

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382 : 621.383.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ В КРЕМНИЕВЫХ СХЕМАХ СЧИТЫВАНИЯ СИГНАЛОВ ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, А. И. Козлов,
И. В. Марчишин, В. Н. Овсяк

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

Представлены физико-технические принципы создания кремниевых мультиплексоров (КМ) для считывания и предварительной обработки фотосигналов детекторов инфракрасного спектрального диапазона 8–14 мкм. Проведена оценка эквивалентной шуму разности температур фотоприёмников длинноволнового инфракрасного спектрального диапазона на основе КМ с кадровым накоплением сигналов многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ). Проанализированы особенности влияния технологических ограничений в кремниевых схемах считывания фотосигналов на характеристики ИК-фотоприёмников в широком диапазоне параметров фотодетекторов на основе МСКЯ и проектных норм КМОП-технологии изготовления КМ.

Ключевые слова: кремниевый мультиплексор, схема считывания фототоков, многоэлементный инфракрасный фотоприёмник, фотодетектор на основе многослойных структур с квантовыми ямами.

Введение. Потребность совершенствования тепловизионных систем в плане уменьшения эквивалентной шуму разности температур (NETD) и улучшения пространственного разрешения определяет современные тенденции развития интегральных схем считывания фотосигналов, так называемых кремниевых мультиплексоров (КМ) для инфракрасных фотоприёмников (ИК ФП), состоящие в увеличении формата матрицы и уменьшении размеров фоточувствительных элементов (ФЧЭ) [1, 2]. При этом основными особенностями ИК ФП, которые надо учитывать в ходе разработки КМ, являются существенное изменение параметров ФЧЭ и оптимальный выбор кремниевой технологии с соответствующими проектными нормами.

В ряде работ проведено качественное сравнение матричных мультиплексоров с строчным и кадровым накоплением фотосигналов ИК ФП и приведены оценки значений NETD системы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора» для фотодиодов (ФД), выполненных на материале кадмий—ртуть—теллур и отличающихся от других ИК-фотодетекторов высоким квантовым выходом и большой неоднородностью параметров по полю матрицы [3–8]. Инфракрасные фотоприёмники на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ), типичным представителем которых являются структуры GaAs/AlGaAs, характеризуются высокой однородностью параметров ФЧЭ по полю матрицы при умеренном квантовом выходе, что позволяет достаточно просто реализовать в КМ режим кадрового накопления сигнала. Однако современные исследования системы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора» для фотоприёмников на основе МСКЯ в литературе практически отсутствуют.

Наличие интереса к ФП на основе длинноволновых ИК-детекторов с разной длиной волны максимума спектральной чувствительности (λ_{\max}), подтверждаемого промышленным выпуском типоразмерного ряда ИК-фотоприёмников фирмой "Sofradir" (Франция), требует специальной оценки зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП от λ_{\max} .

Целью данной работы является оценка достижимых параметров МСКЯ ИК ФП с учётом технологических ограничений параметров применяемой схемы считывания и оптимизация выбора проектных норм кремниевой технологии при уменьшении размеров элементарной ячейки фотоприёмной матрицы и соответствующем снижении величины входных токов для мультиплексоров.

Особенности организации и технология кремниевых мультиплексоров.

Кремниевый мультиплексор с кадровым накоплением включает в себя матрицу элементарных ячеек для считывания токов ФЧЭ и систему передачи сигналов элементарных ячеек на общий выход [3]. Каждая элементарная ячейка такого мультиплексора содержит интегратор, адресный ключ и входную схему для согласования сопротивлений ФЧЭ и интегратора (рис. 1). Считывание сигналов элементарных ячеек может осуществляться с помощью столбцового зарядочувствительного усилителя A_i , имеющего ёмкость в цепи обратной связи C_{OC} [3, 7].

Базовой технологией изготовления охлаждаемых кремниевых мультиплексоров в настоящее время является КМОП-технология. Известная фирма "X-FAB" (Германия) предлагает набор КМОП-технологий, доступных в режиме «кремниевой мастерской», в диапазоне проектных норм от 0,18 до 1,0 мкм [9]. Наиболее передовые Российские предприятия ОАО «Ангстрем» и ОАО «НИИМЭ и Микрон» (г. Зеленоград) обладают КМОП-технологиями с проектными нормами 180–250 нм и технологическим оборудованием, обеспечивающим реализацию топологических размеров 90 нм и менее, сохраняя при этом микронные технологии [10, 11].

