

УДК 621.383

Матричный мультиплексор с расширенным динамическим диапазоном для МФПУ коротковолнового ИК-диапазона

П. А. Кузнецов, И. С. Моцев

Обосновывается необходимость применения новых способов расширения динамического диапазона МФПУ коротковолнового ИК-диапазона. Традиционно применяемые способы обладают низкой эффективностью, особенно для мегапиксельных форматов и с шагом ячеек не более 15 мкм. Наибольшей эффективностью расширения динамического диапазона (более 100 дБ) обладают адаптивные ячейки с индивидуальной подстройкой времени накопления и линейно-логарифмической передаточной характеристикой.

PACS: 85.60 Dw

Ключевые слова: БИС считывания, МФПУ, расширенный динамический диапазон.

Введение

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) для коротковолнового ИК-спектра (0,9—1,7 мкм) находят широкое применение в приборах ночного видения, системах тепловизионной и лазерной локации [1—3, 10].

Особенностью функционирования ФПУ в коротковолновом участке ИК-спектра является необходимость регистрации изменений освещенности на 4—5 порядков в пределах наблюдаемой сцены. Накопительные ячейки схем считывания фотосигнала (БИС считывания или мультиплексоров) с линейной передаточной характеристикой не в состоянии обеспечить детальную передачу столь высококонтрастного изображения. В связи с этим к накопительным ячейкам предъявляются повышенные требования по величине динамического диапазона.

В общем случае динамический диапазон определяется как отношение максимального входного фотосигнала к суммарному среднеквадратичному отклонению (СКО) приведенного ко входу шума, т. е. дробового, теплового, $1/f$ -шума, а также шума считывания. Расширение динамического диапазона является одной из основных тенденций развития современных матричных ФПУ коротковолнового участка ИК-спектра [1, 2].

В данной работе предложена накопительная ячейка трансимпедансного типа для МФПУ ко-

ротковолнового ИК спектра на основе тройного соединения $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ с шагом 12—15 мкм. Поскольку такие накопительные ячейки имеют очень низкую зарядовую емкость (не более 50 Кс), то расширение их динамического диапазона становится крайне актуальным. Особенностью предложенной накопительной ячейки является внешнее управление динамическим диапазоном в широких пределах (60—120 дБ).

Обзор способов расширения динамического диапазона

Существуют несколько способов расширения динамического диапазона ФПУ, которые можно классифицировать следующим образом.

1. Суперпозиция подкадров [4], с различным временем экспозиции (накопления), за пределами ФПУ (программно-аппаратные средства).

2. Построение накопительных ячеек мультиплексора в соответствии с известными вариантами схемотехники:

2.1 — режим «солнечного элемента» [5];

2.2 — нелинейная нагрузка для ФЧЭ [6];

2.3 — построение накопительной ячейки с переключаемой накопительной емкостью [7];

2.4 — цифровой преобразователь «фототочастота» [8, 9].

Первый способ предполагает запоминание подкадров изображения с изменяемым временем накопления, например, по закону $T_N = T_0 2^N$, где N — порядковый номер подкадра (0, 1, 2...). При этом синтезируется изображение с широким динамическим диапазоном и с характеристикой, близкой к логарифмической. Существенным недостатком этого способа является снижение кадровой частоты ФПУ в N раз.

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист.

Моцев Иван Сергеевич, начальник дизайн-центра.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2015 г.

© Кузнецов П. А., Моцев И. С., 2015

В варианте 2.1 используется логарифмическая зависимость фотоЭДС на $p-n$ -переходе от освещенности ФЧЭ, а в варианте 2.2 используется логарифмическая зависимость напряжения затвористок нагрузочного МОП транзистора от величины протекающего фототока (только в подпороговом режиме). При всей простоте этих вариантов, они имеют ряд недостатков: низкая чувствительность (~60 мВ на декаду изменения фототока) и низкая скорость стекания фотогенерированного заряда при слабых уровнях освещенности; большой уровень геометрического шума, связанный с температурной зависимостью ВАХ $p-n$ -переходов (вар. 2.1) и разбросом пороговых напряжений нагрузочных МОП транзисторов (вар. 2.2).

