

К. т. н. В. П. РЕВА, И. В. МАРЧИШИН, С. В. КОРИНЕЦ,  
д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ

Украина, г. Киев, ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;  
Россия, г. Новосибирск, ИФП РАН  
E-mail: vpreva@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
09.02 2011 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Н. Н. БЕРЧЕНКО  
(НУ «ЛП», г. Львов)

## УСТРОЙСТВА СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ С КРУПНОФОРМАТНЫХ МАТРИЦ ИК-ФОТОДИОДОВ

*Спроектированы и изготовлены устройства считывания для матриц ИК-фотодиодов формата 320×256 и 640×512. Рассмотрена архитектура построения и влияние геометрических размеров элементов схем считывания на выходные параметры устройства.*

Область задач, которые решаются с применением систем технического зрения в тех областях спектра, где зрительная система человека невосприимчива к излучению, в настоящее время быстро расширяется. Решение таких задач базируется, прежде всего, на применении крупноформатных линеек и матриц фотоприемников, обеспечивающих работу систем в масштабе реального времени. Однако такие крупноформатные фотоприемные устройства (ФПУ) не могут функционировать без использования процессорной электроники (в данном случае — без устройств считывания), обеспечивающей выполнение функций накопления заряда, конверсии заряда в напряжение, усиления и мультимплексирования.

Среди нескольких технологий формирования ФПУ гибридная технология изготовления охлаждаемых многоэлементных ИК-фотоприемников и соединения их с устройствами считывания до настоящего времени является наиболее распространенной [см., напр., 1]. Прогресс в технологии изготовления ИК-фотодиодов позволяет реализовывать крупноформатные матрицы и требует новых решений в проектировании и изготовлении устройств считывания для них. В настоящее время основной технологией изготовления таких устройств для крупноформатных приемников излучения ИК-диапазона является кремниевая КМОП-технология с проектными нормами не более 1,0 мкм.

В настоящей работе рассматриваются конструкция и параметры кремниевых устройств считывания, спроектированных и изготовленных по проектным нормам 0,8 и 0,6 мкм, для матриц ИК-фотодиодов на основе узкощелевых полупроводников формата 320×256 и 640×512.

### Архитектура матричных устройств считывания ИК-диапазона

Большинство современных матричных ФПУ ИК-диапазона спроектировано для работы в режиме «мо-

ментального снимка» («snapshot» regime) [1], который позволяет получать информацию от всех пикселей в один и тот же момент. Существуют две разновидности данного режима — «интегрирование, затем считывание» (Integrate Than Read — ITR), применяемого, в основном, для длинноволнового диапазона, и «интегрирование с одновременным считыванием» (Integrate When Read — IWR), применяемого для средневолнового диапазона. В режиме ITR в течение одного кадра вначале производится накопление информационного фототока на емкости пиксела, затем процесс накопления останавливается и производится строчное считывание накопленного заряда. В режиме IWR интегрирование фототока текущего кадра и считывание предыдущего осуществляется одновременно.

При функционировании устройств считывания в первом режиме есть ограничение по времени накопления (интегрирования) фототока, которое можно считать как

$$T_{int} = T_{frame} - (t_{rate} \times n \times m + t_{service}),$$

где  $T_{frame}$  — длительность кадра;

$t_{rate}$  — период вывода одного пиксела информации;

$n \times m$  — формат матрицы;

$t_{service}$  — время, необходимое для срабатывания обрамляющих устройств.

Для частоты развертки  $f=50$  Гц в матрице на 320×256 элементов с одним выходом и в матрице на 640×512 элементов с четырьмя выходами, работающими на частоте 5 МГц, значение  $T_{int}$  составляет порядка 10% от длительности кадра (не более 3 мс). В обоих диапазонах длин волн этого времени достаточно, чтобы получить температурное разрешение не хуже 0,025 К. Для крупноформатных матриц применяется традиционная архитектура развертки либо столбцов, либо строк со строчными (столбцовыми) усилителями/преобразователями, сигналы из которых затем направляются на один или несколько выходов (рис. 1).

