

УДК 6
EDN: PUZPMU

PACS: 85.60Dw



Накопительная ячейка с аналогово-цифровым преобразованием для матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона

П. А. Кузнецов, А. Н. Кузнецов, Ю. А. Якимов

Рассматриваются варианты схемотехники накопительных ячеек с аналогово-цифровым преобразованием в матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона. Обосновывается необходимость многократного увеличения зарядовой емкости накопительной ячейки для улучшения пороговых характеристик ФПУ. Предлагается новый вариант накопительной ячейки с аналогово-цифровым преобразованием, имеющий ряд преимуществ перед аналогами: высокая линейность, малое потребление, низкий уровень шума. Приводятся результаты исследования тестового кристалла КМОП интегральной схемы считывания, изготовленной по технологии HCMOS8D АО «Микрон» с проектной нормой 0,18 мкм.

Ключевые слова: ФПУ, ИСС, аналогово-цифровой преобразователь.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-6-577-583

Введение

Современное развитие микрофотоэлектроники обусловлено в первую очередь фактором технологического прогресса в области кремниевой КМОП электроники, а также развитием схемотехники интегральных схем считывания (ИСС). Предельные характеристики матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона (8–12 мкм) с аналоговым накоплением ограничены малой величиной зарядовой емкости накопительных ячеек ИСС, в результате чего время накопления фотосигнала составляет всего 1–2 % от времени кадра. Увеличения зарядовой емкости аналоговых накопительных ячеек ограничено рабочим напряжением

ИСС (не более 3 В) и малой площадью накопительной ячейки. Анализ зарубежных [1–6] и отечественных [7–9] публикаций позволяет сделать вывод, что в ИСС с аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП) в накопительной ячейке величина эквивалентной зарядовой емкости может быть увеличена на два порядка при разрядности АЦП 14 бит и более. При этом существенно повышается отношение сигнал-шум на выходе ИСС, расширяется линейный динамический диапазон ФПУ, исключается влияние электромагнитных помех при работе ФПУ в составе ОЭП, появляется возможность проведения первичной цифровой обработки фотосигнала в составе ИСС.

Основные схемы накопительных ячеек с АЦП

Рассмотрим две основные схемы накопительных ячеек (НЯ) с АЦП для «смотрящих» матриц длинноволнового ИК диапазона. Общим принципом функционирования таких НЯ является генерация импульсов автосброса накопленного заряда с частотой, пропорциональной фототоку и подсчет количества этих

Кузнецов Петр Александрович, гл. специалист.
Кузнецов Антон Николаевич, начальник дизайн-центра.

Якимов Юрий Александрович, инженер 2 кат.
АО НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.

© Кузнецов П. А., Кузнецов А. Н., Якимов Ю. А., 2022

импульсов (цифровое накопление). В первой схеме (рис.1) с автосбросом напряжения происходит периодическое переключение выхода Clk компаратора напряжения CMP при разряде накопительного конденсатора C_{int} фототоком I_{pd} до уровня опорного напряжения V_{REF} и дальнейшего сброса C_{int} до исходного уровня напряжения V_R .

Поскольку скорость разряда емкости прямо пропорциональна току фотоприемника I_{pd} , то частота генерации импульсов Clk будет

также пропорциональна фототоку. Цифровую кодировку этих импульсов осуществляет n -битный двоичный счетчик Counter, показания которого заносятся в память MEM для дальнейшего считывания. Недостатком данной схемы НЯ является нелинейная зависимость частоты генерации от фототока, что объясняется инерционностью τ срабатывания компаратора при разряде накопительной емкости от уровня сброса V_R до опорного уровня V_{REF} (рис. 2).

