

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382 : 621.383.5

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ КРЕМНИЕВЫХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИК-ФОТОПРИЕМНИКОВ

А. И. Козлов

Учреждение Российской академии наук

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

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

Рассмотрены основы построения кремниевых мультиплексоров для линейчатых и матричных ИК-фотоприемников. Представлены кремниевые мультиплексоры, предназначенные для совместной работы с многоэлементными фотодиодными детекторами на основе соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ), с многоэлементными фоторезистивными детекторами с использованием многослойных структур с квантовыми ямами и другими типами фотодетекторов со спектральной чувствительностью в ИК-диапазонах 3–5 и 8–16 мкм. Типоразмерный ряд мультиплексоров содержит 19 моделей, отличающихся форматом, входными схемами, зарядовой емкостью и шагом ячеек. На базе разработанных мультиплексоров созданы гибридные и монокристалльные фотоприемники различных форматов для среднего и дальнего ИК-диапазонов с достаточно высоким ($< 0,02$ К) разрешением по температуре.

Ключевые слова: ИК-фотоприемник, схема считывания фототоков, кремниевые мультиплексоры.

Введение. Современные многоэлементные ИК-фотоприемники состоят из 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).

Разработкам кремниевых мультиплексоров посвящено большое количество работ [1–6]. Немногочисленные авторы пытались обобщить данные о мультиплексорах [1, 2]. В работе [1], например, проведен анализ применимости разных схем входных узлов мультиплексоров для различных фотодетекторов (ФД). В [2] сделана попытка анализа архитектуры мультиплексоров. Однако в большинстве работ представлено только описание разработок, но не обобщается и не систематизируется информация о схемах считывания фотосигналов. Поэтому специалисты, разрабатывающие фотоприемные устройства и тепловизионные системы, не всегда имеют полную и наглядную информацию о сравнительной специфике построения мультиплексоров, принципов интегрирования фототока и использования различных кремниевых схем считывания фотосигналов.

Целью данной работы является попытка восполнить этот пробел: объединить достижения последних лет в области реализации схем считывания и провести анализ принципов построения кремниевых мультиплексоров для оптимизации их конструкции с учетом особенностей фотодетекторов и условий применения в разных спектральных ИК-диапазонах. Приведены характеристики унифицированного типоразмерного ряда из 19 мультиплексоров, созданных в Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН (ИФП

СО РАН) совместно с другими предприятиями (ОАО «Ангстрем», СП ООО «Интеко», НПО «Микротелеком», ЗАО «Матричные технологии» и ФГУП «НПП "Восток"») [3–10].

Современные тенденции построения мультиплексов. Ведущими фирмами (например, SOFRADIR, Франция) разработаны и в настоящее время серийно производятся типоразмерные ряды линейчатых (288×4 {LW}, 480×6 {LW}) и матричных (320×256 {SW, MW, LW}, 384×288 {LW}, 500×256 {SW}, 640×512 {MW, LW}, 1000×256 {SW}, 1280×1024 {MW}) фотоприемников дальнего (LW), среднего (MW) и ближнего (SW) спектральных ИК-диапазонов [10].

Линейчатый или матричный мультиплексор обеспечивает требуемые электрические режимы работы ФЧЭ, осуществляет считывание фототоков ФЧЭ, позволяет исключить механическую развертку изображения по одной или двум координатам и в итоге в значительной степени определяет качество получаемого тепловизионного изображения в целом.

Представленные на мировом рынке соответствующие типоразмерные ряды кремниевых мультиплексов 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.

В настоящее время идет процесс стандартизации кремниевых мультиплексов [11]. Так, имеет место унификация внутренней структуры мультиплекса 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. Кроме того, кремниевые мультиплексы становятся более универсальными. Универсальные мультиплексы предназначены для считывания фотосигналов с целого ряда фотодетекторов: с ФЧЭ на основе HgCdTe, QWIP (AlGa/GaAlAs), SiGe/Si, InSb и InGaAs.

И наконец, стремительное уменьшение топологических норм КМОП-технологии и развитие системного проектирования обеспечили и сформировали качественно новую парадигму разработки кремниевых ИС, названную «система на кристалле». Это позволяет поставить вопрос о создании цифрового «интеллектуального» мультиплекса для ИК ФПУ, а в перспективе и «интеллектуального» тепловизора в одно- или двухкристальном исполнении.

Гибридные фотоприемники. В гибридном исполнении фоточувствительный и кремниевый кристаллы соединяются друг с другом методом групповой холодной сварки с использованием индиевых микростолбов.

Линейчатые мультиплексы. Наиболее простым из линейчатых ИС считывания является линейный мультиплексор (ЛМ) с однорядным расположением ФЧЭ (табл. 1: ЛМ 1×576 , ЛМ 1×288 , ЛМ 1×32 и КТ-2К) [4]. Главные особенности однорядного мультиплекса заключаются, во-первых, в возможности размещения в каждой ячейке большой программируемой емкости накопления с максимальной общей величиной до $3 \cdot 10^8$ электронов и более, во-вторых, в возможности построения входного узла по схеме буферизированной прямой инжекции [4], обеспечивающей высокую (не более ± 6 мВ) однородность смещения фотодетекторов, что позволяет успешно использовать схему для работы с КРТ-фотодиодами не только среднего, но и дальнего, и сверхдальнего спектральных ИК-диапазонов в условиях больших (до 300 нА и более) темновых и/или фоновых токов и жестких требований к однородности напряжений смещения [4, 5].