Управление матрицей считывания осуществляет цифровой контроллер, обеспечивающий все необходимые сигналы управления. С его помощью можно задавать нужный формат (320×256, 320×240 или 256×25 для матрицы на 320×256 элементов и 640×512, 640×480 или 512×512 для матрицы на 640×512 элементов или произвольное окно внутри матрицы), оптимизировать аналоговые параметры, вырабатывать



формационного заряда (режим «моментального снимка»);  $T2$  — как транзистор «антиблуминга», тестирующий транзистор и транзистор сброса в режиме IWR;  $T3$  — как считывающий адресный транзистор;  $T4$  — транзистор для соединения и разъединения емкостей  $C1$  и  $C2$  в режиме ITR и IWR. Величина максимальной зарядовой емкости в режиме IWR на 30% меньше, чем в режиме ITR. Для увеличения зарядовой емкости конденсаторы  $C1$  и  $C2$  реализованы как подзатворные емкости  $p$ -канальных транзисторов. Это дает возможность повысить величину максимальной зарядовой емкости до 5 пКл в режиме ITR и до 3 пКл в режиме IWR. Напряжение питания схемы считывания  $U_{cc}$  обычно составляет 3–5 В, подстраиваемое напряжение транзистора  $U_{inj}=0,7–1,4$  В.

**Устройства считывания информационного заряда**

Для считывания информации со столбцовых шин применяются либо балансные дифференциальные усилители, либо зарядочувствительные усилители, эквивалентные схемы которых представлены на рис. 3. Основным их элементом является операционный усилитель. К его входу (неинвертирующему в случае *a* и инвертирующему в случае *б*) подключается через транзистор выборки определенный пиксел. На второй вход подается напряжение смещения  $U_{см}$ . При этом оно может подаваться извне (рис. 3, *б*) либо формироваться внутри микросхемы с помощью делителя питающего напряжения  $U_{dd}$ . В случае *a* между входом и выходом операционного усилителя включена емкость  $C_a$ , определяющая коэффициент преобразования заряд/напряжение. Обе схемы имеют как достоинства, так и недостатки.

В разработанных устройствах используется зарядочувствительный усилитель, т. к. в нем отсутствует деление заряда между пиксельной и считывающей емкостями, благодаря чему не уменьшается динами-

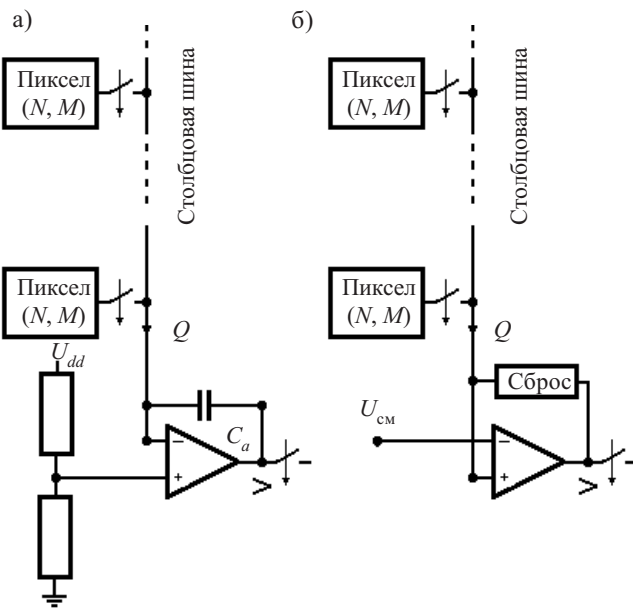


Рис. 3. Эквивалентные схемы зарядочувствительного (а) и балансного дифференциального (б) столбцовых усилителей

