

УДК 535.247.4 : 621.383.52

ЯЧЕЙКА КРЕМНИЕВОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ СО ВСТРОЕННЫМ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

А. В. Зверев, Ю. С. Макаров, Е. А. Михантьев, С. А. Дворецкий

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: makarov@isp.nsc.ru*

Предложен проект накопительной ячейки кремниевой интегральной микросхемы считывания сигнала со встроенным аналого-цифровым преобразователем для матричных ИК-фотоприёмников на основе твёрдых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с чувствительностью в спектральном диапазоне от 8 до 10 мкм. Ячейка разработана по кремниевой технологии HСMOS8D ОАО «НИИМЭ и Микрон» (Москва) с проектной нормой 0,18 мкм. Представленный проект ячейки имеет размер 20×20 мкм, разрядность встроенного аналого-цифрового преобразователя 15 бит. При средней величине фототока 7 нА и времени интегрирования 7,5 мс расчётное значение эквивалентной шуму разности температур составляет 4,6 мК.

Ключевые слова: интегральная микросхема считывания сигнала, ИК-фотоприёмники, NEDT, КРТ, цифровое интегрирование.

DOI: 10.15372/AUT20160410

Введение. В атмосфере существуют окна прозрачности для ИК-излучения. Для наблюдения за объектами с температурой, близкой к комнатной, интерес представляет окно прозрачности в диапазоне длин волн 8–14 мкм. Фоточувствительные элементы (ФЧЭ), способные регистрировать излучение в указанном диапазоне, можно изготовить из твёрдых растворов теллурида кадмия и ртути (КРТ). Созданные на их основе фотодиоды обладают высокой удельной обнаружительной способностью. Для достижения максимальной чувствительности необходимо охлаждать фоточувствительные элементы до температуры жидкого азота [1, 2].

В диапазоне длин волн 8–10 мкм при температуре объектов 300 К и угле поля зрения 30° число фотонов в потоке излучения составляет $1,85 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При площади фотодиода 20×20 мкм и квантовой эффективности 0,6 такой поток излучения будет генерировать фототок 7,2 нА плотностью 18 пА/мкм². В данном спектральном диапазоне предельные характеристики фотоприёмного устройства (ФПУ) достигаются в режиме ограничения фоном [1].

В настоящее время для задач тепловидения в тонкой плёнке КРТ изготавливают матрицу одинаковых ФЧЭ групповым методом. Поскольку размер каждого элемента в плоскости матрицы обычно равен 15–30 мкм, возникает необходимость в специальном устройстве, которое способно регистрировать фототок со всех элементов матрицы одновременно и считывать полученную информацию последовательно. Создать такое устройство можно только с использованием кремниевой интегральной технологии. Будем называть его кремниевой интегральной микросхемой считывания сигнала (ИМСС).

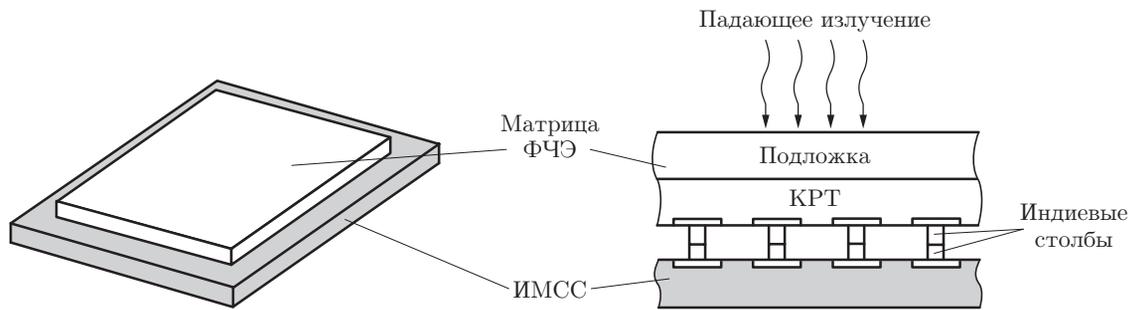


Рис. 1. Схема гибридной сборки

Технология изготовления ФЧЭ на поверхности ИМСС находится в стадии разработки [3–5]. Матрицу ФЧЭ и ИМСС соединяют между собой через индиевые столбы методом групповой холодной сварки (flip-chip) [6]. Полученная таким образом гибридная сборка ФЧЭ и ИМСС схематически представлена на рис. 1.

