

А. И. Козлов, И. В. Марчишин, В. Н. Овсюк, В. В. Шашкин

(Новосибирск)

**КРЕМНИЕВЫЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ
ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ
ИК-ДИАПАЗОНА**

Рассмотрены принципы построения кремниевых мультиплексоров для линейчатых и матричных инфракрасных фотоприемных устройств. Разработан унифицированный ряд из 13 мультиплексоров, предназначенных для совместной работы с многоэлементными фотодиодными фотоприемниками на основе соединения кадмий–ртуть–теллур, с многоэлементными фоторезистивными фотоприемниками на основе многослойных структур с квантовыми ямами и другими типами фотодетекторов со спектральной чувствительностью в ИК-диапазонах 8–14 и 3–5 мкм. Эти мультиплексоры сохраняют работоспособность в диапазоне температур от 300 до 65 К. На основе построенных мультиплексоров можно создавать линейчатые и матричные фотоприемные гибридные модули различного формата для среднего и длинноволнового ИК-диапазона с достаточно высоким ($< 0,02$ К) разрешением по температуре.

Введение. Современные гибридные многоэлементные ИК-фотоприемники состоят из двух основных частей: многоэлементной фоточувствительной структуры и кремниевого мультиплексора, соединяемых друг с другом методом групповой холодной сварки с использованием индиевых микро-столбов (рис. 1). Линейчатый или матричный мультиплексор – это интегральная схема или, точнее, кремниевый кристалл, который обеспечивает требуемые электрические режимы работы фоточувствительных элементов (ФЧЭ), осуществляет считывание электрических сигналов, полученных в результате фотоэлектрического преобразования падающего ИК-излучения в ФЧЭ, позволяет исключить механическую развертку изображения по одной или по двум координатам и в конечном итоге в значительной степени определяет качество получаемого тепловизионного изображения в целом. К кремниевым кристаллам мультиплексоров предъявляются более жесткие требования по однородности, чем к обычным интегральным схемам, причем выполнение этих требований зачастую выходит за рамки стандартных заводских технологических процессов изготовления сверхбольших интегральных схем. По этой причине разработка кремниевых мультиплексоров требует оптимизации технологии их изготовления на наиболее передовой технологической базе.

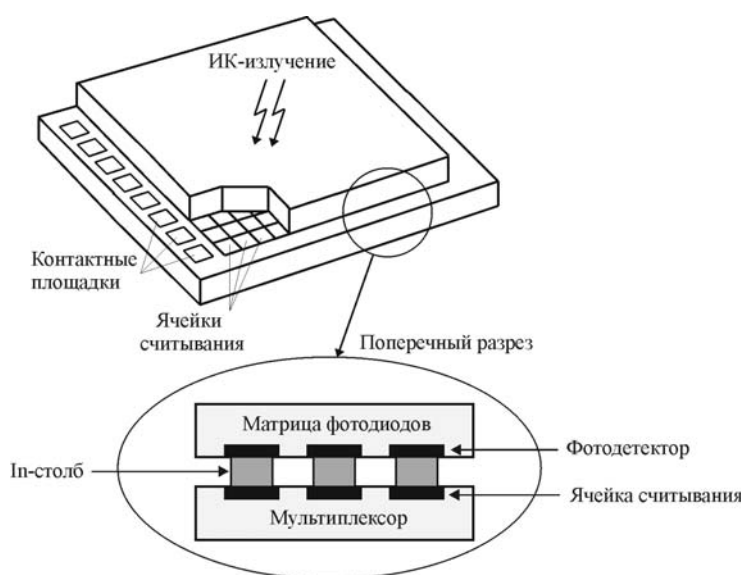


Рис. 1. Общий вид и поперечный разрез гибридной микросборки матрицы фотодетекторов и кремниевого мультиплексора

Ведущими мировыми фирмами (SOFRADIR, “Indigo Systems Corporation” и др.) разработаны и в настоящее время серийно производятся ряды линейчатых (4×288 , 6×460 , 1×512) и матричных (128×128 , 320×240 , 320×256 , 320×256 , 384×288 , 640×512) кремниевых мультиплексоров для фотоприемников дальнего, среднего и ближнего ИК-спектральных диапазонов [1, 2].

