ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.382: 621.383.5

АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ В КРЕМНИЕВЫХ СХЕМАХ СЧИТЫВАНИЯ СИГНАЛОВ ФОТОДИОДОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

© 2014 г.
В. В. Васильев, канд. физ.-мат. наук; **А. И. Козлов**, канд. техн. наук; **И. В. Марчишин**; **Ю. Г. Сидоров**, доктор физ.-мат. наук; **М. В. Якушев**, доктор физ.-мат. наук

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

E-mail: kozlov@isp.nsc.ru

Представлены результаты исследования научно-технических принципов создания кремниевых мультиплексоров, предназначенных для считывания и предварительной обработки сигналов фотодетекторов инфракрасных спектральных диапазонов 8–14 и 3–5 мкм. Проведена оценка эквивалентной шуму разности температур фотоприемников длинноволнового инфракрасного диапазона на основе кремниевых мультиплексоров с построчным и кадровым накоплениями сигналов фотодиодов на основе соединения кадмий-ртуть-теллур. Проанализированы особенности влияния структурно-технологических ограничений в кремниевых схемах считывания на характеристики фотоприемников инфракрасной области в широком диапазоне параметров фотодиодов на основе соединения кадмий-ртуть-теллур и проектных норм технологии изготовления кремниевых мультиплексоров.

Ключевые слова: *кремниевый мультиплексор, многоэлементный инфракрасный фотоприемник, кремниевая схема считывания фототоков, фотодиод на основе соединения кадмий-ртуть-теллур.*

Коды OCIS: 040.3060, 110.3080, 130.5990

Поступила в редакцию 17.07.2013

Введение

Необходимость улучшения технических характеристик тепловизионных систем в плане уменьшения эквивалентной шуму разности температур (*noise equivalent temperature difference* – NETD) и улучшения пространственного разрешения определяет современные тенденции развития схем считывания (так называемых кремниевых мультиплексоров) сигналов фотоприемников (ФП) инфракрасного (ИК) диапазона – увеличение формата матрицы и уменьшение размеров фоточувствительных элементов (ФЧЭ) [1–3]. При этом основными особенностями ИК ФП, которые надо учитывать в ходе разработки кремниевых мультиплексоров, являются существенное изменение параметров ФЧЭ и оптимальный выбор кремниевой технологии с соответствующими проектными нормами.

В ряде работ рассматриваются матричные мультиплексоры с построчным и кадровым накоплениями фотосигналов ИК ФП, обозначенные далее, соответственно, ММПН и ММКН [4–11]. В работах [7–8] проведено качественное сравнение структур кремниевых схем считывания фотосигналов. В работах [9–11] приводятся оценки значений эквивалентной шуму разности температур системы “ФЧЭ – канал считывания мультиплексора” для ММПН и ММКН. Однако, сравнение ММПН и ММКН проведено для фотодиодов (ФД) на основе соединения кадмий-ртуть-теллур (КРТ) с существенными темновыми и/или фоновыми токами, свойственными длинноволновому ИК спектральному диапазону при апертурном угле $\Theta/2 = 30^{\circ}$ и размере элементарной ячейки 35 мкм [9, 12]. Далее текущий анализ типоразмерного ряда ИК ФП, выпускаемого фирмой “SOFRADIR”,

Франция [3], показывает наличие практического интереса к ФП на основе длинноволновых КРТ ФД с разной (в диапазоне от 9 до 11,5 мкм) длиной волны максимума спектральной чувствительности (λ_{max}). Это требует отдельной оценки зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП от λ_{max} для мультиплексоров с различной внутренней организацией.

