

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.382: 621.383.5

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НЕКОТОРЫЕ РЕАЛИЗАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

© 2010 г. А. И. Козлов, канд. техн. наук

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

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

Рассмотрены особенности проектирования и организации кремниевых мультиплексоров для линейчатых и матричных инфракрасных фотоприемников. На этой основе разработаны 19 кремниевых мультиплексоров, предназначенных для совместной работы с многоэлементными фотодиодными детекторами на основе соединения кадмий–ртуть–теллур, с многоэлементными фоторезистивными детекторами на основе многослойных структур с квантовыми ямами и другими типами фотодетекторов со спектральной чувствительностью в диапазонах 3–5 и 8–16 мкм. Мультиплексоры позволяют создавать на своей основе гибридные и монолитные фотоприемники различного формата для среднего и дальнего инфракрасных диапазонов с достаточно высоким (< 0,02 К) разрешением по температуре.

**Ключевые слова:** кремниевый мультиплексор, многоэлементный инфракрасный фотоприемник, кремниевая схема считывания фототоков, режим с временной задержкой и накоплением, фотоприемник на основе многослойных структур с квантовыми ямами, фотодиод на основе соединения кадмий–ртуть–теллур.

Коды OCIS: 040.3060, 110.3080, 130.5990

Поступила в редакцию 27.07.2009

### Введение

Современные тепловизионные системы строятся на базе многоэлементных приемников инфракрасного (ИК) излучения. Многоэлементные ИК фотоприемники состоят из двух основных частей: многоэлементной фоточувствительной структуры и кремниевой схемы считывания (мультиплексора). Мультиплексор – это интегральная схема (ИС) или, точнее, кремниевый кристалл, на котором выполнена схема считывания электрических сигналов, полученных в результате фотоэлектрического преобразования падающего ИК излучения в фоточувствительных элементах (ФЧЭ). В гибридном исполнении ИК фотоприемника фоточувствительный и кремниевый кристаллы соединяются друг с другом методом групповой холодной сварки с использованием индивидуальных микростолбов [1]. В монолитном исполнении фотоприемника ФЧЭ создаются методом эпитаксии слоев различных материалов в специально отведенных местах в ячейках мультиплексора на его кремниевой подложке.

В литературе имеется большое количество сообщений о кремниевых мультиплексорах [1–12]. Однако современные тенденции развития, ряд проблем проектирования и особенностей организации мультиплексоров, а также их практического применения освещены недостаточно полно и наглядно. В частности, считается, что для достижения предельных характеристик линейчатых ИК фотоприемников обязательно требуются мультиплексоры с временной задержкой и накоплением (ВЗН) фотосигналов. Это не всегда справедливо. Например, незаслуженно не используются матричные мультиплексоры с построчным накоплением, которые наиболее эффективны в некоторых областях ИК спектрального диапазона и при определенных параметрах фотодетекторов. Кроме того, в литературе практически полностью отсутствуют сведения о мультиплексорах для монолитных фотоприемников на основе соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ) и свинец–олово–теллур (СОТ).

В данной работе предпринята попытка объединить достижения последних лет в области

реализации схем считывания и рассмотреть актуальные вопросы современных тенденций развития, особенностей проектирования, концептуального построения и практического применения кремниевых мультиплексоров для ИК фотоприемников.

В работе представлен унифицированный типо-размерный ряд из 19 мультиплексоров (табл. 1), созданных в Институте физики полупроводников СО РАН (ИФП СО РАН) в кооперации с рядом других предприятий (ОАО “Ангстрем”, СП ООО “Интеко”, НПОО “Микротелеком”, ЗАО “Матричные технологии” и ФГУП “НПП “Восток”) [1–7].

### **Современные тенденции развития мультиплексоров**

Ведущими фирмами (например, “SOFRADIR”) разработаны и в настоящее время серийно производятся типоразмерные ряды линейчатых ( $288 \times 4$  {LW},  $480 \times 6$  {LW}) и матричных ( $320 \times 256$  {SW, MW, LW},  $384 \times 288$  {LW},  $500 \times 256$  {SW},  $640 \times 512$  {MW, LW},  $1000 \times 256$  {SW},  $1280 \times 1024$  {MW}) фотоприемников дальнего (LW), среднего (MW) и ближнего (SW) ИК спектральных диапазонов [10].

В составе фотоприемника линейчатый или матричный мультиплексор обеспечивает требуемые электрические режимы работы ФЧЭ, осуществляет считывание фототоков 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.

Представленные на мировом рынке типо-размерные ряды кремниевых мультиплексоров постоянно пополняются новыми моделями. Разные модели кремниевых ИС считывания отличаются форматом, входными схемами, зарядовой емкостью и шагом ячеек. Следует отметить, что максимальный формат матриц обычно понижается с увеличением рабочей длины волны ИК фотоприемника. Причина – большой размер ячейки, определяемый длиной волны излучения. Кремниевые мультиплексоры обычно работают при температурах 65–300 К, что обеспечивает их применение при изготовлении как охлаждаемых (65–80 К), так и слабо-охлаждаемых (200–210 К) фотоприемников. Авторами статьи разработаны мультиплексоры, функционирующие и при более низких температурах (до 4 К).