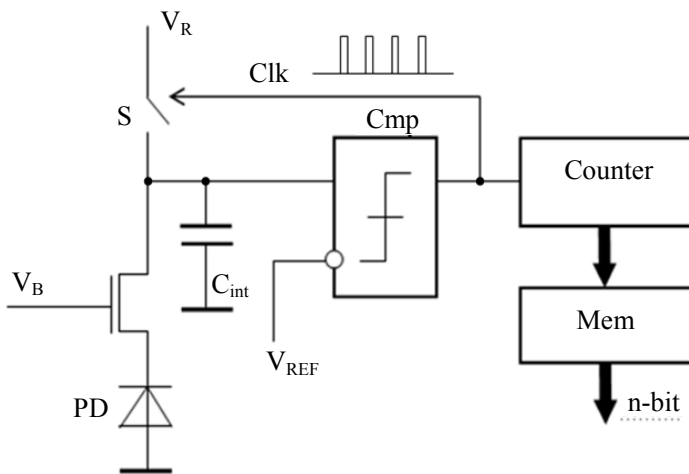


Рис. 1. Цифровая накопительная ячейка с автосбросом напряжения

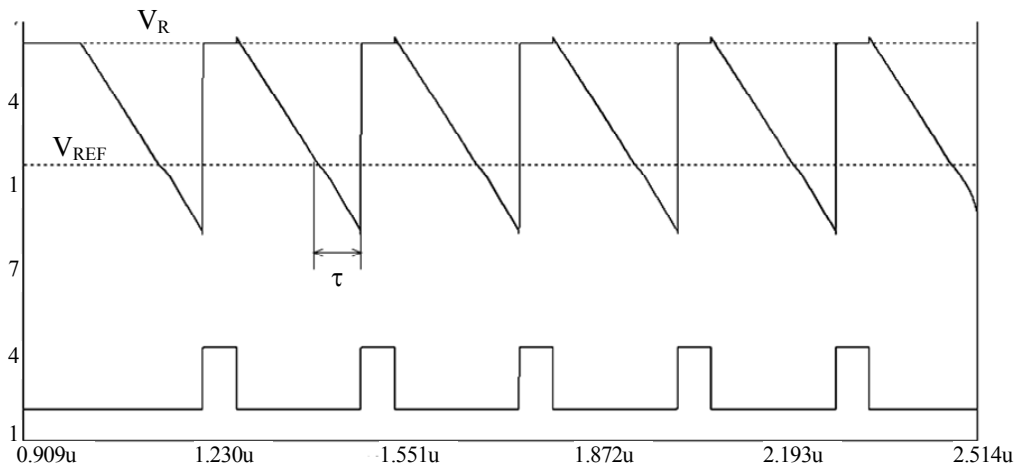


Рис. 2. Временная диаграмма генерации импульсов автосброса

Период генерации импульсов Clk с учетом времени задержки τ срабатывания компаратора равен:

$$T = C_{int} (V_R - V_{REF}) / I_{pd} + \tau = Q_0 / I_{pd} + \tau, \quad (1)$$

где $Q_0 = C_{int} (V_R - V_{REF})$ – фиксированная порция заряда (квант заряда). Тогда частота генерации будет равна:

$$f_{Clk} = 1/T = I_{pd} / (Q_0 + I_{pd} \tau). \quad (2)$$

Крутизна преобразования фототока в частоту генерации определяется дифференцированием выражения (2):

$$S_i = df_{Clk} / dI_{pd} = Q_0 / (Q_0 + I_{pd} \tau)^2. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что крутизна преобразования ячейки S_i падает при росте фототока I_{pd} , что ведет к нелинейной зависимости частоты генерации от фототока. Для снижения задержки срабатывания τ необходимо существенно увеличивать ток потребления компаратора, что ведет к увеличению потребляемой мощности ИСС.

