

УДК 621.382 : 535.231.62

## СОЗДАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ СИГНАЛОВ ФОТОПРИЁМНИКОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

М. А. Демьяненко, А. И. Козлов, И. В. Марчишин, В. Н. Овсюк

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

Рассмотрены особенности построения аналого-цифровых интегральных схем считывания фотосигналов гибридных многоэлементных инфракрасных фотоприёмников (кремниевых мультиплексоров). Проведена оценка эквивалентной шуму разности температур инфракрасных фотоприёмников на базе мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением сигналов фоточувствительных элементов спектральных диапазонов 8–14 и 3–5 мкм. Разработаны кремниевые мультиплексоры для инфракрасных фотоприёмников, создаваемых с применением фотодиодов на основе соединения кадмий—ртуть—теллур и фотодетекторов на многослойных структурах с квантовыми ямами. Изготовленные мультиплексоры обеспечивают возможность использования матричных и линейчатых фотоприёмных кристаллов, в том числе имеющих повышенные темновые токи, для производства инфракрасных фотоприёмников с температурным разрешением, соответствующим уровню мировых образцов.

*Ключевые слова:* кремниевый мультиплексор, интегральная схема считывания фотосигналов, инфракрасный фотоприёмник, фотодиод на основе соединения кадмий—ртуть—теллур, фотодетектор на основе многослойных структур с квантовыми ямами.

DOI: 10.15372/AUT20160615

**Введение.** Современные потребности рынка инфракрасных фотоприёмников (ИК ФП) и необходимость совершенствования технических характеристик тепловизионных систем в плане улучшения пространственного разрешения, достигаемого путём увеличения формата фотоприёмной матрицы и уменьшения размеров фоточувствительных элементов (ФЧЭ), определяют актуальные тенденции развития аналого-цифровых интегральных схем считывания фотосигналов — кремниевых мультиплексоров (КМ) [1–6]. Наиболее часто для создания гибридных ИК ФП используются фотодиоды на основе соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ), выделяющиеся среди других ФЧЭ высокой квантовой эффективностью, и фотодетекторы на многослойных структурах с квантовыми ямами (МСКЯ), отличающиеся высокой однородностью параметров по полю фотоприёмной матрицы [1–3].

Существует много публикаций, посвящённых разработке, изготовлению и применению кремниевых мультиплексоров в составе ИК ФП на основе КРТ-фотодиодов и МСКЯ-фотодетекторов [1–5]. Тем не менее некоторые научные вопросы создания и использования кремниевых мультиплексоров не проанализированы и не изучены в полной мере [1–6].

Цель данного исследования — изучение принципов организации и разработки кремниевых мультиплексоров, анализ технических характеристик ИК ФП, а также рассмотрение вопросов оптимального выбора и/или модернизации кремниевой технологии и применения изготовленных мультиплексоров для создания специальных и недорогих гражданских тепловизионных приборов.

