

Фотоприемное устройство коротковолнового ИК-диапазона формата 640×512 элементов с увеличенным динамическим диапазоном

П. А. Кузнецов, И. С. Моцев

Обосновывается необходимость расширения динамического диапазона в МФПУ коротковолнового ИК-спектра (SWIR). Традиционно применяемые способы обладают низкой эффективностью, в особенности, в крупноформатных матрицах с шагом не более 15 мкм. Наибольшей эффективностью расширения динамического диапазона (до 100 дБ) обладают накопительные ячейки с индивидуально изменяемой передаточной характеристикой в зависимости от яркости фрагментов наблюдаемой сцены. В работе предлагается простой в топологической реализации и эффективный способ расширения динамического диапазона, основанный на автоподстройке времени накопления индивидуально в каждой ячейке интегральной схемы считывания. При этом сохраняется высокая крутизна и линейность преобразования в накопительных ячейках с умеренной освещенностью (до 50–70 % от максимального сигнала), но снижается чувствительность в ячейках, близких к насыщению. В результате, формируется линейно-логарифмическая передаточная характеристика, обеспечивающая расширенный динамический диапазон. В работе приводятся примеры изображений с расширенным динамическим диапазоном, полученные с помощью первой отечественной SWIR-камеры формата 640×512 элементов.

Ключевые слова: фотоприемные устройства, фотодиоды, коротковолновый ИК-диапазон, расширение динамического диапазона, InGaAs, БИС считывания.

Ссылка: Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 438.

Reference: P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, Usp. Prikl. Fiz. 6 (5), 438 (2018).

Введение

Фотоприемные устройства (ФПУ) для SWIR-диапазона, т. е. для коротковолнового участка 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 на данном участке ИК-спектра является необходимость регистрации изменений освещенности на четыре-пять порядков в пределах наблюдаемой сцены. Однако накопительные ячейки интегральных схем считывания (БИС считывания) фотосигнала 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 среднеквадратичному отклонению входного шума. Расширение динамического диапазона является одной из основных тенденций развития современных ИК ФПУ [2, 11].

Целью данной работы является представление первого отечественного ФПУ SWIR-диапазона на основе фотодиодной матрицы из $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ формата 640×512 элементов и с шагом 15 мкм. Особенностью данного ФПУ, отличающей его от отечественного прототипа формата 320×256 элементов [13], является наличие в БИС считывания функции расширенного динамического диапазона, регулируемого в широких пределах (60–100 дБ).

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

Обзор способов расширения динамического диапазона

Существует ряд способов реализации режима расширенного динамического диапазона или режима HDR (high dynamic range) в ИК ФПУ,

Статья поступила в редакцию 3 октября 2018 г.

© Кузнецов П. А., Моцев И. С., 2018

причём основные из них можно классифицировать следующим образом:

1. суперпозиция подкадров с различным временем накопления программно-аппаратными средствами за пределами ФПУ [4];
2. фотовольтаический режим фотодетектора или режим «солнечного элемента» [5, 6];
3. нелинейная нагрузка фотодетектора на МОП-транзисторе [6];
4. переключение накопительной емкости на больший номинал [7];
5. цифровой преобразователь «фототок-частота» [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 передаточной характеристикой, близкой к логарифмической. Существенным недостатком этого способа является снижение кадровой частоты ФПУ в n раз, что допустимо только при наблюдении статических и малодинамических объектов.

В варианте 2 используется логарифмическая зависимость фотоЭДС на p - n -переходе от освещенности фоточувствительного элемента (ФЧЭ), а в варианте 3 используется логарифмическая зависимость напряжения «затвор-исток» нагрузочного МОП-транзистора от величины протекающего фототока (только в подпороговом режиме). При всей простоте этих вариантов, они имеют ряд недостатков: низкая чувствительность (60–90 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) и разбросом пороговых напряжений нагрузочных МОП-транзисторов (вар. 3). Кроме того, для режима «солнечного элемента» требуется специально разработанная технология изготовления фоточувствительной матрицы для исключения межэлементной взаимосвязи при прямом смещении фотодетекторов, характерном для этого режима [5, 6].