В настоящее время идет процесс непрерывного усложнения и расширения функций мультиплексоров. Современные мультиплексоры, разработанные с использованием КМОП-технологии с проектными нормами $0,6\text{--}0,25$ мкм и 3–5 уровнями металлизации, позволяют выполнять предварительную обработку и аналого-цифровое преобразование фотосигналов, что приводит как к улучшению технических характеристик ИК-фотоприемных устройств (ИК ФПУ), так и снижению стоимости производства ФПУ в целом [3].

Прогресс в отечественных разработках этого направления и формирующиеся мировые тенденции представили возможность поставить вопрос о создании промышленно ориентированного ряда отечественных мультиплексоров, предназначенных для считывания и предварительной обработки фотосигналов с линейчатых и матричных фотодетекторов, в первую очередь на основе КРТ и многослойных структур с квантовыми ямами для спектральных диапазонов 8–14 и 3–5 мкм. В данной работе рассмотрены способы построения кремниевых мультиплексоров и приведены характеристики унифицированного ряда из 13 мультиплексоров, созданных в Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН) совместно с другими предприятиями.

Принципы построения и основные характеристики мультиплексоров. Основные характеристики разработанных кремниевых мультиплексоров приведены в табл. 1. Мультиплексор МК-М-1 с однонаправленным сканированием разработан и изготовлен на базе $1,2$ мкм ПЗС/КМОП-технологии в СП ООО «Интеко» (г. Минск, Беларусь) по заказу ИФП СО РАН.

Разработанные кремниевые мультиплексоры для ИК ФПУ

Наименование мультиплексора	Формат	Особенности схемы	Шаг, мкм	Емкость накопления, 10^6 электронов	Тактовая частота, МГц	Максимальный входной ток, нА	Выходное напряжение, В	Динамический диапазон, дБ	
									Линейчатые мультиплексоры
КТ-2К	1 × 64	БПИ	100	156	>1	>300	2,2	–	
ЛМ* 1 × 288	1 × 288	ПИ	28	18–300	>5	>300	2,0	–	
ЛМ* 4 × 288	4 × 288	ВЗН по 4 элемента	28 × 43	12,5	<2	–	3,0	70	
МК-М-1	4 × 288	ВЗН по 4 элемента	28 × 43	25	<2	–	3,0	70	
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 мультиплексоры									
МХ2	32 × 32	ПД	100	Исследовательский мультиплексор с внекристалльным накоплением					
МХ4	128 × 128	ПД	50	Исследовательский мультиплексор с внекристалльным накоплением					
ММ-В	128 × 128	ПИ	50	28	>1	150	0,3	78	
ММ-А	128 × 128	ПИ	50	37,5	>1	>150	0,5	–	
ММПН 128	128 × 128	ПИ, ПН, ВПУ	40	18–300	>1	>300	2,1	78	
ММ-1 320	320 × 256	ПИ	40	18	>2	>40	>0,8	70	
ММ-2* 320	320 × 256	ПИ	30	15	>2	–	–	–	
ММПН* 320	320 × 256	ПИ, ПН, ВПУ	35	18–300	>2	>300	–	–	
Карат* 320	320 × 240	ПИ, ВПУ	35	12,5	>4	–	3,0	70	

Примечания: * – модель находится в разработке; БПИ – буферированная прямая инжекция; ПИ – прямая инжекция; ВЗН – временная задержка и накопление; ПД – прямой доступ к фотоприемнику; ПН – построение накопления фотосигнала; ВПУ – вычитание постоянного уровня.

Мультиплексор ЛМ 4×288 с возможностью изменения направления сканирования создан по заказу ИФП СО РАН в ЗАО «Матричные технологии» (Москва) на основе промышленной 1,2 мкм КМОП-технологии. Мультиплексор «Карат» 320×240 разработан и изготовлен по заказу ИФП СО РАН на НПООО «Микротелеком» с использованием промышленной КМОП-технологии. Мультиплексор ММ-В разработан в ИФП СО РАН и изготовлен на основе промышленной 3 мкм ПЗС/КМОП-технологии в ФГУП НПП «Восток» (г. Новосибирск). Остальные мультиплексоры разработаны в ИФП СО РАН и ориентированы на изготовление по промышленной 1,2 мкм КМОП-технологии ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград). Кроме того, в ИФП СО РАН на базе лабораторной 4 мкм КМОП-технологии разработаны и изготовлены мультиплексоры МХ2, МХ4 и КТ-2К.