В варианте схемы НЯ с АЦП с автосбросом заряда (рис. 3) формирователь кванта заряда Q_0 изолирован от компаратора напряжением буферным p -МОП транзистором:

$$Q_0 = C_0(V_{dd} - V_G + V_{tp}), \quad (4)$$

где V_{tp} , V_G – пороговое напряжение и напряжение затвора p -МОП транзистора соответственно, V_{dd} – напряжение питания ячейки. Инжекция заряда Q_0 в исток p -МОП транзистора через замкнутый ключ S_1 приводит к компенсации накопленного фотозаряда и переключению компаратора в инверсное состояние. Отсутствие задержки компаратора τ в выражении для кванта заряда (4) позволяет получить линейную зависимость частоты генерации от фототока. Однако при увеличении фототока до величины $I_{pd} > Q_0/\tau$ кванта Q_0 становится недостаточно для компенсации накапливаемого фотозаряда и происходит срыв генерации. В работе [10], для устранения этого недостатка в схему НЯ с АЦП был введен осциллятор с частотой $f_{osc} = I_{max}/Q_0$, где I_{max} – максимально ожидаемый фототок. Однако это приводит к усложнению схемы НЯ, увеличению ее размеров и снижению линейности преобразования.

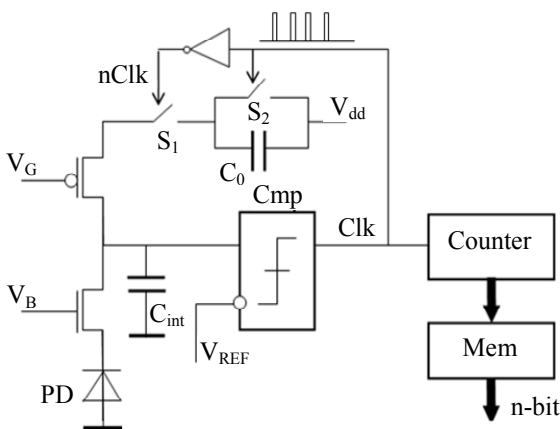


Рис. 3. Цифровая накопительная ячейка с автосбросом заряда

Авторами работы был предложен гибридный вариант НЯ с АЦП, в котором схема НЯ с АЦП со автосбросом напряжения имеет высокую линейность преобразования в широком диапазоне входных фототоков. Результат достигается введением в схему НЯ дополнительной емкости C_2 , много большей накопительной емкости C_{int} (рис. 4), при этом управление ключами S_1 и S_2 является противофазным. Тогда выражение для крутизны преобразования НЯ приближается к идеальному виду при $C_2 \gg C_{int}$:

$$S_i = df_{clk}/dI_{pd} = Q_0 / (Q_0 + I_{pd}\tau k)^2 \approx 1/Q_0, \quad (5)$$

где $k = C_{int}/(C_{int} + C_2)$.

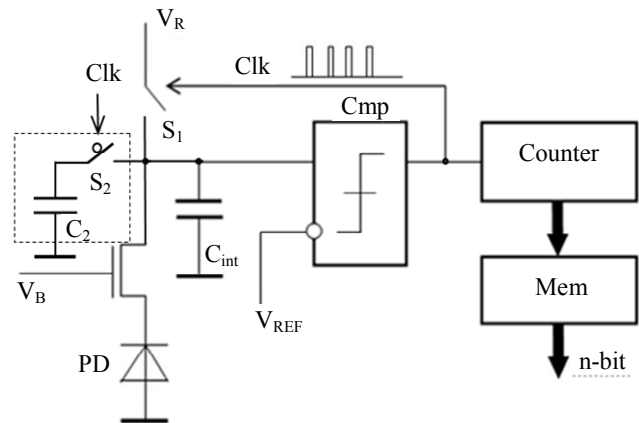


Рис. 4. Гибридная цифровая накопительная ячейка с автосбросом напряжения

Результаты исследований накопительных ячеек с АЦП

Был изготовлен тестовый кристалл КМОП ИСС по технологии HCMOS8D АО «Микрон» с проектной нормой 0,18 мкм, содержащий три варианта НЯ с АЦП: 1) с автосбросом напряжения ($C_{int} = 10$ фФ); 2) с автосбросом заряда ($C_{int} = 10$ фФ, $C_0 = 20$ фФ); 3) гибридный вариант ($C_{int} = 10$ фФ, $C_2 = 90$ фФ). Плата для исследования тестового кристалла (рис. 5) также содержит двоичный счетчик, сдвиговый регистр на ПЛИС и 14-битный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Сброс накопления фототока и период накопления определяются внешними импульсами «старт». Генерация фототока осуществляется встроенными в тестовые НЯ кремниевыми фотодио-