Построение ячейки с переключаемой накопительной емкостью на большой номинал (вар. 2.3) является наиболее распространенным вариантом при согласовании ФЧЭ с трансимпедансным усилителем (СТИА). При этом используется одновременное, т. е. по всем ячейкам, 10—20-кратное ослабление выходного фотосигнала по внешнему управляющему импульсу. Недостатком является ослабление чувствительности по всем фрагментам наблюдаемой сцены, что ведет к ухудшению контраста изображения и снижению отношения сигнал/шум. Кроме того, в накопительных ячейках мегапиксельных МФПУ с малым шагом (12—15 мкм) остается площадь только под малую накопительную емкость, что делает этот вариант топологически нереализуемым.

Вариант 2.4 с автосбросом и с преобразованием «фототок-частота» имеет линейную передаточную характеристику и наиболее предпочтителен для матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона, поскольку в коротковолновом ИК-диапазоне (из-за низкого уровня фототоков 0,1—100 пА) возникает автосброс с частотой, причем порядка нескольких импульсов за кадр, что ведет к очень низкой разрядности получаемого цифрового сигнала.

Накопительная ячейка с управляемым линейно-логарифмическим динамическим диапазоном

Предлагаемая накопительная ячейка (НЯ) с расширенным динамическим диапазоном, структурная схема которой приведена на рис. 1, имеет известный прототип [9] с автоподстройкой времени накопления на основе преобразователя «фототок-временной интервал». Здесь к обычной накопительной ячейке трансимпедансного типа с интегрированием фототока I_{ph} на емкости C_{int} добавлены компаратор напряжения CMP с опорным напряжением V_{ref} и триггер TRS с входом предустановки ST. При линейном увеличении выходного

напряжения $V_{int}(t) = I_{ph}t/C_{int}$ интегрирующего усилителя A_V до уровня V_{ref} происходит смена логического уровня на выходе компаратора CMP и его запоминание на выходе триггера. Момент времени t_s , при котором происходит равенство напряжений $V_{int}(t)$ и V_{ref} , является временным эквивалентом фототока и в прототипе служит для преобразования этого фототока в цифровой код, формируемый внешним двоичным счетчиком. Запоминание цифрового кода в каждой НЯ происходит индивидуально по сигналу триггера TRS. Поскольку цифровое представление сигналов в НЯ с шагом 12—15 мкм является крайне проблематичным, то был предложен вариант ячейки с расширенным динамическим диапазоном, имеющей аналоговый выход V_{out} .

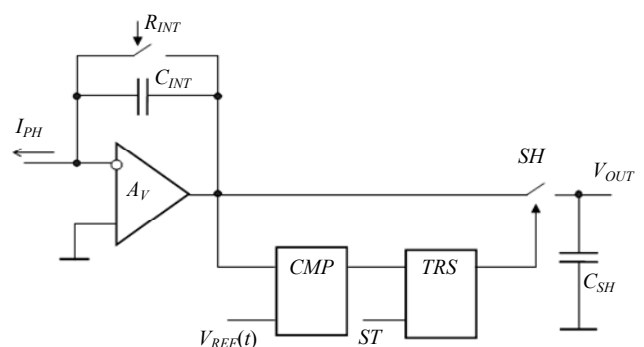


Рис. 1. Структурная схема накопительной ячейки с расширенным динамическим диапазоном и с автоподстройкой времени накопления

Для аналогового выхода следует отметить один существенный нюанс: при постоянном опорном напряжении V_{ref} выходное напряжение V_{out} не будет меняться, поскольку его запоминание на емкости C_{sh} происходит при условии $V_{int}(t_s) = V_{ref}$, что показано на рис. 2. Для решения этой проблемы была введена временная зависимость опорного напряжения компаратора в виде следующего выражения:

$$V_{ref}(t) = V_0 [1 - (t/T_k)^m], \quad (1)$$

где V_0 — значение опорного напряжения в начале накопления фототока (по окончании импульса сброса R_{INT}), T_k — период накопления кадра, m — изменяемый параметр. На рис. 3 приведены зависимости $V_{ref}(t)$ для различных значений параметра m .

Выходной сигнал $V_{out}(I_{ph})$ рассчитывается из решения следующей системы уравнений:

$$V_{int}(t_s) = I_{ph}t_s/C_{int} = V_0 [1 - (t_s/T_k)^m], \quad (2)$$

$$V_{out}(I_{ph}) = I_{ph}t_s/C_{int}, \quad (3)$$

причем при $m = 1/2$ выходной сигнал равен

$$V_{out}(I_{ph}) = V_0 [(1 + 4I_{ph}/I_0)^{1/2} - 1]^2 / 4(I_{ph}/I_0) \quad (4)$$

где I_0 — максимальное значение фототока для обычного линейного накопления, при котором выходное напряжение интегратора V_{int} еще не достигло насыщения. При заданных параметрах интегратора $V_0 = V_{max} = 1,6$ В, $C_{int} = 5$ фФ, $T_k = 10$ мс, получим $I_0 = V_0 C_{int} / T_k = 0,8$ пА.

