

УДК 621.382 : 621.383.5

## ПРОМЫШЛЕННО ОРИЕНТИРОВАННЫЕ РАЗРАБОТКИ КРЕМНИЕВЫХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИК-ФОТОПРИЁМНИКОВ

А. И. Козлов, И. В. Марчишин

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

Рассмотрены особенности организации кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК-фотоприёмников. Представлен обзор промышленно ориентированных разработок линейных ( $1 \times 32$ ,  $1 \times 288$ ,  $1 \times 576$ ) и матричных ( $32 \times 32$ ,  $128 \times 128$ ,  $160 \times 128$ ,  $320 \times 256$ ) кремниевых мультиплексоров для считывания фотосигналов детекторов среднего и дальнего спектральных ИК-диапазонов на основе соединений кадмий—ртуть—теллур, свинец—олово—теллур и многослойных структур с квантовыми ямами. Выполнен анализ температурного разрешения матричных ИК-фотоприёмников на базе мультиплексоров с построчным и кадровым накоплением фотосигналов, разработанных с использованием КМОП-технологии с проектными нормами от микронных до глубоко субмикронных. Приведены типичные параметры мультиплексоров и характеристики некоторых ИК-фотоприёмников, созданных в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

*Ключевые слова:* кремниевый мультиплексор, схема считывания фототоков, ИК-фотоприёмник.

**Введение.** Эффективная работа современных многоэлементных ИК-фотоприёмников (ИК ФП) обеспечивается кремниевыми мультиплексорами (КМ), которые оптимизируют режимы работы фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и считывают электрические сигналы, полученные в результате фотоэлектрического преобразования падающего ИК-излучения в фотодетекторах. Потребность в улучшении технических характеристик тепловизионных систем в плане уменьшения эквивалентной шуму разности температур (NETD) определяет современные тенденции развития КМ [1–3]. В ходе разработки КМ главными вопросами являются оптимальный выбор их внутренней организации и кремниевой технологии с соответствующими топологическими нормами. В [4, 5] качественно сравниваются принципы организации КМ. В [6–8] приводятся оценки значений NETD системы «ФЧЭ—канал считывания мультиплексора» для матричных мультиплексоров с построчным и кадровым накоплением (ПН и КН) фотосигналов ИК-детекторов. Сравнение проведено для случая фотодиодов (ФД), выполненных на основе соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ) и характеризующихся существенными темновыми и фоновыми токами, при большом апертурном угле ( $\Theta/2 = 30^\circ$ ), большом размере элементарной ячейки  $35 \times 35$  мкм и 1,0 мкм технологии изготовления КМ [6].

Целью данной работы является рассмотрение основ создания унифицированной серии КМ, предназначенных для считывания и предварительной обработки фотосигналов с линейных и матричных фотодетекторов спектральных ИК-диапазонов 8–14 мкм и 3–5 мкм и ориентированных на изготовление по промышленной технологии. В первую очередь следует рассмотреть особенности организации и практического применения всех вариантов КМ с поэлементным, построчным и кадровым накоплением фотосигналов. Далее необходимо обобщить результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) и направленных на разработку и создание КМ как на экспериментальной, так

и на промышленных технологических базах. При этом требуется проанализировать влияние проектных норм современной КМОП-технологии на характеристики тепловизионного прибора на основе совершенных ФЧЭ с низкими темновыми токами и высокими дифференциальными сопротивлениями, что позволит оптимизировать выбор варианта организации КМ и технологии изготовления перспективных образцов КМ для фотоприёмников дальнего спектрального ИК-диапазона.

Практический интерес к длинноволновым ИК ФП на основе КРТ-детекторов с разной (9,0; 9,1; 9,5; 10,3; 11,0; 11,5 мкм) длиной волны максимума спектральной чувствительности  $\lambda_{\max}$  (см., например, номенклатуру фирмы "Sofradir", Франция [1]) потребовал анализа зависимости NETD ИК ФП на базе КМ с разной организацией от  $\lambda_{\max}$  КРТ-фотодиодов, изготовленных в ИФП СО РАН [9].

В данном обзоре представлена серия из 15 кремниевых мультиплексоров, разработанных авторами для изготовления по экспериментальной кремниевой технологии ИФП СО РАН и промышленной КМОП-технологии на производственных базах ОАО «Интеграл» (Беларусь), ФГУП «НПП "Восток"» (г. Новосибирск), ОАО «НИИМЭ и Микрон» и ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград).

**Особенности организации кремниевых мультиплексоров.** В наиболее общем виде КМ с классической организацией (аналог фирмы "Indigo Systems Corporation", США) показан на рис. 1. Такой мультиплексор состоит из набора элементарных ячеек считывания фотосигнала и системы коммутации сигнального напряжения элементарных ячеек на один или несколько выходов, включающей соответствующие усилители сигналов и управляемой цифровым блоком адресации. Каждая элементарная ячейка считывания фотосигнала может содержать интегратор, усилитель, адресный ключ и устройство согласования ФЧЭ и интегратора [1].