Основной целью данной работы является оценка достижимых параметров КРТ ИК ФП на основе ММПН и ММКН в режиме "ограничения фоном" (ОФ) с учетом структурно-технологических ограничений применяемой схемы считывания и оптимизации выбора проектных норм кремниевой технологии при уменьшении размеров элементарной ячейки матрицы и соответствующем снижении входных токов мультиплексоров. Имеющиеся в литературных источниках данные о формировании задачи и проведении ряда исследований, нацеленных на создание монолитных КРТ ИК ФП [1, 13–16], привели к необходимости некоторого обобщения выполненных работ этого направления, относящихся к кремниевым схемам считывания.

Особенности конструкции и технология кремниевых мультиплексоров

Кремниевый мультиплексор с кадровым накоплением включает матрицу элементарных ячеек для считывания токов ФЧЭ и систему передачи сигнального напряжения с элементарных ячеек на общий выход. Каждая элементарная ячейка такого мультиплексора содержит интегратор, адресный ключ и входную схему для согласования сопротивлений ФЧЭ и интегратора (рис. 1). Однако интегратор может быть расположен в каждой элементарной ячейке считывания, в каждом столбцовом канале считывания или быть одним на всю матрицу. В зависимости от этого мультиплексоры могут иметь кадровое, построчное или поэлементное накопления. Считывание сигналов элементарных ячеек может осуществляться с помощью столбцового зарядочувствительного усилителя или стробируемого интегратора A_i.

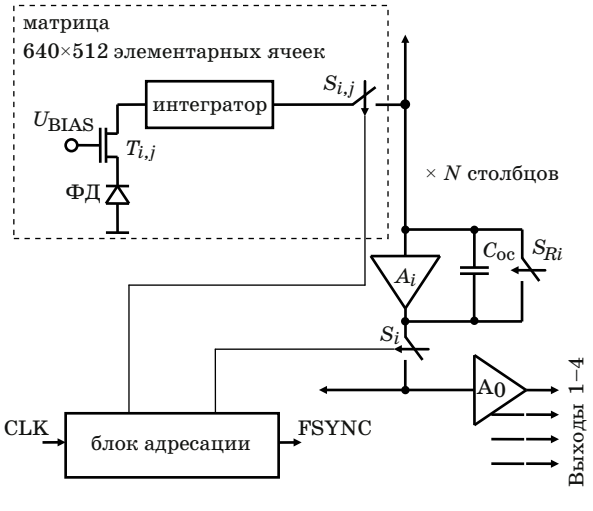

Рис. 1. Структурная схема ММКН.

Следует отметить, что ММПН при увеличении формата и данном отношении сигнал/шум или при данном формате и необходимости увеличения отношения сигнал/шум для своего функционирования требует большего числа выходов, чем ММКН [7]. В ММПН строки, смежные со считываемой строкой, следует подключать к некоторой нагрузке для уменьшения взаимосвязи между ФЧЭ соседних строк. В отличие от ММКН, ММПН допускает использование для согласования ФЧЭ и интегратора схему буферированной прямой инжекции при необходимости обеспечения высокой однородности напряжений смещения ФД [17], что может оказаться принципиально важным преимуществом ММПН при освоении более длинноволновой области дальнего ИК диапазона.

Базовой технологией изготовления охлаждаемых кремниевых мультиплексоров в настоящее время является КМОП-технология. Достаточно 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 [18]. Наиболее передовые Российские предприятия ОАО "Ангстрем" и ОАО "НИИМЭ и Микрон" (г. Зеленоград) обладают КМОП-технологиями с проектными нормами 130–180 нм, сохраняя при этом микронные технологии [19, 20].