В настоящее время идет процесс стандартизации кремниевых мультиплексоров [11]. Так, имеет место унификация внутренней структуры мультиплексора и его основных элементов (входных схем считывания и предварительной обработки, зарядочувствительных, столбцовых и выходных усилителей). В этом случае построение кремниевой ИС осуществляется из базовых элементов с использованием типовых норм КМОП-технологии. С другой стороны, кремниевые мультиплексоры становятся более универсальными и предназначены для считывания фотосигналов с целого ряда фотодетекторов: с ФЧЭ на основе HgCdTe, QWIP (AlGa/GaAlAs), SiGe/Si и InGaAs.

Стремительное уменьшение топологических норм КМОП-технологии и развитие системного проектирования обеспечило качественно новую парадигму в разработке кремниевых ИС, кратко выражаемую следующей формулой – “система на кристалле”. Это позволяет поставить вопрос о создании цифрового интеллектуального мультиплексора для ИК ФПУ, а в перспективе и интеллектуального тепловизора в одно- или двухкристальном исполнении.

### **Гибридные фотоприемники**

#### *Линейчатые мультиплексоры*

Наиболее простым из линейчатых ИС считывания является линейный мультиплексор (ЛМ) с однорядным расположением ФЧЭ (в таблице – ЛМ  $1 \times 576$ , ЛМ  $1 \times 288$ , ЛМ  $1 \times 32$  и КТ-2К) [3]. Главные особенности однорядного мультиплексора заключаются, во-первых, в возможности размещения в каждой ячейке большой программируемой емкости накопления с максимальным общим значением до  $3 \times 10^8$  электронов и более, во-вторых, в возможности построения входного узла по схеме буферированной прямой инжекции, обеспечивающей высокую (не более  $\pm 6$  мВ) однородность смещения фотодетекторов, что позволяет успешно использовать схему для работы с КРТ-фотодиодами не только среднего, но и дальнего, и сверхдальнего ИК спектральных диапазонов, в условиях больших (до 300 нА и более) темновых и/или фоновых токов и жестких требований к однородности напряжений смещения [3, 4].

Мультиплексор ЛМ  $1 \times 576$  состоит из 576 каналов считывания фотосигнала 2, четырех сдвиговых регистров и четырех выходных шин считывания (рис. 1). Каждый канал счита-

**Таблица 1.** Разработанные кремниевые мультиплексоры для ИК фотоприемников

Наименование	Формат	Особенности схемы	Шаг, мкм	Емкость накопления, $10^6$ эл.	Частота, МГц	Макс. входной ток, нА	Выходное напряжение, В	Динамический диапазон, дБ
линейчатые мультиплексоры для гибридных фотоприемников								
KT-2K	1×64	БПИ	100	156	> 1	> 300	2,2	78
ЛМ 1×288	1×288	ПИ	28	18–300	> 5	> 300	2,0	79
ЛМ 4×288	4×288	ВЗН по 4 элт.	28×43	12,5	< 2	15	3,0	70
МК-М-1	4×288	ВЗН по 4 элт.	28×43	25	< 2	30	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 для гибридных фотоприемников								
MX2	32×32	ПД	100	исследовательский мультиплексор с внекристальным накоплением				
MX4	128×128	ПД	50	исследовательский мультиплексор с внекристальным накоплением				
MM-B	128×128	ПИ	50	28	> 1	150	0,3	78
MM-A	128×128	ПИ	50	37,5	> 1	> 150	0,5	79
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	76
ММ-2* 320	320×256	ПИ	30	15	> 2	35	1,0	76
ММПН 320	320×256	ПИ, ПН, ВПУ	35	18–300	> 2	> 300	2,1	78
Карат 320	320×240	ПИ, ВПУ	35	12,5	> 4	30	3,0	70
линейчатые мультиплексоры для монолитных фотоприемников								
ЛМ 1×32	1×32	ИПД	200	320	> 1	500	1,0	79
ЛМ* 2×2×480	2×2×480	для болометров	51	—	0,001	—	—	—
матричные мультиплексоры для монолитных фотоприемников								
МКРТ32	32×32	ПД	150	исследовательский мультиплексор с внекристальным накоплением				
ММПН* 160	160×128	ПИ, ПН, ВПУ	75	18–300	> 4	> 300	2,0	78

**Примечание.**\* – модель находится в разработке, БПИ – буферированная прямая инъекция, ПИ – прямая инъекция, ВЗН – временная задержка и накопление, ПД – прямой доступ к фотоприемнику, ПН – построчное накопление фотосигнала, ВПУ – вычитание постоянного уровня, ИПД – истоковый повторитель на детектор.