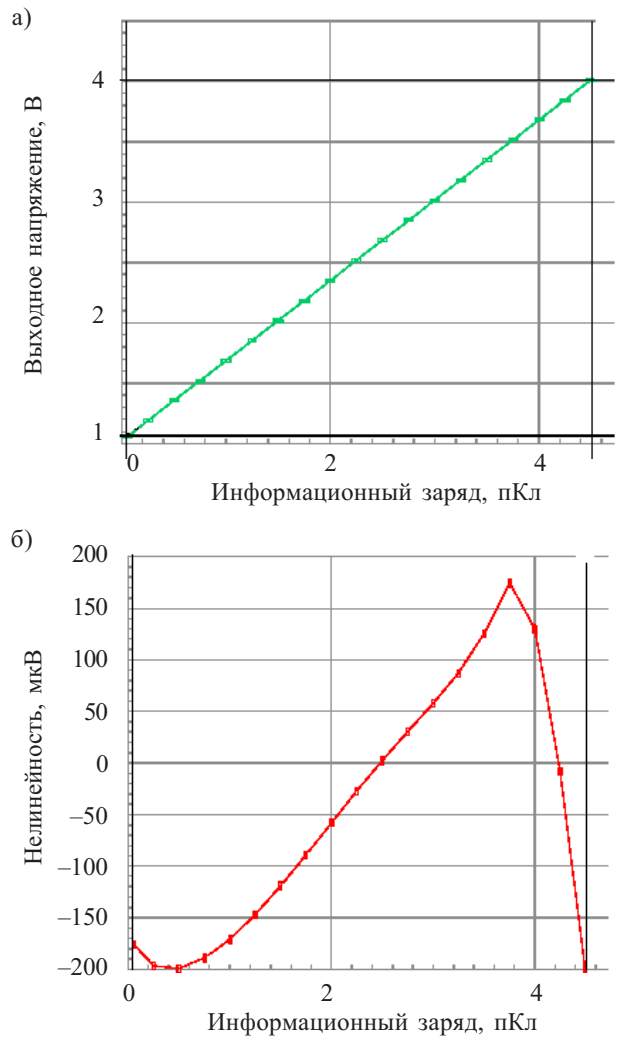


Рис. 4. Расчетная передаточная характеристика столбцового зарядочувствительного усилителя (а) и отклонение характеристики от линейности в реальном усилителе (б)

ческий диапазон; легко перестраивается коэффициент преобразования за счет изменения емкости обратной связи; не требуется дополнительного цикла перезаряда накопительной емкости и прецизионной подстройки опорного напряжения. Зарядочувствительный усилитель имеет лучшую, чем балансный дифференциальный усилитель, линейность при малых уровнях сигнала и позволяет использовать нелинейную подзатворную емкость в качестве накопительного конденсатора. Расчеты показывают, что при коэффициенте преобразования 1 пКл/В зарядочувствительный усилитель позволяет получить динамический диапазон более 80 дБ, максимальный выходной сигнал — не менее 3 В, интегральный шум — менее 250 мкВ (рис. 4).

**Сравнение полученных характеристик устройств считывания с результатами моделирования**

При изготовлении устройств считывания использовалась КМОП-технология с проектными нормами 0,8 и 0,6 мкм, двумя уровнями поликремния и тремя уровнями металла. Основные физико-технологиче-

Основные параметры устройств считывания на основе КМОП-структур, изготовленных по технологиям с разными проектными нормами

Параметры, обозначение, единицы измерения	Проектная норма	
	0,8 мкм	0,6 мкм
Пороговое напряжение МОП-транзисторов, В — <i>n</i> -канальных, $V_{in}$ — <i>p</i> -канальных, $V_{ip}$	0,70 ± 0,1 – (0,80 ± 0,12)	0,72 ± 0,12 – (0,80 ± 0,12)
Удельная емкость диэлектрика $C_{уд}$ , фФ/мкм <sup>2</sup> — подзатворного — конденсаторного	2,03 0,86	2,76 0,86

ские параметры структур, изготовленных в обоих процессах, представлены в **таблице**.

Большинство параметров соответствовало расчетным величинам как при комнатной, так и при азотной температуре. Для получения максимального быстродействия в схеме формата 320×256, изготовленной по 0,8-мкм технологии, в аналоговой части для дифференциальных каскадов были использованы полевые транзисторы минимальных размеров (с длиной канала 0,8 мкм). Это привело к значительному увеличению и межканального разброса значений параметров по сравнению с расчетным, и к повышению шума (**рис. 5, 6**). Измерения показали, что отклоне-

ние уровня постоянного выходного сигнала составляет более ±500 мВ при расчетном значении менее 100 мВ, а средний шум составляет порядка 2,2 мВ при расчетном 0,25 мВ. В результате этого полученный динамический диапазон был ниже расчетного более чем на 20% (снизился с 80 до 60 дБ). В схеме считывания для матрицы формата 640×512 для дифференциальных каскадов использовались транзисторы, длина канала которых превышала минимальную не менее чем втрое, с «мозаичным» топологическим расположением элементов. Это позволило приблизить реальные параметры к расчетным и получить совпадение более чем на 90%.