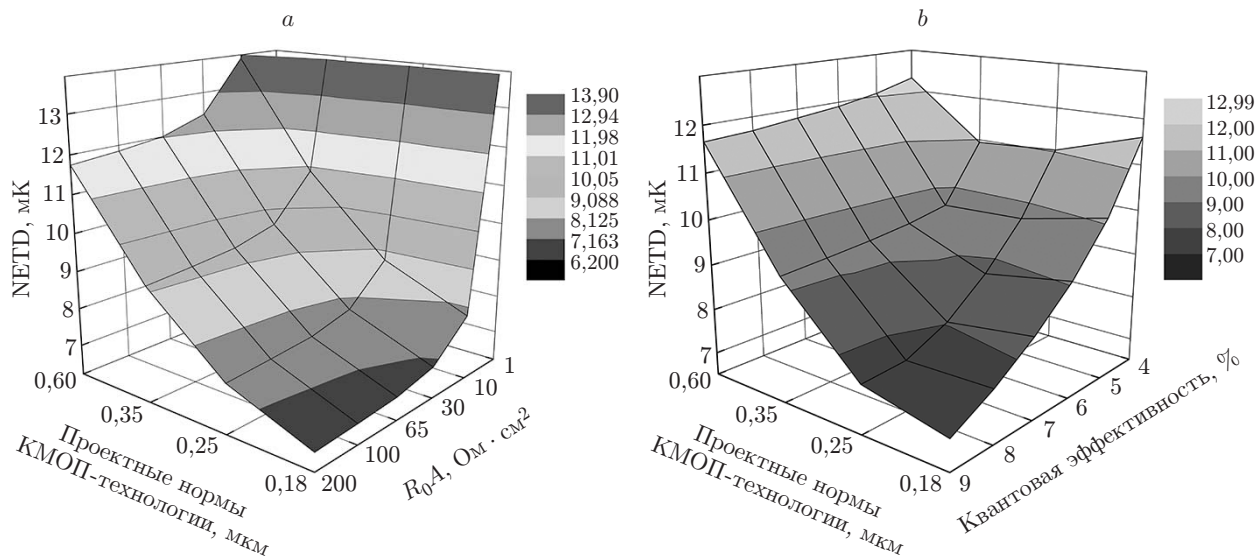


Рис. 1. Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП: *a* — от  $R_0A$  КРТ-фотодиодов ( $\lambda_{\max} = 11$  мкм,  $\eta = 0,7$ ) и от проектных норм КМОП-технологии изготовления ММКН; *b* — от  $\eta$  МСКЯ-фотодетекторов ( $\lambda_{\max} = 9$  мкм,  $R_0A = 2000$  Ом·см<sup>2</sup>) и от проектных норм КМОП-технологии

**Анализ схем прямой инжекции с аналоговым и цифровым каналами считывания.** Рассмотрены особенности кремниевых мультиплексоров со схемой прямой инжекции сигнала в каждой ячейке и аналоговым каналом считывания. Проведена оценка эквивалентной шуму разности температур (NETD) ИК ФП, разрабатываемых на базе мультиплексоров с кадровым накоплением сигналов МСКЯ-фотодетекторов, а также на основе мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением сигналов КРТ-фотодиодов [2, 3]. Использование NETD для сравнения разных ИК ФП сочетает в себе простоту вычисления и наглядность непосредственного анализа ожидаемого отношения сигнал/шум для данной входной разности температур 1 К [2, 3, 5, 6]. Исследование эквивалентной шуму разности температур ИК ФП длинноволнового ИК-диапазона проведено в зависимости от параметра  $R_0A^*$ , квантовой эффективности  $\eta$ , длины волны максимума спектральной чувствительности  $\lambda_{\max}$  ФЧЭ и от проектных норм КМОП-технологии изготовления кремниевых мультиплексоров. Аналитические оценки NETD с помощью выражений, полученных в [2, 3, 6], представлены на рис. 1–3.

Рис. 1 демонстрирует особенности оптимального выбора кремниевой технологии изготовления мультиплексоров в зависимости от параметров ФЧЭ. Преимущества применения матричных мультиплексоров с кадровым накоплением (ММКН) для МСКЯ-фотодетекторов и матричных мультиплексоров с построчным накоплением (ММПН) для КРТ-фотодиодов в длинноволновом ИК-диапазоне иллюстрируют рис. 2, 3. Время накопления определялось из условия полного заполнения входным током ёмкости накопления мультиплексора ( $C_{\text{int}}$ ) с учётом допустимого напряжения питания выбранной кремниевой технологии и заданной дискретности величины  $C_{\text{int}}$  для ММПН (рис. 4) [2, 3, 5, 7, 8]. Параметры ИК ФП рассматривались для ММКН (шаг ячеек считывания  $20 \times 20$  мкм), создаваемого по КМОП-технологии с проектными нормами 0,18 мкм, кроме специально указанных случаев [2, 3, 6].

\*Параметр  $R_0A$  — произведение дифференциального сопротивления  $R_0$  при напряжении смещения, равном нулю, на площадь  $A$  фоточувствительного элемента. Параметр  $R_0A$  характеризует уровень технологии и предельные фотоэлектрические характеристики ФЧЭ.