Для организации работы линеек фотоприемников в режиме с временной задержкой и накоплением (ВЗН) требуются специальные мультиплексоры [4]. Мультиплексоры МК-М-1 и ЛМ 4×288 выполнены по схеме с ВЗН фотодiodов КРТ-диодов спектрального диапазона 8–14 мкм [5]. За счет ВЗН обеспечивается увеличение эффективного времени накопления фотосигналов и возможность дублирования дефектных фоточувствительных элементов с соответствующим достижением более высокого уровня технических характеристик тепловизионных систем.

Базовая конструкция таких мультиплексоров показана на рис. 2. Сканирование изображения происходит сверху вниз, при этом тактовая частота ра-

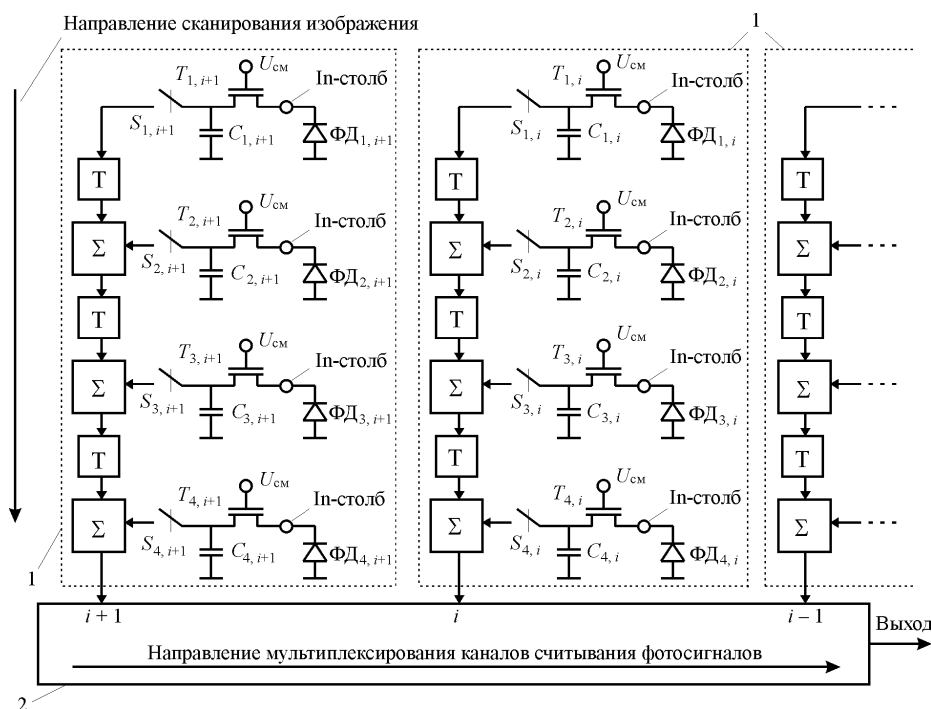


Рис. 2. Схема мультиплексора с ВЗН по четырем элементам: 1 – канал считывания; 2 – мультиплексор каналов считывания; $T_{j,i}$ – входной транзистор; $S_{j,i}$ – ключ для деселекции дефектных элементов, где $j = 1, \dots, 4$; $U_{см}$ – напряжение смещения входного транзистора; Т – элемент временной задержки; Σ – сумматор

боты мультиплексора выбрана так, чтобы задержка между отдельными входами была равна времени перемещения изображения от одного детектора к другому. Попадая в область чувствительности фотодетектора $\Phi Д_{1, i}$, некоторый элемент изображения, соответствующий этой области, инжектирует сигнальный заряд на емкость накопления $C_{1, i}$. К тому времени, когда этот элемент изображения переместится к детектору $\Phi Д_{2, i}$, заряд, инжектированный детектором $\Phi Д_{1, i}$, окажется в том месте канала считывания, куда будет введен фотосигнал от детектора $\Phi Д_{2, i}$. Таким образом, для группы из четырех детекторов осуществляется четырехкратное когерентное суммирование. Шумы в то же время складываются некогерентно, за счет чего в режиме ВЗН обеспечивается выигрыш в отношении сигнал/шум, равный $\sqrt{4} = 2$ [4].

