

**УНИФИЦИРОВАННЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ
МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ 128 × 128
ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ**

А. И. Козлов, И. В. Марчишин, В. Н. Овсяк, В. В. Филиппова

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

E-mail: kozlov@thermo.isp.nsc.ru

Рассмотрены особенности конструкции и принципы построения кремниевых матричных мультиплексоров на базе промышленных технологий. Представлены два варианта унифицированных мультиплексоров 128 × 128, разработанных на основе 1,2 мкм КМОП-технологии и 3 мкм ПЗС/КМОП-технологии.

Введение. Во многих отраслях народного хозяйства используются матричные инфракрасные фотоприемные устройства (ИК ФПУ). В их основе лежит многоэлементный матричный фотоприемник излучения, представляющий собой гибридное соединение двух кристаллов, один из которых содержит матрицу фоточувствительных элементов (ФЧЭ), а второй – интегральную схему матричного мультиплексора (ММ), осуществляющего считывание электрических сигналов, получаемых в результате фотоэлектрического преобразования падающего ИК-излучения в ФЧЭ, исключая таким образом механическую развертку по какой-либо координате.

Рассматриваемые в данной работе мультиплексоры относятся к классу схем считывания, архитектура которых основана на использовании отдельных шин считывания. В работе [1] описана схема, в которой при считывании фотосигналов строчные шины мультиплексируются через строчные ключи на единственную вертикальную шину. Время накопления в таком мультиплексоре определяется длительностью импульса, подаваемого на входные транзисторы ячеек мультиплексора в интервале времени между считыванием кадров ИК-изображения. Время кадра равно сумме времени накопления и времени опроса кадра изображения. Этот режим работы называют режимом «мгновенного фотоснимка» ("snapshot"). Однако в таком режиме частота кадров ИК-изображений зависит от времени накопления, что обычно неприемлемо для систем визуализации изображений [2]. В [3] предложена другая схема, в которой фотосигналы с помощью строчных шин мультиплексируются через строчные буферные истоковые повторители на восемь вертикальных шин, а затем – на общий выход. В этой схеме считывания кроме режима snapshot возможен режим работы, когда накопление ИК-фотосигналов осуществляется в процессе опроса матрицы ячеек мультиплексора. Недостат-

ком такой схемы мультиплексора является добавочный геометрический шум, вызванный неоднородностью характеристик строчных истоковых повторителей.

В данной работе представлены два варианта матричных 128×128 мультиплексоров на основе промышленных 1,2 мкм КМОП-технологии (ММ-А) и 3 мкм ПЗС/КМОП-технологии (ММ-В). Каждый канал мультиплексора состоит из входной схемы считывания фототока, емкости накопления, набора ключей и усилителя на выходе. С помощью схемы адресации осуществляется последовательная коммутация ячеек считывания на общий выход. Разработанные схемы мультиплексоров позволяют регулировать время накопления, в том числе и при фиксированном времени кадра, что обеспечивает увеличение динамического диапазона ИК ФПУ при высоком уровне входных токов. Кроме того, использование для коммутации ячеек матрицы на общий выход только набора ключей значительно уменьшает геометрический шум за счет исключения из каналов считывания транзисторов истоковых повторителей и связанного с ними влияния разброса параметров. Разработанные мультиплексоры унифицированы по шагам ячеек считывания, форме и расположению базового контакта к подложке фотоприемника. Основные параметры мультиплексоров приведены в таблице. Ячейка считывания спроектирована с шагом 50×50 мкм по направлениям X и Y . Диапазон рабочих температур составляет от 40 до 300 К. Частота считывания кадров ИК-изображения не менее 50 Гц.

Наибольшее распространение получили многоэлементные фотоприемники на основе соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ), а также на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ), работающие в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм [4–6]. Ведутся работы по созданию матричных ИК-фотоприемников других типов. Фотоприемники различных типов отличаются друг от друга своими параметрами. При проектировании кремниевой схемы считывания наибольшее значение имеют внутреннее сопротивление и квантовая эффективность детекторов, определяющие диапазон рабочих токов. В связи с этим следует отметить, что разработанные унифицированные мультиплексоры (ММ-А и ММ-В) могут работать в широком диапазоне входных токов от единиц пикоампер до десятков наноампер и использоваться в тепловизионных системах с различными типами ИК-фотодетекторов.