Для регистрации фототоков, имеющих плотность несколько десятков пикоампер на квадратный микрон, широко применяется ИМСС с прямой инжекцией, в которой носители заряда накапливаются на встроенном в ячейку конденсаторе, определяющем её зарядовую ёмкость. В серийно-выпускаемых ИК-фотоприёмниках (ФП) в основном используются ИМСС с аналоговым интегрированием фотосигнала [6–9]. Одним из существенных недостатков аналоговых ИМСС является малая зарядовая ёмкость ячейки. В настоящее время предложено несколько реализаций ИМСС со встроенным АЦП, в которых значительно увеличена эффективная зарядовая ёмкость [10–12]. Для реализации ИМСС со встроенным АЦП необходимы современные кремниевые технологии изготовления с проектными нормами 0,18 мкм и ниже.

Для характеристики фотоприёмных устройств ИК-диапазона наиболее широко применяется эквивалентная шуму разность температур (NEDT), отражающая минимальную разность температур, которую может различить прибор. Чем меньше величина NEDT, тем выше дальность обнаружения ИК-системы [1, 13, 14].

Предельные характеристики ФПУ спектрального диапазона 8–10 мкм ограничены малой величиной зарядовой ёмкости ячеек ИМСС. Целью данной работы является создание ячеек ИМСС со встроенным АЦП, позволяющим увеличить зарядовую ёмкость и преодолеть ограничения традиционных аналоговых решений. Основные требования, предъявляемые к проекту: шаг ячеек не более 20 мкм; возможность изготовления проекта на отечественной технологической базе; сравнимый с аналоговыми ИМСС уровень энергопотребления.

Микросхема считывания сигнала с аналоговым интегрированием. Серийно выпускаемые ИМСС обрабатывают и выводят фотосигнал в аналоговом виде. Ключевой характеристикой аналоговых ячеек ИМСС с прямой инжекцией является их зарядовая ёмкость, равная произведению электрической ёмкости встроенного конденсатора на допустимый размах напряжения. Максимальное соотношение сигнал/шум (SNR_{max}) для ИК-фотоприёмника, работающего в режиме ограничения фоном [1, 10], запишем в виде

$$SNR_{max} = \sqrt{N_{well}}, \quad (1)$$

где N_{well} — зарядовая ёмкость ячейки, определяемая в электронах (e).

Достичь большой зарядовой ёмкости можно двумя способами: увеличить размах напряжения на конденсаторе либо его электрическую ёмкость. Размах напряжения не может

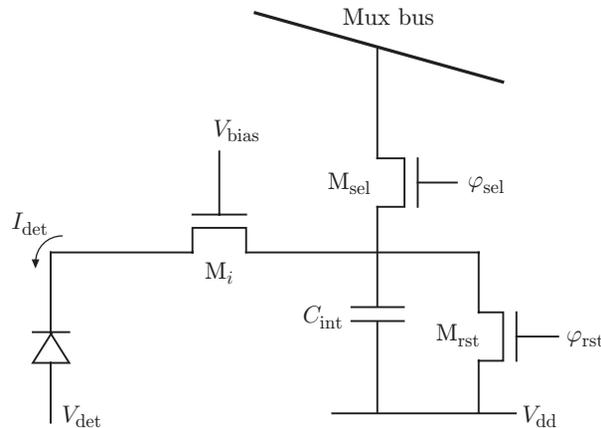


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема аналоговой ячейки ИМСС [15] (V_{dd} — напряжение питания, V_{det} — напряжение на аноде фотодиода, φ_{sel} — сигнал выборки, φ_{rst} — сигнал сброса заряда)

превышать рабочего напряжения кремниевой ИМСС, которое определяется технологией её изготовления. Величина электрической ёмкости накопительного конденсатора ограничена отведённой под ячейку площадью, и, как следствие, минимизированы время интегрирования сигнала и соотношение сигнал/шум.