В случае когда не требуется достижения предельных характеристик ИК ФПУ и/или при надлежащем уровне технологии изготовления многоэлементной фоточувствительной структуры, может оказаться экономически целесообразным применение гибридных фотоприемников с однорядным расположением ФЧЭ, которые обеспечивают мультиплексоры ЛМ 1×576 , ЛМ 1×288 и КТ-2К [6]. Причем мультиплексор ЛМ 1×288 имеет пониженное энергопотребление и при изготовлении может обеспечить высокий процент выхода годных кристаллов.

Матричные мультиплексоры (ММ-А, ММ-В, ММ 320×256) предназначены для считывания сигналов ИК-фотоприемников спектральных диапазонов 3–5 и 8–11 мкм. Такие мультиплексоры могут работать в широком диапазоне входных токов (от единиц пикоампер до десятков наноампер) с КРТ-фотодиодами и фотоприемниками на основе многослойных структур с квантовыми ямами. Мультиплексоры могут обеспечивать высокие эксплуатационные характеристики ФПУ при работе с КРТ-фотодиодами, имеющими низкие темновые токи ($I_{\text{dark}} \approx 0,7$ нА при рабочей температуре фотодетектора $T_{\text{ФД}} = 78$ К) и высокие ($\sim 10^{10}$ Ом) дифференциальные сопротивления [7].

Мультиплексор ММ-В (ММ-А) имеет в каждой ячейке входную схему считывания фототока и емкость накопления, а также схему адресации X – Y с двумя МОП-ключами, схему коммутации строк и общий выходной усилитель Т1 [8, 9]. Принципиальная схема данного мультиплексора представлена на рис. 3. С помощью узла адресации осуществляется последовательное мультиплексирование сигналов ячеек считывания на общий выход.

Конструкция мультиплексора может обеспечивать накопление фотосигналов в процессе опроса его ячеек. В мультиплексоре ММ-В это происходит следующим образом. Две выбранные несмежные пары строк (одна для сброса, другая для считывания) перезаряжаются до напряжения V_R одновременно с приходом импульса Φ_R . Однако в каждый данный момент только одна из указанных пар строк подсоединена к транзистору считывания Т1, поскольку шины считывания четных и нечетных пар строк при помощи внешнего сигнала «нечет/чет» поочередно подключаются к выходному узлу. При такой организации появляется возможность разделить операции считывания и перезарядки интегрирующих элементов и реализовать режим «электронной заслонки» – регулировку времени накопления внешним цифровым кодом считывания при фиксированном времени кадра. Время накопления определяется интервалом времени между активными состояниями импульса запуска вертикального регистра ФмЗ. Кадровая частота определяется временем опроса всех ячеек считывания.

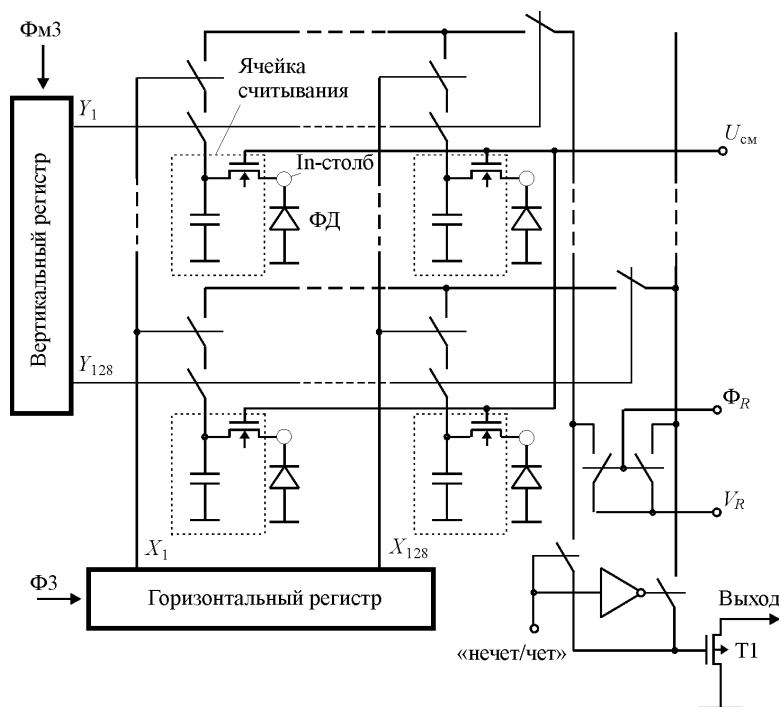


Рис. 3. Принципиальная схема универсального мультиплексора ММ-В 128×128 элементов разложения