Общие принципы организации мультиплексора и ячейка считывания. Каждый мультиплексор состоит из матрицы 128×128 ячеек считывания, горизонтального и вертикального регистров, системы строчной адресации на n -МОП-транзисторах Т3, выходного узла Т4–Т7, участвующего в управлении временем накопления, и выходного усилителя Т8 (рис. 1). Ячейка считывания мультиплексора соединена непосредственно с фотодиодом через индиевый столб и содержит входной транзистор $T_{вх}$, емкость накопления $C_{нак}$ и два ключа Т1 и Т2, затворы которых присоединены к адресным шинам (рис. 2). С помощью входного транзистора устанавливается напряжение смещения на фотоприемнике ФД. Характерный вид зависимости смещения детектора от внешнего напряжения смещения $V_{см}$ приведен на рис. 3. Фототок интегрируется на емкости накопления $C_{нак}$.

Сканирование матрицы считывающих ячеек осуществляется последовательно, строка за строкой, а при выбранной строке – перебором столбцов. Выбранная строка через ключи Т1 и Т2 и строчный ключ Т3 соединяется с выходным узлом (см. рис. 1). При выборе ячейки считывания накопленный

Основные параметры разработанных матричных мультиплексоров	Мультиплексор ММ-А	Мультиплексор ММ-В
Формат кристалла	128 × 128	
Технология	1,2 мкм КМОП	3 мкм ПЗС/КМОП
Предприятие-изготовитель	ОАО «Ангстрем»	ФГУП «НПП «Восток»»
Типы фотоприемников	3–5, 8–12 мкм КРТ и 8–10 мкм МСКЯ	
Входная поляриность фотоприемников	n^+ на p -подложке	
Тип входной схемы	прямая инжекция	
Шаг входных контактных площадок, мкм ²	50 × 50	
Коэффициент заполнения ячейки, %	67	52
Емкость накопления/рабочий диэлектрик, пФ/А	3,1/250	1/450
Однородность смещения фотодиодов не хуже, мВ	± 15	± 50
Максимальный входной ток не менее, нА	>150	150
Время накопления (регулируемое), мкс	40–20000	
Тактовая частота не менее, МГц	1	
Максимальный выходной сигнал не менее, мВ	400	250
Динамический диапазон (при отношении сигнал/шум ≥ 1) не менее, дБ	82	78
Количество работающих ячеек считывания, %	>99	
Напряжение питания, В	5 ± 0,5	7,5 ± 0,5
Потребляемая мощность не более, мВт	25	40
Геометрические размеры кристалла, мм ²	7,5 × 8,8	8,0 × 9,1

заряд поступает на общую шину считывания, затем происходит перезарядка шины до напряжения V_R . Выходной узел содержит повторитель на транзисторе Т8, который усиливает сигналы по мощности. Транзистор Т8 «нагружается» на внешнее сопротивление или источник тока (относительно напряжения питания), образуя тем самым истоковый повторитель. Внешняя схема двойной коррелированной выборки позволяет устранить kTC -шум емкости шины считывания.

На основе стандартного технологического маршрута 1,2 мкм КМОП ДМ с топологической нормой 1,2 мкм, напряжением питания 5 В и толщиной рабочего диэлектрика 250 Å спроектирована (ОАО «Ангстрем», г. Зеленоград) конструкция (рис. 4, а) и топология (рис. 5, а) ячейки считывания ММ-А.