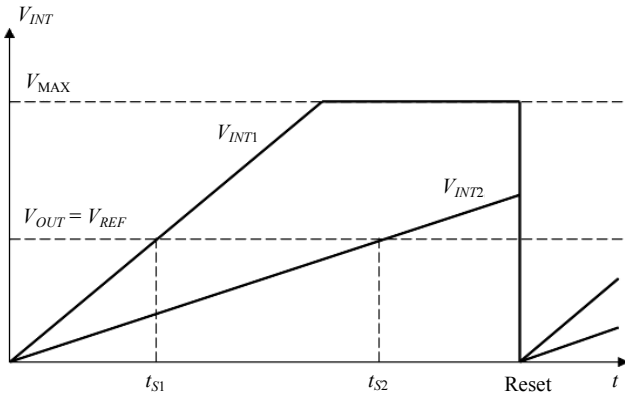


Рис. 2. Автоподстройка времени накопления (t_S) при фиксированном опорном напряжении компаратора V_{ref}

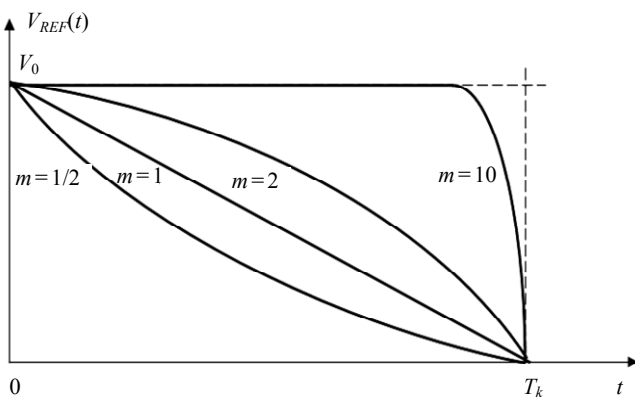


Рис. 3. Временная зависимость опорного напряжения компаратора для различных значений параметра m

При $m = 1$ выражение для выходного сигнала имеет вид:

$$V_{out}(I_{ph}) = V_0 [I_{ph} / (I_{ph} + I_0)] \quad (5)$$

При $m > 10$ выражение для выходного сигнала стремится к линейной зависимости от фототока:

$$V_{out}(I_{ph}) \approx I_{ph} T_k / C_{int} \quad (6)$$

На рис. 4 в логарифмическом масштабе по оси X приведены графические зависимости выходного сигнала НЯ (в относительных единицах) от фототока I_{ph} .

В логарифмическом масштабе линейная зависимость от фототока представляется в виде экспоненты (график 1), а логарифмические зависимости представляются линейными участками с различными наклонами (графики 2, 3). Максимальный фототок I_{max} , рассчитанный по уровню

0,99 от насыщения выходного сигнала, при значениях $m = 1/2$, $m = 1$, $m > 10$ будет равен 1000, 40 и 0,8 пА соответственно.

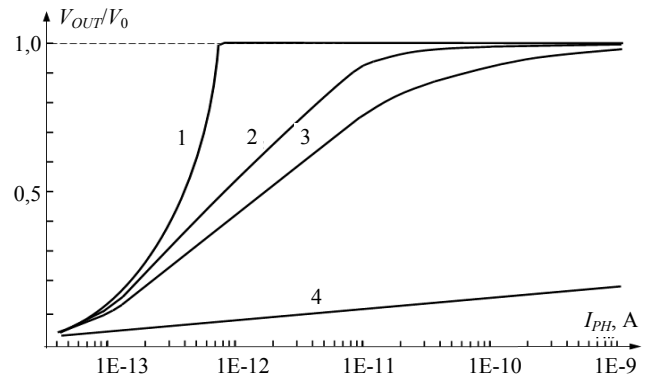


Рис. 4. Относительные передаточные характеристики накопительной ячейки: 1 — при $m > 10$; 2 — при $m = 1$; 3 — при $m = 1/2$; 4 — логарифмическая зависимость фотоЭДС на $p-n$ -переходе