дами при включении светодиодного излучателя СДИ. Вариант НЯ с АЦП выбирается встроенным коммутатором 3×1 с единым выходным буфером. Функционирование вариантов НЯ с АЦП подтверждается зависимостями 1–3 частоты генерации импульсов от фототока I_{pd} и дополнительной характеристикой 4 иде-

альной НЯ с АЦП, полученной путем компьютерного моделирования (рис. 6). Максимально высокую, близкую к идеальной, линейность имеет гибридный вариант НЯЗ, что делает его весьма перспективным для использования в матричных ФПУ длинноволнового диапазона с повышенной кадровой частотой.

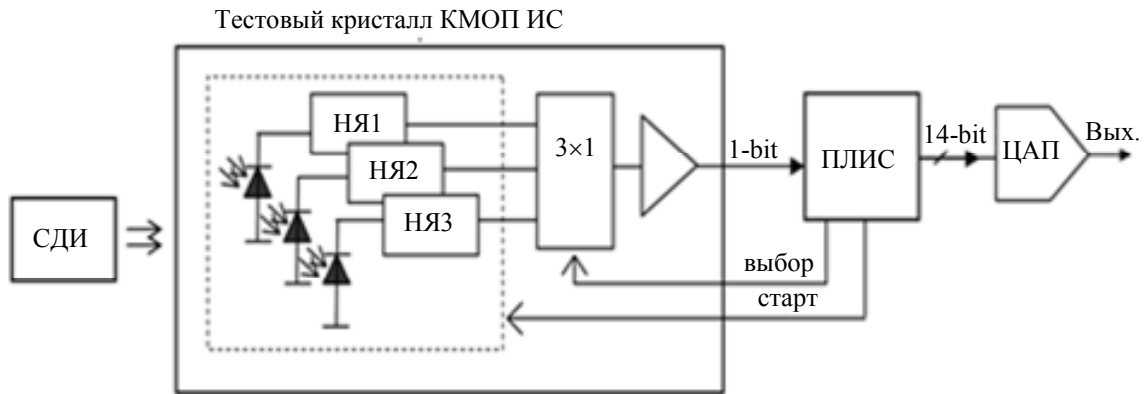


Рис. 5. Структурная схема платы для исследования тестового кристалла КМОП ИСС

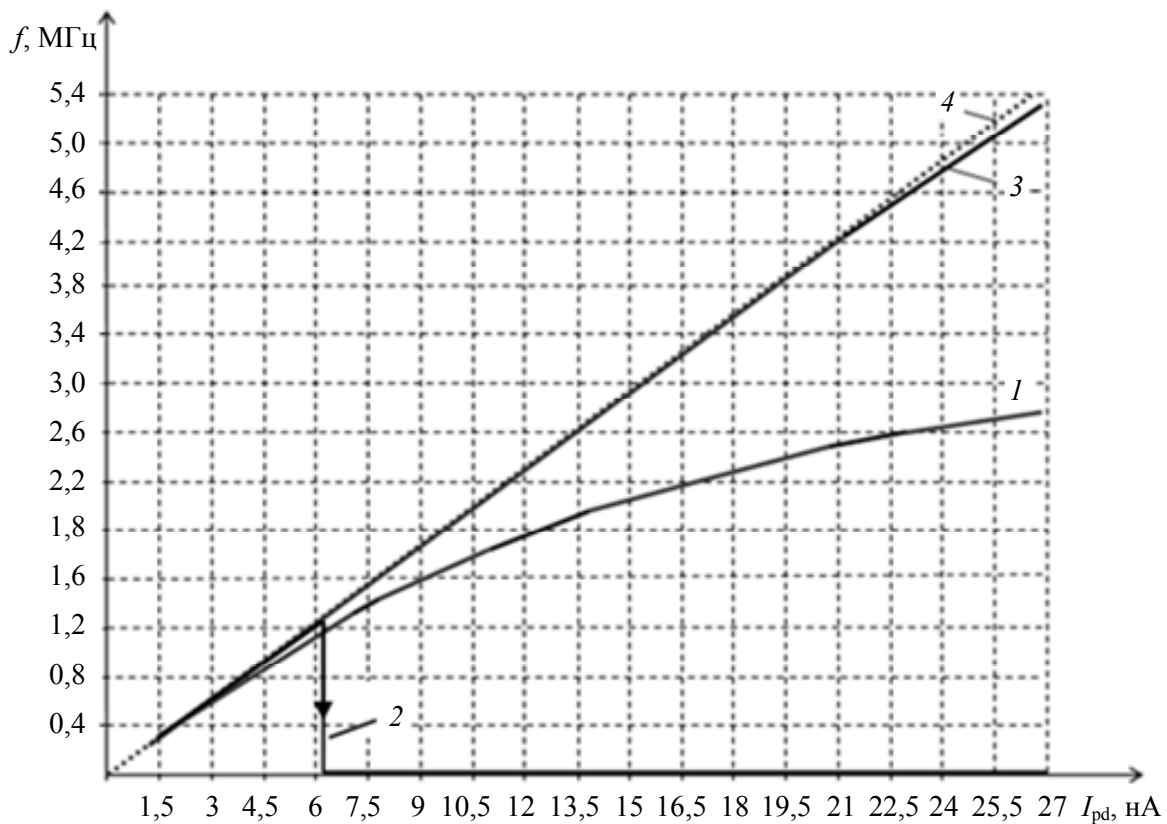


Рис. 6. Зависимость частоты генерации НЯ с АЦП от фототока: 1 – с автосбросом напряжения; 2 – с автосбросом заряда; 3 – гибридный вариант автосброса; 4 – идеальная НЯ

Для измерения СКО шума НЯ с АЦП в аналоговом виде применялся 14-битный ЦАП AD9744 с установленным выходным диапазоном напряжения от 0 В до 3,3 В и милливольтметр АВМ-1072АС с минимальной шкалой 300 мкВ. Период обновления данных (кадра) на входе ЦАП устанавливался в ПЛИС в диапазоне 16–32 мс. Для периода кадра 16 мс при 50 % заполнении эквивалентной зарядовой емкости