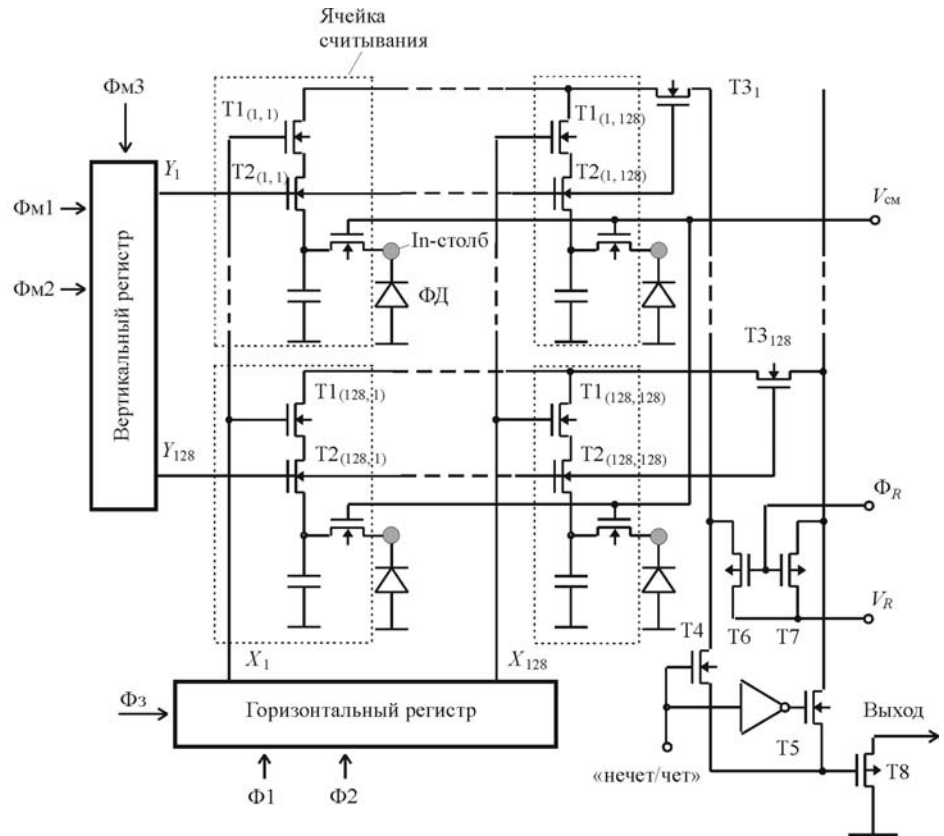


Рис. 1. Принципиальная схема унифицированного мультиплексора ММ-А (ММ-В) формата 128×128 элементов разложения

Площадь затвора накопления составляет 67 % от площади ячейки. В мировой практике обычно коэффициент заполнения достигает величины немногим более 50 % [7]. Накопительная емкость формируется между p -подложкой и диффузионной областью n^+ и между диффузионной областью n^+ и поликремниевым электродом первого уровня $Si_{п/к1}$, что позволяет получить большую емкость накопления $C_{нак} = 3,1$ пФ. Полученное значение емкости на-

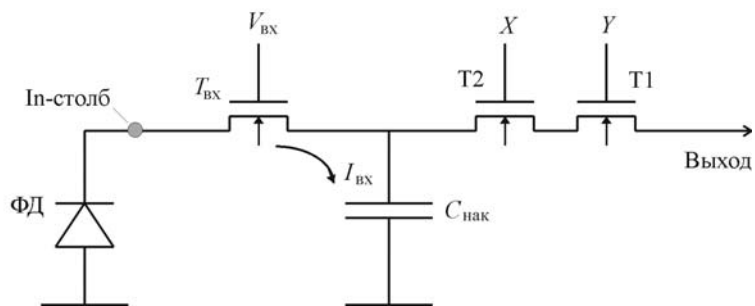


Рис. 2. Схема ячейки считывания мультиплексора ММ-А (ММ-В)

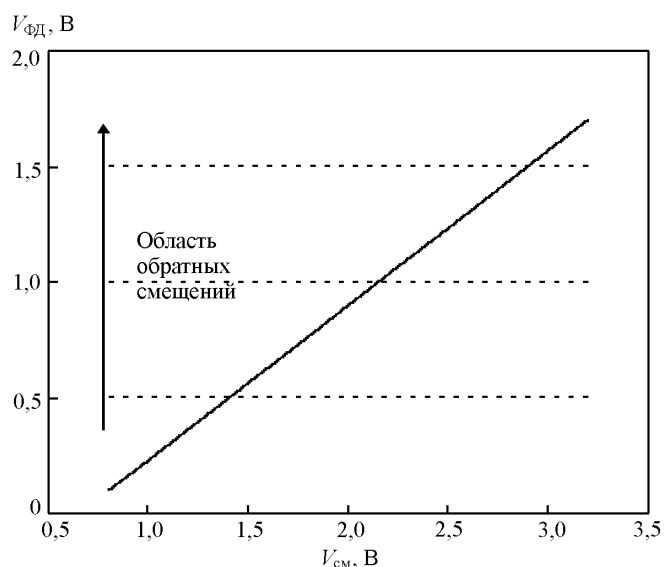


Рис. 3. Регулирование смещения детектора внешним напряжением $V_{см}$

копления в совокупности с возможностью регулирования времени накопления обеспечивает кремниевому мультиплексору ММ-А гибкость, достаточную для работы с фотодиодами на КРТ различных спектральных диапазонов в разной фоновой обстановке.