Анализ температурного разрешения ИК ФП спектрального диапазона 8–14 мкм проводился при разных параметрах фотодетекторов на основе МСКЯ. Оценка значений NETD получена как отношение шума системы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора» к температурной чувствительности ИК-фотодетекторов с квантовой эффективностью $\eta = 0,04$ (в отдельных случаях использовано значение 0,13) [1]. Напряжение шума U_n сис-

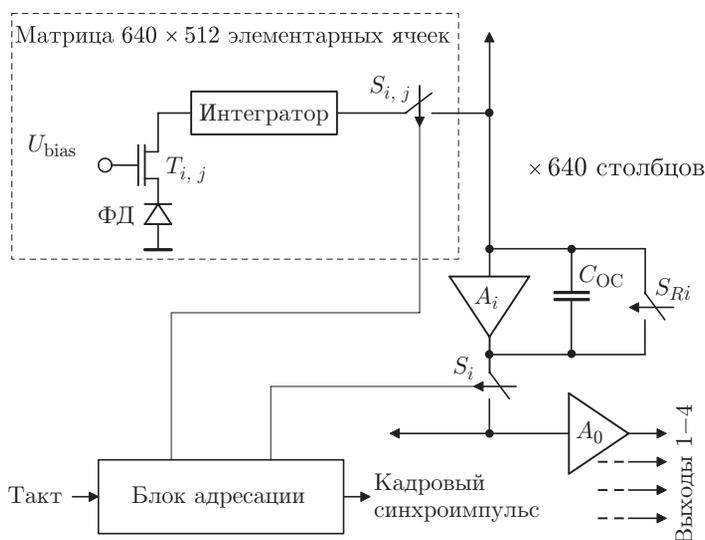


Рис. 1. Структурная схема кремниевого мультиплексора

темы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора», приведённое к ёмкости накопления, рассчитывалось в зависимости от параметра R_0A или темнового тока I_T при температуре фона $T_\phi = 300$ К и апертурном угле $\Theta = 30^\circ$. Параметр R_0A для фотодетекторов на основе МСКЯ вводится в работе [12]. Упрощённое выражение для иллюстрации расчётов U_n запишем в виде [8, 13]

$$U_n = \left(\left(\frac{4kT}{R_{\text{det}}} + 2qI_{\text{inp}} \right) \frac{\eta_{\text{inj}}^2 t_{\text{int}}}{2C_{\text{int}}^2} + \frac{4kTC_{\text{inp}}}{3C_{\text{int}}^2} + \int_{\Delta f} \frac{t_{\text{int}}^2}{R_{\text{det}}^2 C_{\text{int}}^2} \left(\frac{8kT}{3g_m} + \frac{A_m}{f^\alpha} \right) df + \frac{2kT}{C_{\text{int}}} + \int_{\Delta f_a} \left(\frac{8kT}{3g_{ma}} + \frac{A_a}{f^\alpha} \right) df \right)^{1/2},$$

где R_{det} — дифференциальное сопротивление детектора; I_{inp} — общий ток детектора в рабочей точке; C_{inp} — ёмкость входного узла; η_{inj} — коэффициент инжекции тока детектора; C_{int} — ёмкость накопления; t_{int} — время накопления; g_m — крутизна входного транзистора; g_{ma} — крутизна активного транзистора усилительного каскада; A_m и A_a — спектральные плотности шумов входного и усилительного транзисторов на частоте 1 Гц; Δf и Δf_a — полосы пропускания интегратора и усилительного каскада соответственно.