Схема считывания мультиплексора ММ-В (ММ-А) позволяет регулировать время накопления при фиксированном времени кадра, что обеспечивает увеличение динамического диапазона ИК ФПУ при высоком уровне входных токов. Такой мультиплексор может работать в широком диапазоне входных токов от единиц пикоампер до десятков наноампер.

Кремниевый мультиплексор ММ 320×256 в наиболее общем виде содержит каскады истоковых повторителей, которые введены в конструкцию для повышения амплитуды выходного сигнала при увеличении формата и разделены на ячеечный, строчный и столбцовый уровни. Сигнальное напряжение от каждой ячейки матрицы последовательно считывается через архитектуру переключаемых истоковых повторителей, как показано, например, на рис. 4. Ключи соответствующим образом мультиплексируют ячейки считывания на общий выход [10].

Мультиплексор ММ 320×256 осуществляет одновременное интегрирование фототоков во всех ячейках с последующим считыванием накопленных сигналов, т. е. 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 $U_{см}$, подаваемого на входной транзистор ячейки считывания.

Кремниевый мультиплексор ММ-В (ММ-А) также может работать в режиме одновременного интегрирования фототоков во всех ячейках. Максимальный входной ток мультиплексора в этом режиме увеличивается до 150 нА.

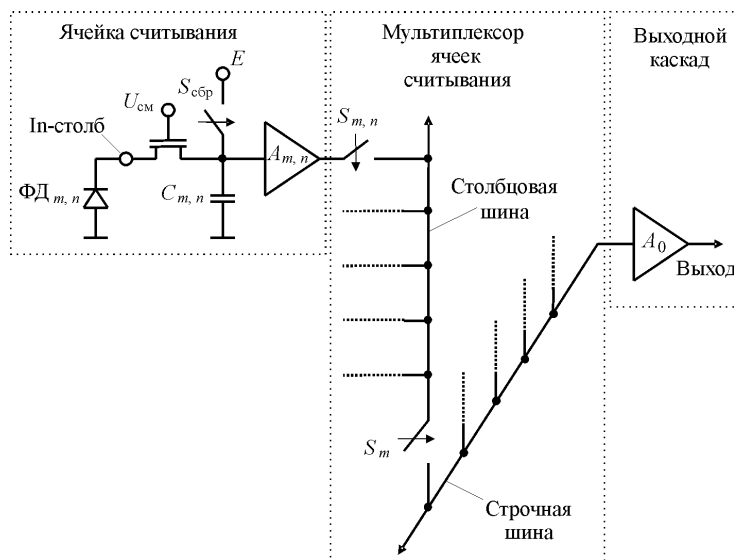


Рис. 4. Схема кремниевого мультиплексора с прямой инъекцией фототока и переключаемыми истоковыми повторителями

Для уменьшения геометрических aberrаций и снижения требований к проекционной оптике конечного тепловизионного прибора требуется максимальное уменьшение размера поля матрицы мультиплексоров большого формата, что, в свою очередь, заставляет использовать предельно допустимые топологические нормы технологических процессов и нестандартные схемотехнические решения. Вследствие этого потребовалась проработка нескольких вариантов принципиальной схемы и топологии матричных мультиплексоров ММ-1 и ММ-2 для наиболее эффективного использования возможностей отечественной технологии изготовления СБИС. В ходе этой работы уточнены и выбраны максимальный формат мультиплексоров и размер ячеек считывания.

Для матричного мультиплексора с построчным накоплением (ММПН) был взят вариант, при котором сигнальные фототоки выбранной строки ФЧЭ через входные схемы считывания накапливаются на соответствующих емкостях 2 (рис. 5). Полученные таким образом сигнальные напряжения затем мультиплексируются на общий выход. Мультиплексор ММПН может работать с большими фоновыми и/или темновыми токами, характерными для фотоприемников спектрального диапазона 8–14 мкм. Конструкция мультиплексора ММПН обеспечивает достаточно большую зарядовую емкость (до $300 \cdot 10^6$ электронов), что позволяет использовать большие времена накопления с соответствующим улучшением тактико-технических характеристик ИК ФПУ. Кроме того, этот мультиплексор имеет переключаемые емкости накопления, что придает ему достаточную гибкость в условиях разных сигнальных, фоновых и темновых токов при работе с фотоприемниками различных ИК-спектральных диапазонов.