Наиболее часто в качестве устройства согласования берётся простая схема прямой инжекции (ПИ) фототока через входной МОП-транзистор соответствующей полярности [4]. В случае необходимости обеспечения высокой однородности смещения ФЧЭ обычно применяется схема буферированной прямой инжекции (БПИ), в которой используется корреляция электрофизических параметров близко расположенных транзисторов дифференциального

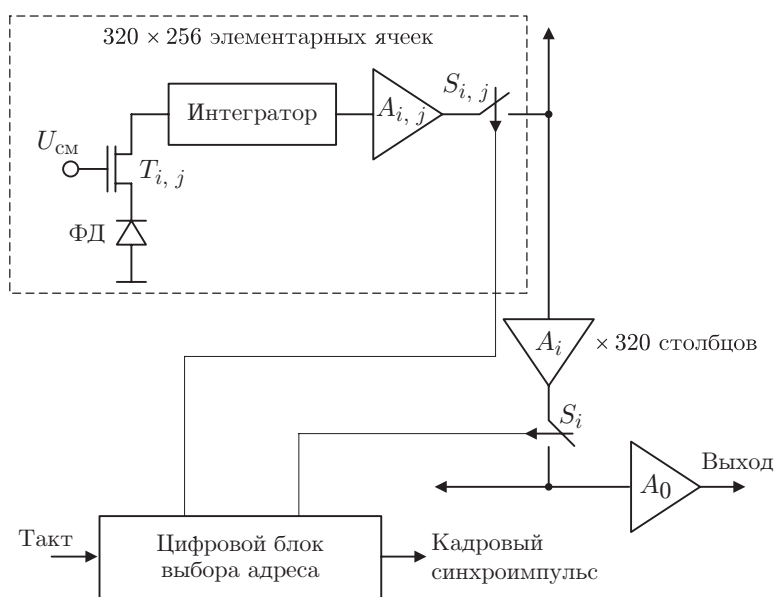


Рис. 1. Структурная схема кремниевого матричного мультиплексора с кадровым накоплением и прямой инжекцией фототока

каскада операционного усилителя [10]. При работе с высокоомными ФЧЭ или при накоплении малых (до  $10^{-14}$  А) входных токов может применяться схема трансимпедансного усилителя с конденсатором в цепи обратной связи. В последнем случае ФЧЭ, как правило, допускают большие напряжения смещения  $U_{см}$ , и поэтому возможен второй, более простой, вариант — интегрирование входного тока на ёмкости накопления, включённой параллельно детектору без устройства согласования. Такой вариант обычно реализуется с истоковым повторителем в каждой элементарной ячейке считывания и называется истоковым повторителем на детектор (ИПД) [1, 11].

Интегратор может быть расположен в каждой элементарной ячейке считывания, в каждом столбцовом канале считывания или один на всю матрицу. В зависимости от этого мультиплексоры могут быть с кадровым накоплением, с построчным накоплением или с поэлементным накоплением [4, 7, 8, 12, 13].

Мультиплексоры с поэлементным накоплением часто реализуются в виде системы коммутации с цифровым блоком адресации, выполненными на одном кремниевом кристалле, и внешним интегратором, т. е. в виде КМ с внекристальным накоплением (ВКН) [5, 14]. При этом усреднение фотосигнала может осуществляться только в течение времени адресации к выбранному фотодиоду, что ограничивает кадровую частоту. Однако КМ с ВКН предоставляют прямой доступ (ПД) к элементам фотоприёмной матрицы, высокую однородность смещения ФЧЭ и возможность работы с большими темновыми и/или фоновыми токами.

Матричные мультиплексоры с построчным накоплением (ММПН) обладают большой программируемой ёмкостью накопления и высоким динамическим диапазоном и обеспечивают работу с КРТ-диодами, имеющими большие темновые и/или большие фоновые токи, возможность вычитания постоянного уровня (ВПУ) индивидуально для каждой строки КРТ-фотодиодов и существенно более низкие требования к величине сопротивления подложки матрицы ФЧЭ, чем в случае матричных мультиплексоров с кадровым накоплением (ММКН), когда при одновременном накоплении суммарный ток всей матрицы КРТ-фотодиодов протекает через сопротивление подложки матрицы ФЧЭ [4–8]. ИК-фотоприёмники форматом  $256 \times 256$  и  $384 \times 288$  на базе ММПН в настоящее время производят, в частности, ФГУП «НПО "Орион"» (Москва) [12].

Наибольшее распространение получили ММКН, поскольку они могут работать в режиме одновременного накопления фотосигналов для всех ФЧЭ матрицы — режиме накопления с последующим считыванием [1, 4–8, 13]. Организация режима накопления во время считывания несколько ухудшает параметры ИК ФП вследствие того, что часть ёмкости накопления приходится отделять КМОП-ключом для формирования дополнительной ёмкости и реализации схемы выборки—хранения, обеспечивающей этот режим [1].

Особый интерес представляют достаточно длинные ( $1 \times 576$ ) линейные мультиплексоры (ЛМ) [15, 16], которые при формировании полноформатного ( $768 \times 576$ ) изображения позволяют полностью исключить механическую развёртку по одной из координат [17]. Главные особенности однорядного мультиплексора заключаются, во-первых, в возможности размещения в каждой ячейке большой программируемой ёмкости накопления, во-вторых, в возможности построения входного узла по схеме БПИ [10, 17], что позволяет успешно использовать его для работы с КРТ-фотодиодами дальнего (8–14 мкм) спектрального ИК-диапазона в условиях значительных темновых и/или фоновых токов и жёстких требований к однородности напряжений смещения [17, 18]. При обеспечении надлежащего уровня технологии изготовления многоэлементной фоточувствительной структуры или в случае, когда не требуется достижение предельных характеристик ИК ФП, применение однорядных мультиплексоров может оказаться экономически более целесообразным по сравнению с многорядными линейчатыми КМ.

Линейный мультиплексор  $1 \times 32$  выполнен по схеме ИПД и предназначен для создания монолитного ИК ФП на основе соединения свинец—олово—теллур (СОТ). В остальном работа ЛМ  $1 \times 32$  аналогична работе КМ для гибридных фотоприёмников. Конструкция данного ЛМ обеспечивает его работу при температуре порядка 4 К [19].