Время интегрирования при расчётах определялось из условия полного заполнения входным током ёмкости накопления мультиплексора с учётом допустимого напряжения питания выбранной технологии. Ёмкость в цепи обратной связи C_{OC} зарядочувствительного усилителя A_i при анализе принята равной ёмкости накопления C_{int} в каждой ячейке мультиплексора. Фотоприёмная матрица размером 640×512 элементарных ячеек, фотосигналы которых мультиплицируются на четыре выхода, для теоретического анализа NETD эквивалентна матрице 320×256 с одним выходом. В спектральном диапазоне 8–14 мкм для оценки эффективности ИК ФП была выбрана полоса фоточувствительности МСКЯ 8,5–9,5 мкм. Анализ параметров системы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора» проводился для матричных мультиплексоров с кадровым накоплением (ММКН), разработанных по КМОП-технологии с проектной нормой 0,18 мкм, кроме специально указанных случаев. Температура ИК ФП принималась равной 70 К.

Зависимости NETD для фотоприёмников на основе МСКЯ от параметра R_0A с разными размерами элементарной ячейки приведены на рис. 2. При квантовой эффективности 0,04 размер ячейки матрицы начинает оказывать некоторое влияние на NETD при $R_0A > 500$ Ом · см². При меньших значениях R_0A NETD определяется величиной темнового тока. По мере увеличения параметра R_0A до 1000 Ом · см² и более разрешение по температуре фиксируется для размера ячейки 25×25 мкм на уровне ~ 10 мК и с несколько бóльшим значением для ФЧЭ размером 20×20 мкм.

Рассмотрим далее зависимости NETD ИК ФП от размера элементарной ячейки фотоприёмной матрицы (l_{pix}) для разных МСКЯ-фотодетекторов (рис. 3). По мере уменьшения размеров элементарной ячейки фотоприёмной матрицы эквивалентная шуму разность температур для системы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора» монотонно увеличивается с уровней 5 и 20 мК до 12 и 26 мК и лучшие значения достигаются при бóльших R_0A и η . Это связано с тем, что при уменьшении размеров ячейки в фотоприёмной матрице сокращается площадь сбора носителей заряда, генерированных падающим ИК-излучением, и уменьшается площадь кремниевого кристалла, доступная для размещения ёмкости накопления в ячейке мультиплексора. При этом на обратно пропорциональную зависимость NETD для отдельного фотодетектора от корня квадратного площади ячейки фотоприёмной матрицы накладывается зависимость NETD от ёмкости накопления для мультиплексора, ещё более ухудшающая значения температурного разрешения данной системы.

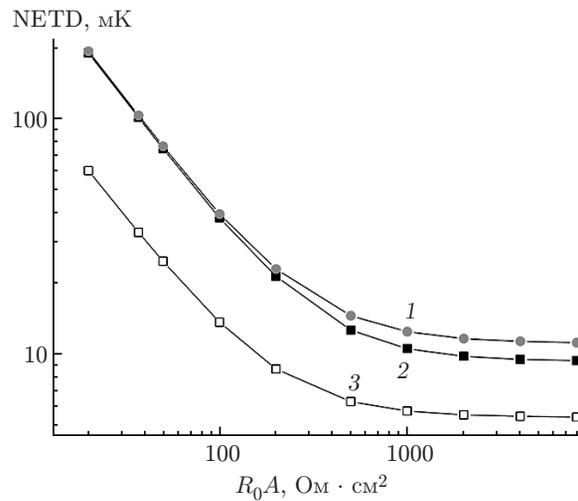


Рис. 2. Зависимости эквивалентной шуму разности температур от параметра R_0A фотодетекторов на основе МСКЯ для ИК ФП с разными размерами элементарной ячейки матрицы (кривая 1 — 20×20 мкм, $\eta = 0,04$; 2 — 25×25 мкм, $\eta = 0,04$; 3 — 25×25 мкм, $\eta = 0,13$)

Рис. 3 наглядно демонстрирует тот факт, что для улучшения NETD при использовании 0,18 мкм КМОП-технологии необходимо либо увеличить параметр R_0A , либо при тех же темновых токах существенно повысить квантовую эффективность. Однако второй путь может оказаться сомнительным из-за возможного дополнительного роста темновых токов.

