^{-5}	2.07×10^{-5}
ICX415AL	4.12×10^{-3}	9.88×10^{-5}	2.11×10^{-5}	6.02×10^{-6}
ICX415AL с ИК фильтром	0.014	3.44×10^{-4}	7.35×10^{-5}	2.10×10^{-5}

Таблица 8

Тип матричного ПЗС	Значения пороговой чувствительности, (лк)				
	T = 20 мс	T = 1 сек	T = 10 сек	T = 100 сек	T = 1000 сек
ICX259AL	5.55×10^{-3}	1.10×10^{-4}	1.12×10^{-5}	1.14×10^{-6}	1.41×10^{-7}
ICX259AL с ИК фильтром	0.012	4.62×10^{-4}	4.68×10^{-5}	4.76×10^{-6}	5.90×10^{-7}
ICX429AL	1.49×10^{-3}	5.49×10^{-5}	5.51×10^{-6}	5.76×10^{-7}	7.67×10^{-8}
ICX429AL с ИК фильтром	7.64×10^{-3}	2.81×10^{-4}	2.82×10^{-5}	2.95×10^{-6}	3.92×10^{-7}
ICX423AL	1.35×10^{-3}	5.28×10^{-5}	5.32×10^{-6}	5.76×10^{-7}	8.87×10^{-8}
ICX423AL с ИК фильтром	1.35×10^{-3}	1.66×10^{-4}	1.67×10^{-5}	1.81×10^{-6}	2.78×10^{-7}
ICX415AL	4.1×10^{-3}	8.20×10^{-5}	8.32×10^{-6}	8.45×10^{-7}	1.05×10^{-7}

ICX415AL с ИК фильтром	0.013	2.86×10^{-4}	2.90×10^{-5}	2.95×10^{-6}	3.65×10^{-7}
---------------------------	-------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- выведенные выражения для интегральной чувствительности позволили получить значения, практически совпадающие с паспортными данными на указанные матричные ПЗС;
- полученные расчетные значения пороговой чувствительности близки к паспортным данным на лучшие ТВК, выполненные на матричных ПЗС, что говорит об адекватности предложенных методик расчета;
- при увеличении времени накопления пороговая чувствительность улучшается, однако не пропорционально времени накопления что обусловлено влиянием темновых токов. Применение охлаждения позволяет добиться роста пороговой чувствительности практически пропорционального времени накопления в пределах до сотен секунд.
- на значение пороговой чувствительности существенное влияние оказывает определение понятия отношения сигнал-шум.

Библиографический список

1. Выбор типа фотоприемника в телевизионной системе измерения пространственно-временных координат объектов/ А. А. Манцветов, А. К. Цыцулин, С. Н. Коноплев, Е. В. Курзенева, Д. В. Умников//Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 2001. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. С 24-27.
2. Никитин В. В., Цыцулин А. К. Телекамеры: гипноз рекламы и реальность // Безопасность, достоверность, информация. 1999. № 6. С 14-16.
3. Куликов А. Н. Телевизионное наблюдение в сложных условиях // Специальная техника. 2000. №35. С 30-33.
4. Никитин В. В., Цыцулин А. К. Телевидение в системах физической защиты: СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. 134
5. Цифровое преобразование изображений/ Р. Е. Быков, Р. Фрайер, К. В. Иванов, А. А. Манцветов. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. 228 с.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: М.: Мир, 1984. 455 с.
7. Йесперс П., Ван де Виле Ф., Уайт М. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения: М.: Мир, 1979. 574 с.

O.S. Vahromeeva, A.A. Mantsvetov

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

Sensitivity Characteristics of Charge Coupled Device Cameras

The various definition of sensitivity of solid-state image sensors are considered. The expressions for integrated and threshold of sensitivity area CCD imagers are received. The accounts of sensitivity for is glad CCD imagers, confirmed adequacy of the received expressions are made, the influence of time of accumulation and cooling on threshold sensitivity is shown.