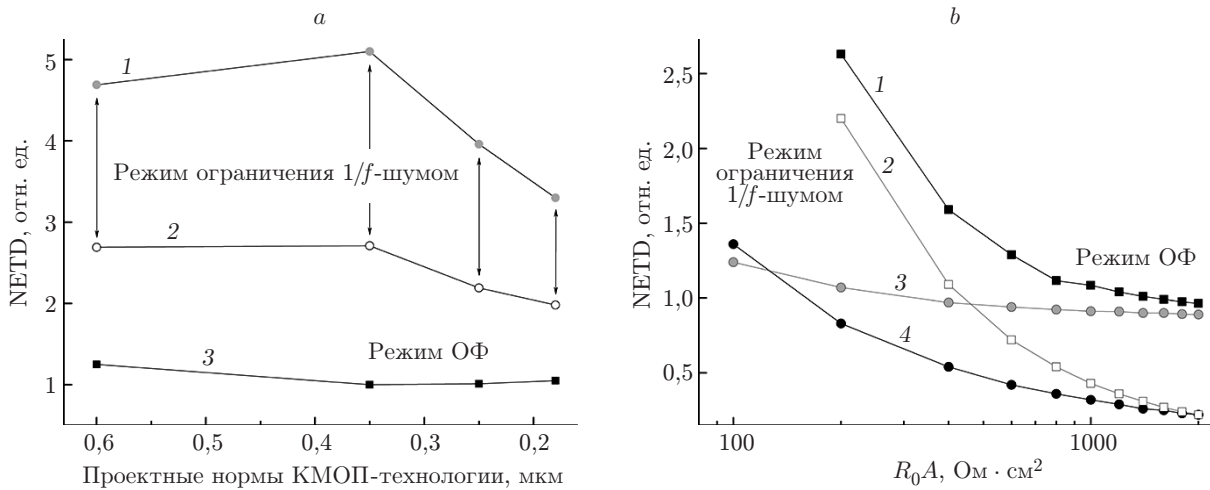


Рис. 2. Зависимости эквивалентной шуму разности температур ИК ФП на основе МСКЯ-фотодетекторов с  $\lambda_{\max} = 9$  мкм: *a* — от проектных норм КМОП-технологии (кривые 1, 2 —  $R_0A = 100\text{--}200$  Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup>, 3 —  $R_0A = 2000$  Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup>); *b* — от  $R_0A$  (кривая 1 — NETD с учётом всех источников шума [2, 3], 2 — вклад в NETD  $1/f$ -шума входного транзистора, 3 — доля NETD с учётом фонового излучения, 4 — вклад в NETD темнового тока)

При создании ИК ФП обычно требуется обеспечить режим «ограничения фоном» (ОФ), при котором NETD определяется шумом фонового излучения (см. рис. 2). Несложно получить выражение, описывающее зависимость температурного разрешения ИК ФП от параметров выбранной кремниевой технологии:  $\text{NETD} \sim (T_{\text{ок}}/E_{\text{п}})^{1/2}$ , где  $T_{\text{ок}}$  — толщина рабочего диэлектрика в интегральной схеме считывания фотосигналов,  $E_{\text{п}}$  — допустимое напряжение питания мультиплексора [9]. По мере увеличения параметра  $R_0A$  МСКЯ-фотодетекторов до  $10^3$  Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup> и более шум фонового тока становится основным для разности температур, эквивалентной шуму (см. рис. 2, *a, b*).

В некоторых случаях, когда обеспечить режим ОФ затруднительно (например, из-за больших затрат энергии на охлаждение ИК ФП), NETD определяется  $1/f$ -шумами входных транзисторов в ячейках считывания мультиплексора (см. рис. 2, *b*). При этом