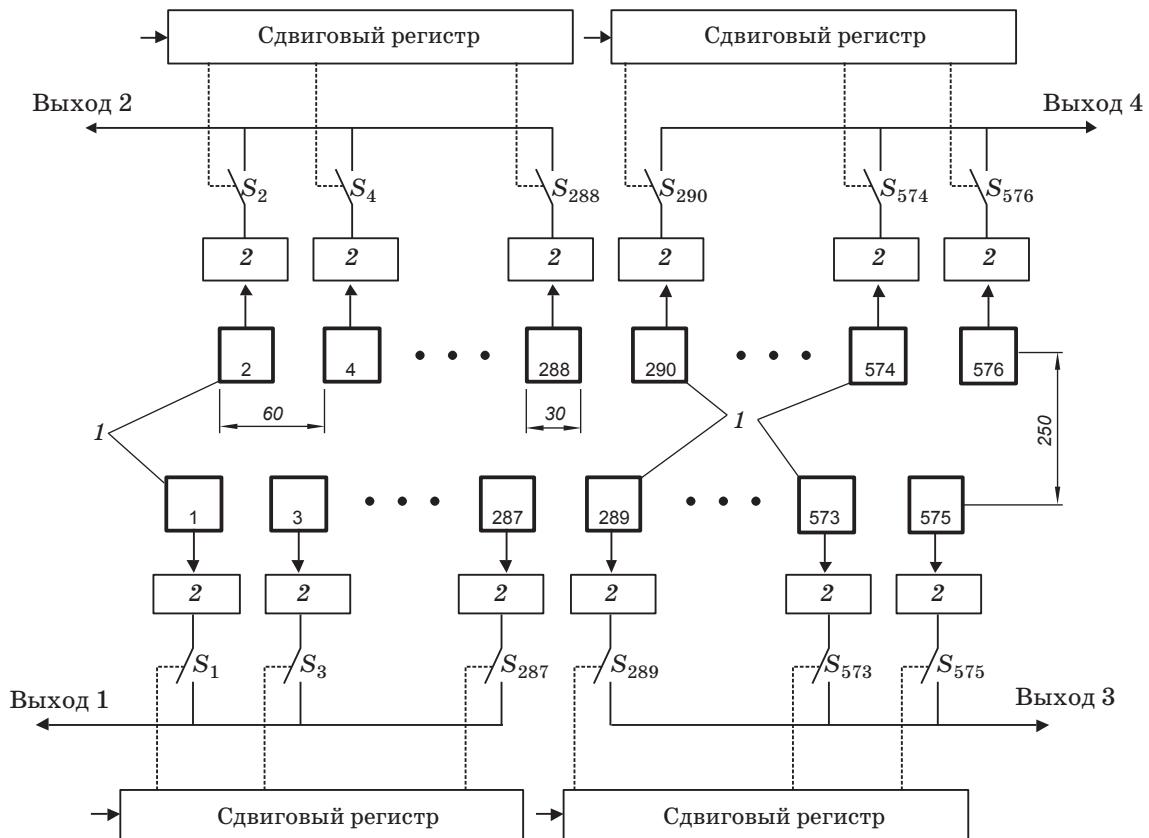
ния мультиплексора непосредственно соединен с фотодиодом через контактную площадку 1 с индиевым микростолбом и содержит входную схему, переключаемую емкость накопления, активный транзистор истокового повторителя и ключ  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 576$ ). С помощью входной схемы устанавливается напряжение смещения на фотодетекторе (ФД) и считывается фототок. Фототок интегрируется на емкости накопления, которая периодически заряжается до напряжения источника питания. Заряд, образуемый интегрированием входного тока за время накопления, для мультиплексора является сигнальным зарядом. Уровни заряда и разряда каждой емкости передаются на выход с помощью активного транзистора истокового повторителя и ключа. Разность этих уровней фиксируется схемой двойной коррелированной выборки (ДКВ) один раз за период опроса всех каналов считывания. Схема ДКВ также позволяет подавить  $1/f$ -шум выходного транзистора, шумы и "наводки" по цепям питания и выходного сигнала.

Входной узел канала считывания мультиплексора ЛМ-2 1×576 выполнен по схеме буф-

рированной прямой инжекции (рис. 2). Операционный усилитель в данной схеме, помимо функции формирования постоянного, термостабильного смещения (с однородностью  $\pm 6$  мВ), обеспечивает низкое входное сопротивление схемы считывания, что важно при работе с низкоомными фотодатчиками дальнего ИК спектрального диапазона. Минимальное сопротивление детектора, которое обеспечивает режим считывания мультиплексора с шумами, ограниченными флуктуациями фонового потока ИК излучения, составляет около 200 кОм при времени накопления  $t_{\text{нак}} = 40$  мкс. При больших временах накопления сопротивление датчика должно быть еще большим.

Рассмотренная выше схема линейного мультиплексора при изготовлении может обеспечить высокий процент выхода годных кристаллов и пониженное энергопотребление, и во многих случаях использование линейных мультиплексоров может оказаться экономически целесообразным.

В случае, когда требуется достижение предельных характеристик ИК фотоприемников,



**Рис. 1.** Функциональная схема кремниевого мультиплексора ЛМ 1×576 (общая для ЛМ-1 и ЛМ-2). 1 – входные контактные площадки с индиевыми микростолбами (1 – 576), 2 – каналы с ключами  $S_i$  считывания выходного сигнала  $S_1 – S_{576}$ .