НЯ фотоэлектронами (т. е. при $U_{\text{ЦАП}} = 3,3/2 = 1,65$ В), измеренное СКО шума НЯ с АЦП составляло 140 мкВ. Ток потребления компаратора был установлен на минимальном уровне 160 нА, что в три раза меньше, чем в аналоге [11]. При увеличении периода кадра в два раза и поддержании фототока на уровне $U_{\text{ЦАП}} = 1,65$ В, СКО шума снижалось до 100–110 мкВ, т. е. приблизительно в $\sqrt{2}$ раз. Этот результат свидетельствует о преимущественном преобладании дробовой составляющей шума НЯ с АЦП. Тепловой шум накопительной емкости и шум квантования при заданных временах кадра пренебрежимо малы. Для примера, рассчитаем СКО шума аналоговой накопительной ячейки длинноволнового ФПУ формата 640×512 фирмы AIM Infrarot Module [12] с ЭШРТ = 33 мК ($f/2,05$, $T = 300$ К), зарядовой емкостью $Q_{\text{well}} = 6$ Ме⁻ и шагом 15 мкм. При типичной величине накопительной емкости $C_{\text{int}} = 0,5$ пФ получаем $U_{\text{ш}} = \sqrt{q_e Q_{\text{well}}} / C_{\text{int}} \approx 770$ мкВ. Таким образом, измеренное СКО шума тестируемой НЯ с 14-ти битным АЦП в 5,5 раз ниже, чем в аналоговой НЯ, что позволяет рассчитывать на такое же снижение ЭШРТ до 6 мК. Дальнейшее снижение ЭШРТ возможно за счет увеличения разрядности двоичного счетчика до 15 и более бит.