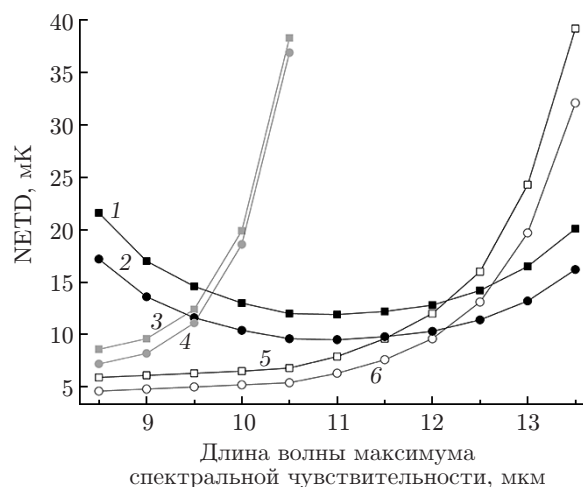


Рис. 3. Зависимости NETD ИК ФП от  $\lambda_{\max}$ : кривые 1, 2 — ММПН (0,18–1,0 мкм КМОП-технология) и КРТ-фотодиоды; 3, 4 — ММКН и МСКЯ-фотодетекторы; 5, 6 — ММКН и КРТ-фотодиоды (шаг ФЧЭ —  $20 \times 20$  и  $25 \times 25$  мкм для кривых 1, 3, 5 и 2, 4, 6 соответственно)

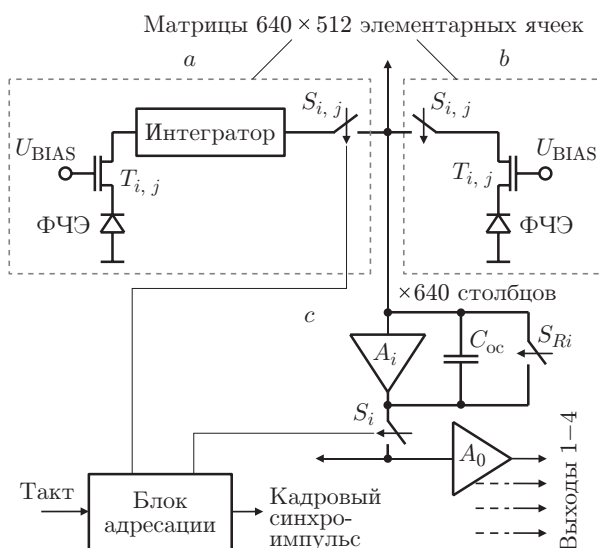


Рис. 4. Упрощённые принципиальные схемы элементарных ячеек: ММКН (а), ММПИ (б) и структурная схема варианта исполнения КМ (с) [5, 7]

аналитическая зависимость оценки разности температур, эквивалентной шуму, от параметров кремниевой технологии несколько изменяется:  $NETD \sim (T_{ox})^{1/2}$  для входных  $p$ -МОП-транзисторов схем прямой инжекции сигналов и  $NETD \sim T_{ox}$  для входных  $n$ -МОП-транзисторов [9]. По мере уменьшения параметра  $R_0A$  МСКЯ-фотодетекторов до  $10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  и менее  $1/f$ -шумы входных транзисторов КМ и шумы темновых токов ФЧЭ существенно повышаются, ухудшая тем самым значения  $NETD$  ИК ФП (см. рис. 2).

Полученные выражения показывают, что одним из перспективных нелинейных технических решений проблемы  $1/f$ -шума при изготовлении интегральных схем считывания фотосигналов может быть использование технологии с не очень низкими проектными нормами, но с принципиально пониженной толщиной рабочего диэлектрика. Поскольку снижение проектных норм КМОП-технологии, выбранной для изготовления мультиплексов, вместе с уменьшением толщины рабочего диэлектрика ведёт к понижению допустимого напряжения питания интегральной схемы, не всегда есть необходимость переходить к меньшим топологическим нормам. Часто достаточно в рамках имеющейся технологии обеспечить локальное уменьшение толщины рабочего диэлектрика в интегральной схеме считывания фотосигналов при сохранении допустимого напряжения питания, что определяет значительную величину ёмкостей накопления КМ и одновременно снижает  $1/f$ -шумы транзисторов.

Схема прямой инжекции со счётчиком заряда и цифровым каналом считывания является аналогом схемы АЦП в каждой ячейке. В настоящее время схемы многоразрядных прецизионных АЦП с высокой частотой дискретизации занимают существенную площадь кремниевых кристаллов. Основные ограничивающие факторы при создании таких схем —  $kTC$ -шум ёмкостей и  $1/f$ -шум транзисторов.