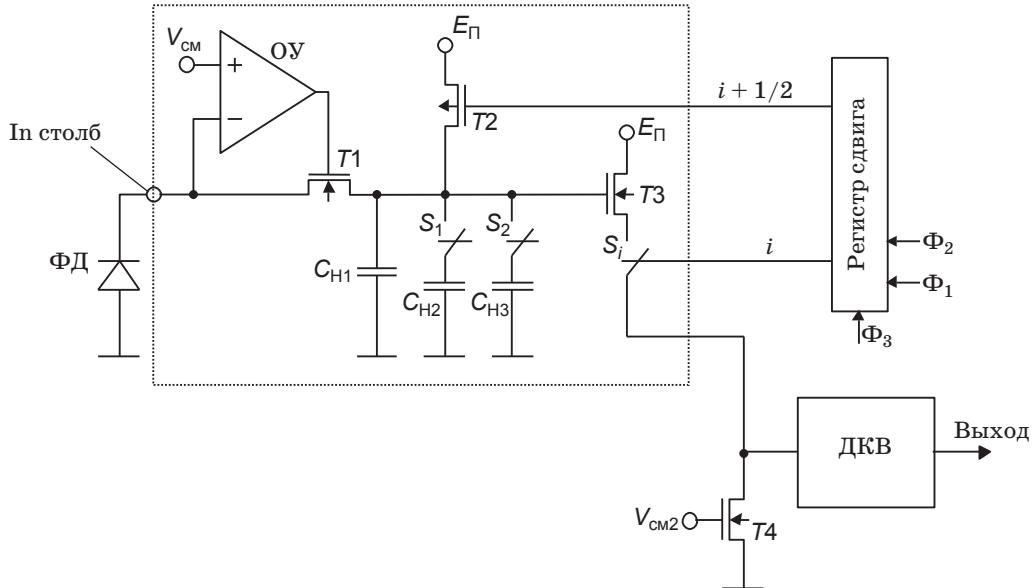


Рис. 2. Схема одного канала мультиплексора ЛМ-2 1×576. Входной узел выполнен по схеме буферированной прямой инжекции. ФД – фотодетектор, ОУ – операционный усилитель, ДКВ – схема двойной коррелированной выборки.

используется режим с временной задержкой и накоплением (ВЗН). Линейчатые мультиплексоры МК-М-1 и ЛМ 4×288 выполнены по схеме ВЗН фототоков КРТ-диодов спектральных диапазонов 8–10 и 3–5 мкм [7]. При сканировании изображения тактовая частота работы линейчатого мультиплексора с ВЗН выбирается так, чтобы задержка между отдельными входами была равна времени перемещения изображения от одной линии детекторов к другой. В процессе ВЗН для группы из 4 детекторов осуществляется четырехкратное когерентное суммирование сигнального фототока. Шумы при этом складываются некогерентно, за счет чего в режиме ВЗН обеспечивается выигрыш в отношении сигнала/шум, равный  $\sqrt{4} = 2$  [7].

За счет ВЗН обеспечивается увеличение эффективного времени накопления фотосигналов и повышение надежности из-за возможности дублирования дефектных ФЧЭ, с соответствующим достижением более высокого уровня технических характеристик тепловизионных систем. Однако создание и использование таких мультиплексоров связано с определенными трудностями получения приемлемого процента выхода годных кристаллов, сложностью в управлении и их практическом применении [7]. Емкости накопления линейчатых мультиплексоров с ВЗН ограничены величиной примерно  $2,5 \times 10^7$  электронов, поэтому область использования

таких схем ограничивается средним и началом дальнего ИК спектрального диапазона. Кроме того, требуется обеспечение высокого уровня технологии изготовления многоэлементной фоточувствительной структуры для минимизации темновых токов фотодетекторов.

### Матричные мультиплексоры

Для КРТ-фотодиодов с низкими темновыми токами и высокими дифференциальными соотивлениями можно использовать обычные современные матричные мультиплексоры с кадровым накоплением (ММКН) и умеренными емкостями, расположенными в каждой ячейке матрицы.

Принцип организации одного из ММКН поясняет функциональная схема, которая представлена на рис. 3. Мультиплексор ММ-1 состоит из следующих основных частей: матрица из  $320 \times 256$  ячеек считывания, горизонтальный и вертикальный регистры, 320 каналов считывания, выходной усилитель.

В каждой ячейке с помощью входного транзистора на фотодиоде устанавливается напряжение смещения  $V_{cm}$  и считывается фототок. Фототок интегрируется на емкости накопления  $C_{i,j}$ . Накопленный заряд при открытом ключе адресации считывается истоковым повторителем  $A_{i,j}$ . Последующая зарядка емкости  $C_{i,j}$

осуществляется с помощью транзистора сброса  $S_{\text{сбр}}$ . Емкость формируется между встроенным  $n^+$  каналом и поликремниевым электродом первого уровня, что позволило получить при размере ячейки  $40 \times 40$  мкм емкость накопления  $1,8 \times 10^7$  электронов.

При считывании фотосигнала каждая ячейка опрашивается два раза. Первый раз – фиксируется уровень накопленного сигнального заряда, второй раз – уровень сброса емкости накопления. Уровень сброса и уровень сигнала считаются отдельно, что позволяет схеме ДКВ подавить  $1/f$  шум и геометрический шум ячеек считывания [12]. Полученные сигналы мультиплексируются на выход с помощью горизонтального регистра.

Время накопления в этом мультиплексоре определяется длительностью импульса напряжения смещения  $V_{\text{см}}$ , подаваемого на входные транзисторы 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”).

Недостаток режима “snapshot” проявляется либо в зависимости частоты кадров от времени накопления, либо в необходимости выделять между кадрами паузу под импульс  $V_{\text{см}}$ , длительность которой равна максимально необходимому времени накопления, что приводит к увели-

чению доли кадрового времени, когда фотосигналы не считаются, и снижению эффективности тепловизионной системы в целом.

Регулировку времени накопления при фиксированном времени кадра (режим “электронной заслонки”) обеспечивает схема мультиплексора ММ-В (ММ-А), в котором разделены операции считывания и перезарядки интегрирующих элементов, а накопление фотосигналов происходит в процессе опроса ячеек мультиплексора. В этом случае кадровая частота определяется только временем опроса всех ячеек считывания. Рассматриваемый мультиплексор может также работать в режиме “snapshot”. Универсальные мультиплексоры ММ-В и ММ-А подробно описаны в работе [6].

Полученное значение емкости в совокупности с возможностью регулирования времени накопления обеспечивает ММКН (ММ-А, ММ-В, ММ-1, ММ-2, Карат) гибкость, достаточную для работы с фотодиодами на КРТ спектральных диапазонов 3–5 и 8–10 мкм, а также с фотоприемниками на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ).