Практическое применение накопительных ячеек с АЦП

Применение накопительных ячеек с АЦП в матричных ФПУ целесообразно в двух основных случаях. В первом случае, это малоформатные матричные ФПУ (64×64, 128×128) с шагом ФЧЭ более 30 мкм. Размеры накопи-

тельных ячеек в таких ФПУ позволяют получать относительно большую зарядовую емкость и, как следствие, снижение уровня шума, что следует из выражения:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{q_e Q_{\text{well}}} / C_{\text{int}} = \sqrt{q_e V_R C_{\text{int}}} / C_{\text{int}} = \sqrt{q_e V_R / C_{\text{int}}}, \quad (6)$$

где V_R – напряжение подзарядки накопительной емкости C_{int} . Например, для $C_{\text{int}} = 4$ пФ, $V_R = 2$ В и при 50 % заполнений зарядовой емкости СКО шума составит 200 мкВ. Учитывая высокий уровень электромагнитных помех на выходе ФПУ при работе в составе ОЭП, выделение таких низких шумов становится крайне проблематичным. Применение НЯ с АЦП позволяет не только решить проблему помехозащищенности, но и, учитывая немалые размеры накопительных ячеек, увеличить зарядовую емкость за счет повышения разрядности счетчиков до 18–20 бит.

Во втором случае, это полноформатные матричные длинноволнового ИК-диапазона ФПУ с шагом пикселей до 15 мкм, в которых, для достижения предельных характеристик, требуется большая зарядовая емкость. В настоящее время отсутствуют прототипы полноформатных ФПУ с цифровым накоплением в ячейке ИСС с шагом 15 мкм. Авторами работы был предложен вариант решения данной проблемы, состоящий в том, что матрица накопительных ячеек формата 640×512 с шагом 15 мкм делится на макроячейки формата 2×2 с одним АЦП на 4 пикселя матрицы ФЧЭ. Например, при периоде полного кадра равному 24 мс, происходит последовательное цифровое накопление и считывание 4-х подкадров формата 320×256 с периодом 6 мс. Для формирования 15-ти битного цифрового сигнала за данный период подкадра, необходимо, чтобы максимальная частота генерации импульсов автосброса достигала $(2^{15}-1)/6$ мс = 5,3 МГц. Этому условию удовлетворяет только гибридный вариант НЯ с АЦП, что следует из графиков зависимости частоты автогенерации от фототока на рис. 6. Как следует из идеального выражения для частоты автогенерации $f_{\text{Ск}} = I_{\text{pd}} / Q_0$, ее величина определяется не

только фототоком I_{pd} , но и квантом заряда Q_0 , который регулируется внешним опорным напряжением. Размер макроячейки формата 2×2 составляет $30 \times 30 \text{ мкм}^2$, что значительно упрощает размещение 15 битного АЦП по технологии HCMOS8D АО «Микрон» с проектной нормой 0,18 мкм.