**Технология изготовления кремниевых мультиплексоров.** Базовой технологией изготовления охлаждаемых кремниевых мультиплексоров в настоящее время является КМОП-технология. Стремительное уменьшение топологических норм КМОП-технологии обеспечило новый подход к разработке кремниевых интегральных схем (ИС) в целом и мультиплексоров в частности, сформированный в виде «системы на кристалле» [20, 21].

Фирма "Х-ФАВ" (Германия) предлагает набор КМОП-технологий, доступных в режиме «кремниевой мастерской», в диапазоне проектных норм от 0,18 до 1,0 мкм [22]. Наиболее передовые российские предприятия ОАО «Ангстрем» и ОАО «НИИМЭ и Микрон» обладают КМОП-технологиями с проектными нормами 130–180 нм, сохраняя при этом технологии до 1,0 мкм [23, 24]. Это определяется тем, что субмикронные и микронные технологии имеют ряд неоспоримых преимуществ, например: простые, быстрые, недорогие схемотехнические и топологические решения, традиционные напряжения питания. Кроме того, выбор базовой технологии конкретной ИС обычно осуществляется совместно фирмами-производителями и потребителями ИС с учётом реального и прогнозируемого «жизненного цикла» базовой технологии, ИС и электронной аппаратуры на их основе [20]. ИФП СО РАН обладает экспериментальными технологиями с проектными нормами от 1–3 мкм и до наноразмеров [25]. Одна из основных мировых фирм TSMC (Тайвань) предлагает КМОП-технологии с проектными нормами от микронных и до 28 нм, однако фотоприёмники видимого диапазона производятся на базе топологических норм КМОП-технологии 90 нм и более [26].

Особая задача создания термостойких (500–600 °С) кремниевых мультиплексоров для монолитных ИК-фотоприёмников потребовала проведения фундаментальных исследований по разработке специальной технологии с привлечением специалистов по термообработкам и металлизации. Часть научных исследований выполнена на разных технологических базах (ИФП СО РАН, ОАО «НИИМЭ и Микрон» и ОАО «Интеграл») [27]. Предложено несколько возможных вариантов технологических решений этой задачи. В ОАО «Интеграл» имеется серийная технология тугоплавкой металлизации PtSi + TiW, которая требует модифицирования для таких применений.

Монолитные ФП по сравнению с гибридными обладают двумя существенными достоинствами: надёжностью и технологичностью, проигрывая по остальным параметрам, так как ФЧЭ занимает только часть ячейки матрицы. Даже при использовании передовых кремниевых технологий следует учитывать существенные краевые эффекты в конструкции ФЧЭ [27]. Возможные перспективы решения этой задачи могут быть связаны с разработкой трёхмерной 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.

**Анализ температурного разрешения ИК ФП спектрального диапазона 8–14 мкм** проводился для ММКН, ММПН при реально достижимых параметрах КРТ-фотодиодов и ФЧЭ, созданных с использованием многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ) на основе GaAs/AlGaAs. Оценка значений NETD получена как отношение напряжения шума системы «ФЧЭ—канал считывания мультиплексора» к температурной чувствительности ИК ФЧЭ с квантовой эффективностью  $\eta$ , равной 0,7 для КРТ ФД и 0,03 для МСКЯ [3]. Напряжение шума  $U_n$  такой системы, приведённое к ёмкости накопления, рассчитывалось

в зависимости от параметра  $R_0 A^*$  [28, 29] при температуре фона  $T_\Phi = 300$  К и апертурном угле  $\Theta = 30^\circ$ . Упрощённое выражение для иллюстрации расчётов  $U_n$  имеет вид [30]

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

где  $R_{\text{det}}$  — дифференциальное сопротивление детектора;  $I_{\text{inp}}$  — общий ток детектора в рабочей точке;  $C_{\text{inp}}$  — ёмкость входного узла;  $\eta_{\text{inj}}$  — коэффициент инжекции тока детектора;  $C_{\text{int}}$  — ёмкость накопления;  $t_{\text{int}}$  — 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;  $\Delta f$  и  $\Delta f_a$  — полосы пропускания интегратора и усилительного каскада;  $k$  — постоянная Больцмана.

Время интегрирования в случае ММКН и ёмкость накопления в случае ММПН определялись из условия полного заполнения входным током ёмкости накопления соответствующего мультиплексора. Размер элементарной ячейки  $25 \times 25$  мкм, формат фотоприёмной матрицы  $320 \times 256$  элементарных ячеек, что эквивалентно формату  $640 \times 512$  с четырьмя выходами. В спектральном диапазоне 8–14 мкм для оценки эффективности ИК ФП были выбраны полосы фоточувствительности КРТ ФД 7,7–9,5 мкм и 7,7–11 мкм и МСКЯ 8–9 мкм [1]. Рассмотрение параметров системы «ФЧЭ—канал считывания мультиплексора» при разной длине волны максимума спектральной чувствительности КРТ-фотодиодов проводилось для ММПН и ММКН, разработанных по одной и той же 0,6 мкм КМОП-технологии [22].

Преимущества ММПН в дальнем спектральном ИК-диапазоне наглядно показывает рис. 2. Эквивалентная шуму разность температур ИК ФП на основе КРТ-фотодиодов с реальными параметрами и ММКН минимальна при длине волны максимума спектральной чувствительности диодов  $\lambda_{\text{max}}$  в диапазоне 8,5–10,5 мкм. Зависимость NETD от  $\lambda_{\text{max}}$  для ИК ФП на базе КРТ-фотодиодов и ММПН имеет минимум при длине волны максимума спектральной чувствительности около 10,5 мкм, и при дальнейшем увеличении  $\lambda_{\text{max}}$  КРТ-фотодиодов ММПН в составе ИК ФП начинает обеспечивать лучшее температурное разрешение, чем ММКН.