**Экспериментальные результаты.** В Институте физики полупроводников (ИФП СО РАН) разработаны кремниевые мультиплексы, обеспечивающие изготовление линейчатых ( $1 \times 288$ ,  $1 \times 576$ ) и матричных ( $128 \times 128$ ,  $320 \times 256$ ) ИК ФП спектральных диапазонов 8–14 и 3–5 мкм с температурным разрешением на уровне мировых образцов (рис. 5, таблица) [2–4, 6, 7, 9–14]. Созданные мультиплексы с построчным считыванием сигналов КРТ-фотодиодов функционально полно соответствуют, а по некоторым техническим характеристикам и возможностям обработки сигналов превосходят аналогичные мультиплексы для фотоприёмников длинноволнового инфракрасного спектрального диапазона, например [15].

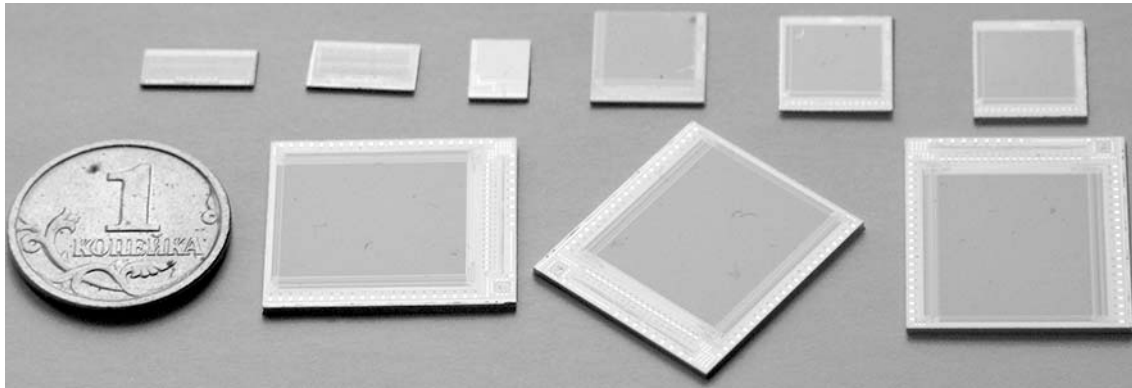


Рис. 5. Кристаллы мультиплексов производства ОАО «Ангстрем» и ИФП СО РАН

Для матричных фотоприёмных кристаллов на основе МСКЯ-фотодетекторов разработаны матричные мультиплексы с кадровым накоплением (формат  $128 \times 128$ , шаг ячеек 50 мкм) в трёх модификациях (МХV, МХ-В и МХ-А) на основе экспериментальной (ИФП СО РАН) и промышленных (ОАО «НПО "Восток"» (г. Новосибирск) и ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград)) технологий. Мультиплексы МХV представляют собой идеальный вариант для пикоамперных ФЧЭ, например КРТ-фотодиодов и МСКЯ-фотодетекторов [8].

Следует особо отметить мультиплексы МХV, изготовленные по экспериментальной ПЗС/КМОП-технологии с предельно низкими темновыми токами и минимальными шумами [8]. Характеристики данных мультиплексов обеспечивают возможность считывания фотосигналов как охлаждаемых, так и слабоохлаждаемых ФЧЭ. Образцы МХ-А выполнены на технологической базе ОАО «Ангстрем» без использования ПЗС-элементов (см. рис. 5 и таблицу).

Мультиплексы ММ-1 форматом  $320 \times 256$  с кадровым накоплением фотосигналов и шагом ячеек 40 мкм обладают следующими достоинствами: высокий (до 80 %) процент выхода годных кристаллов при серийном производстве и высокая степень готовности разработки конструкции мультиплекса, определяющие основную часть стоимости кристалла интегральной схемы [13, 14]. Пример экспериментального изображения, полученного с помощью ИК ФП на основе МСКЯ-фотодетекторов и ММКН, приведён на рис. 6, а [3, 12].