\*\*\*

Таким образом, при проектировании и изготовлении устройств считывания для крупноформатных фоточувствительных матриц ИК-диапазона необходимо учитывать многие технологические параметры, несущественные для устройств считывания меньшего формата, исследованных ранее [4, 5]. Для аналоговой части схем считывания это относится, в первую очередь, к отклонению от расчетных значений таких физических параметров, как пороговое напряжение, подвижность носителей, геометрические размеры. Такие отклонения наиболее сказываются на транзисторах минимальных размеров, поэтому применение транзисторов с минимальной длиной канала в балансных каскадах операционных усилителей нежелательно. Необходимо также учитывать, что результаты моделирования с учетом допустимых отклонений могут отличаться от реальных данных более чем в два раза, что указывает на необходимость тщательной проработки аналоговых схем.

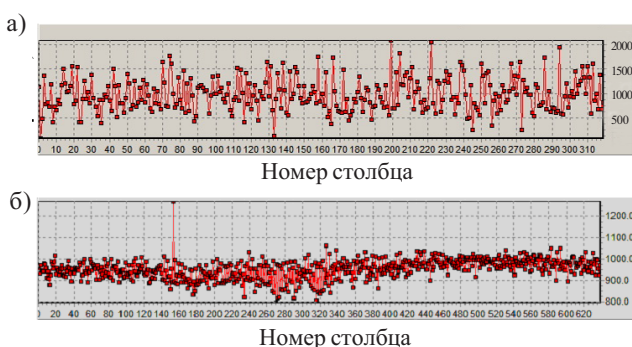


Рис. 5. Оцифрованная осциллограмма выходного сигнала  $U$  схемы считывания с матрицей формата 320×256 (а) и формата 640×512 (б) (в тестовом режиме измерения без подключения фотодиодов, при 20°C, частота считывания 5 МГц)

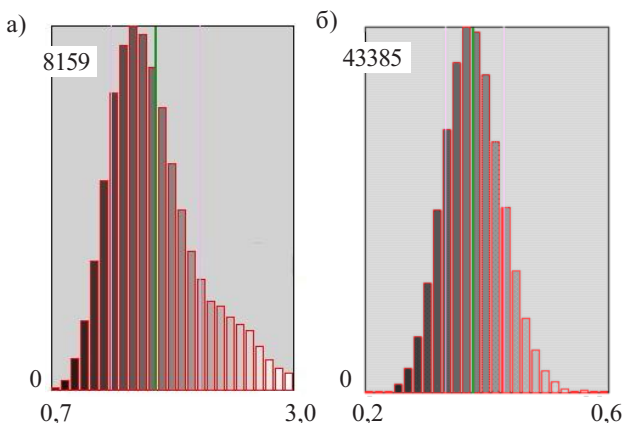


Рис. 6. Статистическое распределение шума схемы считывания для матриц формата 320×256 (а) и формата 640×512 (б) в тестовом режиме измерения

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сизов Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения в невидимых участках спектра.— К.: Академперіодика, 2008. [Sizov F. F. Foelektronika dlya sistem videniya v nevidimyh uchastkakh spektra. Kiev. Akademperiodika. 2008]
2. Kozlowski L. J., Kosonocky. W. F. Infrared detector arrays/In book: Handbook of Optics // Ed. by M. Boss, W. Van Stryland, D. R. Williams, W. L. Wolfe.— New York, McGraw-Hill, 1995.
3. Fossum E., Pain B. Infrared readout electronics for space science sensors: State of the art and future directions // Proc. SPIE. — 1994.— Vol. 2020.— P. 262—285.
4. Рева В. П., Коринец С. В., Писаренко Л. А. и др. Сравнительный анализ технологий изготовления кремниевых схем считывания инфракрасной аппаратуре // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2007.— № 5.— С. 46—49. [Reva V. P., Korinets S. V., Pisarenko L. A. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2007. N 5. P. 46]
5. Sizov F. F., Derkach Yu. P., Korinets S.V., Reva V. P. 576×6 ROIC for MCT LWIR Arrays // Proc. SPIE.— 2005.— Vol. 5726.— P. 140—145.