Проведён анализ NETD фотоприёмников длинноволнового ИК-диапазона с КРТ-фотодиодами при разных  $\lambda_{\text{max}}$  и фоторезисторами на основе МСКЯ с типичной длиной волны максимума спектральной чувствительности в зависимости от проектных норм КМОП-технологии изготовления КМ с КН и ПН (рис. 3). Температурное разрешение ФП дальнего спектрального ИК-диапазона на базе КРТ-фотодиодов и ММПН практически не зависит от топологических норм кремниевой технологии и находится в диапазоне 12–15 мК. В случае использования для построения ИК ФП длинноволновых КРТ-фотодиодов и ММКН эквивалентная шуму разность температур существенно уменьшается до технологии с проектными нормами 0,6 мкм и затем вплоть до топологических норм 0,18 мкм снижается гораздо медленнее с некоторым преимуществом для меньшей длины волны

\* Параметр  $R_0 A$  — произведение дифференциального сопротивления  $R_0$  при напряжении смещения, равном нулю, и площади  $A$  фотодетектора. Этот параметр характеризует уровень технологии ФЧЭ и, соответственно, предельные фотоэлектрические характеристики ИК-детекторов и обеспечивает возможность сравнения и оценки фотодетекторов с разной площадью.

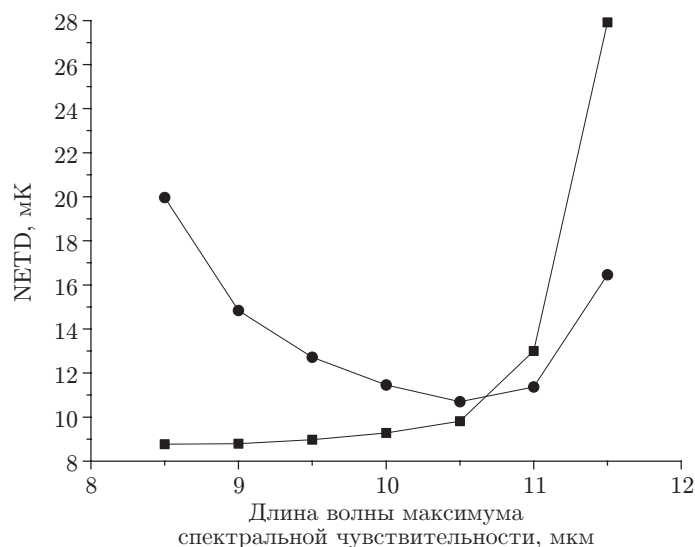


Рис. 2. Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП на основе ММКН (■) и ММПН (●) от длины волны максимума спектральной чувствительности КРТ-фотодиодов

максимума спектральной чувствительности: 8–9 мК при  $\lambda_{max} = 9,5$  мкм и 11–13 мК при  $\lambda_{max} = 11$  мкм. Температурное разрешение ИК ФП в составе ММКН и фоторезисторов на основе МСКЯ дальнего спектрального ИК-диапазона достигает минимальных значений  $\approx 15$  мК при проектных нормах КМОП-технологии 0,25–0,6 мкм и менее. Следует отметить, что прямое использование ММКН с максимальной ёмкостью накопления, достигнутой при проектных нормах 0,18–0,25 мкм КМОП-технологии, в составе ИК ФП на основе МСКЯ может привести к увеличению NETD из-за неполного использования ёмкости интегратора и соответствующего уменьшения отношения сигнал/шум.

**Кремниевые мультиплексоры, разработанные в ИФП СО РАН для разных предприятий-изготовителей.** В ИФП СО РАН создаётся промышленно ориентированная серия линейных ( $1 \times 32$ ,  $1 \times 288$ ,  $1 \times 576$ ) и матричных ( $32 \times 32$ ,  $128 \times 128$ ,  $160 \times 128$ ,  $320 \times 256$ ) КМ (примеры кристаллов приведены на рис. 4) для считывания фотосигналов детекторов среднего и дальнего спектральных ИК-диапазонов на основе соединений КРТ, СОТ и МСКЯ (табл. 1). На базе данных КМ изготовлен ряд линейных и матричных ИК ФП спектральных диапазонов 8–14 мкм и 3–5 мкм. Характеристики некоторых из них приведены в табл. 2 [5, 7, 14, 15, 18, 31, 32].

Из табл. 2 видно, что линейные фотоприёмники форматом  $1 \times 576$  на основе мультиплексоров ЛМ-1, изготовленных по стандартной промышленной 1,2 мкм КМОП-технологии, обеспечивают создание полноформатных тепловизионных систем с высоким ( $\sim 14$  мК) температурным разрешением [5]. Кремниевый мультиплексор ЛМ-2, построенный по схеме БПИ, с высокой (не более  $\pm 6$  мВ) однородностью смещения фотодетекторов позволяет успешно работать с КРТ-фотодиодами дальнего (8–14 мкм) спектрального ИК-диапазона (рис. 4, а) [17]. Мультиплексор ЛМ  $1 \times 288$  выполнен на базе стандартной 1,0 мкм КМОП-технологии в формате ИК ФП фирмы "Sofradir" с шагом 28 мкм, имеет пониженное энергопотребление и при изготовлении обеспечивает высокий процент выхода годных кристаллов (рис. 4, б) [18].