#### Характеристики некоторых образцов КМ и ИК ФП

Формат	Шаг, мкм	Применяемый мультиплексор	Входная схема	Тип ФЧЭ	$\lambda_{\max}$ , мкм	NETD, мК
128 × 128	50 × 50	МХV	ПИ	МСКЯ-фотодетекторы	8,3	22*
				КРТ-фотодиоды	6	17
					4,3	180**
320 × 256	40 × 40	ММ-1	ПИ, ВПУ	КРТ-фотодиоды	5	~25
	35 × 35	ММПН-2			11	~20
1 × 576	30	ЛМ-1	ПИ	КРТ-фотодиоды	10,2	14
		ЛМ-2	БПИ			
1 × 288	28	ЛМ-3	ПИ	КРТ-фотодиоды	8–16	9–19***

Примечание: ПИ — прямая инжекция; ВПУ — вычитание постоянного уровня; БПИ — буферизованная прямая инжекция; \* — рабочая температура 65 К; \*\* — рабочая температура 215 К; \*\*\* — расчётная величина ( $\lambda_{\max} = 11\text{--}13$  мкм,  $F_{\text{такт}} = 5$  МГц).

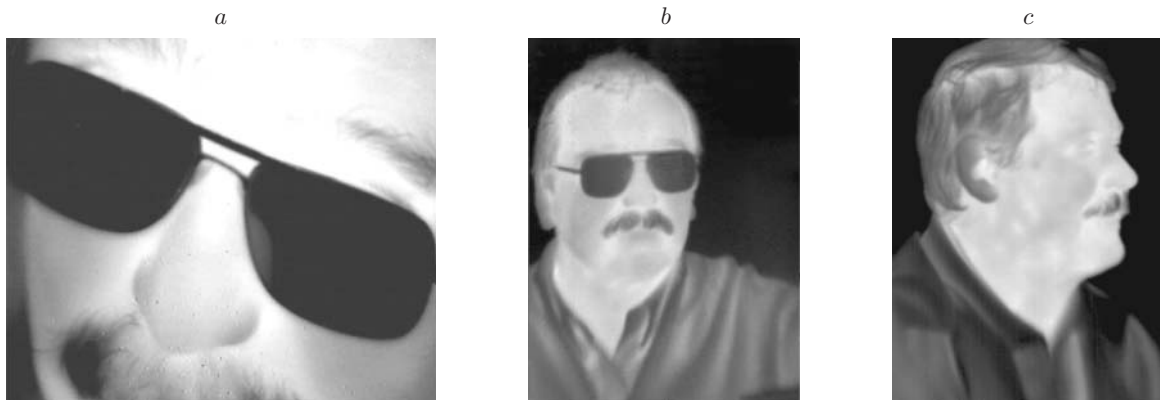


Рис. 6. Примеры тепловых изображений: *a* — полученных с применением МСКЯ-фотодетекторов и ММКН ( $\lambda_{\max} \approx 9,3$  мкм, NETD = 30 мК), *b* — КРТ-фотодиодов и ММКН ( $\lambda_{\max} \approx 5$  мкм, NETD = 25 мК), *c* — КРТ-фотодиодов и ММПН ( $\lambda_{\max} \approx 11$  мкм, NETD = 20 мК)

Возможные области специального применения созданных кристаллов: ИК ФП одноразового назначения для военных роботов и самонаводящихся снарядов, работающих по принципу «выстрелил и забыл», в гражданской промышленности для передвижных радиоуправляемых роботизированных комплексов, используемых в зонах чрезвычайных ситуаций или для автоматизированного поиска повреждений трубопроводов и других транспортных систем и сетей различного назначения.

Для матричных фотоприёмных кристаллов на основе КРТ-фотодиодов исполнены два варианта мультиплексоров с построчным накоплением: ММПН-1 форматом  $128 \times 128$  ячеек с шагом 40 мкм и ММПН-2 форматом  $320 \times 256$  ячеек с шагом 35 мкм. Разработанные мультиплексоры имеют недостаток — построчное накопление, однако в длинноволновой части спектрального ИК-диапазона 8–14 мкм ММПН обеспечивают лучшие значения NETD в сравнении с известными аналогами; причём в отличие от ММКН меньшие значения разности температур, эквивалентной шуму, достигаются в области больших значений  $\lambda_{\max}$  КРТ-фотодиодов указанного ИК-диапазона (см. рис. 3 и таблицу) [2, 4, 6, 15].

