

УДК 623.544:681.78

Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Институт механики УрО РАН

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЕМКОСТИ *p-n-p*-СТРУКТУРЫ ТЕЛЕВИЗИОННОГО СКАНИСТОРА  
НА ЕГО БЫСТРОДЕЙСТВИЕ

В статье рассмотрено влияние паразитных емкостей *p-n*-переходов сканистора на его коммутационное быстродействие. Получено выражение, описывающее влияние шунтирующей емкости фотодиодных ячеек на форму и амплитуду видеосигнала. Показано, что емкостные составляющие тока сканистора сужают полезную длину его фоточувствительной поверхности до величины ее центрального участка.

**Ключевые слова:** сканисторная структура, фотодиодная ячейка, зарядная и диффузионная емкости, видеосигнал, коммутационное быстродействие.

Основными направлениями практического применения телевизионных сканисторных структур (сплошного сканистора, многоэлементного мульти-скана) являются измерения различных геометрических величин в производстве [1–5], в военной технике [6–10] и в научных исследованиях [11–15]. Сканисторные информационно-измерительные системы (ИИС) отличаются малыми габаритами, небольшим потреблением энергии, простотой конструкции при сравнительной сложности выполняемых функций, практически неограниченный срок службы, высокое быстродействие, малые рабочие напряжения [16–19]. Они позволяют бесконтактным способом с высокими точностью и быстродействием осуществлять контроль, управление и автоматизацию различных производственных процессов. При этом основным фактором, ограничивающим реальное быстродействие таких ИИС, являются нелинейные емкости *p-n*-переходов сканистора.

Следует отметить, что в работах, связанных с анализом сканисторных структур, отсутствует общее выражение, описывающее влияние шунтирующей емкости фотодиодных ячеек на форму и амплитуду видеосигнала со сканистора. Получение такого выражения является весьма важной задачей, так как определение координат световых зон на сканисторе обычно ведется по фронтам или максимуму видеосигнала. Необходимое выражение можно получить из анализа эквивалентной схемы выделения видеосигнала со сканистора (рис. 1).

Для элементарной фотодиодной ячейки с учетом шунтирующих емкостей ее *p-n*-переходов можно записать:

$$E_{э.о} = E_k + U_{э-б} + U_{б-к}; \tag{1}$$

$$j_{э-б}^\phi = j_s \cdot (e^{\alpha U_{э-б}} - 1) - j_{fэ}; \tag{2}$$

$$j_{б-к}^\phi = -j_s \cdot (e^{-\alpha U_{б-к}} - 1) - j_{fк}; \tag{3}$$

$$j = j_{э-б}^\phi + j_{э-б}^{диф} + j_{э-б}^{зар} = j_{б-к}^\phi + j_{б-к}^{диф} + j_{б-к}^{зар}, \tag{4}$$

где  $E_{э.о} = E_0 \cdot x_0 / L$  – потенциал эмиттера в точке опроса  $x_0$ ;  $E_0$  – напряжение источника смещения сканистора;  $L$  – длина сканистора;  $E_k = E_0 \cdot t / T$  – текущее значение пилообразного напряжения;  $t$  – текущее время;  $T$  – период пилообразного напряжения;  $U_{э-б}, U_{б-к}$  – напряжение на фотодиодах эмиттер-база и база-коллектор соответственно;  $j_{э-б}^\phi, j_{б-к}^\phi$  – плотности токов через фотодиоды эмиттер-база и база-коллектор соответственно;  $j_s$  – плотность тока насыщения фотодиодов ячейки в темноте;  $j_{fэ}, j_{fк}$  – приращения плотностей насыщения фотодиодов эмиттер-база и база-коллектор соответственно;  $\alpha = q / A \cdot KT$ ;  $A$  – коэффициент, отражающий степень «неидеальности» *p-n*-перехода;  $K$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура по Кельвину;  $q$  – заряд электрона;  $j$  – полный ток фотодиодной ячейки;  $j_{э-б}^{диф}, j_{б-к}^{диф}$  – плотности токов через диффузионные емкости фотодиодов эмиттер-база и база-коллектор соответственно;  $j_{э-б}^{зар}, j_{б-к}^{зар}$  – плотности токов через зарядные (барьерные) емкости фотодиодов эмиттер-база и база-коллектор соответственно.