Анализ температурного разрешения

Анализ оценки температурного разрешения ИК ФП спектрального диапазона 8–14 мкм проводился для ММКН и ММПН при параметрах КРТ ФД, обеспечивающих режим "ОФ". Оценка значений NETD получена как отношение шума системы "ФЧЭ – канал считывания мультиплексора" к температурной чувстви-

тельности ИК ФД с квантовой эффективностью, соответствующей 0,7 [2]. Напряжение шума U_n системы "ФЧЭ – канал считывания мультиплексора", приведенное к емкости накопления, рассчитывалось в зависимости от параметра R_0A[1] при температуре фона $T_b = 300$ K и $\Theta = 30^\circ$. Упрощенное выражение, иллюстрирующее расчеты U_n, в наиболее общем виде представлено ниже [21]

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

где R_{det} – дифференциальное сопротивление детектора, I_{inp} – общий ток детектора в рабочей точке, C_{inp} – емкость входного узла, η_{inj} – коэффициент инжекции тока детектора, C_{int} – емкость 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 соответственно, Δf и Δf_a – полосы пропускания интегратора и усилительного каскада соответственно.

Время интегрирования в случае ММКН и емкость накопления в случае ММПН определялись из условия полного заполнения входным током емкости накопления соответствующего мультиплексора. Фотоприемная матрица размером 640×512 элементарных ячеек, фотосигналы которых мультиплицируются на 4 выхода, что для теоретического анализа NETD эквивалентно матрице 320×256 с одним выходом. (Фотосигналы на четырех выходах большой матрицы можно дополнительно коммутировать на единственный выход, если это необходимо по системным требованиям, но для нашего рассмотрения последнее не принципиально). В спектральном диапазоне 8–14 мкм для оценки эффективности ИК ФП были выбраны полосы фоточувствительности КРТ ФД 7,7–9,5 и 7,7–11 мкм аналогично тому, как это представлено в базовых информационных источниках фирмы "SOFRADIR" [3]. Рассмотрение параметров системы "ФЧЭ – канал считывания мультиплексора" проводилось для ММПН и ММКН, разработанных по КМОП-технологии с проектными нормами 0,18 мкм (характерный параметр этой технологии $\lambda_{\text{CMOS}} = 90$ нм) [14], кроме случаев, специально указанных на рисунках настоящей статьи.

Зависимости NETD от параметра R_0A в случаях ММКН и ММПН с размером элементарной ячейки 20×20 мкм, приведенные на рис. 2, позволяют сделать следующие замечания. При параметре КРТ ФД R_0A, составляющем единицы Ом см^2, ММКН и ММПН обеспечивают сравнимое температурное разрешение в диапазоне $(20–40)\times10^{-3}$ K. По мере увеличения параметра R_0A до 10 Ом см^2 и более разрешение по температуре, полученное с использованием ММПН, фиксируется на уровне $(10–20)\times10^{-3}$ K, в случае ММКН–NETD продолжает уменьшаться, выходя на уровень значений $(6–7)\times10^{-3}$ K.

Рассмотрим далее зависимости NETD ИК ФП от размера элементарной ячейки фотоприемной матрицы (l_{pix}) для ММКН и ММПН

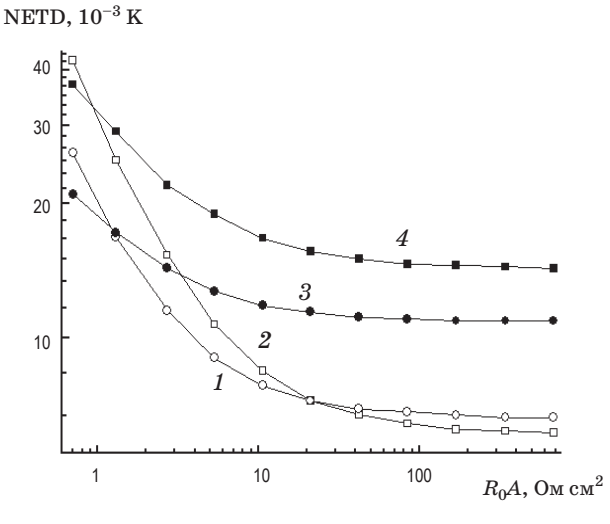

Рис. 2. Зависимости разности температур, эквивалентной шуму, от параметра R_0A длинноволновых КРТ ФД с различной $\lambda_{\max}$ ИК ФП на основе разных мультиплексоров (*1* – $\lambda_{\max} = 11$ мкм и ММКН, *2* – $\lambda_{\max} = 9{,}5$ мкм и ММКН, *3* – $\lambda_{\max} = 11$ мкм и ММПН, *4* – $\lambda_{\max} = 9{,}5$ мкм и ММПН).