Результаты анализа зависимости NETD фотоприёмников на основе МСКЯ длинноволнового ИК-диапазона от проектных норм КМОП-технологии изготовления КМ приведена на рис. 4. В случае использования для построения ИК ФП на МСКЯ с типичными значениями параметра $R_0A = 2000$ Ом·см², $\eta = 0,04$ и размером ячейки 25×25 мкм КМОП-технологий с проектными нормами 0,18–0,8 мкм эквивалентная шуму разность температур находится в диапазоне 8–13 мК при всех значениях минимального топологического раз-

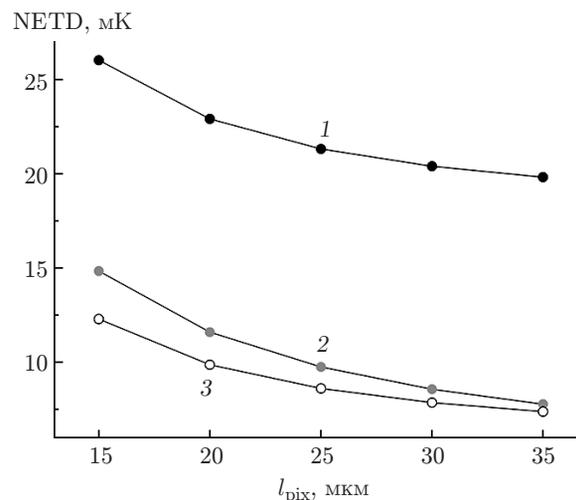


Рис. 3. Зависимости эквивалентной шуму разности температур от размера элементарной ячейки (l_{pix}) ИК ФП при разных значениях η и параметра R_0A (кривая 1 — 200 Ом·см², $\eta = 0,04$; 2 — 2000 Ом·см², $\eta = 0,04$; 3 — 200 Ом·см², $\eta = 0,13$)

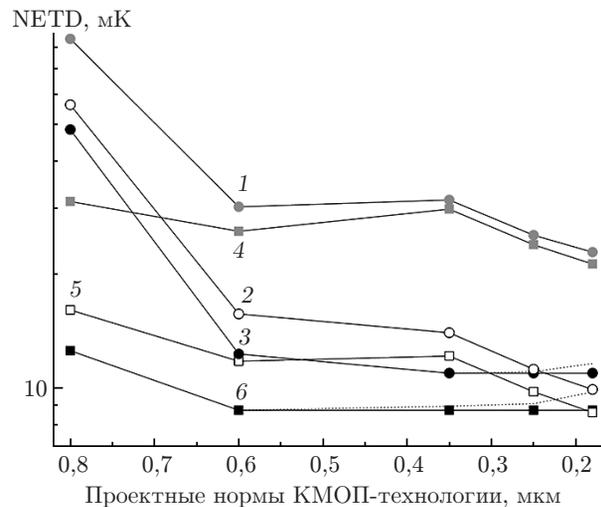


Рис. 4. Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП на основе МСКЯ от проектных норм КМОП-технологии, выбранной для изготовления ММКН при разных значениях размера ячейки и параметра R_0A (кривые 1, 2 — 20×20 мкм, $200 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; 3 — 20×20 мкм, $2000 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; 4, 5 — 25×25 мкм, $200 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; 6 — 25×25 мкм, $2000 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; квантовая эффективность $\eta = 0,04$ и $0,13$ для кривых 1, 3, 4, 6 и 2, 5 соответственно

мера с некоторым преимуществом для проектных норм начиная с $0,6$ мкм и менее. При уменьшении размера ячейки до 20×20 мкм характер зависимости NETD от проектных норм КМОП-технологии становится более резким, снижаясь с неприемлемого во многих практически важных случаях уровня ($50\text{--}100$ мК) при $0,8$ мкм КМОП-технологии, обусловленного недостаточной ёмкостью накопления, до значений $11\text{--}13$ мК при проектных нормах равных или меньших $0,6$ мкм.

На рис. 4 пунктирными линиями показано поведение зависимости NETD фотоприёмников на основе МСКЯ при использовании ММКН с максимальной ёмкостью накопления, достигнутой при проектных нормах $0,18\text{--}0,35$ мкм КМОП-технологии. Некоторое увеличение NETD возможно из-за неполного использования ёмкости интеграторов, расположенных в каждой ячейке КМ, и соответствующего уменьшения отношения сигнал/шум для каждого канала считывания мультиплексора.