На рис. 2 представлена схема классической аналоговой ячейки ИМСС с прямой инъекцией заряда [15]. Фиксированное напряжение V_{bias} на затворе прямоинжекционного транзистора M_i смещает фотодиод в обратном направлении. Инжектированный сигнальный фототок I_{det} разряжает накопительный конденсатор C_{int} . Затем оставшийся на конденсаторе заряд с помощью транзистора выборки M_{sel} переносится на колоночную шину Mux bus для дальнейшего вывода. Транзистор M_{rst} используется для сброса заряда конденсатора.

Размер типичной аналоговой ячейки ИМСС от 15×15 до 30×30 мкм. Большая часть площади занята накопительным конденсатором, величина зарядовой ёмкости в зависимости от площади ячейки изменяется от $6,5 \cdot 10^6$ до $36 \cdot 10^6$ е [16, 17].

При описанном выше уровне фототока аналоговые ИМСС из-за малой зарядовой ёмкости ячеек могут накапливать лишь незначительную часть заряда, который генерируется падающим на ФЧЭ излучением за полное время кадра. Поэтому для достижения большей величины соотношения сигнал/шум ИМСС часто работают на повышенной кадровой частоте, чтобы выполнить внешнее дополнительное интегрирование сигнала [1]. Для увеличения максимальной кадровой частоты необходимо либо добавить число аналоговых сигнальных выходов, либо поднять частоту вывода информации. Число сигнальных выходов ограничено мощностью криогенных охлаждающих систем из-за высокого энергопотребления выходных буферов. Также существенно увеличатся теплопритоки в охлаждаемую зону криостата по дополнительным проводникам, пересекающим его границу. В то же время лимитирована частота вывода информации, потому что аналоговый сигнал сложно передать без искажений до модуля обработки из-за различных наводок, шумов внешних схем сопряжения и возникновения волновых эффектов. Рассмотрим ИМСС ISC0402 [16] формата 640×512 с шагом ячеек 20 мкм. Данная ИМСС имеет четыре сигнальных выхода, частота вывода информации составляет 12,5 МГц, кадрковая частота — 120 Гц, что соответствует времени кадра 8,2 мс, зарядовая ёмкость — $11 \cdot 10^6$ е. Рассчитанный выше фототок для спектрального диапазона 8–10 мкм равен 7,2 нА. Для КРТ-фотодиодов такого спектрального диапазона площадью 20×20 мкм величина темнового тока ≈ 1 нА [18].

Тогда время интегрирования, за которое будут заполнены три четверти накопительной ёмкости ячейки, составит 0,16 мс или 2 % от времени кадра. В этом случае NEDT в 8 раз больше значения, которого можно достичь при интегрировании в течение времени кадра. Таким образом, к основным недостаткам серийно выпускаемых ИМСС можно отнести:

- малую зарядовую ёмкость ячейки ИМСС, не позволяющую выполнить интегрирование фототока в течение всего времени кадра и тем самым в полной мере выделить полезную составляющую сигнала от фонового шума при заданной кадровой частоте;
- сложность передачи и обработки аналогового сигнала без значительных искажений.

Цифровая ячейка ИМСС. Установим в ячейку конденсатор C_1 с малой электрической ёмкостью и будем заряжать её фототоком до момента, пока напряжение на конденсаторе не достигнет заданного порогового значения U_{THR} . После этого накопленный заряд сбрасывается и начинается накопление фототока заново. За время интегрирования заряд конденсатора C_1 будет сброшен k раз. Значение k отражает суммарное число фотоэлектронов, которое накапливалось на ёмкости C_1 в течение времени интегрирования. Таким образом, ячейка ИМСС производит аналого-цифровое преобразование величины накопленного фотозаряда. Процесс изменения напряжения U_C на конденсаторе C_1 в течение времени интегрирования τ представлен на рис. 3.