[1] Параметр R_0A – произведение дифференциального сопротивления R_0 при напряжении смещения, равном нулю, на площадь A фотодетектора. Этот параметр характеризует уровень технологии ФЧЭ и, соответственно, предельные фотоэлектрические характеристики ИК детекторов и обеспечивает возможность сравнения и оценки фотодетекторов с разной площадью.

и разных КРТ ФД (рис. 3). По мере уменьшения размеров элементарной ячейки фотодиодной матрицы эквивалентная шуму разность температур монотонно увеличивается с уровня $(4–9)\times10^{-3}$ К до значений $(9–20)\times10^{-3}$ К, при этом лучшие значения показывает ММКН.

Проведен анализ оценки NETD ФП длинноволнового ИК диапазона с КРТ ФД в зависимости от проектных норм ($2\lambda_{CMOS}$) КМОП-технологии изготовления ММКН и ММПН (рис. 4). Температурное разрешение ИК ФП дальнего спектрального ИК диапазона на базе КРТ ФД и ММПН не зависит от топологических норм кремниевой технологии и находится в диапазоне $(9–15)\times10^{-3}$ К (см. расчетные точки на рис. 4).

В случае использования для построения ИК ФП с размером ячейки 25×25 мкм длинноволновых КРТ ФД и ММКН эквивалентная шуму разность температур существенно уменьшается до технологии с проектными нормами 0,6 мкм. В диапазоне 0,35–0,6 мкм КМОП-технологий темп падения NETD замедляется, затем вплоть до топологических норм 0,18 мкм температурное разрешение снова улучшается достаточно быстро с некоторым преимуществом для меньшей длины волны максимума спектральной чувствительности, выходя на уровень значений NETD порядка $(5–6)\times10^{-3}$ К. При уменьшении размера ячейки до 20×20 мкм характер зависимости NETD от проектных норм КМОП-технологии становится более плавным, снижаясь с уровня $(11–14)\times10^{-3}$ К при 0,6 мкм КМОП до значений $(6–8)\times10^{-3}$ К при 0,18 мкм КМОП.

Особенности применения ММПН в длинноволновом спектральном ИК диапазоне наглядно демонстрирует рис. 5. Сначала рассмотрим ММКН и ММПН, выполненные на основе 0,6 мкм КМОП-технологии. В этом случае ММКН обеспечивает меньшие значения NETD до $\lambda_{max} \approx 10,5$ и 11 мкм при размерах элементарной ячейки 20×20 и 25×25 мкм соответственно. При дальнейшем увеличении λ_{max} определенные преимущества обеспечивает ММПН.

Наилучшие и сравнимые для разных размеров ячейки значения NETD в длинноволновом ИК диапазоне вплоть до $\lambda_{max} \approx 11,5$ мкм можно получить с использованием ММКН, созданном на базе 0,18 мкм КМОП-технологии.

Таким образом, в целом проанализированы конструктивные особенности, особенности создания и применения мультиплексоров с построчным и кадровым накоплением фотосигналов многоэлементных ИК ФП.