Применение МСКЯ с пониженным до $200 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ значением параметра R_0A приводит к ухудшению температурного разрешения ИК ФП с сохранением резкого характера зависимости NETD в диапазоне проектных норм $0,6\text{--}0,8$ мкм при размерах ячейки матрицы МСКЯ 20×20 мкм. Дальнейшее уменьшение проектных норм КМОП-технологии несколько меняет характер зависимости эквивалентной шуму разности температур. В случае перехода от $0,6$ к $0,35$ мкм сочетание сопутствующих изменений параметров схемы считывания, задаваемых выбранной технологией, таких как толщина полевого диэлектрика и напряжение питания, приводит (при использовании в схеме максимизированных ёмкости и времени накопления) к уменьшению её вольтовой чувствительности в $1,5$ раза, в то время как шумовое напряжение этой системы снижается только в $1,3$ раза, что создаёт небольшой локальный максимум на зависимости NETD от проектных норм КМОП-технологии.

В случае перехода от $0,6$ мкм КМОП-технологии к $0,25$ мкм изменение соотношения параметров системы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора» вызывает более значительное уменьшение шумового напряжения по сравнению со снижением её чувствительности и обеспечивает переход в область более низких значений эквивалентной шуму разности температур.

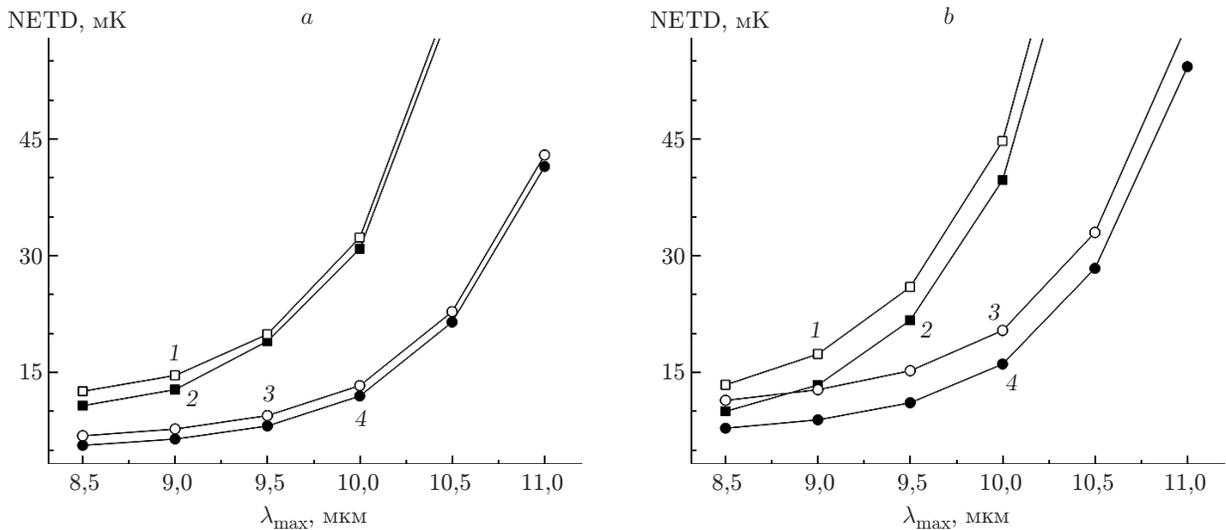


Рис. 5. Особенности использования КМОП-технологии для изготовления КМ: при проектной норме 0,18 мкм (а) и 0,6 мкм (б). Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП от λ_{\max} МСКЯ при разных l_{pix} и η (кривые 1 — 20×20 мкм, $\eta = 0,04$; 2 — 25×25 мкм, $\eta = 0,04$; 3 — 20×20 мкм, $\eta = 0,13$; 4 — 25×25 мкм, $\eta = 0,13$)

Для улучшения температурного разрешения ФП при использовании КМОП-технологии с проектной нормой более 0,25 мкм предпочтительным является путь увеличения параметра R_0A , а при топологическом размере менее 0,25 мкм повышение квантовой эффективности η может обеспечить лучшие значения NETD. При выборе для создания схемы считывания КМОП-технологии с проектной нормой 0,25 мкм оба способа могут обеспечить сравнимые результаты.