Построение ячейки с переключением накопительной емкости на больший номинал (вар. 4) является в настоящее время наиболее распространенным вариантом. При уровнях освещенности, близких к насыщению фотосигнала, применяется общее (10–20)-кратное ослабление выходного фотосигнала по внешнему управляющему сигналу. Недостатком этого варианта является одновременное ослабление чувствительности ФПУ по всем фрагментам наблюдаемой сцены, что ведет к

ухудшению контраста изображения и снижению отношения сигнал/шум. Кроме того, в накопительных ячейках крупноформатных ФПУ с малым шагом (не более 15 мкм) остается площадь только под малую накопительную емкость, что создает значительные топологические проблемы. Поэтому в таких ФПУ часто применяется способ автоматически регулируемого времени накопления по средней яркости, но с ухудшением качества изображения из-за снижением отношения сигнал/шум.

Вариант 5 с автосбросом накопления и с цифровым преобразованием «фототок-частота» имеет линейную передаточную характеристику, но ввиду схемотехнической и топологической сложности наиболее предпочтителен для матричных ФПУ с шагом не менее 25 мкм. Кроме того, в коротковолновом ИК-диапазоне из-за низких уровней фототока (0,1–100 пА) будет очень низкая частота автосброса и, соответственно, неприемлемо низкая разрядность цифрового кода.

Популярный метод эквализации гистограмм нельзя представить как метод расширения динамического диапазона, поскольку здесь происходит растягивание гистограммы по шкале яркости, сопровождаемое разрывами исходной гистограммы, в результате чего количество градаций яркости не увеличивается.

Из отечественных разработок представляет интерес фото-КМОП БИС формата 1280×1024 (шаг 13 мкм) с индивидуальным переключением накопительной емкости в зависимости от накопленного заряда [2].

БИС считывания формата 640×512 элементов

Основные особенности БИС считывания сводятся к следующим позициям.

Формат – 640×512 ячеек.

Размер ячейки – 15×15 мкм.

Тип накопительной ячейки – СТИА для фотодиодов с N -подложкой.

Режим интегрирования – Snapshot.

Режим считывания – IWR (считывание во время накопления) в заданном «окне».

Регулировка потребления по питанию.

Количество выходов – 8/4, опорный выход.

Режимы работы – по умолчанию, программируемый.

Динамический диапазон – линейный, расширенный (режим HDR).

Структура БИС считывания:

– матрица входных ячеек 640×512, тестовая строка;

– 512-канальный регистр выборки строк;

- аналоговый мультиплексор 640×8 ;
- 640-канальный регистр выборки столбцов;
- 8-канальный выходной буфер;
- блок формирования цифровых сигналов управления.

Для управления работой БИС считывания используются пять импульсных сигналов. Из них — три синхроимпульса — FRAME (кадровой синхронизации и накопления), LINE (строчной синхронизации), CLK (тактовая частота), а также два служебных — STOP для глобального сброса цифровой части БИС и DATA для последовательного ввода данных в программируемом режиме.

Электрическая схема входной (накопительной) ячейки БИС считывания приведена на рис. 1.

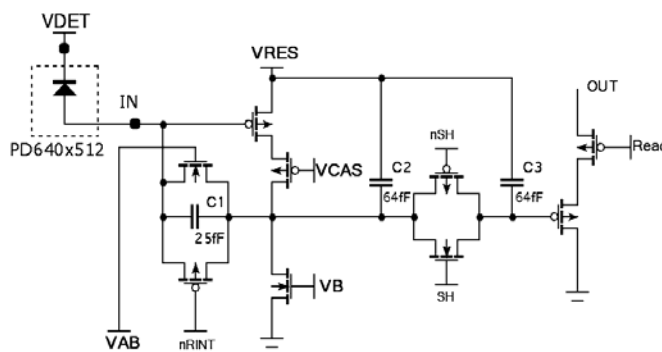


Рис. 1. Электрическая схема накопительной ячейки на основе СТИА.