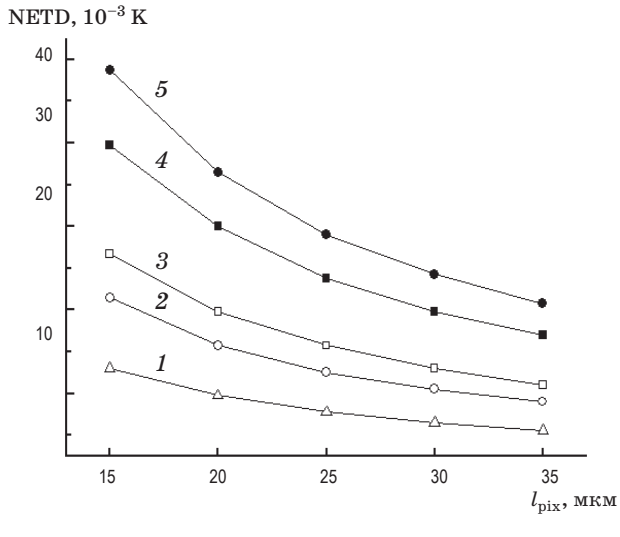

Рис. 3. Зависимости разности температур, эквивалентной шуму, от размера элементарной ячейки ИК ФП в ММКН и ММПН при разных значениях λ_{max} (*1* – λ_{max} = 5 мкм и ММКН, *2* – λ_{max} = 9,5 мкм и ММКН, *3* – λ_{max} = 11 мкм и ММКН, *4* – λ_{max} = 11 мкм и ММПН, *5* – λ_{max} = 9,5 мкм и ММПН).

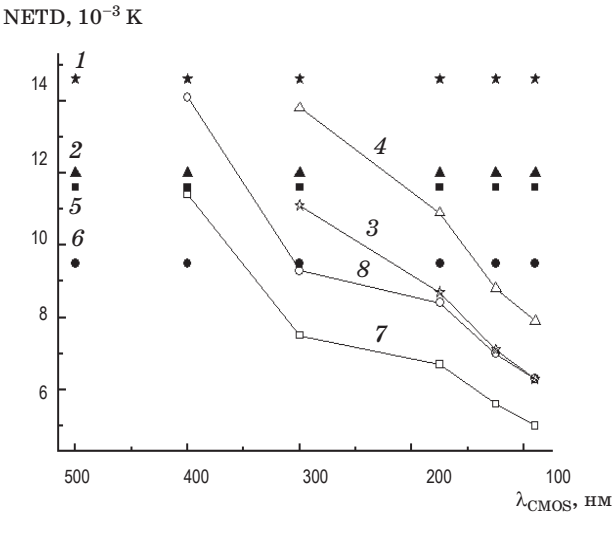

Рис. 4. Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП на основе длинноволновых КРТ ФД от проектных норм ($2\lambda_{CMOS}$) КМОП-технологии, выбранной для изготовления ММКН и ММПН (ячейка 20×20 мкм: *1* – λ_{max} = 9,5 мкм и ММПН, *2* – λ_{max} = 11 мкм и ММПН, *3* – λ_{max} = 9,5 мкм и ММКН, *4* – λ_{max} = 11 мкм и ММКН; ячейка 25×25 мкм: *5* – λ_{max} = 9,5 мкм и ММПН, *6* – λ_{max} = 11 мкм и ММПН, *7* – λ_{max} = 9,5 мкм и ММКН, *8* – λ_{max} = 11 мкм и ММКН).