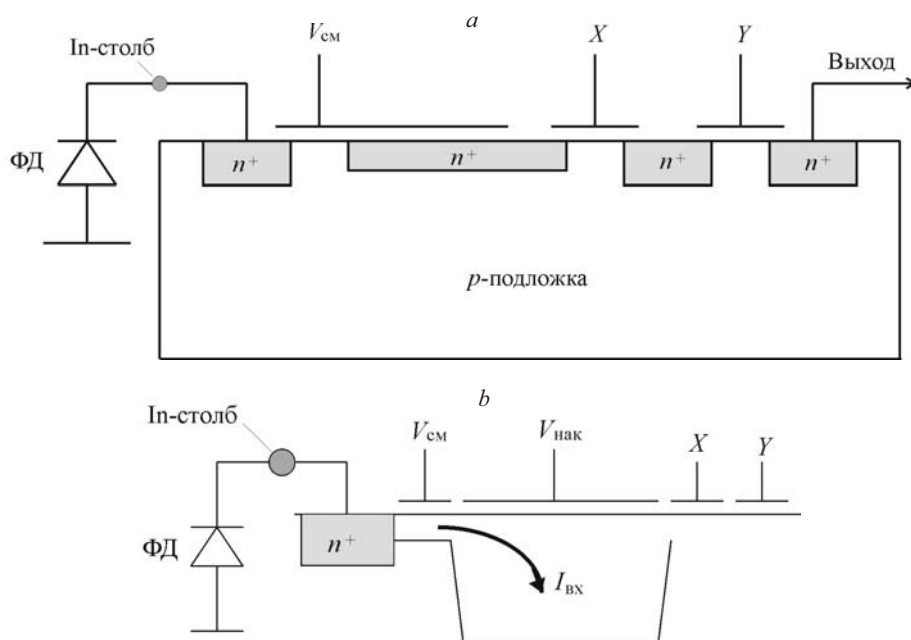


Рис. 4. Способы реализации емкости накопления в ячейках считывания: на основе КМОП-технологии в мультиплексоре ММ-А (а) и ПЗС/КМОП-технологии в мультиплексоре ММ-В (б)

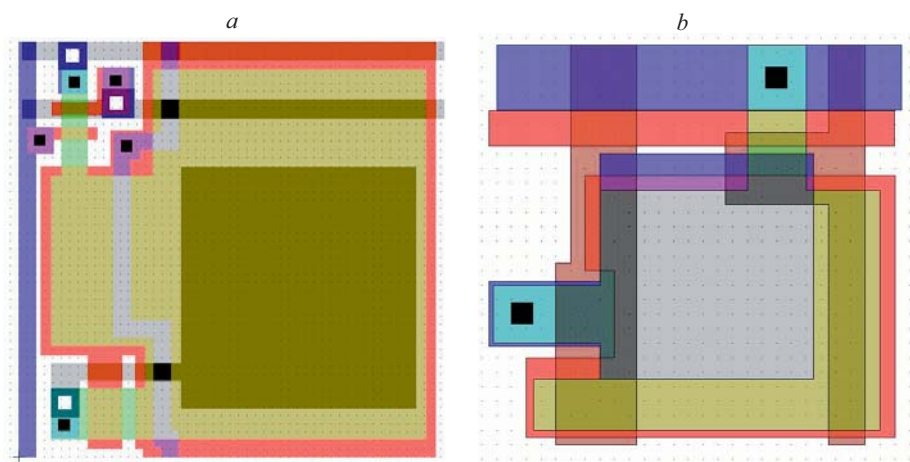


Рис. 5. Топология ячейки считывания мультиплексоров: MM-A (a) и MM-B (b)

Вариант ячейки считывания MM-B разработан на базе промышленной ПЗС/КМОП-технологии (ФГУП «НПП «Восток», г. Новосибирск) с топологической нормой 3 мкм, напряжением питания 8 В и толщиной рабочего диэлектрика 450 Å. Способ реализации емкости накопления в ячейке считывания мультиплексора MM-B представлен на рис. 4, b, а топология ячейки считывания – на рис. 5, b. В этом случае фототок интегрируется на емкости ПЗС под затвором накопления (емкость накопления составляет 1 пФ).