В мультиплексорах ММПН 128×128 , ММПН 320×256 и «Карат» 320×240 предусмотрена возможность вычитания (компенсации) постоянного уровня входного тока с помощью управляемых источников инверсного тока, размещенных в каждой ячейке считывания мультиплексора «Карат»

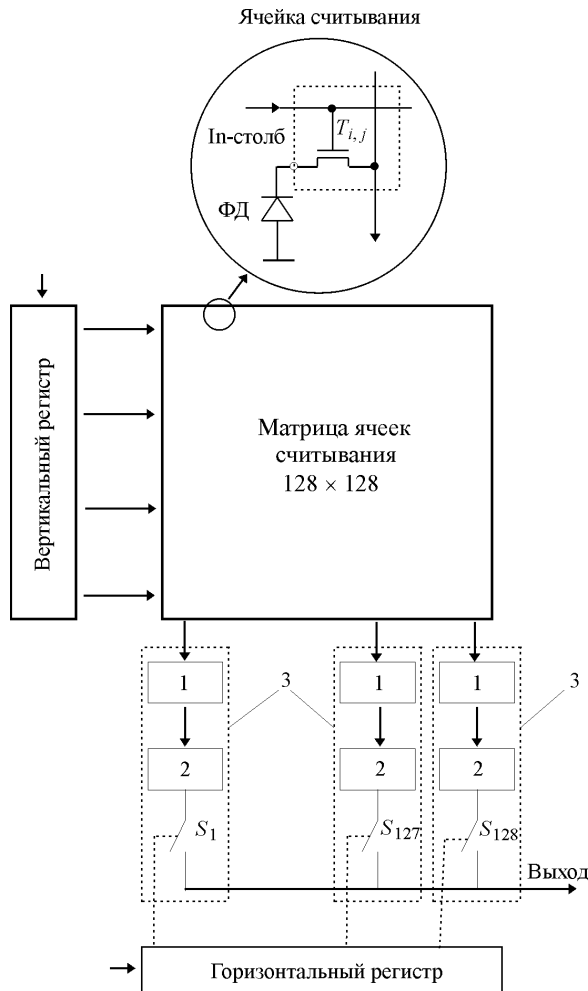


Рис. 5. Схема кремниевого мультиплексора ММПН 128×128 : 1 – входные схемы считывания фотосигнала, 2 – переключаемые емкости накопления, 3 – канал считывания фотосигнала, S_i – ключ считывания выходного сигнала канала

или на столбцовых выходах матрицы ячеек считывания мультиплексоров типа ММПН. Организация мультиплексора «Карат» допускает вычитание постоянного уровня входного тока, являющегося общим для всей матрицы ячеек считывания. А в мультиплексорах ММПН 128×128 и ММПН 320×256 обеспечивается вычитание постоянного уровня входного тока индивидуально для каждой строки фоточувствительных элементов матрицы. При этом следует иметь в виду, что шум входных каскадов мультиплексоров («Карат» и ММПН) увеличивается в $\sqrt{2}$ раз за счет режима вычитания токов на входе.

Исследовательские мультиплексоры (MX2, MX4) работают следующим образом [11]. Выбранный фотодиод подключается к соответствующей шине считывания (ШС) (рис. 6). Смещение на фотодиодах задается внешней прецизионной малощумящей схемой считывания, которая выполняет усреднение и преобразование фототока в сигнальное напряжение. Усреднение фотосигнала может осуществляться в течение времени адресации к выбранному