Максимально возможное значение k определяется разрядностью q встроенного в ячейку ИМСС аналого-цифрового преобразователя и равно $k_m = 2^q - 1$. Тогда эффективная зарядовая ёмкость ячейки будет составлять $N_{\text{well}} = (2^q - 1)N_{\text{LSB}}$, где $N_{\text{LSB}} = C_1 U_{\text{THR}}/e$ — младший значащий разряд (e).

В аналого-цифровых преобразователях даже при полном отсутствии помех всегда присутствует определённый вид шумов, называемый шумом квантования. В предлагаемом методе шум квантования вызван потерей части заряда в процессе интегрирования (момент τ на рис. 3). В результате часть накопленных фотоэлектронов не учтена в величине k . Дисперсия шума квантования σ_q^2 вычисляется по формуле [11, 19, 20]

$$\sigma_q^2 = N_{\text{LSB}}^2/12. \quad (2)$$

Каждый сброс заряда накопительного конденсатора C_1 приводит к шуму, мощность которого

$$\sigma_{\text{res}}^2 = k_B T C_1 / e^2, \quad (3)$$

где k_B — постоянная Больцмана ($\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$); T — температура (К). Тогда минимальная мощность шума цифрового ФПУ (ЦФПУ) $\sigma_{\text{ЦФПУ}}^2$ будет вычисляться по формуле

$$\sigma_{\text{ЦФПУ}}^2 = N_\tau + \sigma_q^2 + k\sigma_{\text{res}}^2, \quad (4)$$

где N_τ — количество электронов, накопленных за время интегрирования.

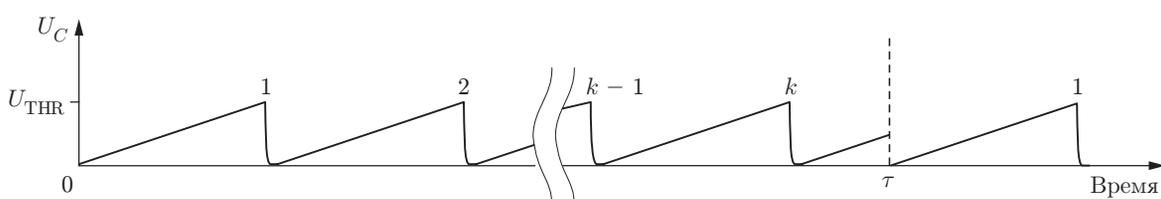


Рис. 3. Изменение напряжения U_C на накопительном конденсаторе C_1

Компонента N_T в формуле (4) связана с дробовым шумом фотодиода. Максимальное значение соотношения сигнал/шум ЦФПУ запишем в виде

$$\text{SNR}_{\max} = \frac{(2^q - 1)N_{\text{LSB}}}{\sqrt{N_{\text{LSB}}^2/12 + (2^q - 1)(N_{\text{LSB}} + k_B T C_1/e^2)}}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что при увеличении разрядности q используемого АЦП растёт и соотношение сигнал/шум ЦФПУ. Однако число бит АЦП, который устанавливается в ячейку, ограничивается её площадью, и разрядность становится фиксированной при используемой технологии изготовления и площади накопительной ячейки. Поэтому для достижения наилучшего соотношения сигнал/шум необходимо подбирать оптимальное значение N_{LSB} в зависимости от интенсивности потока излучения и заданного времени интегрирования фотосигнала.

Известно несколько реализаций ИМСС по вышеописанному принципу. В работе [11] представлена конструкция накопительной ячейки площадью 25×25 мкм со встроенным 15-разрядным АЦП, изготовленная по технологии с проектной нормой 0,18 мкм. Заявленный ток потребления ячейки составляет 500 нА. Полученное значение NEDT равно 2 мК. В [10] предлагаются решения, разработанные по проектным нормам от 65 до 90 нм, с шагом ячеек от 20 до 30 мкм и встроенным АЦП разрядностью от 14 до 21 бит. В [12] продемонстрирована двухспектральная ячейка площадью 30×30 мкм с 19-разрядным АЦП, выполненная по технологии IBM 90 нм.