Для реализации требуемых значений обнаружительной способности ИК фотоприемников на базе КРТ-фотодиодов, характеризующихся более высокими темновыми токами, и в условиях значительных фоновых токов, характерных для дальнего и сверхдальнего ИК спектральных диапазонов, необходимо использовать большие емкости накопления, которые могут быть получены с использованием альтернативного принципа внепиксельного, или построчного накопления [13–18].

Принцип построения мультиплексора с построчным накоплением ММПН  $320 \times 256$  поясняет функциональная схема, которая представлена на рис. 4. Мультиплексор состоит из матрицы коммутирующих ячеек, набора каналов считывания 1, вертикального и горизонтального регистров и выходной шины считывания. Каждый канал считывания 1 соединен с фотодиодом через ключ адресации  $T_{i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, 320$ ,  $j = 1, 2, \dots, 256$ ) и контактную площадку с индивидуальным микростолбом и содержит входную схему, переключаемую емкость накопления и ключ  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 320$ ).

Таким образом, в каждой ячейке матрицы находится ключ, который используется для коммутации фотодетектора со столбцовой шиной. Когда вертикальный регистр выбирает строку в матрице, ключевые транзисторы в ячейках, подсоединеных к данной строке, включают-

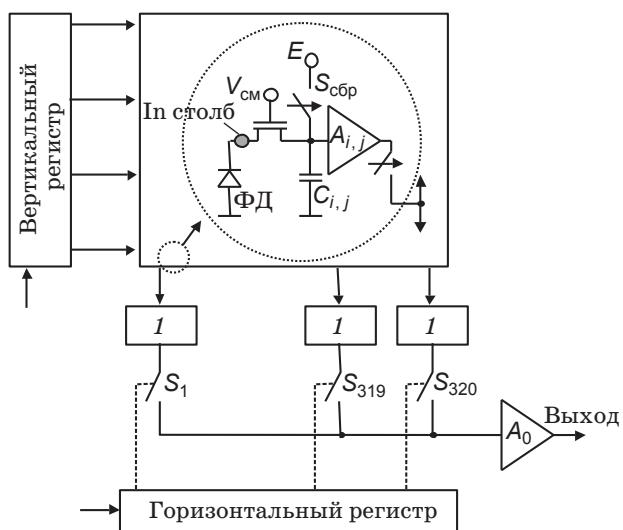


Рис. 3. Схема кремниевого мультиплексора ММ-1  $320 \times 256$ . 1 – каналы считывания,  $S_i$  – ключи считывания выходного сигнала  $i$ -го канала ( $1 - 320$ ).

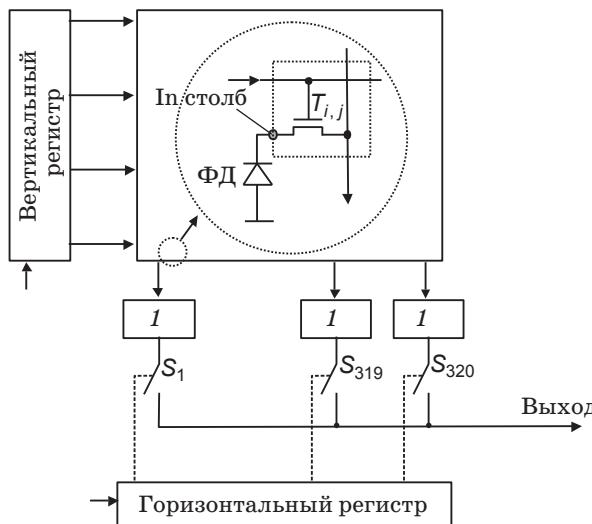


Рис. 4. Схема кремниевого мультиплексора MMPI 320×256. 1 – каналы 1 с ключами Si считывания выходного сигнала.

ся одновременно. С помощью входной схемы устанавливается напряжение смещения на фотодетекторе и считывается фототок. При этом фототок КРТ-диодов выбранной строки через столбцовые шины интегрируется на соответствующих емкостях накопления, которые периодически заряжаются до напряжения источника питания. Накопление фототоков во всех

каналах осуществляется одновременно, также одновременно происходит фиксация сигнального напряжения на емкости хранения, а считывание информации с емкостей хранения на общий выход выполняется последовательно. Емкость накопления может принимать значения от 1 до 16 пФ с дискретностью 1 пФ (рис. 5). Выходной сигнал мультиплексора, формируемый схемой ДКВ, пропорционален накопленному на емкости сигнальному заряду.

Особенностью рассматриваемых мультиплексоров является большая программируемая емкость накопления до  $3 \times 10^8$  электронов, что обеспечивает работу ИК фотоприемников в спектральном диапазоне 8–16 мкм при разной фоновой обстановке.