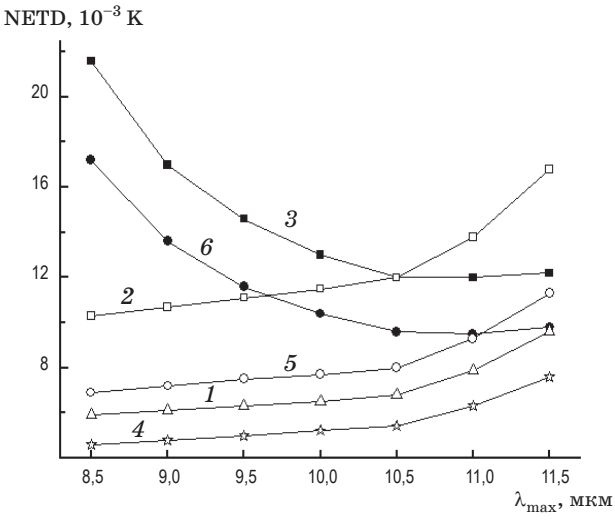

Рис. 5. Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП на основе ММКН и ММПН от λ_{max} КРТ ФД при разных l_{pix} (ячейка 20×20 мкм: *1* – λ_{CMOS} = 90 нм и ММКН, *2* – λ_{CMOS} = 300 нм и ММКН, *3* – λ_{CMOS} = = 90–500 нм и ММПН; ячейка 25×25 мкм: *4* – λ_{CMOS} = 90 нм и ММКН, *5* – λ_{CMOS} = 300 нм и ММКН, *6* – λ_{CMOS} = 90–500 нм и ММПН).

Экспериментальные данные

Монолитное исполнение ИК ФП

В ИФП СО РАН проведены исследования, направленные на разработку технологии изготовления монолитных КРТ ИК ФП [16]. В частности, разработаны технологические процессы выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии КРТ-структур на кремниевой пластине с ориентацией (310).

При этом особая задача разработки специальной кремниевой технологии изготовления мультиплексоров, имеющих повышенную стойкость к технологическим процессам создания меза-фотодиодов на основе КРТ в ячейках кремниевой схемы считывания, потребовала проведения фундаментальных исследований блоков технологических процессов термообработки, систем металлизации и пассивации кристаллов. На технологических базах ИФП СО РАН, ОАО “Микрон” и ОАО “Интеграл” проведены поисковые исследования элементов технологии кремниевых мультиплексоров для монолитных КРТ ИК ФП в части создания оптимизированных конструкций МОП-транзисторов и кремниевых диодов, новых систем защитных диэлектрических покрытий и металлической разводки [12, 16].

Монолитные ИК ФП по сравнению с гибридными обладают двумя существенными достоинствами: надежностью и технологичностью, проигрывая по остальным параметрам, так как ФЧЭ занимает только часть ячейки матрицы, и даже при использовании передовых кремниевых технологий следует учитывать существенные краевые эффекты в конструкции ФЧЭ [16]. Возможные перспективы решения этой задачи могут быть связаны с разработкой трехмерной технологии, обеспечивающей размещение каждого детектора матрицы непосредственно на внешнем, последнем слое кристалла мультиплексора, при этом ФЧЭ должен занимать практически всю площадь над ячейкой мультиплексора, или с развитием технологии создания интегральных микролинз над ФЧЭ в области ИК излучения.

Гибридное исполнение ИК ФП

На основе ММКН, ММПН и матриц 320×256 КРТ ФД в ИФП СО РАН созданы гибридные ИК ФП, которые были испытаны в составе экспериментальной тепловизионной системы с объективами $F/1{,}8$ (для ММКН) и $F/1{,}4$ (для ММПН) при кадровой частоте 30–60 Гц.

При считывании фототоков длинноволновых КРТ ФД с $\lambda_{max} \approx 11$ мкм с использованием ММПН (шаг – 35 мкм) достигнуто температурное разрешение около 20×10^{-3} K [9, 12]. Разность температур, эквивалентная шуму, при формировании теплового изображения с использованием КРТ ФД с $\lambda_{max} \approx 5$ мкм и ММКН (шаг ячеек 30 мкм) составляет около 13×10^{-3} K, а в случае КРТ ФД с $\lambda_{max} \approx 9{,}5$ мкм NETD $\approx 34\times10^{-3}$ K [22, 23]. Отличие экспериментально полученных значений разности температур, эквивалентной шуму, от теоретических значений обусловлено наличием у КРТ ФД, используемых в данных ИК ФП, избыточного фликкер-шума и неоднородностью параметров детекторов по полю матрицы [9]. Тем не менее, достигнутые значения находятся в области типичных для NETD тепловизионных приборов, выпускаемых ведущими фирмами, например, фирмой “SOFRADIR” [3].