Проект цифровой ячейки ИМСС. Нами разработан проект цифровой накопительной ячейки с площадью 20×20 мкм по технологии HCMOS8D ОАО «НИИМЭ и Микрон» (Москва) с проектной нормой 0,18 мкм [21]. Электрическая принципиальная схема спроектированной цифровой ячейки со встроенным АЦП приведена на рис. 4. Входная аналоговая часть представляет собой схему прямой инжекции, с помощью которой задаётся смещение на фотодиоде. Ячейка содержит триггер Шмитта D1, динамический 15-разрядный

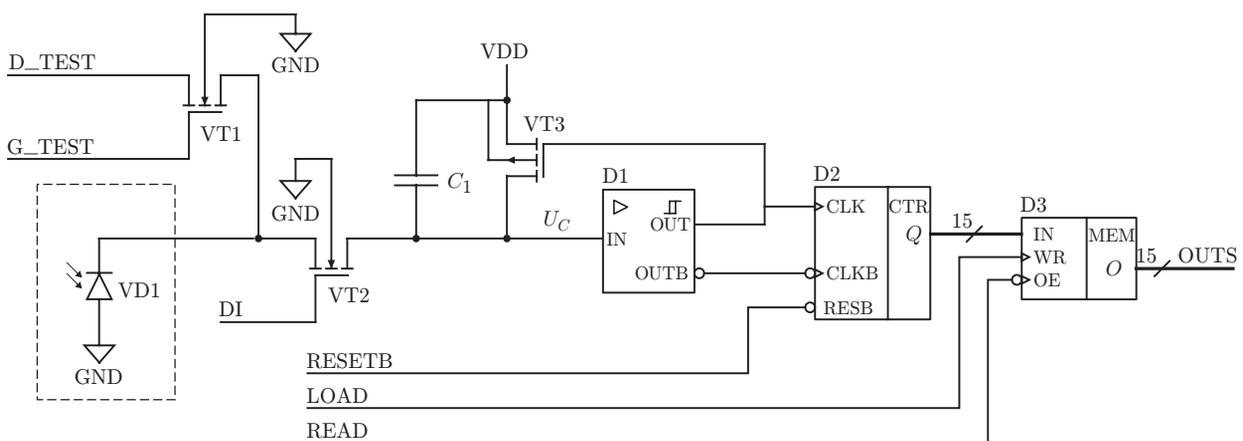


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема цифровой ячейки: VD1 — подключённый фотодиод; VT1, VT2, VT3 — транзисторы (тестовый, прямой инжекции и сброса); D1 — триггер Шмитта; D2 — динамический счётчик; D3 — динамическая память; VDD — напряжение питания; GND — общее напряжение; D_TEST, G_TEST — напряжение на стоке и затворе тестового транзистора; DI — напряжение подстройки смещения фотодиода; RESETB — сигнал сброса счётчика; LOAD — сигнал записи значения счётчика в память; READ — сигнал считывания из памяти; OUTS — шина передачи данных

счётчик D2, динамическую память D3. Принцип работы схемы следующий: обратный ток фотодиода, проходя через транзистор прямой инжекции VT2, разряжает накопительный конденсатор C_1 до нижнего порога срабатывания триггера Шмитта, после чего триггер меняет своё логическое состояние (выход OUT с «1» на «0»), сбрасывая заряд C_1 и увеличивая значение счётчика D2 на логическую единицу. Как только напряжение в момент сброса достигает верхнего порога срабатывания триггера Шмитта, последний меняет логическое состояние, начиная тем самым новый акт интегрирования. Счётчик регистрирует число срабатываний триггера Шмитта, т. е. число совершённых актов. Значение счётчика записывается в память, из которой осуществляется параллельный вывод. Принцип действия разработанной ячейки аналогичен решению, предложенному в [11]. Величина $N_{\text{LSB}} \approx 14 \cdot 10^3$ е. Эффективная ёмкость ячейки $N_{\text{well}} \approx 460 \cdot 10^6$ е. Максимальное соотношение сигнал/шум, полученное по формуле (5), равно 86,3 дБ. Обратный ток фотодиода, состоящий из суммы фототока и темнового тока и равный 8,2 нА, заполняет три четверти эффективной зарядовой ёмкости примерно за 7,5 мс. С учётом формулы (4) запишем выражение для предельного соотношения сигнал/шум ЦФПУ:

$$\text{SNR}(\tau_i) = \frac{I_{\text{ph}}\tau_i}{e} \left(\frac{N_{\text{LSB}}^2}{12} + \frac{(I_{\text{ph}} + I_{\text{dark}})\tau_i}{e} \left(1 + \frac{k_B T C_1}{e^2 N_{\text{LSB}}} \right) \right)^{-1/2}, \quad (6)$$

где I_{ph} — величина фототока (А); I_{dark} — темновой ток фотодиода (А). Основными шумами ЦФПУ являются дробовой, квантования и сброса. В [10, 22] показано, что вклад остальных механизмов шума незначителен, поэтому они не учитываются в (6).

Вычисление NEDT будем производить с помощью уравнения, вывод которого опирается на формулы, представленные в [1, 13]:

$$\text{NEDT} = \frac{4(F/\#)^2 W_F(T_{\text{АЧТ}})}{t_{\text{оп}} \text{SNR}(\tau_i)} \left[\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{dW(\lambda, T_{\text{АЧТ}})}{dT} d\lambda \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $F/\#$ — диафрагменное число оптики системы; $T_{\text{АЧТ}}$ — температура абсолютно чёрного тела; $t_{\text{оп}}$ — коэффициент пропускания линзы; λ_a , λ_b — нижняя и верхняя границы

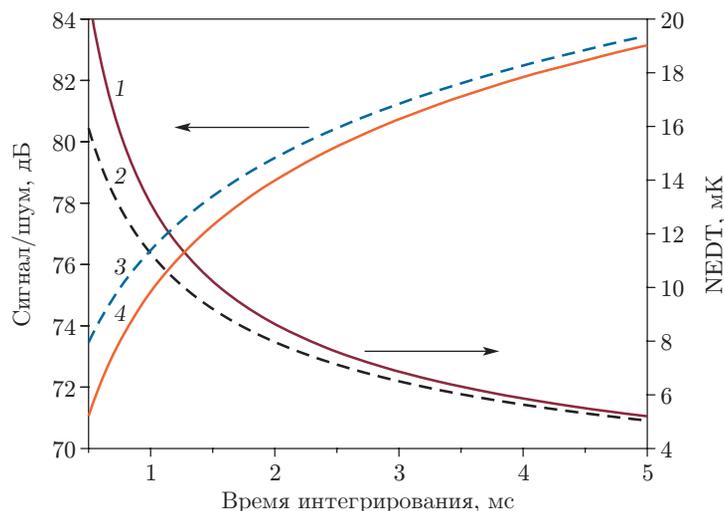


Рис. 5. Зависимости NEDT и соотношений сигнал/шум от времени интегрирования: 1 — NEDT ЦФПУ с учётом темнового тока, шумов квантования и сброса; 2 — NEDT идеального ФПУ; 3 — соотношение сигнал/шум идеального ФПУ; 4 — соотношение сигнал/шум ЦФПУ с учётом темнового тока, шумов квантования и сброса

Параметр	Аналоговая ячейка фирмы "FLIR Systems"	Предлагаемая цифровая ячейка	Цифровая ячейка фирмы "CEA Leti"
Шаг ячейки (мкм)	20	20	25
Технологическая норма (мкм)	—	0,18	0,18
Рабочее напряжение (В)	5,5	1,2–1,8	1,8
Зарядовая ёмкость (е)	$11 \cdot 10^6$	$460 \cdot 10^6$	$3000 \cdot 10^6$
SNR _{max} ФПУ (дБ)	70,4	86,3	≈90
Ток потребления ячейки ИМСС (нА)	—	200 (при рабочем напряжении матрицы 1,2 В)	500

спектральной чувствительности (м); $W(\lambda, T_{\text{АЧТ}})$ — плотность мощности потока излучения ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$); $W_F(T_{\text{АЧТ}})$ — плотность мощности потока излучения в спектральном диапазоне чувствительности от λ_a до λ_b при ограниченном поле зрения ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$).