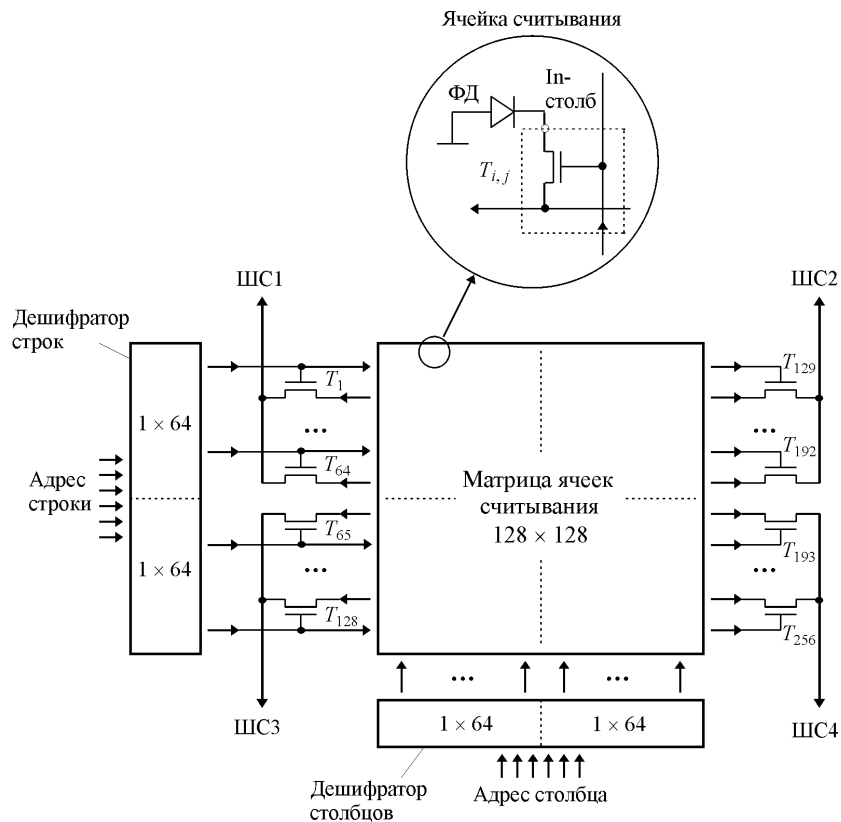


Рис. 6. Схема КМОП-мультиплексора МХ4 128×128 с произвольной выборкой элементов матрицы фотоприемников

фотодиоду. Исследовательские мультиплексоры обеспечивают произвольный доступ к элементам фотоприемной матрицы, высокую однородность смещения фотодиодов и возможность работы с большими темновыми и/или фоновыми токами. Схема удобна в эксплуатации, так как требует для работы только два источника постоянного напряжения и 12-разрядные цифровые коды, и поэтому была использована при создании автоматизированной установки на основе ПК для исследования характеристик ИК-фотоприемников различного типа по полю матрицы и получения ИК-изображений.

Рабочая температура охлаждаемых гибридных фотоприемников, в составе которых могут работать создаваемые кремниевые мультиплексоры, 65–80 К. Однако работоспособность мультиплексоров сохраняется и при более высоких (до 300 К) температурах, что обеспечивает их использование при изготовлении слабоохлаждаемых фотоприемников.

Основные характеристики гибридных ИК-фотоприемников, созданных на основе разработанных мультиплексоров. На базе разработанных в ИФП СО РАН кремниевых кристаллов в течение 1996–2004 гг. создан широкий ряд линейчатых и матричных фотоприемников различного формата средне- и длинноволнового ИК-диапазонов. Характеристики некоторых из этих фотоприемников приведены в табл. 2 [12]. Из таблицы видно, что линейчатые фотоприемники размерностью 1×576 и 4×288 на основе мульти-

Таблица 2

Типичные характеристики созданных гибридных ИК-фотоприемников

Размерность фотоприемной матрицы, шаг размещения элементов, мкм	Используемый мультиплексор	Тип и материал фотоприемной матрицы	Длинноволновая граница фоточувствительности, мкм	Эквивалентная шуму разность температур, мК	Время накопления, мкс	Частота кадров, Гц
1 × 128, 50	КТ-2К	$n^+ - p$ -фотодиоды на основе ЖФЭ CdHgTe	8,7	20	128	50
			10,2	23	64	50
			10,2	14	72	25
			10,3	7	24	50
32 × 32, 100	МХ2 МХ4	$n^+ - p$ -фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe	10,6	70	100*	10
			8,3	17	100*	2,5
			13,1	32	100*	2,5
			4,3**	180	256	50
128 × 128, 50	ММ-В		6,0	17	256	50
			8,7	30	60	50
			8,3	22	5000	50
128 × 128, 40	ММПН 128 × 128	Фоторезисторы на квантовых ямах GaAs/AlGaAs*** $n^+ - p$ -фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe	10,2	16	65	60

* Накопление осуществлялось внешним интегратором.