Режимы интегрирования. Мультиплексоры MM-A и MM-B допускают использование двух режимов интегрирования. Первый режим обеспечивает накопление фотосигналов в процессе опроса ячеек мультиплексора (рис. 6, a) [3]. Во втором режиме работы сначала происходит одновременное интегрирование фототоков во всех ячейках, а затем последовательное считывание накопленных сигналов (рис. 6, b).

В первом режиме с регулируемым временем накопления две выбранные несмежные строки (одна для сброса, другая для считывания) перезаряжаются одновременно с приходом импульса Φ_R (см. рис. 1). В каждый данный момент только одна из указанных строк подключается к транзистору считывания T8, поскольку шины считывания четных и нечетных пар строк при помощи внешнего сигнала «нечет/чет» поочередно подключаются к выходному узлу. Все это позволяет разделить операции считывания и перезарядки интегрирующих элементов и реализовать режим «электронной заслонки» – регулировку времени накопления внешним цифровым кодом считывания при фиксированном времени кадра. Кадровая частота определяется временем опроса всех ячеек считывания.

Отличие мультиплексоров состоит в том, что в MM-B каждая пара строк имеет одну общую шину считывания, а в MM-A каждая строка имеет свою собственную шину считывания, вследствие этого в рассматриваемом режиме минимальное время накопления в MM-A может быть в 2 раза меньше, чем в MM-B.

Время накопления определяется интервалом времени между активными состояниями кода считывания Φ_M3 (см. рис. 6, a). Минимальное время накопления равно времени считывания двух строк для MM-B или одной строки

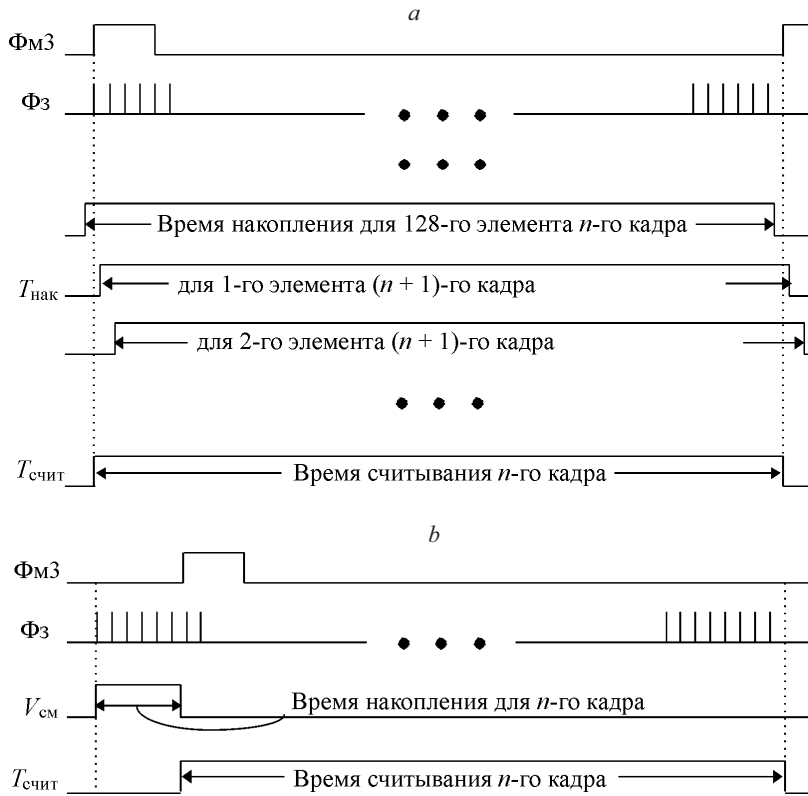


Рис. 6. Режимы интегрирования фототоков унифицированными кремниевыми матричными мультиплексорами ММ-А и ММ-В: первый режим – интегрирование фототоков во время считывания ($T_{\text{кадр}} = T_{\text{счит}}$) (a); второй режим – сначала интегрирование, затем считывание кадра ($T_{\text{кадр}} = T_{\text{нак}} + T_{\text{счит}}$) (b)

для ММ-А, максимальное – времени считывания кадра. Режим электронной заслонки позволяет расширить динамический диапазон входных сигналов в 64 (ММ-В) или 128 раз (ММ-А) по сравнению со случаем интегрирования фототока в течение всего времени кадра. Максимальный входной ток мультиплексора при этом составляет от 0,3 до 20 нА для максимального и минимального времени накопления соответственно.