Заключение

В данной работе проведен анализ структурно-технологических ограничений в схемах считывания сигналов ИК ФП, получена оценка до-

стижимых параметров ИК ФП, созданных с использованием ММПН и ММКН и КРТ ФД при уменьшении размеров элементарной ячейки матрицы и соответствующем снижении входных токов и площади кремниевого кристалла, доступной для размещения емкости накопления. На основе выполненного анализа в ИФП СО РАН разрабатываются кремниевые мультиплексоры, ориентированные на изготовление с использованием промышленной КМОП-технологии.

В длинноволновой области ИК спектра при R_0A около или более 10 Ом см^2 предельное разрешение по температуре обеспечивает комбинация ММКН и КРТ ФД с λ_{max} = 9,5 мкм. По мере уменьшения линейного размера ячейки схема ММКН продолжает обеспечивать лучшее температурное разрешение по сравнению с ММПН.

В целом с уменьшением проектных норм КМОП-технологии от микронных и субмикронных в направлении глубоко субмикронных и нанометровых происходит соответствующее улучшение предельных оценок характеристик тепловизионных приборов. Уменьшение проектных норм КМОП-технологии, выбранной для создания мультиплексора, ведет к увеличению длины волны максимума спектральной чувствительности КРТ ФД, начиная с которой ММПН обеспечивает лучшее температурное разрешение, чем ММКН.

В работе также представлены практические результаты разработок гибридных ИК ФП на основе КРТ ФД. Экспериментально показана возможность достижения в спектральных ИК диапазонах 3–5 и 8–14 мкм температурного разрешения порядка (13–34)×10^{-3} К, соответствующего уровню мировых образцов.

Авторы выражают благодарность А.К. Панфиленко за работу по созданию мультиплексоров с шагом ячеек 30 мкм на технологической базе ОАО “Интеграл”; П.Р. Машевичу и А.А. Романову за помощь при изготовлении кремниевых мультиплексоров с шагом 35 мкм на технологической базе ОАО “Ангстрем”.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Варавин В.С., Гутаковский А.К., Дворецкий С.А., Карташев В.А., Латышев А.В., Михайлов Н.Н., Придачин Д.Н., Ремесник В.Г., Рыхлицкий С.В., Сабинина И.В., Сидоров Ю.Г., Титов В.П., Швец В.А., Якушев М.В., Асеев А.Л.* Состояние и перспективы молекулярно-лучевой эпитаксии $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 25–41.

2. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.

3. Продукция фирмы “SOFRADIR”: Охлаждаемые ИК ФП // Официальный сайт группы компаний “SOFRADIR”. URL: http://www.sofradir-ec.com/products-cooled.asp (дата обращения: 10.03.2013).

4. *Акимов В.М., Еремеева Л.Е., Лисейкин В.П., Щукин С.В., Патрашин А.И., Климанов Е.А., Тимофеев А.А., Гастев С.С.* Разработка охлаждаемых МОП-мультиплексоров для считывания и обработки сигнала с фотодиодных КРТ-матриц // Оптический журнал. 1995. Т. 62. № 12. С. 63–70.

5. *Бовина Л.А., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Климанов Е.А., Патрашин А.И., Сагинов Л.Д., Стафеев В.И., Тимофеев А.А.* Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 6. С. 74–77.

6. *Стафеев В.И., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Акимов В.М., Климанов Е.А., Сагинов Л.Д., Соляков В.Н., Мансветов Н.Г., Пономаренко В.П., Тимофеев А.А., Филачев А.М.* Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 10. С. 1257–1265.

7. *Mottin E., Pantigny P., Boch R.* An improved architecture of IR FPA readout circuits // Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 119–128.

8. *Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсюк В.Н., Шашкин В.В.* Кремниевые мультиплексоры для многоэлементных фотоприемников ИК диапазона // Автометрия. 2005. Т. 41. № 3. С. 88–99.