Реализация режима расширенного динамического диапазона (HDR)

Практическая реализация режима HDR была проведена в коротковолновом ИК ФПУ формата 640×512 элементов, разработанном в АО «НПО «Орион» на основе n - B - p -гетероструктуры $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$. В работе [14] был описан способ расширения динамического диапазона матричного ФПУ на примере накопительной ячейки с прямой инжекцией. В БИС считывания формата 640×512 элементов этот способ был адаптирован к накопительной ячейке с СТИА путём введения n -МОП-транзистора с управляющим импульсным напряжением VAB. Выбором амплитуды и ширины импульса VAB устанавливается момент перехода накопительной ячейки из линейного в линейно-логарифмический режим накопления, т. е. в режим HDR.

На рис. 2 приведены осциллограммы выходных сигналов на выходе БИС считывания в двух режимах. В режиме HDR линейный участок выходного сигнала составляет $\sim 75\%$ от максимального размаха, ограниченного уровнем насыщения, что позволяет проводить стандартную двухточечную коррекцию HDR-изображения на линейном участке сигнальной характеристики.

Входная ячейка выполнена по схеме с каскодным СТИА (СТИА — емкостной трансимпедансный усилитель), имеющем накопительную емкость $C1 = 25$ фФ. Емкость $C2 = 64$ фФ ограничивает полосу пропускания СТИА для снижения высокочастотных шумов. Емкость $C3 = 64$ фФ служит для хранения накопленного напряжения в течение времени считывания кадра, тем самым обеспечивая режим IWR. Напряжением VCAS устанавливается режим работы СТИА, при котором нейтрализуется влияние проходной паразитной емкости входного транзистора и накопление ведется только на емкости $C1$. Смещение фотодиодов обеспечивается напряжением VDET на общей подложке N типа. Считывание сигналов на выход ячейки OUT осуществляется через p -МОП повторитель с ключом опроса Read.

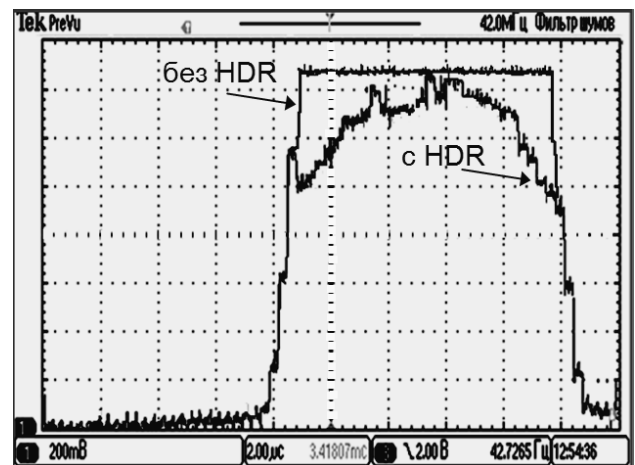


Рис. 2. Осциллограммы выходных сигналов для линейного и HDR-режимов.

На рис. 3 приведены примеры высококонтрастных изображений, полученных в линейном и HDR-режимах, с помощью новой SWIR-камеры формата 640×512 элементов. Из сравнения этих режимов следует, что в режиме HDR наблюдается гораздо большее количество градаций яркости и, как следствие, лучшее качество изображения в сочетании с большей информативностью.