Структура ММПН налагает ограничения на время накопления, что уменьшает отношение сигнал/шум в схемах считывания данного типа для применений, в которых требуется большой формат матричных фотоприёмных кристаллов в комбинации с малым количеством выходов мультиплексоров [4, 5, 7]. Это ограничение можно существенно ослабить, определённым образом перераспределяя выходные сигналы на несколько выходов [4, 7].

Матричные мультиплексоры с построчным накоплением сигналов КРТ-фотодиодов в сравнении с линейчатыми мультиплексорами исключают необходимость использования механического сканера для получения двумерного сигнала — изображения. Существенное преимущество ММПН заключается в возможности размещения в каждом канале считывания программируемой ёмкости накопления, достаточной для работы ИК ФП в длинноволновом инфракрасном спектральном диапазоне с большими фоновыми и/или повышенными темновыми токами ФЧЭ. Ещё одно достоинство ММПН — возможность значительного, практически на два порядка, ослабления требований к сопротивлению подложки матричного фотоприёмного кристалла в сравнении со случаем кадрового накопления, при котором за время накопления суммарный ток всех КРТ-фотодиодов протекает через распределённое сопротивление подложки фотоприёмного кристалла. В каждой ячейке ММПН размещается один ключ адресации, что удобно для создания ИК ФП с небольшими размерами ФЧЭ. Выход годных кристаллов должен быть высоким, что подтвердилось при изготовлении мультиплексоров.

Экспериментальное изображение, полученное с помощью ИК ФП (формат  $320 \times 256$ , шаг ячеек 40 мкм) на основе мультиплексоров ММ-1 с кадровым накоплением сигналов КРТ-фотодиодов средневолнового ИК-диапазона, приведено на рис. 6, *b* [2, 4, 6, 7]. На рис. 6, *c* представлено изображение, созданное с использованием ИК ФП (формат  $320 \times 256$ , шаг ячеек 35 мкм) на основе ММПН-2 и КРТ-фотодиодов длинноволнового ИК-диапазона [10, 11, 13, 14].

Для линейчатых фотоприёмных кристаллов на основе КРТ-фотодиодов разработаны линейчатые мультиплексоры (ЛМ-1, ЛМ-2) форматом  $1 \times 576$  с шагом ячеек 30 мкм и мультиплексоры (ЛМ-3) форматом  $1 \times 288$  с шагом ячеек 28 мкм [4, 10]. В каждом канале считывания линейчатых мультиплексоров расположена большая программируемая ёмкость накопления, достаточная для считывания повышенных фоновых и/или темновых токов ФЧЭ длинноволнового инфракрасного спектрального диапазона. Мультиплексоры ЛМ-3 выполнены в топологическом формате кристаллов  $4 \times 288$  фирмы "Sofradir", т. е. конструктивно мультиплексоры форматом  $1 \times 288$  совместимы с фотоприёмными кристаллами  $4 \times 288$ , но на выходы передаётся одна строка из четырёх. При изготовлении мультиплексоров ЛМ-3 получен высокий процент годных кристаллов, приближающийся к 100 %, и, как следствие, минимальная стоимость при серийном производстве. Линейчатые мультиплексоры обеспечивают возможность создания недорогих ИК ФП гражданского назначения на основе линейчатых фотоприёмных кристаллов, в том числе и с повышенными темновыми токами.

**Заключение.** Исследованы принципы создания унифицированных серий кремниевых мультиплексоров, предназначенных для считывания и предварительной обработки фотосигналов в составе гибридных многоэлементных ИК ФП. Рассмотрены линейчатые ( $1 \times 288$ ,  $1 \times 576$ ) и матричные ( $128 \times 128$ ,  $320 \times 256$ ) мультиплексоры, созданные на базе экспериментальной и промышленных технологий. При этом проанализированы особенности организации, изготовления и применения мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением сигналов МСКЯ-фотодетекторов и КРТ-фотодиодов. Для создания ИК ФП специального назначения преимущественно используется кадровый режим накопления, характеризующийся одновременным накоплением сигналов ФЧЭ. Для ИК ФП гражданского назначения можно использовать матричный мультиплексор с построчным накоплением, который в отличие от линейчатых мультиплексоров позволяет исключить механическую развёртку и получить лучшее температурное разрешение тепловизионных приборов в длинноволновом инфракрасном спектральном диапазоне.