Кремниевые мультиплексоры КРТ32N и МХ-4 с ПД и ВКН, созданные на основе экспериментальной технологии в ИФП СО РАН (*n*-МОП и КМОП соответственно), применены при разработке и оптимизации конструкций ФЧЭ и технологий изготовления

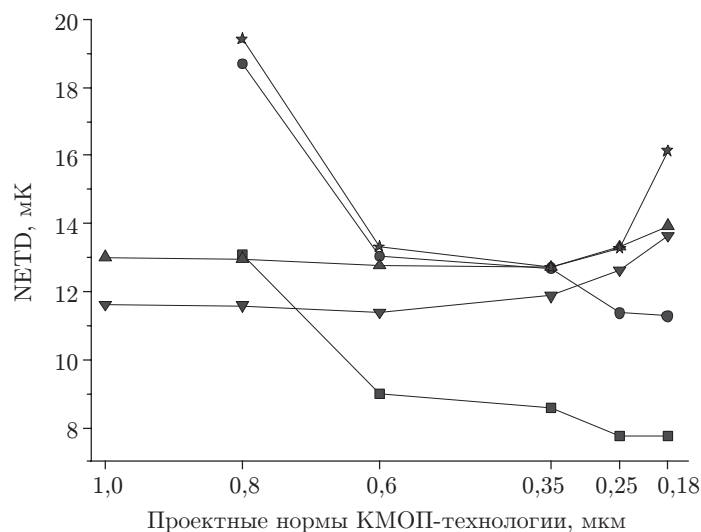


Рис. 3. Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП на основе КРТ-фотодиодов с  $\lambda_{\max} = 9,5$  мкм и  $\lambda_{\max} = 11$  мкм и на основе МСКЯ с  $\lambda_{\max} = 8,5$  мкм от проектных норм КМОП-технологии изготовления ММКН и ММПН (■ — 9,5 мкм КРТ + ММКН; ● — 11 мкм КРТ + ММКН; ▲ — 9,5 мкм КРТ + ММПН; ▼ — 11 мкм КРТ + ММПН; ★ — 8,5 мкм МСКЯ + ММКН)

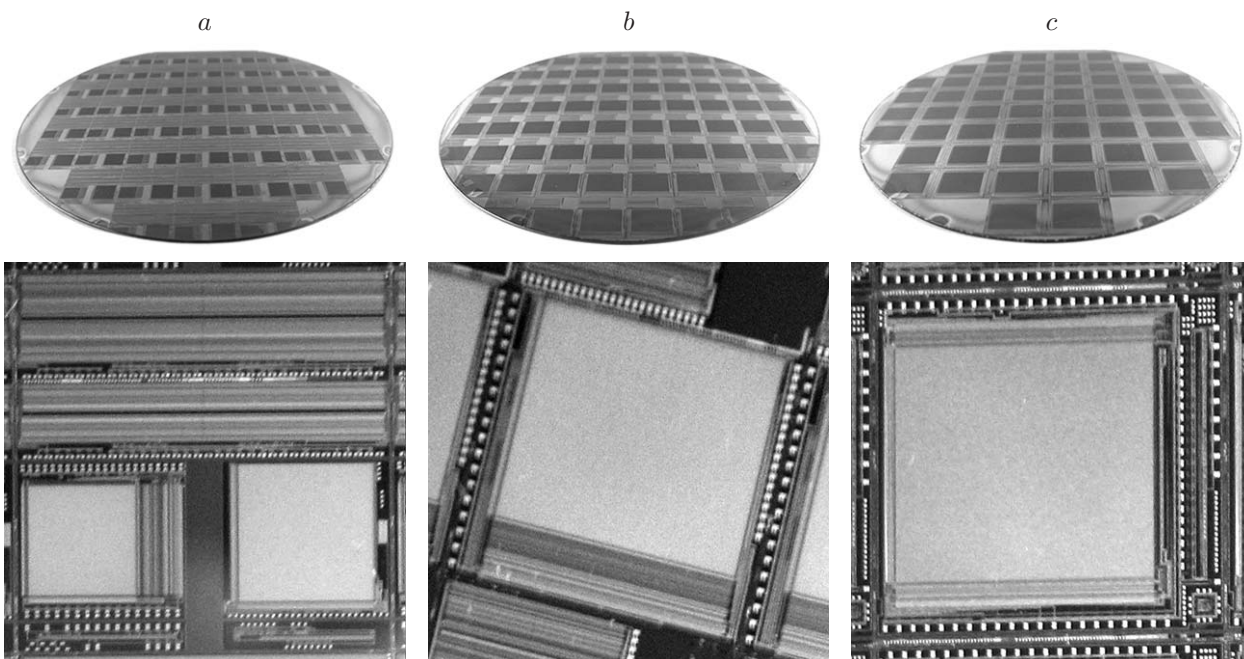


Рис. 4. Примеры кристаллов КМ (разработка ИФП СО РАН, производство ОАО «Ангстрем»): *a* — мультичип из четырёх кристаллов ( $128 \times 128$  (ММ-А, ММПН 128),  $1 \times 576$  (ЛМ-1, ЛМ-2)); *b* — мультичип из двух кристаллов: ( $320 \times 256$  (ММПН 320),  $1 \times 288$  (ЛМ 1  $\times$  288)); *c* — кремниевый мультиплексор ММ форматом  $320 \times 256$  с кадровым накоплением фотосигналов