** Слабоохлаждаемый модуль на термоэлектрическом элементе Пельтье (рабочая температура 215 К).

*** Рабочая температура 65 К.

ЖФЭ – жидкофазная эпитаксия.

плексоров ЛМ 1×576 и МК-М-1 соответственно обеспечивают создание полноформатных тепловизионных систем высокого разрешения. Матричный мультиплексор МХ4 с произвольным доступом и внешним накоплением сигнала позволяет работать с фотоприемниками длинноволнового диапазона (8–14 мкм) с большим фоновым током в системах, где не требуется высокая частота обновления кадров. Универсальным является мультиплексор ММ-В, который допускает широкий диапазон регулирования времени накопления (40–20000 мкс) и обеспечивает работу средне- и длинноволновых фотоприемных матриц, выполненных на различных полупроводниковых материалах с рабочей температурой 65–215 К [13]. Мультиплексор с построчным накоплением ММПН 128×128 обладает большой зарядовой емкостью и высоким динамическим диапазоном, что позволяет получать предельные параметры температурной чувствительности для матриц диапазона 8–14 мкм на основе фотодиодов КРТ.

Заключение. Институт физики полупроводников СО РАН совместно с другими предприятиями разработал и изготовил промышленно ориентированный ряд линейчатых (1×64, 1×288, 4×288, 1×576) и матричных (32×32, 128×128, 320×240, 320×256) кремниевых мультиплексоров для гибридных фотоприемников среднего и дальнего ИК-спектральных диапазонов в первую очередь на основе соединения кадмий–ртуть–теллур и многослойных структур с квантовыми ямами. Созданные мультиплексоры использованы для гибридной микросборки ИК-фотоприемников с предельными характеристиками. Получены ИК-изображения разного формата с высоким (< 0,02 К) разрешением по температуре и кадровой частотой до 60 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.sofradir.com
2. www.indigosystems.com
3. **Frank J. D.** Off-the-shell readout ICs standardize detector interface // *Laser Focus World*. 1998. N 3.
4. **Приборы** с зарядовой связью /Под ред. М. Хоувза, Д. Моргана. Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981.
5. **Ovsyuk V. N., Sizov F. F., Vasilyev V. V. et. al.** MCT heteroepitaxial 4 × 288 FPA // *Infrared Phys. and Technol.* 2004. **45**. P. 13.
6. **Васильев В. В., Захарьяш Т. И., Клименко А. Г. и др.** Фокальные матрицы 2 × 64 для спектрального диапазона 8–10 мкм на объемных кристаллах CdHgTe // *Автометрия*. 1996. № 4. С. 32.
7. **Destefanis G., Audebert P., Mottin E. et. al.** High performance LWIR 256 × 256 HgCdTe focal plane array operating at 88 K // *SPIE*. 1997. **3061**. P. 111.
8. **Овсяк В. Н., Васильев В. В., Козлов А. И. и др.** Фотоприемные устройства на основе слоев КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (глава 3) // *Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона*. Новосибирск: Наука, 2001. С. 180.
9. **Ovsyuk V. N., Sidorov Yu. G., Vasilyev V. V. et. al.** 128 × 128 FPAs on MBE grown CdHgTe layers for medium and far IR range // *SPIE Proc. Photoelectronics and Night Vision Devices*. 2000. **4340**. P. 49.

10. **Kozlowski L. J., Vural K., Bui D. Q. et. al.** Status and direction of PACE-I HgCdTe FPAs for astronomy // SPIE. 1993. **1946**. P. 148.
11. **Васильев В. В., Есаев Д. Г., Захарьяш Т. И. и др.** Матричное фотоприемное устройство 128×128 на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs // Автометрия. 1998. № 4. С. 27.
12. **Овсяк В. Н., Сизов Ф. Ф., Сидоров Ю. Г. и др.** Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для среднего и дальнего ИК-диапазонов // Микроэлектроника. 2002. № 6.
13. **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.

*Институт физики полупроводников СО РАН,
E-mail: kozlov@thermo.isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
13 апреля 2004 г.*