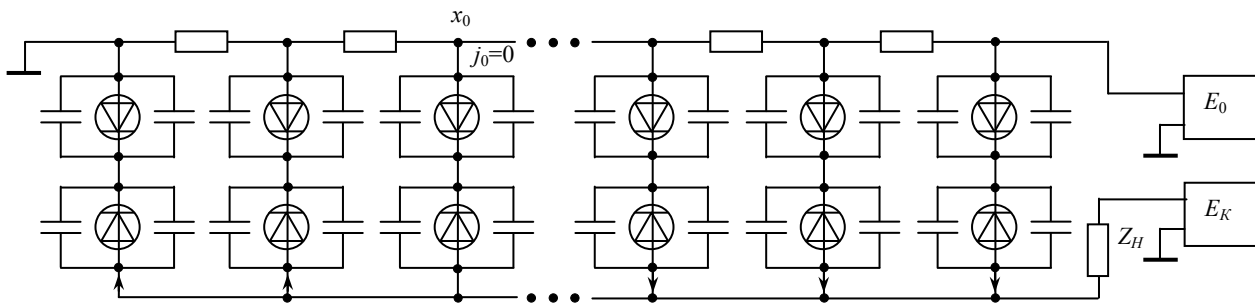


Рис. 1. Эквивалентная схема выделения видеосигнала со сканисторной структуры с учетом шунтирующих емкостей ее *p-n*-переходов

В общем случае физическая природа нелинейной полупроводниковой емкости  $p$ - $n$ -перехода, ее зависимость от напряжения, температуры, частоты, а также электрические характеристики этой емкости как радиоэлектронного прибора рассмотрены в работе [20], согласно которой диффузионные и зарядные емкости прямо смещенного эмиттерного и обратного смещенного коллекторного  $p$ - $n$ -переходов элементарной фотодиодной ячейки сканистора можно представить в следующем виде:

$$C_{\text{э-б}}^{\text{диф}} = \frac{dQ_{\text{э-б}}^{\text{диф}}}{dU} = \frac{d}{dU} \left\{ \tau_p \cdot [j_s (e^{aU_{\text{э-б}}} - 1) - j_{f\beta}] \right\} = \tau_p \cdot \alpha \cdot j_s \cdot e^{aU_{\text{э-б}}}; \quad (5)$$

$$C_{\text{б-к}}^{\text{диф}} = \frac{dQ_{\text{б-к}}^{\text{диф}}}{dU} = \frac{d}{dU} \left\{ \tau_p \cdot [-j_s (e^{-aU_{\text{б-к}}} - 1) + j_{f\kappa}] \right\} = \tau_p \cdot \alpha \cdot j_s \cdot e^{-aU_{\text{б-к}}}; \quad (6)$$

$$C_{\text{э-б}}^{\text{зар}} = S \cdot \sqrt[3]{\frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{э-б}}}{12(\varphi_{\kappa} - U_{\text{э-б}})}}; \quad (7)$$

$$C_{\text{б-к}}^{\text{зар}} = S \cdot \sqrt[3]{\frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{б-к}}}{12(\varphi_{\kappa} + U_{\text{б-к}})}}; \quad (8)$$