Сравнительный анализ температурного разрешения инфракрасных фотоприемников на основе КРТ-фотодиодов и мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением показывает следующее [2]. В спектральном диапазоне 3–5 мкм ММКН обеспечивает по сравнению с ММПИ почти двукратный выигрыш в температурном разрешении. При работе с низкоомными КРТ-фотодиодами спектрального диапазона 8–16 мкм несомненными преимуществами в плане улучшения температурного разрешения обладает ММПИ. В случае слабоохлаждаемых КРТ-фотодиодов спектрального диапазона

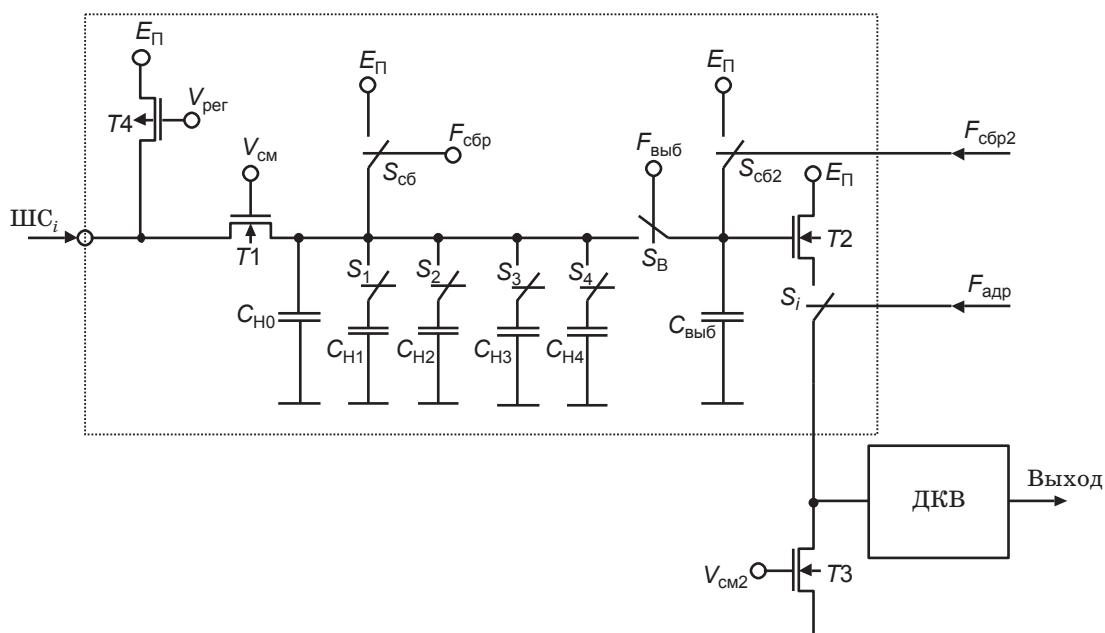


Рис. 5. Принципиальная схема одного канала мультиплексора MMPI 320×256.  $C_{H0}$  – 1,0 пФ,  $C_{H1}$  – 1,0 пФ,  $C_{H2}$  – 2 пФ,  $C_{H3}$  – 4 пФ,  $C_{H4}$  – 8 пФ – емкости накопления; ДКВ – схема двойной коррелированной выборки.

3–5 мкм тип используемого мультиплексора определяется значением параметра  $R_0A$ . При  $R_0A < 1 \text{ Ом см}^2$  выгоднее применять ММПН, а при  $R_0A > 1 \text{ Ом см}^2$  – ММКН.

В мультиплексорах ММПН  $320 \times 256$ , “Карат”  $320 \times 240$ , ММПН  $128 \times 128$  и ЛМ  $1 \times 288$  предусмотрена возможность вычитания постоянного уровня входного тока с помощью управляемых источников инверсного тока, размещенных в каждой ячейке считывания мультиплексора “Карат” 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. В случае мультиплексоров ММПН  $128 \times 128$  и ММПН  $320 \times 256$  обеспечивается вычитание постоянного уровня входного тока индивидуально для каждой строки фоточувствительных элементов матрицы. При этом следует иметь в виду, что за счет режима вычитания токов шум входных каскадов мультиплексоров увеличивается в  $\sqrt{2}$  раз.

## Монолитные фотоприемники

### Линейчатые мультиплексоры

Линейчатый мультиплексор ЛМ  $1 \times 32$  предназначен для создания монолитного фотоприемника на основе соединения свинец–олово–титан и выполнен по схеме истокового повторителя на детектор. Схема истокового повторителя на детектор отличается от схемы прямой инжекции отсутствием входного транзистора, при этом ФЧЭ непосредственно подключается к емкости накопления. Такая схема пригодна для считывания фотосигналов ФЧЭ, которые допускают большие напряжения смещения. В остальном работа мультиплексора ЛМ  $1 \times 32$  аналогична работе линейных ИС считывания для гибридных фотоприемников. Конструкция данного мультиплексора обеспечивает его работу при температуре до 4 К [19].

### Матричные мультиплексоры

Исследовательский мультиплексор МКРТ 32 разработан для считывания фотосигналов с матричных фотоприемников, для измерения вольтамперных и шумовых характеристик ФЧЭ, при отработке конструкции фоточувствительных элементов и при разработке технологии изготовления монолитных ИК фотоприемников на

основе слоев HgCdTe или SiGe/Si, выращенных на кремниевых подложках.

При работе мультиплексора МКРТ 32 выбранный в произвольном порядке фотодиод из матрицы подключается к шине считывания и может быть детально исследован. Внешняя прецизионная малошумящая схема считывания задает смещение на фотодиодах, выполняет усреднение и преобразование фототока в сигнальное напряжение. Усреднение фотосигнала может осуществляться в течение времени адресации к выбранному фотодиоду [19].

Мультиплексор МКРТ 32 обеспечивает прямой 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 10-разрядные цифровые коды, поэтому используется при создании автоматизированной установки на основе ПК для исследования характеристик монолитных КРТ-фотоприемников по полю матрицы и получения ИК изображений.