На рис. 5 приведены зависимости соотношения сигнал/шум и NEDT от времени интегрирования для ЦФПУ при следующих значениях параметров: оптическое поле зрения 30° ; $F/\# = 1,87$; $t_{\text{оп}} = 0,7$; $T_{\text{АЧТ}} = 300$ К; площадь ФЧЭ 20×20 мкм; квантовая эффективность ФЧЭ составляет 0,6; $I_{\text{ph}} = 7,2$ нА; $I_{\text{dark}} = 1$ нА; температура ЦФПУ равна 80 К; электрическая ёмкость конденсатора $C_1 = 11,5$ фФ; $N_{\text{LSB}} = 14 \cdot 10^3$ е. Также представлены зависимости идеального ФПУ, работающего в режиме ограничения фоном. Времена интегрирования аналоговых ФПУ с шагом 20 мкм для спектрального диапазона 8–10 мкм обычно не превышают 0,5 мс, что соответствует предельным значениям соотношения сигнал/шум 74 дБ и NEDT = 16 мК. Теоретическое значение NEDT предложенного решения составляет 4,6 мК, а соотношение сигнал/шум — 84,3 дБ.

Для сравнения в таблице приведены характеристики серийно выпускаемой аналоговой ИМСС ISC0402 (фирмы "FLIR Systems", США) с шагом 20 мкм и цифровой ячейки ИМСС (фирмы "CEA Leti", Франция) с шагом 25 мкм, выполненной по технологии 0,18 мкм [11].

Предложенная цифровая ячейка ИМСС превосходит аналоговую по всем параметрам кроме энергопотребления. Аналоговая ячейка потребляет ток лишь в моменты сбора и считывания информации. Вклад этих токов мал и не приводится для сравнения. Однако важно энергопотребление всей ИМСС в целом. Максимальный вклад в энергопотребление аналоговой ИМСС дают мощные выходные буферы, которые не требуются для вывода цифрового сигнала. Ячейка фирмы "CEA Leti" имеет бóльшую ($\approx 55\%$) площадь. Предполагается, что при использовании элементной базы предложенной нами цифровой ячейки можно установить 18-разрядный АЦП в ячейку площадью 25×25 мкм, чтобы улучшить её чувствительность по сравнению с ячейкой фирмы "CEA Leti".