где  $C_{\text{э-б}}^{\text{диф}}, C_{\text{б-к}}^{\text{диф}}$  – диффузионные емкости фотодиодов эмиттер-база и база-коллектор соответственно;  $\tau_p$  – наибольшее время жизни неосновных носителей (в сплошных сканисторах наибольшим временем жизни обладает базовый слой, менее легированный по сравнению с внешними слоями, для сканисторов  $S_i(A_U)$   $\tau \approx 10^{-7}$  с);  $C_{\text{э-б}}^{\text{зар}}, C_{\text{б-к}}^{\text{зар}}$  – зарядные емкости плавных (диффузионных) переходов эмиттер-база и база-коллектор соответственно;  $S$  – площадь перехода;  $\epsilon\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проводимость материала;  $a_{\text{э-б}} = N_{\text{э-б}}(Z)/Z, a_{\text{б-к}} = N_{\text{б-к}}(Z)/Z$  – скорость изменения концентрации  $N_{\text{э-б}}(Z), N_{\text{б-к}}(Z)$  примесей в переходах эмиттер-база и база-коллектор соответственно;  $\varphi_{\kappa}$  – контактная разность потенциалов.

Ток  $i$ , протекающий через нелинейную емкость  $C$   $p$ - $n$ -перехода, и напряжение  $U$  на  $p$ - $n$ -переходе связаны между собой зависимостью [20]:

$$i = C \frac{dU}{dt} + U \frac{dC}{dt}. \quad (9)$$

Согласно (9) запишем выражения для токов через диффузионные и зарядные емкости эмиттерного и коллекторного фотодиодов сканистора:

$$j_{\text{э-б}}^{\text{диф}} = \tau_p \cdot \alpha \cdot j_s \cdot e^{aU_{\text{э-б}}} \frac{dU_{\text{э-б}}}{dt} + \tau_p \cdot \alpha^2 \cdot j_s \cdot e^{aU_{\text{э-б}}} \cdot U_{\text{э-б}} \cdot \frac{dU_{\text{э-б}}}{dt}; \quad (10)$$

$$j_{\text{б-к}}^{\text{диф}} = \tau_p \cdot \alpha \cdot j_s \cdot e^{-aU_{\text{б-к}}} \frac{dU_{\text{б-к}}}{dt} - \tau_p \cdot \alpha^2 \cdot j_s \cdot e^{-aU_{\text{б-к}}} \cdot U_{\text{б-к}} \cdot \frac{dU_{\text{б-к}}}{dt}; \quad (11)$$

$$j_{\text{э-б}}^{\text{зар}} = S \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{э-б}}}{12} \right]^{1/3} \cdot (\varphi_{\kappa} - U_{\text{э-б}})^{-1/3} \cdot \frac{dU_{\text{э-б}}}{dt} + \frac{S}{3} \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{э-б}}}{12} \right]^{1/3} \cdot (\varphi_{\kappa} - U_{\text{э-б}})^{-4/3} \cdot U_{\text{э-б}} \cdot \frac{dU_{\text{э-б}}}{dt}; \quad (12)$$

$$j_{\text{б-к}}^{\text{зар}} = S \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{б-к}}}{12} \right]^{1/3} \cdot (\varphi_{\kappa} + U_{\text{б-к}})^{-1/3} \cdot \frac{dU_{\text{б-к}}}{dt} - \frac{S}{3} \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{б-к}}}{12} \right]^{1/3} \cdot (\varphi_{\kappa} + U_{\text{б-к}})^{-4/3} \cdot U_{\text{б-к}} \cdot \frac{dU_{\text{б-к}}}{dt}. \quad (13)$$

Совместное приближенное решение уравнений (10)–(13) позволяет определить плотность полного тока  $j$  через элементарную фотодиодную ячейку сканистора. Ток  $I_{\text{ск}}$  сканистора, протекающий через сопротивление  $Z_{\text{н}}$  нагрузки, является током его фотодиодных ячеек:

$$I_{\text{ск}} = \int_0^L j dx = \frac{\epsilon}{2} \left\{ \frac{K \cdot j_s \cdot L}{\alpha \cdot E_0} \cdot \ln \left[ \frac{(f+1)^2}{f} \right] + x(j_{f\kappa} - j_{f\beta}) + \frac{2K \cdot j_s \cdot \tau \cdot L}{T} \cdot \frac{1}{(f+1)} - \frac{j_s \cdot \tau \cdot L}{T} \cdot \frac{K \cdot f}{f+1} \cdot \left[ \ln \left( \frac{K \cdot f}{f+1} \right) - 1 \right] + \frac{j_s \cdot \tau \cdot L}{T} \cdot \frac{K}{(f+1)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{K}{f+1} \right) - 1 \right] + \left[ \varphi_T - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{Kf}{f+1} \right) \right] \right\}^{-1/3} - \frac{L}{T} \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{б-к}}}{12} \right]^{1/3} \cdot \left[ \varphi_T - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{Kf}{f+1} \right) \right]^{2/3} + \frac{L \cdot \varphi_T}{T} \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{э-б}}}{12} \right]^{1/3} \cdot \left[ \varphi_T - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{Kf}{f+1} \right) \right]^{-1/3} \Bigg|_0^L, \quad (14)$$

где  $\epsilon$  – ширина сканистора;  $K = (2j_s + j_{f\beta} + j_{f\kappa})/j_s$ ;

$$f = e^{aE_0(x_0/L - t/T)}; \quad \varphi_T = KT/q.$$

Видеосигнал  $V$  сканистора, отражающий распределение освещенности вдоль его фоточувствительной поверхности, возникает при дифференцировании тока  $I_{\text{ск}}$ :

$$V = L_1 \cdot \frac{dI_{\text{ск}}}{dt} = \frac{L_1 b}{2} \left\{ -\frac{K \cdot j_s \cdot L}{T} \cdot \frac{f}{f+1} + \frac{K \cdot j_s \cdot L}{T} \cdot \frac{1}{f+1} - \frac{2K \cdot j_s \cdot L \cdot \alpha \cdot E_0}{T^2} \cdot \frac{f}{(f+1)^2} + \frac{2K \cdot j_s \cdot L \cdot \alpha \cdot E_0}{T^2} \cdot \frac{f}{(f+1)^2} \ln \left[ \frac{K^2 \cdot f}{(f+1)^2} \right] + \frac{2L \cdot E_0}{3T^2} \cdot \frac{1}{(f+1)} \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{э-б}}}{12} \right]^{1/3} \left[ \varphi_T - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{Kf}{f+1} \right) \right]^{-1/3} + \frac{L \cdot E_0 \cdot \varphi_T}{3T^2} \cdot \frac{1}{(f+1)} \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{э-б}}}{12} \right]^{1/3} \left[ \varphi_T - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{Kf}{f+1} \right) \right]^{-4/3} + \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2L \cdot E_0}{3T^2} \cdot \frac{f}{(f+1)} \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{б-к}}}{12} \right]^{1/3} \cdot \left[ \varphi_T - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{K}{f+1} \right) \right]^{-1/3} + \\
 & + \frac{L \cdot E_0 \cdot \varphi_T}{3T^2} \cdot \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a_{\text{б-к}}}{12} \right]^{1/3} \cdot \left[ \varphi_T - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{K}{f+1} \right) \right]^{-4/3} \Bigg|_0^L
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Для тока  $I_{\text{ск}}$  и видеосигнала  $V$  сканистора соответственно на рис. 2, а, б приведены зависимости активных, на рис. 2, в, г – диффузионных, на рис. 2, д, е – зарядных для случаев узкой ( $x_1=0,2L$ ;  $x_2=0,22L$ ) зоны и широкой ( $x_1=0,2L$ ;  $x_2=0,5L$ ) зоны (рис. 3, а-е) при  $E_0=15\text{e}$ ;  $j_s=5 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ;  $j_{fs}=j_{fk}=1,5 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ ;  $T=10^{-3} \text{ сек}$ ;  $\epsilon=0,1 \text{ см}$ ;  $L=1 \text{ см}$ ;  $a_{\text{э-б}}=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-4}$ ;  $a_{\text{б-к}}=0,75 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-4}$ ;  $\tau_p=3 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ .

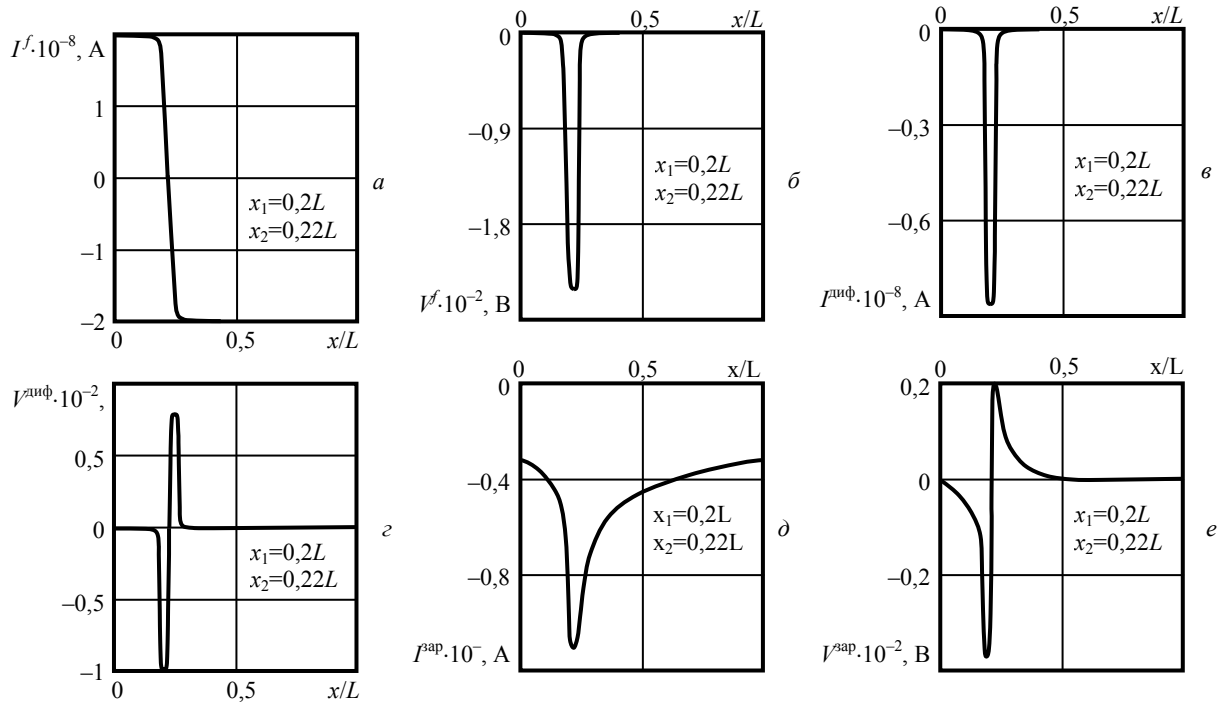


Рис. 2. Зависимость активной световой, диффузионной и зарядной составляющих тока и видеосигнала сканисторной структуры от момента ее опроса для случая узкой световой зоны