Особенности применения кремниевых мультиплексоров для МСКЯ в длинноволновом спектральном ИК-диапазоне демонстрирует рис. 5. Сначала рассмотрим КМ, выполненные на основе 0,6 мкм КМОП-технологии. В этом случае в диапазоне длин волн $\lambda_{\max} \approx 8,5\text{--}9$ мкм анализ даёт сравнимые значения NETD для разных размеров элементарной ячейки и параметров МСКЯ. При дальнейшем увеличении λ_{\max} наблюдается значительный рост NETD с некоторым преимуществом для больших значений l_{pix} и лучших параметров фотодетекторов. Несколько меньшие и сравнимые для разных размеров ячейки значения NETD в длинноволновом ИК-диапазоне можно получить с использованием КМ, созданных на базе 0,18 мкм КМОП-технологии.

Таким образом, проанализированы технологические ограничения в кремниевых мультиплексорах с кадровым накоплением сигналов многоэлементных ИК ФП на основе МСКЯ. При этом рассмотрены физико-технические основы выбора КМОП-технологий для создания оптимальных схем считывания фотосигналов многослойных структур с квантовыми ямами. Показано, что уменьшение проектных норм КМОП-технологии, выбранной для создания мультиплексора, в области значений $\sim 0,25$ мкм приводит к смене приоритетов в способах улучшения разрешения по температуре для ИК ФП на основе МСКЯ. Для ранних кремниевых технологий более эффективно уменьшение темновых токов МСКЯ, а в условиях применения глубоко субмикронных КМОП-технологий приоритетным становится увеличение квантовой эффективности МСКЯ.

Экспериментальные данные. На основе кремниевых мультиплексоров и матриц 128×128 и 320×256 фотодетекторов на базе МСКЯ в Институте физики полупроводников (ИФП) СО РАН созданы гибридные ИК ФП, которые были испытаны в составе экспериментальной тепловизионной системы с объективом $F/1,4$ при кадровой частоте 30–60 Гц.



Рис. 6. Тепловые изображения, полученные с помощью ИК ФП на МСКЯ: *a* — формат 128×128 ($\text{NETD} \approx 0,05$ К, $\lambda_{\text{max}} = 8,6$ мкм, $T = 65$ К, 98,5 % работающих ФЧЭ, кремниевый мультиплексор разработан и изготовлен в ИФП СО РАН); *b* — формат 320×256 ($\text{NETD} \approx 0,03$ К, $\lambda_{\text{max}} = 9,5$ мкм, $T = 70$ К, 98 % работающих ФЧЭ (с подложкой)); *c* — формат 320×256 ($\text{NETD} \approx 0,03$ К, $\lambda_{\text{max}} = 9,4$ мкм, $T = 70$ К, 99 % работающих ФЧЭ (подложка удалена))

При считывании фототоков матрицы 128×128 длинноволновых ФЧЭ на МСКЯ с $\lambda_{\text{max}} \approx 8,6$ мкм и шагом ячеек 50×50 мкм достигнуто температурное разрешение не хуже 50 мК (рис. 6, *a*) [14]. Эквивалентная шуму разность температур при формировании теплового изображения с использованием матрицы 320×256 фотодетекторов на основе МСКЯ с $\lambda_{\text{max}} \approx 9,4\text{--}9,5$ мкм (шаг ячеек 30×30 мкм) составляла 30 мК (рис. 6, *b, c*) [15].

Отличие экспериментально полученных величин NETD от теоретических значений обусловлено пониженной чувствительностью ФЧЭ, используемых в данных ИК ФП, и некоторой остаточной неоднородностью параметров детекторов по полю матрицы [4]. Тем не менее достигнутые значения находятся в области типичных величин NETD для тепловизионных приборов, выпускаемых ведущими фирмами, например "Sofradir" [2].

Заключение. В данной работе проведён анализ технологических ограничений в схемах считывания сигналов ИК-фотоприёмников; получена оценка достижимых параметров ИК ФП на основе МСКЯ при уменьшении размеров элементарной ячейки матрицы и при соответствующем снижении величин входных токов и площади кремниевого кристалла, доступной для размещения ёмкости накопления.

В длинноволновой области ИК-спектра при R_0A более $300 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ кремниевый мультиплексор начинает обеспечивать практически предельное разрешение по температуре ФП

на МСКЯ с длиной волны максимума спектральной чувствительности $\lambda_{\max} = 9$ мкм. По мере уменьшения линейного размера ячейки КМ эквивалентная шуму разность температур МСКЯ ФП монотонно увеличивается.