Мультиплексор для монолитного КРТ-фотоприемника форматом  $160 \times 128$  разработан по схеме с построчным накоплением. Такая схема выбрана потому, что в монолитных фотоприемниках особенно остро встает вопрос повышения коэффициента заполнения ячейки, равного отношению площади ФЧЭ к площади матрицы. В ММПН ячейка считывания содержит только ключевой транзистор и обеспечивает максимальный коэффициент заполнения.

## Экспериментальные данные

На базе разработанных в ИФП СО РАН кремниевых кристаллов мультиплексоров создан ряд линейчатых и матричных ИК фотоприемников. Характеристики некоторых из этих фотоприемников приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что линейчатые фотоприемники размерностью  $1 \times 576$  и  $4 \times 288$  на основе мультиплексоров ЛМ  $1 \times 576$  и МК-М-1, соответственно, обеспечивают создание полноформатных тепловизионных систем высокого разрешения. Матричные мультиплексоры МХ2, МХ4, МКРТ 32 с произвольным доступом и внешним накоплением сигнала позволяют работать с фотоприемниками длинноволнового диапазона (от 8 до 16 мкм) с большим фоновым током в системах, где не требуется высокая частота обновления кадров. Универсальные мультиплексоры ММ-А,

**Таблица 2.** Типичные характеристики некоторых созданных гибридных ИК фотоприемников

Размерность ФПМ, шаг размещения элементов, мкм	Используемый мультиплексор	Тип и материал матрицы	Длинноволновая граница фоточувствительности, мкм	Эквивалентная шуму разность температур, мК	Время накопления, мкс	Частота кадров, Гц
1×128, 50	КГ-2К	$n^+ - p$ фотодиоды на основе ЖФЭ CdHgTe	8,7	20	128	50
4×288, 28	МК-М-1	$n^+ - p$ фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe	10,2	23	64	50
1×576, 30	ЛМ 1×576		10,3	7	24	50
32×32, 100	MX2		10,2	14	72	25
128×128, 50	MX4		10,6	70	100*	10
	ММ-В		8,3	17	100*	2,5
		фоторезисторы на квантовых ячайках GaAs/AlGaAs***	13,1	32	100*	2,5
			4,3**	180	256	50
			6,0	17	256	50
			8,7	30	60	50
			8,3	22	5000	50
128×128, 40	ММПН 128×128	$n^+ - p$ фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe	10,2	16	65	60
320×256, 35	ММПН 320×256		~11	~20	65	30
320×256, 40	ММ-1 320×256		~5	~25	6000	30

**Примечание.** \* накопление осуществлялось внешним интегратором,

\*\* слабоохраняемый модуль на термоэлектрическом элементе Пельтье (рабочая температура 215 К),

\*\*\* рабочая температура 65 К.

ММ-В, ММ-1 обеспечивают работу средне- и длинноволновых фотоприемных матриц, выполненных на различных полупроводниковых материалах с рабочей температурой от 65 до 215 К. Мультиплексоры с построчным накоплением ММПН 128×128 и ММПН 320×256 обладают большой зарядовой емкостью и высоким динамическим диапазоном, что позволяет получать предельные параметры температурной чувствительности для матриц диапазона 8–16 мкм на основе фотодиодов КРТ.

## Выводы

В работе показано, что в настоящее время происходит постоянное расширение типоразмерного ряда кремниевых мультиплексоров, стандартизация мультиплексоров и унификация их внутренней структуры, а также универсализация их применения.

Рассмотрены особенности архитектуры матричных мультиплексоров с кадровым накоплением в зависимости от выбора режимов накопления фотосигналов. Режим “мгновенного фотоснимка” обеспечивает одновременное для всех фоточувствительных элементов время накопления, однако приводит либо к неудобству в использовании из-за зависимости частоты кадров от времени накопления, либо к потере эффективности тепловизионной системы из-за увеличения доли кадрового времени, когда фотосигналы не считаются. Режим “электронной заслонки” обеспечивает регулировку времени накопления при фиксированном времени кадра и эффективное использование кадрового времени, однако накопление сигналов фоточувствительных элементов происходит неодновременно.

Исследованы особенности конструкции матричных мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением. Мультиплексоры с кадровым накоплением отличаются расположением умеренной (до  $20 \times 10^6$  электронов) емкости накопления в каждой ячейке матрицы в фокальной плоскости. В мультиплексорах с построчным накоплением большие (до  $300 \times 10^6$  электронов) программируемые емкости накопления расположены на периферии кристалла вне фокальной плоскости.

Приведены данные о том, что в спектральном диапазоне 3–5 мкм в плане улучшения температурного разрешения матричные мультиплексоры с кадровым накоплением обладают несомненными преимуществами перед матричными

мультиплексорами с построчным накоплением. В случае слабоохлаждаемых КРТ-фотодиодов ближнего ИК диапазона тип используемых мультиплексоров определяется параметрами фотодетекторов. В спектральном диапазоне 8–16 мкм особенно эффективны матричные мультиплексоры с построчным накоплением фотосигналов и линейные мультиплексоры с однорядным расположением фоточувствительных элементов и большой программируемой емкостью накопления. Область использования мультиплексоров с временной задержкой и накоплением фотосигналов ограничена средним и началом дальнего ИК диапазонов (из-за емкости накопления, не превышающей  $25 \times 10^6$  электронов).