Таблица 1

**Параметры кремниевых мультиплексоров, разработанных в ИФП СО РАН**

Наименование	Формат	Особенности схемы	Шаг, мкм	Ёмкость накопления, $10^6$ электронов	Тактовая частота, МГц	Макси- мальный входной ток, нА	Размах выходного напряжения, В	Динамический диапазон, дБ	Техно- логическая база для изготовления
Мультиплексоры для монолитных ИК ФП:									
линейный									
ЛМ 1 × 32	1 × 32	ИПД	200	320	> 1	500	1,0	79	ИФП СО РАН
матричные									
КРТ32N	32 × 32	ПД, ВКН	150 × 150	—	—	—	—	—	ИФП СО РАН
МКРТ32	32 × 32	ПД, ВКН	150 × 150	—	—	—	—	—	ОАО «Интеграл»
КРТ16М	160 × 128	ПИ, ПН, ВПУ	75 × 75	15–150	> 5	150	1,0*	> 79*	ОАО «Микрон»
КРТ32М	320 × 256	ПИ, ПН	50 × 50	10–80	5	100	1,5*	> 79*	ОАО «Интеграл»
Мультиплексоры для гибридных ИК ФП:									
линейные									
ЛМ 1 × 288	1 × 288	ПИ	28	18–300	> 5	300	2,0	> 79	ОАО «Ангстрем»
ЛМ-1 1 × 576	1 × 576	ПИ	30	18–260	> 3,5	300	3,0	> 79	
ЛМ-2 1 × 576	1 × 576	БПИ	30	18–260	> 3,5	300	3,0	> 79	
матричные									
МХ-4	128 × 128	ПД, ВКН	50 × 50	—	—	—	—	—	ИФП СО РАН
МХ-V	128 × 128	ПИ, КН	50 × 50	28	> 1	150	0,3	78	ФГУП «Восток»
ММ-V	128 × 128	ПИ, КН	50 × 50	28	> 1	150	0,3	78	
ММ-A	128 × 128	ПИ, КН	50 × 50	37,5	> 5	150	0,5	79	ОАО «Ангстрем»
ММПН 128	128 × 128	ПИ, ПН, ВПУ	40 × 40	18–300	> 2	300	2,1	78	
ММ 320	320 × 256	ПИ, КН	40 × 40	18	> 5	> 40	> 0,8	76	
ММПН 320	320 × 256	ПИ, ПН, ВПУ	35 × 35	18–300	> 5	300	2,1	> 79	

Примечание: \* — ожидаемые параметры.



Таблица 2

## Характеристики некоторых гибридных ИК-фотоприёмников, созданных на основе представленных мультиплексоров

Размерность фотоприёмников, шаг размещения элементов, мкм	Используемый мультиплексор	Тип и материал фотоприёмной матрицы	Длинноволновая граница фоточувствительности, мкм	Эквивалентная шуму разность температур, мК	Время накопления, мкс	Частота кадров, Гц
128 × 128, 50	ММ-В	фоторезисторы на квантовых ямах GaAs/AlGaAs*	8,3	22	5000	50
			4,3**	180	256	50
128 × 128, 40 320 × 256, 40 320 × 256, 35 1 × 576, 30	МХ-4 ММПН 128 × 128 ММ 320 × 256 ММПН 320 × 256 ЛМ-1 1 × 576	$n^+p$ -фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe	6,0	17	256	50
			8,7	30	60	50
			8,3	17	100	2,5
			13,1	32	100	2,5
			10,2	16	65	60
			~5	25	6000	30
			~11	20	130	30
10,2	14	72	25			

Примечания: \* — рабочая температура 65 К, \*\* — слабоохлаждаемый модуль на термоэлектрическом элементе Пельтье (рабочая температура 215 К).

КРТ-фотодиодов и фоторезисторов на МСКЯ для монолитных и гибридных ИК ФП. С их использованием созданы автоматизированные установки на основе ПК для исследования характеристик фотодетекторов по полю матрицы и получения экспериментальных ИК-изображений [5, 14, 27]. Мультиплексор МХ-4  $128 \times 128$  позволяет работать с ИК-фотодетекторами длинноволнового диапазона (8–14 мкм) с большим фоновым током в тепловизионных системах, где не требуется высокой частоты обновления кадров, и обеспечивает при этом эквивалентную шуму разность температур на уровне 17–32 мК [5].

Кремниевые мультиплексоры с построчным накоплением фотосигналов КРТ-фотодиодов КРТ16М (стандартная 1,2 мкм КМОП-технология), КРТ32М (типовая 1,2 мкм КМОП-технология), ММПН 128 и ММПН 320 (стандартные 1,2 мкм и 1,0 мкм КМОП-технологии соответственно) предназначены для использования на этапе доработки технологии изготовления ИК ФЧЭ, когда ожидаются большие темновые токи, и изготовления слабоохлаждаемых и охлаждаемых ИК ФП среднего и дальнего спектральных диапазонов. На основе ММПН созданы гибридные фотоприёмники длинноволнового ИК-диапазона форматом  $128 \times 128$  и  $320 \times 256$  элементов разложения с температурным разрешением порядка 16–20 мК (см. рис. 4 *a, b* и рис. 5, *a*) [5, 6, 18].

Кремниевые мультиплексоры МХ-V, ММ-В, ММ-А и ММ 320 с кадровым накоплением фотосигналов ФЧЭ являются универсальными, допускают широкий диапазон регулирования времени накопления (от 10 мкс и до времени кадра) и обеспечивают работу средне- и длинноволновых матриц ФЧЭ, выполненных на различных полупроводниковых материалах [5, 14, 18, 31, 32]. Так, например, при считывании фотосигналов с матрицы фоторезисторов на квантовых ямах GaAs/AlGaAs кремниевые мультиплексоры МХ-V и ММ-В обеспечили эквивалентную шуму разность температур около 22 мК [5, 7, 8]. В работе [33] показано, что изготовление унифицированных мультиплексоров  $128 \times 128$  на базе двух вариантов промышленных технологий (1,2 мкм КМОП с напряжением питания 5 В и толщиной рабочего окисла 25 нм (см. рис. 4, *a*, ММ-А) и 3 мкм ПЗС/КМОП с напряжением питания 9 В и толщиной рабочего окисла 45 нм (МХ-V, ММ-В)) привело лишь к незначительному ( $\sim 30\%$ ) отличию характеристик конечных тепловизионных приборов. Это свидетельствует о достаточно сложной зависимости параметров ИК ФП от