В целом с уменьшением проектных норм КМОП-технологии от субмикронных в направлении глубоко субмикронных и нанометровых происходит улучшение предельных оценок характеристик тепловизионных приборов. Однако при разных соотношениях внутренних параметров системы «ФЧЭ — канал считывания мультиплексора» на зависимости температурного разрешения от проектных норм КМОП-технологии могут возникать небольшие локальные максимумы.

В ИФП СО РАН на основе выполненного анализа разрабатываются кремниевые мультиплексоры, ориентированные на промышленную КМОП-технологю. Представлены практические результаты разработок гибридных ИК ФП на базе КМ и многоэлементных МСКЯ-фотодетекторов. Экспериментально показана возможность достижения с помощью таких фотодетекторов, имеющих длину волны максимума спектральной чувствительности 9,4–9,5 мкм, температурного разрешения не хуже 30 мК, соответствующего уровню мировых образцов.

Авторы выражают благодарность акад. А. Л. Асееву за полезные обсуждения результатов работы, ведущему инженеру А. П. Савченко за предоставление данных по параметрам МСКЯ-фотодетекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. **Продукция** фирмы "Sofradir": Охлаждаемые ИК ФП // Официальный сайт группы компаний "Sofradir". URL: <http://www.sofradir-ec.com/products-cooled.asp> (дата обращения: 06.02.2015).
3. **Mottin E., Pantigny P., Boch R.** An improved architecture of IR FPA readout circuits // Proc. SPIE. 1997. **3061**. P. 119–128.
4. **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.
5. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н.** Кремниевые мультиплексоры 320 × 256 для инфракрасных фотоприемных устройств на основе КРТ-диодов // Автометрия. 2007. **43**, № 4. С. 74–82.
6. **Козлов А. И.** Анализ принципов построения схем кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК-фотоприемников // Автометрия. 2010. **46**, № 1. С. 118–129.
7. **Козлов А. И.** Особенности проектирования и некоторые реализации кремниевых мультиплексоров для инфракрасных фотоприемников // Оптический журнал. 2010. **77**, № 7. С. 19–29.
8. **Козлов А. И., Марчишин И. В.** Промышленно ориентированные разработки кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК-фотоприемников // Автометрия. 2012. **48**, № 4. С. 60–72.
9. **Перечень** КМОП технологий фирмы "X-FAB", доступных в режиме «кремниевой мастерской» // Официальный сайт фирмы «X-FAB». URL: <http://www.xfab.com/en/technology/ctmos/> (дата обращения: 06.02.2015).
10. **Информация** о технологиях ОАО «Ангстрем» // Официальный сайт ОАО «Ангстрем». URL: <http://www.angstrem.ru/proizvodstvo/foundry/>; URL: <http://www.angstrem.ru/proizvodstvo/krislal/> (дата обращения: 06.02.2015).

11. **Информация** о технологиях ОАО «НИИМЭ и Микрон» // Официальный сайт ОАО «НИИМЭ и Микрон». URL: <http://mikron.sitronics.ru/products/micron/technology/> (дата обращения: 06.02.2015).
12. **DeWames R. E., Arias J. M., Kozlowski L. J., Williams G. M.** An assessment of HgCdTe and GaAs/GaAlAs technologies for LWIR infrared imagers // Proc. SPIE. 1992. **1735**. P. 2–16.
13. **Kozlowski L. J., Bailey R. B., Cabelli S. C. et al.** 640 × 480 PACE HgCdTe FPA // Proc. SPIE. 1992. **1735**. P. 163–174.
14. **Овсяк В. Н., Сидоров Ю. Г., Васильев В. В., Шашкин В. В.** Матричные фотоприемники 128 × 128 на основе слоев HgCdTe и многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 70–79.
15. **Есаев Д. Г., Марчишин И. В., Овсяк В. Н. и др.** Инфракрасное фотоприемное устройство на основе многослойных структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами // Автометрия. 2007. **43**, № 4. С. 112–118.

Поступила в редакцию 6 марта 2014 г.