Во втором режиме интегрирования (режим snapshot) процесс считывания начинается после интервала интегрирования. В результате время кадра равно сумме времени накопления и времени опроса кадра. Время накопления задается длительностью импульса напряжения смещения $V_{\text{см}}$, подаваемого на входной транзистор. В этом случае его можно менять произвольно, не кратно строкам, и сделать меньше времени считывания одной строки. Максимальный входной ток мультиплексора в этом режиме увеличивается до 150 нА.

Экспериментальные данные. Функциональный контроль каждого кристалла мультиплексора осуществлялся при тестировании пластин, затем функционирующие кристаллы более тщательно исследовались для разбра-

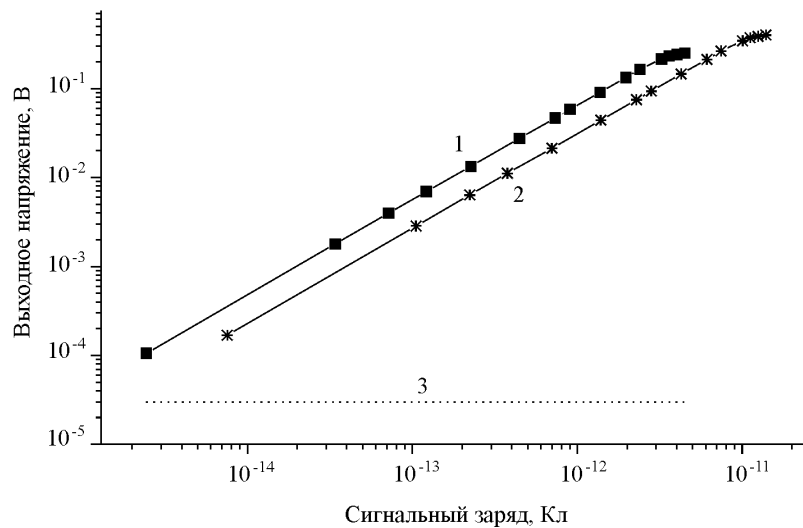


Рис. 7. Передаточные характеристики мультиплексов ММ-В при $C_{\text{нак}} = 1,0$ пФ (кривая 1), ММ-А при $C_{\text{нак}} = 3,1$ пФ (2); максимальный уровень шума (3)

ковки по параметрам. Экспериментальные результаты получены при обследовании целого ряда образцов и могут рассматриваться как типичные.

Зависимость выходного сигнала от входного тока, являющаяся передаточной характеристикой каналов мультиплексов, при времени накопления $T_{\text{нак}} = 20$ мс представлена на рис. 7. Уровень насыщения выходного сигнала для ММ-В превышает 250 мВ, для ММ-А составляет более 400 мВ, а уровень шума в обоих случаях – не более 30 мкВ. Однородность смещения фотоприемников определялась по отклонению порогового напряжения входных МОП-транзисторов от среднего значения по матрице 128×128 ячеек считывания, которое не превышало ± 15 мВ для ММ-А и ± 50 мВ для ММ-В. Типичные образцы кремниевых мультиплексов, использованных при сборке гибридных ИК-фотоприемников, имели дефектность менее 1 % элементов. Потребляемая ММ-В мощность при напряжении питания 8 В, рабочем токе выходного транзистора 3 мА и тактовой частоте 1 МГц не превышает 40 мВт. Тактовая частота 1 МГц соответствует считыванию 60 кадров ИК-изображения в секунду. ММ-А потребляет значительно меньшую мощность (см. таблицу).