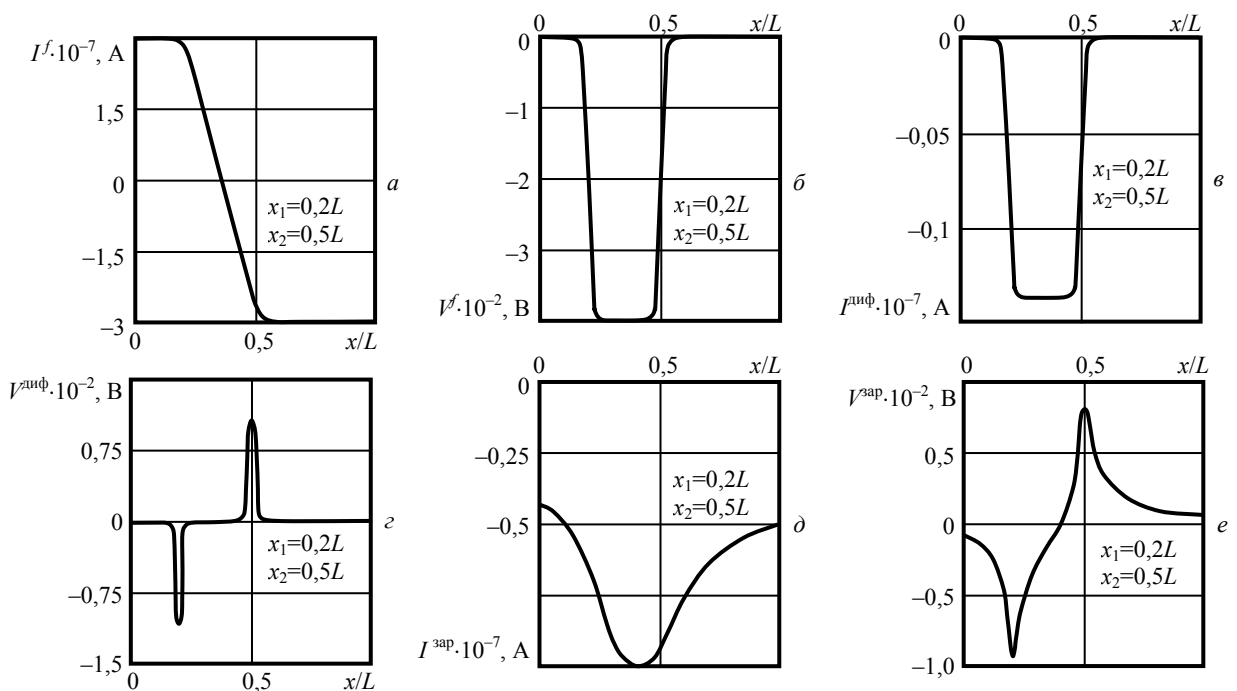


Рис. 3. Зависимость активной световой, диффузионной и зарядной составляющих тока и видеосигнала сканисторной структуры от момента ее опроса для случая широкой световой зоны

Видно, что диффузионная составляющая тока  $I^{\text{диф}}$  сканистора обладает меньшей амплитудой, но более крутыми фронтами, чем зарядная  $I^{\text{зар}}$  составляющая, и при дифференцировании тока  $I_f^{\Sigma}$  (когда формируется суммарный видеосигнал  $V_f^{\Sigma}$ ) это приводит к выравниванию составляющих соотношения  $V_{\text{max}}^{\text{зар}} / V_{\text{max}}^{\text{диф}}$  в сравнении с  $I_{\text{max}}^{\text{зар}} / I_{\text{max}}^{\text{диф}}$ . Диффузионная емкость представляет собой до некоторой степени фиктивную емкость (например, наличие этой емкости не связано с протеканием токов смещения через данный  $p$ - $n$ -переход). Поэтому составляющая  $I^{\text{диф}}$  светового тока протекает только при опросе освещенных (рис. 2, в, 3, в) и не протекает при опросе неосвещенных участков фоточувствительной поверхности сканистора в отличие от составляющей  $I^{\text{зар}}$ , которая протекает в течение всего периода опроса сканистора.

Следует отметить, что емкости составляющие тока сканистора приводят к уменьшению общего тока через сопротивление  $z_{\text{н}}$  нагрузки и падения напряжения на нем в начале опроса сканистора, а также к их увеличению в конце опроса. Это уменьшает длину неопрашиваемой (за счет падения напряжения на  $z_{\text{н}}$ ) части у одного конца сканистора в начале опроса и увеличивает длину неопрашиваемой части у противоположного конца сканистора в конце опроса. Появление «ложного видеосигнала» в начале опроса приводит к невозможности использования начального участка сканистора. Таким образом, емкости составляющие тока  $I_{\text{ск}}$  сканистора сужают полезную длину фоточувствительной поверхности до величины ее центрального участка, и поэтому для повышения коммутационного быстродействия сканистора целесообразно использовать импульсный режим его опроса.