9. *Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсюк В.Н.* Кремниевые мультиплексоры 320×256 для инфракрасных фотоприемных устройств на основе КРТ-диодов // Автометрия. 2007. Т. 43. № 4. С. 74–82.

10. *Козлов А.И.* Анализ принципов построения схем кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК фотоприемников // Автометрия. 2010. Т. 46. № 1. С. 118–129.

11. *Козлов А.И.* Особенности проектирования и некоторые реализации кремниевых мультиплексоров для инфракрасных фотоприемников // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 7. С. 19–29.

12. *Козлов А.И., Марчишин И.В.* Промышленно ориентированные разработки кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК фотоприемников // Автометрия. 2012. Т. 48. № 4. С. 60–72.

13. *Dalton G.B., Dennis P.N., Lees D.J., Hall D.J., Cairns J.W., Gordon N.T., Hails J.E., Giess J.* Development of non-hybridised HgCdTe detectors for the next generation of astronomical instrumentation // Proc. SPIE. 2008. V. 7021. P. 1–5.

14. *Cairns J.W., Buckle L., Pryce G.J., Hails J.E., Giess J., Crouch M.A., Hall D.J., Hydes A., Graham A., Wright A.J., Hollier C.J., Lees D.J., Gordon N.T., Ashl T.* Integrated infrared detectors and readout circuits // Proc. SPIE. 2006. V. 6206. P. 1–9.

15. *Zanio K., Mattson R., Chu M., Terterian S.* HgCdTe on Si for monolithic focal plane arrays // Proc. SPIE. 1992. V. 1683. P. 179–190.

16. *Yakushev M.V., Dvoretsky S.A., Kozlov A.I., Sabinina I.V., Sidorov Yu.G., Sorochkin A.V., Fomin B.I., Aseev A.L.* HgCdTe monolithic infrared detector // Phys. Status Solidi C. 2010. V. 7. № 6. P. 1681–1683.

17. *Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсюк В.Н.* Кремниевые мультиплексоры 1×576 для ИК фотодиодов на основе соединения кадмий-ртуть-теллур // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 4. С. 278–286.

18. Перечень КМОП-технологий фирмы “X-FAB”, доступных в режиме “кремниевой мастерской” // Официальный сайт фирмы “X-FAB”. URL: http://www.xfab.com/en/technology/cmos/ (дата обращения: 10.03.2013).

19. Информация о технологиях ОАО “Ангстрем” // Официальный сайт ОАО “Ангстрем”. URL: http://www.angstrem.ru/tehnology/ (дата обращения: 10.03.2013).

20. Информация о технологиях ОАО “НИИМЭ и Микрон” // Официальный сайт ОАО “НИИМЭ и Микрон”. URL: http://mikron.sitronics.ru/products/micron/technology/ (дата обращения: 10.03.2013).

21. *Kozlowski L.J., Bailey R.B., Cabelli S.C., Cooper D.E., McComas G., Vural K., Tennant W.E.* 640×480 PACE HgCdTe FPA // Proc. SPIE. 1992. V. 1735. P. 163–174.

22. *Брунев Д.В., Варавин В.С., Васильев В.В., Дегтярев Е.В., Дворецкий С.А., Добровольский П.П., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Крайлюк А.Д., Марчишин И.В., Михайлов Н.Н., Предеин А.В., Сабинина И.В., Сидоров Ю.Г., Сусляков А.О., Якушев М.В., Асеев А.Л.* Инфракрасные фотоприемные устройства второго поколения на основе оптимизированных ГЭС КРТ МЛЭ // Тез. докл. Российского совещания по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники “Фотоника-2008”. Новосибирск, 2008. С. 4.

23. *Васильев В.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Марчишин И.В., Михайлов Н.Н., Предеин А.В., Ремесник В.Г., Сабинина И.В., Сидоров Ю.Г., Сусляков А.О.* Матричный фотоприемник 320×256 со встроенным коротковолновым отрезающим фильтром // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 36–41.