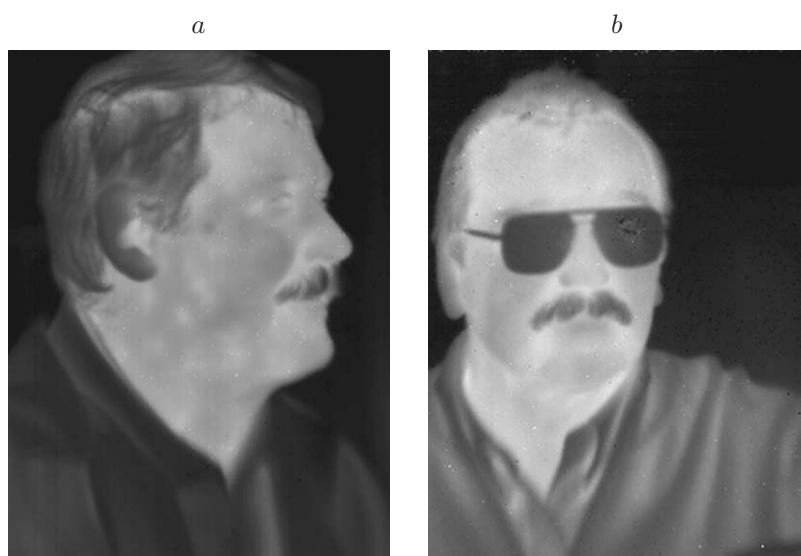


Рис. 5. Тепловые изображения  $320 \times 256$  элементов разложения: *a* — изображение получено на базе ММПН и КРТ-фотодиодов с  $\lambda_{\max} \approx 11$  мкм, *b* — на основе ММКН и КРТ-фотодиодов с  $\lambda_{\max} \approx 5$  мкм

выбранной кремниевой технологии. Гибридные фотоприёмники, созданные на основе ММ  $320 \times 256$  с КН и матриц КРТ-фотодиодов средневолнового ИК-диапазона, обеспечивают NETD порядка 25 мК (см. рис. 4, *с* и рис. 5, *б*) [6].

Отличие экспериментально достигнутой разности температур, эквивалентной шуму, от теоретических значений обусловлено наличием у КРТ-фотодиодов, используемых в данных фотоприёмниках, избыточного  $1/f$ -шума и неоднородностью параметров ФЧЭ по полю матрицы [6]. Тем не менее полученные значения близки к типичным величинам NETD для тепловизионных приборов, выпускаемых ведущими фирмами, например фирмой "Sofradir" [1].

**Заключение.** В настоящее время разработка кремниевых кристаллов мультиплекторов сформировалась как самостоятельное научно-техническое направление, фундаментальные основы которого в ИФП СО РАН были разработаны под непосредственным руководством акад. А. В. Ржанова и чл.-корр. РАН К. К. Свиташева.

В данной работе представлены результаты исследования научно-технических принципов создания кремниевых мультиплекторов. Выполнен обзор постепенно формирующейся серии линейных ( $1 \times 32$ ,  $1 \times 288$ ,  $1 \times 576$ ) и матричных ( $32 \times 32$ ,  $128 \times 128$ ,  $160 \times 128$ ,  $320 \times 256$ ) кремниевых мультиплекторов, разработанных в ИФП СО РАН на базе как экспериментальной, так и промышленной технологий. Проанализированы принципы практического выбора топологических норм КМОП-технологии с оценкой перспективы развития классического подхода к построению кремниевых мультиплекторов, заключающегося в получении и мультиплексировании сигнального напряжения от ИК-фотодетекторов на выход фотоприёмника разными способами при использовании различных ФЧЭ длинноволнового спектрального ИК-диапазона. Рассмотрены особенности организации, разработки и применения кремниевых мультиплекторов с поэлементным, построчным и кадровым накоплением фотосигналов для многоэлементных фотоприёмников среднего и дальнего спектральных ИК-диапазонов, выполненных на разных полупроводниковых материалах.

На основе проведённых исследований в ИФП СО РАН разрабатываются кремниевые мультиплекторы, ориентированные на изготовление по промышленной КМОП-технологии. Эти мультиплекторы обеспечивают создание фотоприёмников различного формата для спектральных ИК-диапазонов 8–14 мкм и 3–5 мкм с разрешением по температуре  $\sim(14\text{--}25)$  мК, что соответствует уровню мировых образцов.

Авторы выражают благодарность акад. А. Л. Асееву и д-ру физ.-мат. наук В. Н. Овсяку за полезные обсуждения и поддержку работы; д-ру физ.-мат. наук Ю. Г. Сидорову, д-ру физ.-мат. наук М. В. Якушеву и канд. физ.-мат. наук В. В. Васильеву за обсуждение разработок кремниевых мультиплекторов для КРТ-фотоприёмников и предоставленные данные по параметрам КРТ-фотодиодов; В. В. Филипповой за помощь при проектировании фотошаблонов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Продукция** фирмы "Sofradir": Охлаждаемые ИК ФП // Официальный сайт группы компаний "Sofradir". URL: <http://www.sofradir-ec.com/products-cooled.asp> (дата обращения: 4.06.2012).
2. **Продукция** фирмы "FLIR Systems, Inc." // Официальный сайт фирмы "FLIR Systems, Inc.". URL: <http://www.flir.com/cvs/cores/> (дата обращения: 4.06.2012).
3. **Rogalski A.** Infrared detectors: status and trends // Progr. Quantum Electron. 2003. **27**. P. 59–210.
4. **Mottin E., Pantigny P., Boch R.** An improved architecture of IR FPA readout circuits // SPIE. 1997. **3061**. P. 119–128.