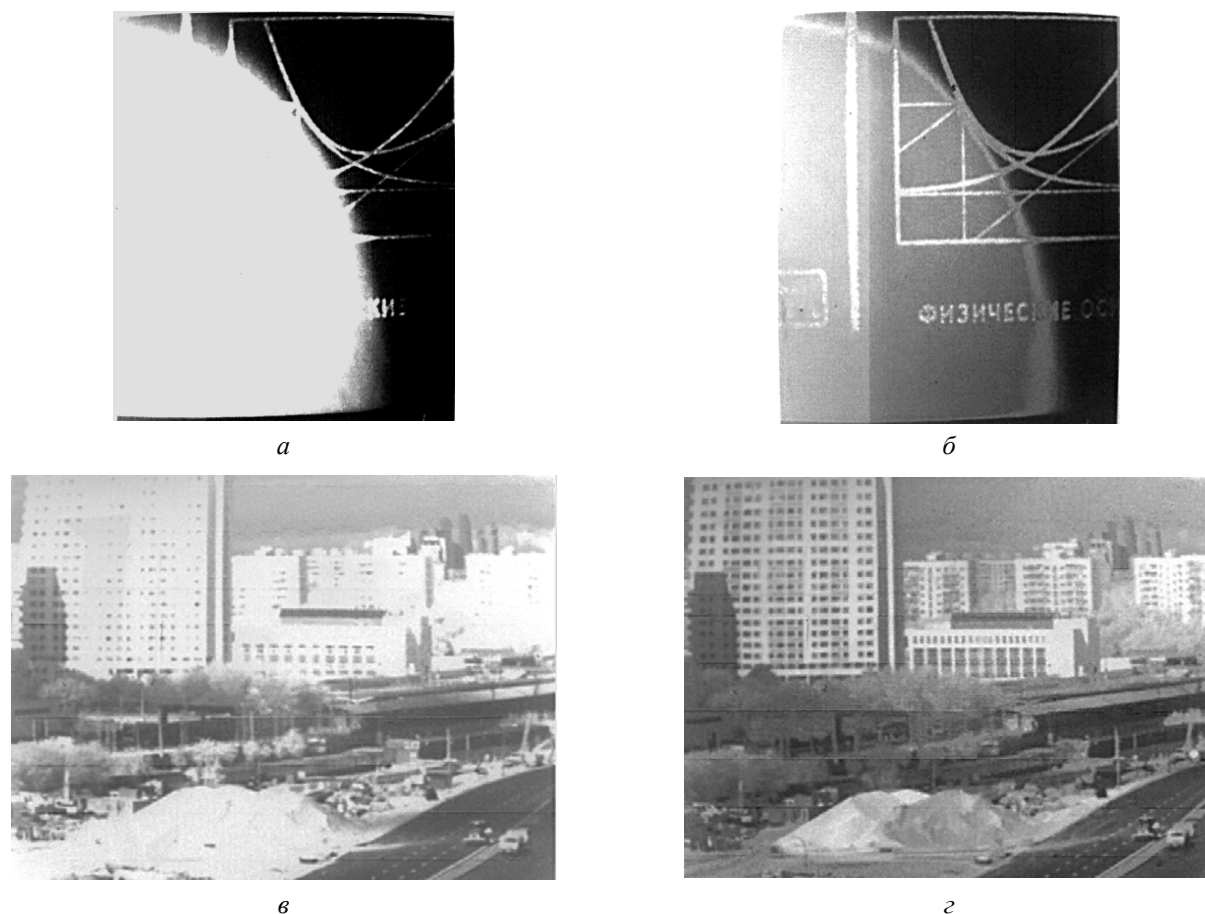


Рис. 3. Примеры изображений, полученных с помощью SWIR-камеры формата 640×512: а, в – в линейном режиме (без HDR); б, г – в режиме HDR.

Далее в таблице приведены основные параметры разработанного ФПУ.

Таблица

Основные параметры разработанного ФПУ

Наименование параметра	Значение параметра	Примечание
Формат матрицы ФЧЭ	640×512	
Шаг ФЧЭ, мкм	15	
Обнаружительная способность, Вт см Гц ^{1/2}	4×10 ¹²	
Максимальная кадровая частота, Гц	100	8 выходов
Потребляемая мощность, Вт	не более 120	на макс. кадровой частоте
Напряжение питания, В	3,3	
Количество дефектных элементов, %	не более 0,1	
Накопительная емкость, Ф	25×10 ⁻¹⁵	в перспективе 5×10 ⁻¹⁵
Режим накопления	IWR	

Заключение

Особенностью функционирования ФПУ в коротковолновом ИК-спектре является необходимость регистрации изменений освещенности на четыре-пять порядков в пределах наблюдаемой сцены. В работе предлагается простой для практической реализации и эффективный способ перехода коротковолновых ИК ФПУ в режим расширенного динамического диапазона (HDR), основанный на автоподстройке времени накопления

индивидуально для каждого пиксела. Применение в БИС считывания техники «динамического антиблужинга» [14] позволяет осуществлять внешнее управление динамическим диапазоном в широких пределах (до 100–110 дБ) на высокой кадровой частоте.