Зависимости эквивалентной шуму разности температур (NETD) от параметра R_0A КРТ-фотодиодов с длиной волны максимума спектральной чувствительности $\lambda_m = 8,2$ мкм для ММ-А (кривая 1) и ММ-В (кривая 2) приведены на рис. 8. Кривые рассчитаны при температуре фона 300 К, апертурном угле 60° , темновом токе 3,4 нА, времени накопления 74 мкс для ММ-А и 40 мкс для ММ-В. (Время накопления определялось из условия полного заполнения входным током емкости накопления ячейки считывания соответствующего мультиплексора.) Видно, что во всем диапазоне параметра R_0A КРТ-фотодиодов мультиплексор ММ-А обеспечивает выигрыш более чем 30 % в температурном разрешении.

Характеристики некоторых фотоприемников, созданных методом гибридной микросборки с использованием разработанных мультиплексов, приведены в работах [4–6]. Показано, что мультиплексы ММ-А и ММ-В

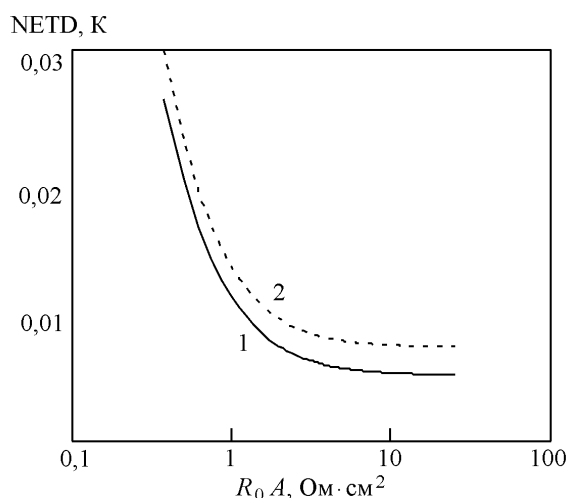


Рис. 8. Зависимости эквивалентной шуму разности температур от параметра R_0A КРТ-фотодиодов для мультиплексоров ММ-А (кривая 1) и ММ-В (кривая 2)

допускают широкий диапазон регулирования времени накопления (40–20000 мкс) и обеспечивают работу средне- и длинноволновых фоточувствительных элементов с рабочей температурой от 65 до 215 К, выполненных на различных полупроводниковых материалах.

Заключение. В представленной работе дано описание конструкции, принципа работы и характеристик унифицированных мультиплексоров ММ-А и ММ-В, которые используются для считывания сигналов с матричных ИК-фотоприемников различного типа и применяются в тепловизионных системах, работающих в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм. При этом следует отметить, что изготовление мультиплексоров на базе двух вариантов основных промышленных технологий – 1,2 мкм КМОП (ММ-А) и 3 мкм ПЗС/КМОП (ММ-В) – привело лишь к незначительному различию характеристик конечных тепловизионных приборов.

Созданные мультиплексоры обеспечивают расширение динамического диапазона ИК ФПУ (увеличивается уровень входных токов) путем изменения времени накопления (в том числе при постоянной частоте кадров). Кроме того, в этих схемах за счет использования только набора ключей для коммутации фотосигналов отдельных ячеек на общий выход исключен геометрический шум строчных истоковых повторителей, которые используются в ряде других разработок [3].

Авторы выражают благодарность П. Р. Машевичу, А. А. Романову, В. Н. Гаштольду и Н. В. Сущевой за поддержку и эффективную помощь при изготовлении кремниевых мультиплексоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. /Под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003.
2. **Mendis S., Kemeny S. E., Fossum E. R.** CMOS active pixel image sensor // IEEE Trans. Electron Dev. 1994. 41, N 8. P. 452.

3. **Sauer D. J., Shallcross F. V., Hseuh F. L. et al.** 640 × 480 MOS PtSi IR sensor // SPIE. 1991. 1540. P. 285.
4. **Овсяк В. Н., Васильев В. В., Козлов А. И. и др.** Фотоприемные устройства на основе слоев КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Гл. 3 // Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001. С. 180.
5. **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.
6. **Овсяк В. Н., Сидоров Ю. Г., Васильев В. В. и др.** Фотоприемники на основе молекулярно-лучевой эпитаксии слоев кадмий–ртуть–теллур для среднего и дальнего ИК-диапазонов // Наука производству. 2001. № 12. С. 9.
7. **Kozłowski L. J., Bailey R. B., Cabelli S. C. et al.** 640 × 480 PACE HgCdTe FPA // SPIE. 1992. 1735. P. 163.

Поступила в редакцию 20 марта 2004 г.