#### Библиографические ссылки

1. Шелковников Ю. К. Прецизионная информационно-измерительная система на основе телевизионного сканистора // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 1. – С. 244–249.
2. Шелковников Ю. К. Повышение стабильности и линейности координатной характеристики сканисторных информационно-измерительных систем // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 251–255.
3. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Применение дискретно-сплошной структуры мультискана в оптико-электронных измерительных устройствах // Датчики и системы. – 2003. – № 2. – С. 46–49.
4. Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р. Информационно-измерительная система на основе телевизионного сканистора с увеличенной длиной фоточувствительной поверхности // Проблемы механики и материаловедения : сборник трудов ИМ УрО РАН. – 2014. – С. 231–236.
5. Шелковников Ю. К. Сканисторная информационно-измерительная система с адаптивным режимом сканирования // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 169–172.
6. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Алиев А. В., Сермягин К. В. Влияние физических особенностей телевизионной сканисторной структуры на точность измерения непрямолинейности ствольных труб // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2. – С. 112–117.
7. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Алиев А. В., Осипов Н. И. Помехозащищенный сканисторный измеритель угловых перемещений объектов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2. – С. 106–112.
8. Закаменных Л. Г., Алиев А. В., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Измерение дульных углов при определении динамического рассогласования выверенных осей ствола и прицела // Оборонная техника. – 2013. – № 9-10. – С. 119–127.
9. Закаменных Л. Г., Алиев А. В., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Измерения непрямолинейности оси ствола в бесстрельбовом методе определения углов вылета снарядов // Оборонная техника. – 2013. – № 9-10. – С. 111–119.
10. Патент РФ на изобретение № 2151361. Датчик координат стрелкового тренажера / Ю. К. Шелковников, А. Ю. Веркиенко, Н. И. Осипов, Б. Г. Подласкин ; опубл. 02.08.1999.
11. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения // Известия РАРАН. – 2005 (43). № 2. – С. 71–75.
12. Подласкин Б. Г., Гук Е. Г., Носенко Е. В. Построение двойной синтезированной апертуры на фотоприемниках мультискан для определения положения фронта перепада яркости слабоконтрастных оптических сигналов // ЖТФ. – 2002. – Т. 72. – С. 73–78.
13. Шелковников Ю. К., Евсеев Ю. И. Устройство для измерения линейного перемещения светового луча // А. с. № 974122. – 1982.
14. Подласкин Б. Г., Гук Е. Г. Позиционно-чувствительный фотодетектор-мультискан // Измерительная техника. – 2005. – Т. 8. – С. 31–34.
15. Патент РФ на изобретение № 2348900. Устройство для измерения размеров объектов / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, С. Р. Кизнерцев ; опубл. 19.11.2007.
16. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И. Анализ работы мультискана с амплитудно-модулированными световыми потоками // Датчики и системы. – 2003. – № 10. – С. 12–16.
17. Шелковников Ю. К. Выделение видеосигнала с мультискана модуляцией развертывающего напряжения // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 107–112.
18. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Технология изготовления эпитаксиальных сканисторных датчиков // Известия РАРАН. – 2005 (43). – № 2. – С. 75–79.
19. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. 133с.
20. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. – М. : Сов. радио, 1963. – 592 с.

\*\*\*

Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor, Chief Researcher, Institute of Mechanics, UB RAS

#### Influence of nonlinear capacity of p-n-p structure of television scanistor on its performance

The paper describes the influence of stray capacities of scanistor p-n junctions on its commutation response speed. The relation is obtained to characterize the influence of the parallel capacity of photodiode cells on video signal shape and amplitude. It is shown that capacity components of scanistor current are narrowing the useful length of its photosensitive surface to the value of its central segment.

**Keywords:** scanistor structure, photodiode cell, charge and diffusion capacities, video signal, commutation response speed.

Поступило: 09.04.15