Примеры HDR-изображений, полученные на первом отечественном ФПУ формата 640×512 элементов, подтверждают перспективность предлагаемых технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
2. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Васильев В. В. / Тезисы 13-ой международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений», 2016. С. 169.
3. Гусарова Н. И., Коцавцев 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. / International Conference on Space Optics, Spain, 2014.
6. Yang Ni, Yi Ming Zhu. A 768×576 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. Vol. 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. и др. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
11. Rogalski A. // Opto-Electronics Review. 2012. Vol. 20. No. 3. P. 279.
12. Jiang D., Liang Q., Ding R. // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9275.
13. Хамидуллин К. А., Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О., Полесский А. В., Бурлаков И. Д., Чепурнов Е. Л., Гусарова Н. И., Попов С. В. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 95.
14. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 52.

PACS: 85.60 Dw

The 640×512 SWIR FPA with function of expanding the dynamic range

P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev

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

Received October 3, 2018

The necessity of expanding the dynamic range in the IR FPA of the short-wave IR spectrum is substantiated. Traditionally used methods have low efficiency, especially in large-format arrays with a pitch of not more than 15 microns. The greatest efficiency of expanding the dynamic range (up to 100 dB) is possessed by pixels with individually variable transmission characteristics, depending on the brightness of the fragments of the observed scene. The paper proposes a simple in the topological implementation and an effective way of expanding the dynamic range, based on the auto-adjustment of the accumulation time individually in each cell of the ROIC. At the same time, high steepness and linearity of conversion in cells with moderate illumination (up to 50–70 % of the maximum signal) is preserved, but sensitivity in cells close to saturation decreases. As a result, a linear-logarithmic transfer characteristic is formed, which provides an extended dynamic range. In this paper, examples of obtained images with an extended dynamic range in the short-wave IR spectrum are given.

Keywords: FPA, SWIR, HDR, photodiodes, InGaAs, ROIC.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Y. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletaev, Usp. Prikl. Fiz. **2** (2), 131 (2014).
2. D. V. Borodin, Yu. V. Osipov, and V. V. Vasilev, in *Proceeding of the XIII International Conference «Television: Images Broadcasting & Processing»*. (Saint Petersburg, 2016).
3. N. I. Gusarova, N. F. Koshchavtsev, and S. V. Popov, Usp. Prikl. Fiz. **2** (3), 288 (2014).
4. A. Richards and B. Cromwell, *Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras*. (FLIR Systems, Indigo Operations).
5. Ni Yang, in *Proceeding of the International Conference on Space Optics* (Spain, 2014).
6. Ni Yang and Ming Zhu Yi. *A 768×576 Logarithmic Image Sensor* (New Image Technologies, SA).
7. P. A. Kuznetsov and S. S. Khromov, Prikl. Fiz., No. 4, 12 (2013).
8. A. Bermak and A. Kitchen. IEEE Photonics Technology Letters **18** (20), 15 (2006).
9. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev, Usp. Prikl. Fiz. **2** (1), 83 (2014).
10. D. S. Andreev, N. B. Zaletaev, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 86 (2012).
11. A. Rogalski, Opto-Electronics Review **20** (3), 279 (2012).
12. D. Jiang, Q. Liang, and R. Ding, Proceeding of SPIE **9275** (2014).
13. K. A. Khamidullin, D. L. Baliev, P. S. Lazarev, K. O. Boltar, A. V. Poleski, I. D. Burlakov, E. L. Chepurmov, N. I. Gusarova, and S. V. Popov, Prikl. Fiz., No. 6, 95 (2017).
14. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev, Prikl. Fiz., No. 5, 52 (2017).