## Заключение

В работе исследованы особенности проектирования и организации, а также современные тенденции развития и практического применения кремниевых мультиплексоров для линейчатых и матричных ИК фотоприемников. Представлен отечественный унифицированный промышленно ориентированный типоразмерный ряд линейчатых ( $1 \times 32$ ,  $1 \times 64$ ,  $2 \times 2 \times 480$ ,  $1 \times 288$ ,  $4 \times 288$ ,  $1 \times 576$ ) и матричных ( $32 \times 32$ ,  $128 \times 128$ ,  $160 \times 128$ ,  $320 \times 240$ ,  $320 \times 256$ ) кремниевых мультиплексоров для фотоприемников среднего и дальнего ИК диапазонов на основе соединений кадмий–ртуть–теллур, свинец–олово–теллур и многослойных структур с квантовыми ямами.

Созданные мультиплексоры использованы для гибридной микросборки ИК фотоприемников с предельными характеристиками. При этом получены ИК изображения разного формата с высоким ( $< 0,02$  К) разрешением по температуре и кадровой частотой до 60 Гц.

Разработаны кремниевые мультиплексоры для монолитных фотоприемников на основе соединений кадмий–ртуть–теллур и свинец–олово–теллур.

Автор выражает благодарность академику А.Л. Асееву и доктору физ.-мат. наук В.Н. Овсяку за поддержку и полезные обсуждения результатов данной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.И., Шашкин В.В. Кремниевые мультиплексоры для многоэлементных фотоприемников ИК диапазона // Автометрия. 2005. Т. 41. № 3. С. 88–99.
2. Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.И. Кремниевые мультиплексоры  $320 \times 256$  для инфракрасных фотоприемных устройств на основе КТР-диодов // Автометрия. 2007. Т. 43. № 4. С. 74–82.
3. Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.И. Кремниевые мультиплексоры  $1 \times 576$  для ИК фотодиодов на основе соединений кадмий–ртуть–теллур // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 4. С. 278–286.
4. Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Асеев А.Л. Серия кремниевых мультиплексоров для КТР-фотодиодов спектрального диапазона 8–16 мкм // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С. 60–67.
5. Васильев В.В., Голенков А.Г., Дворецкий С.А., Есаев Д.Г., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Рева В.П., Сидоров Ю.Г., Сизов Ф.Ф., Суслаков А.О., Талипов Н.Х. Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  для среднего и дальнего ИК-диапазонов // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6. С. 414–422.
6. Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Филиппова В.В. Унифицированные кремниевые мультиплексоры  $128 \times 128$  для инфракрасных фотоприемных устройств // Автометрия. 2006. Т. 42. № 4. С. 109–118.
7. Vasilyev V.V., Klimenko A.G., Marchishin I. V., Ovsyuk V.N., Talipov N. Ch., Zaharyash T.I., Golenkov A.G., Derkach Yu.P., Reva V.P., Sizov F.F., Zubadski V.V. MCT heteroepitaxial  $4 \times 288$  FRA // Infrared Physics and Technology. 2004. V. 45. № 1. P. 13–21.
8. Hewitt M.J., Vampola J.L., Black S.H., Niessen C.J. Infrared readout electronics: a historical perspective // Proc. SPIE. 1994. V. 2226. P. 108–119.
9. Mottin E., Pantigny P., Boch R. An improved architecture of IR FRA readout circuits // Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 119–128.
10. По данным фирмы “SOFRADIR” ([www.sofradir.com](http://www.sofradir.com)).
11. Frank J.D. Off-the-shelf readout ICs standardize detector interface // Optoelectronics World. 1998. № 3. P. 23–24.
12. Nixon R.H., Cemey S.E., Pain B., Staller C.O., Fossum E.R.  $256 \times 256$  Active Pixel Sensor Camtron-a-Chip // IEEE J. of SSC. 1996. V. 31. № 12. P. 2046–2058.
13. Kanno T., Saga M., Karwahara A., Oikawa R., Ajisawa A., Tomioka Y., Oda N., Yamagata T., Murashima S., Shima T., Yasuda N. Development of MBE grown HgCdTe  $64 \times 64$  FRA for long-wavelength IR detection // Proc. SPIE. Infrared Technology XIX. 1993. V. 2020. P. 41–48.
14. Hsieh C.C., Wu C.Y., Sun T.R. A new cryogenic CMOS readout structure for infrared focal plane

- array // IEEE J. of SSC. 1997. Т. 32. № 8. Р. 1192–1204.
15. *Hsieh C.C., Wu C.Y., Sun T.P., Jih F.W., Cherng Y.T.* High-performance CMOS buffered gate modulation input readout circuits for IR FPA // IEEE J. of SSC. 1998. Т. 33. № 8. Р. 1188–1200.
16. *Акимов В.Н., Еремеева Л.Е., Лисейкин В.П., Щукин С.В., Патрашин А.И., Климанов Е.А., Тимофеев А.А., Гастев С.С.* Разработка охлаждаемых МОП-мультиплексоров для считывания и обработки сигнала с фотодиодных КРТ-матриц // Оптический журнал. 1995. Т. 62. № 12. С. 63–70.
17. *Бовина Л.А., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Климанов Е.А., Патрашин А.И., Сагинов Л.Д., Стafeев В.И., Тимофеев А.А.* Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 6. С. 74–77.
18. *Стafeев В.И., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Акимов В.М., Климанов Е.А., Сагинов А.Д., Соляков В.Н., Мансветов Н.Г., Пономаренко В.П., Тимофеев А.А., Филачев А.М.* Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 10. С. 1257–1265.
19. *Французов А.А., Сапожникова Н.В., Феофанов Г.Н.* Многоходовой электрометрический усилитель-мультиплексор, работоспособный при криогенных температурах // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 4. С. 272–276.