Заключение

Рассмотрены три типа накопительных ячеек с АЦП: 1) с автосбросом напряжения; 2) с автосбросом заряда; 3) гибридный вариант с автосбросом. Изготовлен тестовый кристалл КМОП ИСС по технологии HCMOS8D АО «Микрон» с проектной нормой 0,18 мкм. Показаны преимущества предложенного авторами работы гибридного варианта с автосбросом: высокая линейность в сочетании с простотой исполнения; малый ток потребления; низкий уровень шума. Обосновывается целесообразность применения накопительных ячеек с АЦП в перспективных матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона с целью достижения пониженного уровня ЭШРТ (менее 5 мК) и высокой помехозащищенности выходного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lui X., El Gamal A. / Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 4669. P. 304–312.
2. Fowler B., El Gamal A., Yang D. A CMOS Area Image Sensor with Pixel-Level A/D Conversion, in ISSCC Digest of Technical Papers. – San Francisco, CA, 1994.
3. Kitchen A., Berma A., Bouzerdoun A. / IEEE Electron Device Lett. 2004. Vol. 25. № 7. P. 471–473.
4. Kitchen A., Berma A., Bouzerdoun A. / Electron Devices, IEEE Transactions on Electron Devices. 2005. Vol. 52. Iss. 12. P. 2591–2601.
5. Fowler B., El Gamal A., Yang D. / IEEE Journal of solid-state circuits. 1999. Vol. 34. № 3. P. 348–355.
6. Schultz K. I., Kelly V. W., Baker J. J. et al. / Lincoln Laboratory Jour. 2014. Vol. 20. № 2. P. 36.
7. Лу И. И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 417.
8. Зверев А. В., Макаров Ю. С., Михантьев Е. А., Дворецкий С. А. // Автометрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 79.
9. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 83.
10. Peizerat Arnaud, Arques Marc, Villard Patrick, Martin Jean-Luc. Pixel-level A/D conversion: comparison of two charge packets counting techniques. International image sensor workshop. (LETA-CEA, Grenoble, France), 2007. P. 200–203.
11. Bisotto S., Peizerat A. et al. / Proc. SPIE. 2010. Vol. 7834. P. 76603T.
12. Продукция фирмы «AIM Infrarot Module», LWIR IDCAs, aim-ir.com.

PACS: 85.60Dw

Pixel-level analog-to-digital conversion for LWIR FPA

P. A. Kuznetsov, A. N. Kuznetsov and Yu. A. Yakimov

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received December 19, 2022

Variants of circuitry for storage cells with analog-to-digital conversion in matrix FPAs in the long-wave infrared range are considered. The necessity of a multiple increase in the charging capacity of the storage cell to improve the threshold characteristics of the FPA is substantiated. A new version of the storage cell with analog-to-digital conversion is proposed, which has a number of advantages over analogues: high linearity, low consumption, low noise. The results of the study of a test crystal of a CMOS readout integrated circuit manufactured using the HCMOS8D technology of “Mikron” with a design standard of 0.18 μm are presented.

Keywords: FPA, ROIC, analog-to-digital conversion.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-6-577-583

REFERENCES

1. X. Lui and A. El Gamal, Proceedings of SPIE **4669**, 304–312 (2002).
2. B. Fowler, A. El Gamal and D. Yang, *A CMOS Area Image Sensor with Pixel-Level A/D Conversion*, in ISSCC Digest of Technical Papers. (CA, San Frasco, 1994).
3. A. Kitchen, A. Berma and A. Bouzerdoum, IEEE Electron Device Lett. **25** (7), 471–473 (2004).
4. A. Kitchen, A. Berma and A. Bouzerdoum, Electron Devices, IEEE Transactions on Electron Devices **52** (12), 2591–2601 (2005).
5. B. Fowler, A. El Gamal and D. Yang, IEEE Journal of solid-state circuits **34** (3), 348–355 (1999).
6. K. I. Schultz, V. W. Kelly, J. J. Baker et al., Lincoln Laboratory Jour. **20** (2), 36 (2014).
7. I. I. Lee, Usp. Prikl. Fiz. **6** (5), 417 (2018).
8. A. V. Zverev, Y. S. Makarov, E. A. Mikhantiev and S. A. Dvoretzki, Autometria **52** (4), 79 (2016).
9. P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, Usp. Prikl. Fiz. **2** (1), 83 (2014).
10. Arnaud Peizerat, Marc Arques, Patrick Villard and Jean-Luc Martin, *Pixel-level A/D conversion: comparison of two charge packets counting techniques* in International image sensor workshop (LETA-CEA, Grenoble, France), 2007, pp. 200–203.
11. S. Bisotto, A. Peizerat et al., Proc. SPIE **7834**, 76603T (2010).
12. Products “AIM Infrarot Module”, LWIR IDCAs, aim-ir.com.