Разработанные мультиплексоры обеспечивают изготовление гибридных ИК ФП спектральных диапазонов 8–14 и 3–5 мкм с температурным разрешением  $\sim(14-25)$  мК, соответствующим уровню мировых образцов.

Авторы выражают благодарность академику РАН А. Л. Асееву и академику РАН А. В. Латышеву за поддержку исследований и полезные обсуждения, канд. физ.-мат. наук Б. И. Фомину за создание кремниевых мультиплексоров на технологической базе ИФП СО РАН, 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 предоставленных данных по КРТ-фотодиодам и технических требований к мультиплексорам, В. В. Филипповой за проектирование фототаблонов, А. П. Савченко за обсуждение параметров МСКЯ-фотодетекторов, П. Р. Машевичу и А. А. Романову за помощь при изготовлении кремниевых мультиплексоров на технологической базе ОАО «Ангстрем».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.



2. **Васильев В. В., Козлов А. И., Марчишин И. В. и др.** Анализ структурно-технологических ограничений в кремниевых схемах считывания сигналов фотодиодов инфракрасного диапазона // *Оптический журнал*. 2014. **81**, № 7. С. 39–45.
3. **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.
4. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Асеев А. Л.** Серия кремниевых мультиплекторов для КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 8–16 мкм // *Оптический журнал*. 2008. **75**, № 3. С. 60–67.
5. **Mottin E., Pantigny P., Boch R.** Improved architecture of IRFPA readout circuits // *Proc. SPIE*. 1997. **3061**. P. 117–126.
6. **Козлов А. И., Марчишин И. В.** Промышленно ориентированные разработки кремниевых мультиплекторов для многоэлементных ИК-фотоприёмников // *Автометрия*. 2012. **48**, № 4. С. 60–72.
7. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н.** Кремниевые мультиплекторы  $320 \times 256$  для инфракрасных фотоприёмных устройств на основе КРТ-диодов // *Автометрия*. 2007. **43**, № 4. С. 74–82.
8. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Филиппова В. В.** Унифицированные кремниевые мультиплекторы  $128 \times 128$  для инфракрасных фотоприёмных устройств // *Автометрия*. 2006. **42**, № 4. С. 109–118.
9. **Демьяненко М. А., Козлов А. И., Овсяк В. Н.** Влияние параметров кремниевой схемы считывания фотосигналов и матрицы детекторов инфракрасного диапазона на характеристики фотоприёмников // Тез. докл. Росс. конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники «Фотоника-2015». Новосибирск, 2015. С. 161.
10. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н.** Кремниевые мультиплекторы  $1 \times 576$  для ИК-фотодиодов на основе соединения кадмий—ртуть—теллур // *Микроэлектроника*. 2008. **37**, № 4. С. 278–286.
11. **Козлов А. И.** Анализ принципов построения схем кремниевых мультиплекторов для многоэлементных ИК-фотоприёмников // *Автометрия*. 2010. **46**, № 1. С. 118–129.
12. **Есаев Д. Г., Марчишин И. В., Овсяк В. Н. и др.** Инфракрасное фотоприёмное устройство на основе многослойных структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами // *Автометрия*. 2007. **43**, № 4. С. 112–118.
13. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Шашкин В. В.** Кремниевые мультиплекторы для многоэлементных фотоприёмников ИК-диапазона // *Автометрия*. 2005. **41**, № 3. С. 88–99.
14. **Козлов А. И.** Особенности проектирования и некоторые реализации кремниевых мультиплекторов для инфракрасных фотоприёмников // *Оптический журнал*. 2010. **77**, № 7. С. 19–29.
15. **Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др.** Матричные фотоприёмные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // *Физ. и техн. полупроводников*. 2005. **39**, вып. 10. С. 1257–1265.