Заключение. Показана возможность установки аналого-цифрового преобразователя непосредственно в ячейку ИМСС при использовании современных субмикронных КМОП-технологий. Представлен проект цифровой ячейки, разработанный по технологии HCMOS8D ОАО «НИИМЭ и Микрон» с технологической нормой 0,18 мкм. За счёт оптимизации топологии число разрядов АЦП на единицу площади ячейки превышает приблизительно в 1,5 раза известные решения с такой же технологической нормой [11]. Расчётные характеристики ячейки доказывают перспективность предложенного решения. Дальнейшее уменьшение технологической нормы позволит реализовывать более сложные приборы с возможностью дополнительной обработки сигнала непосредственно в ячейке, например вычитание $1/f$ -шума и темнового тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rogalski A.** Infrared Detectors. Boca Raton: CRC Press, 2010. 898 p.
2. **Васильев В. В., Дворецкий С. А., Есаев Д. Г. и др.** Фотоприемники на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2001. № 3. С. 4–8.
3. **Yakushev M. V., Dvoretzky S. A., Kozlov A. I. et al.** HgCdTe monolithic infrared detector // Phys. Status Solidi. C. 2010. 7, Is. 6. P. 1681–1683.
4. **Cairns J. W., Buckle L., Pryce G. J. et al.** Integrated infrared detectors and readout circuits // Proc. SPIE. 2006. 6206. 620614.
5. **Dalton G. B., Dennis P. N., Lees D. J. et al.** Development of non-hybridised HgCdTe detectors for the next generation of astronomical instrumentation // Proc. SPIE. 2008. 7021. 70210I.
6. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Шашкин В. В.** Кремниевые мультиплексоры для многоэлементных фотоприемников ИК-диапазона // Автометрия. 2005. 41, № 3. С. 88–99.
7. **Handbook of Optics.** Vol. I. Fundamentals, Techniques, and Design. N. Y.: McGraw-Hill, 1995. 1664 p. Ch. 23: Infrared Detector Arrays /L. J. Kozlowski, W. F. Kosonocky. P. 23.1–23.37.
8. **Hsieh C.-C., Wu C.-Yu., Jih F.-W., Sun T.-P.** Focal-plane-arrays and CMOS readout techniques of infrared imaging systems // IEEE Trans. Circuits and Syst. Video Technol. 1997. 7, N 4. P. 594–605.
9. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Козлов А. И. и др.** Исследование технологических ограничений в кремниевых схемах считывания сигналов инфракрасных фотоприёмников на основе многослойных структур с квантовыми ямами // Автометрия. 2015. 51, № 2. С. 110–118.
10. **Schultz K. I., Kelly M. W., Baker J. J. et al.** Digital-pixel focal plane array technology // Lincoln Laboratory Journ. 2014. 20, N 2. P. 36–51.
11. **Guellec F., Peizerat A., Tchagaspanian M. et al.** A 25 μ m pitch LWIR focal plane array with pixel-level 15-bit ADC providing high well capacity and targeting 2mK NETD // Proc. SPIE. 2010. 7660. 76603T.
12. **Brown M. G., Baker J., Colonero C. et al.** Digital-pixel focal plane array development // Proc. SPIE. 2010. 7608. 76082H.
13. **Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Фесько Ю. А., Поликанин А. Н.** Дальность действия тепловизионных систем. Ч. I. Методика расчёта // Автометрия. 2014. 50, № 4. С. 96–101.
14. **Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Лаптев Е. В. и др.** Дальность действия тепловизионных систем. Ч. II. Алгоритм, исходные данные и результаты расчётов // Автометрия. 2015. 51, № 2. С. 49–53.
15. **Fossum E. R., Pain B.** Infrared readout electronics for space-science sensors: state of the art and future directions // Proc. SPIE. 1993. 2020. P. 262.
16. **Продукция фирмы "FLIR Systems":** Двумерные матрицы. URL: <http://www.flir.com/cvs/cores/ru/view/?id=51948> (дата обращения: 07.06.2016).
17. **Продукция фирмы "Sofradir":** LWIR Detectors. URL: <http://www.sofradir.com/category-product/lwir-detectors/> (дата обращения: 07.06.2016).
18. **Photodiodes: From Fundamentals to Applications** /Ed. I. Yun. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. 376 p. Ch. 4: LWIR Photodiodes and Focal Plane Arrays Based on Novel HgCdTe/CdZnTe/GaAs Heterostructures Grown by MBE Technique /V. V. Vasiliev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky et al. P. 1–42. DOI: 10.5772/50822.

19. **Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н.** Цифровая обработка сигналов: Справочник. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.
20. **Baker R. J.** CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 1214 p.
21. **Продукция ОАО «НИИМЭ и Микрон»:** ФАБ 200. URL: <http://www.mikron.ru/technology/> (дата обращения: 07.06.2016).
22. **Tyrrell B., Anderson K., Baker J. et al.** Time delay integration and in-pixel spatiotemporal filtering using a nanoscale digital CMOS focal plane readout // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. **56**, Is. 11. P. 2516–2523.

Поступила в редакцию 15 января 2016 г.