5. **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.
6. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н.** Кремниевые мультиплексоры  $320 \times 256$  для инфракрасных фотоприемных устройств на основе КРТ-диодов // *Автометрия*. 2007. **43**, № 4. С. 74–82.
7. **Козлов А. И.** Анализ принципов построения схем кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК-фотоприемников // *Автометрия*. 2010. **46**, № 1. С. 118–129.
8. **Козлов А. И.** Особенности проектирования и некоторые реализации кремниевых мультиплексоров для инфракрасных фотоприемников // *Оптический журнал*. 2010. **77**, № 7. С. 19–29.
9. **Варавин В. С., Гутаковский А. К., Дворецкий С. А. и др.** Состояние и перспективы молекулярно-лучевой эпитаксии  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // *Прикладная физика*. 2002. № 6. С. 25–41.
10. **Bluzer N., Jensen A. S.** Current readout of infrared detectors // *Opt. Eng.* 1987. **26**, N 3. P. 241–249.
11. **Beletic J. W., Blank R., Gulbransen D. et al.** Teledyne Imaging Sensors: Infrared imaging technologies for Astronomy & Civil Space // Официальный сайт фирмы "Teledyne Scientific & Imaging, LLC". URL: [http://www.teledyne-si.com/infrared\\_visible\\_fps/Teledyne Imaging Sensor-Infrared SPIE Paper \\_7021-20\\_.pdf](http://www.teledyne-si.com/infrared_visible_fps/Teledyne Imaging Sensor-Infrared SPIE Paper _7021-20_.pdf). С. 8. (Дата обращения: 4.06.2012.)
12. **Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др.** Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // *Физика и техника полупроводников*. 2005. **39**, № 10. С. 1257–1265.
13. **Frank J. D.** Off-the-shell readout ICs standardize detector interface // *Laser Focus World*. 1998. **34**, N 3. P. 324–325.
14. **Овсяк В. Н., Васильев В. В., Галипов Н. Х. и др.** Фотоприемные устройства на основе слоев КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // *Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона*. Новосибирск: Наука, 2001. Гл. 3. С. 180–241.
15. **Васильев В. В., Голенков А. Г., Дворецкий С. А. и др.** Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  для среднего и дальнего ИК-диапазонов // *Микроэлектроника*. 2002. **31**, № 6. С. 414–422.
16. **Chamonal J. P., Audebert P., Destefanis G. et al.** Long MWIR HgCdTe butted linear arrays // *Proc. SPIE*. 1997. **3061**. P. 467–475.
17. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н.** Кремниевые мультиплексоры  $1 \times 576$  для ИК-фотодиодов на основе соединения кадмий—ртуть—теллур // *Микроэлектроника*. 2008. **37**, № 4. С. 278–286.
18. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Асеев А. Л.** Серия кремниевых мультиплексоров для КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 8–16 мкм // *Оптический журнал*. 2008. **75**, № 3. С. 60–67.
19. **Французов А. А., Сапожникова Н. В., Феофанов Г. Н.** Многоходовый электрометрический усилитель-мультиплексор, работоспособный при криогенных температурах // *Микроэлектроника*. 1996. **25**, № 4. С. 272–276.
20. **Kozlowski L. J.** Attributes and drawbacks of submicron CMOS for IR FPA readouts // *Proc. SPIE*. 1998. **3360**. P. 91–100.
21. **Kozlowski L. J.** Noise minimization via deep submicron system-on-chip integration in megapixel CMOS imaging sensors // *Opto-electron. Rev.* 2006. **14**, N 1. P. 11–18.
22. **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: 4.06.2012).

23. **Информация** о технологиях ОАО «Ангстрем» // Официальный сайт ОАО «Ангстрем». URL: <http://www.angstrem.ru/tehnology/> (дата обращения: 4.06.2012).
24. **Информация** о технологиях ОАО «НИИМЭ и Микрон» // Официальный сайт ОАО «НИИМЭ и Микрон». URL: <http://mikron.sitronics.ru/products/micron/technology/> (дата обращения: 4.06.2012).
25. **Асеев А. Л.** Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // Российские нанотехнологии. 2006. 1, № 1–2. С. 97–110.
26. **Перечень** КМОП-технологий фирмы "TSMC Limited", доступных в режиме «кремниевой мастерской» // Официальный сайт фирмы "TSMC Limited". URL: <http://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/mtm.htm> (дата обращения: 4.06.2012).
27. **Yakushev M. V., Dvoretzky S. A., Kozlov A. I. et al.** HgCdTe monolithic infrared detector // Phys. Status Solidi C. 2010. 7, N 6. P. 1681–1683.
28. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
29. **Сизов Ф. Ф.** Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых» участках спектра. Киев: Академперіодика, 2008. 460 с.
30. **Kozlowski L. J., Bailey R. B., Cabelli S. C. et al.** 640 × 480 PACE HgCdTe FPA // Proc. SPIE. 1992. 1735. P. 163–174.
31. **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.
32. **Васильев В. В., Дворецкий С. А., Есаев Д. Г. и др.** Фотоприемники на основе молекулярно-лучевой эпитаксии слоев кадмий—ртуть—теллур для среднего и дальнего ИК-диапазонов // Наука производству. 2001. 50, № 12. С. 9–11.
33. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Филиппова В. В.** Унифицированные кремниевые мультиплексоры 128 × 128 для инфракрасных фотоприемных устройств // Автометрия. 2006. 42, № 4. С. 109–118.

*Поступила в редакцию 15 июля 2011 г.*

---