Таким образом, предлагаемая схема НЯ позволяет создавать управляемую зависимость выходного сигнала от фототока: от линейной до логарифмической. Для сравнения также приведена передаточная характеристика распространенной ячейки [3] с логарифмической зависимостью напряжения на $p-n$ -переходе (фотоЭДС) от фототока:

$$V_{p-n} = \varphi_T \ln(1 + I_{ph} / I_d), \quad (7)$$

где φ_T — температурный потенциал, равный 25 мВ при $T = 300$ К; I_d — темновой ток фотодиода, в расчетах взятый на уровне 0,01 пА. Как уже было отмечено в сравнительном анализе, основными недостатками такой ячейки является низкая чувствительность при малых фототоках (см. рис. 4) и ее зависимость от темнового тока I_d , имеющего значительный разброс по матрице ФЧЭ.

Проведем оценку динамического диапазона для различных значений параметра m по формуле:

$$D = 20 \lg(I_{max} / \sigma_n), \quad (8)$$

где I_{max} — максимальный фототок, рассчитанный по уровню 0,99 от насыщения при соответствующем параметре m (см. рис. 4); σ_n — СКО шумового тока на входе НЯ. Величина СКО шумового тока рассчитывается как сумма дробового шума темнового тока (при $I_d = 0,01$ пА и $t_{int} = 10$ мс) и теплового шума накопительной емкости (при $C_{int} = 5$ фФ и $T = 300$ К):

$$\sigma_n = [q_e I_d / t_{int} + k T C_{int} / t_{int}^2]^{1/2} = 0,6 \text{ фА} \quad (9)$$

Из выражений (7), (8) получим: $D = 62$ дБ ($m > 10$) в линейном режиме; $D = 96$ дБ ($m = 1$) и $D = 124$ дБ ($m = 1/2$) в логарифмическом режиме.

Заключение

Предложена накопительная ячейка матричного мультиплексора для мегапиксельных МФПУ на основе тройного соединения $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$, обладающая широким диапазоном изменения входных фототоков в пределах 10^{-14} — 10^{-9} А. Отмечены недостатки традиционных решений проблемы расширения динамического диапазона. Описан новый схемотехнический способ расширения динамического диапазона до 120 дБ за счет применения линейно-логарифмической передаточной характеристики, управляемой внешним сигналом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.

2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.

3. Гусарова Н. И., Кошавцев Н. Ф., Попов С. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 288.

4. Richards A., Cromwell B. Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras. FLIR Systems, Indigo Operations.

5. Yang Ni. Low noise WDR ROIC for InGaAs SWIR Image Sensor. International Conference on Space Optics, Spain, 2014.

6. Yang Ni, Yi Ming Zhu. A 768x576 Logarithmic Image Sensor. New Image Technologies SA.

7. Кузнецов П. А., Хромов С. С. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 12.

8. Bermak A., Kitchen A. // IEEE Photonics Technology Letters. 2006. V. 18. No. 20.

9. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 83.

10. Андреев Д. С., Залетаев Н. Б., Трищенко М. А. и др. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.

11. Rogalski A. // Opto-Electronics Review. 2012. V. 20. P. 279.

ROIC for the starring SWIR FPAs with an extended dynamic range

P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev

Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received September 30, 2015

Some construction variants of ROIC for the starring SWIR FPAs having an extended dynamic range have been analyzed. Disadvantages of the traditional ROIC architectures have been obtained. A line-logarithmic transfer function is the most efficient variant for realization of a pixel circuit.

PACS: 85.60 Dw

Keywords: ROIC, SWIR FPA, extended dynamic range.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., *Uspexhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 131 (2014).
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. N. I. Gusarova, N. F. Koshavtsev, and S. V. Popov, *Uspexhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 288 (2014).
4. A. Richards and B. Cromwell, *Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras*. (FLIR Systems, Indigo Operation).
5. Ni Yang, *Low noise WDR ROIC for InGaAs SWIR Image Sensor*, in *Proc. International Conference on Space Optics*, (Spain, 2014).
6. Ni Yang and Yi Ming Zhu, *A 768x576 Logarithmic Image Sensor*. (New Image Technologies SA).
7. P. A. Kuznetsov and S. S. Khromov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 12 (2013).
8. A. Bermak and A. Kitchen, *IEEE Photonics Technology Letters* **18** (20), (2006)
9. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev, *Uspexhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 83 (2014).
10. D. S. Andreev, N. B. Zалетаев, M. A. Trishenkov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 86 (2012).
11. A. Rogalski, *Opto-Electronics Review* **20**, 279 (2012).

* * *