Мультиплексор ЛМ 1×576 (рис. 1) состоит из 576 каналов (2) считывания фотосигнала, четырех сдвиговых регистров и четырех выходных шин считывания. Каждый

Таблица 1

Разработанные кремниевые мультиплексоры для ИК-фотоприемников и их параметры

| Наименование | 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 для гибридных фотоприемников | | | | | | | | |
| КТ-2К | 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 элемента | 28 × 43 | 12,5 | < 2 | 15 | 3,0 | 70 |
| МК-М-1 | 4 × 288 | ВЗН по 4 элемента | 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 | | | | | | | | |
| 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 | 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 | | | | | | | | |
| МКРТ 32 | 32 × 32 | ПД | 150 | исследовательский мультиплексор с внекристалльным накоплением | | | | |
| ММПН* 160 | 160 × 128 | ПИ, ПН, ВПУ | 75 | 18-300 | > 4 | > 300 | 2,0 | 78 |

Примечания: * — модель находится в разработке; БПИ — буферизованная прямая инжекция, ПИ — прямая инжекция, ВЗН — временная задержка и накопление, ПД — прямой доступ к фотоприемнику, ПН — построение накопления фотосигнала, ВПУ — вычитание постоянного уровня, ИПД — истоковый повторитель на детектор.

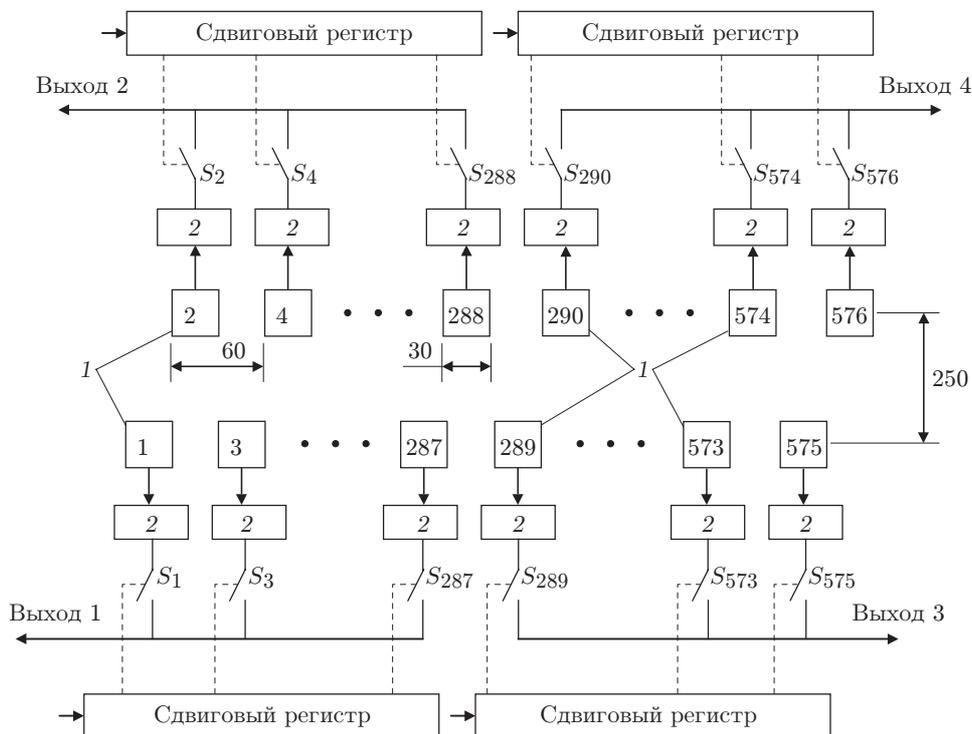


Рис. 1. Функциональная схема кремниевого мультиплексора ЛМ 1 × 576 (общая для ЛМ-1 и ЛМ-2)

канал считывания 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 и считывается фототок. Далее фототок интегрируется на емкости накопления, которая периодически заряжается до напряжения источника питания. Заряд, образуемый интегрированием входного тока за время накопления, для мультиплексора является сигнальным. 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) 1 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 буферированной прямой инжекции (рис. 2). Операционный усилитель (ОУ) в данной схеме помимо функции формирования точного термостабильного смещения (с однородностью ± 6 мВ) обеспечивает низкое входное сопротивление схемы считывания, что важно при работе с низкоомными фотодатчиками дальнего спектрального ИК-диапазона. Минимальное сопротивление детектора, с которым обеспечивается режим считывания мультиплексора с шумами, ограниченными флуктуациями фонового потока ИК-излучения, составляет около 200 кОм при времени накопления $t_n = 40$ мкс. При больших временах накопления сопротивление датчика должно быть еще большим.

При изготовлении рассмотренной выше схемы линейного мультиплексора обеспечивается высокий процент выхода годных кристаллов и пониженное энергопотребление, что может оказаться экономически целесообразным.

В случае, когда требуется достижение предельных характеристик ИК-фотоприемни-

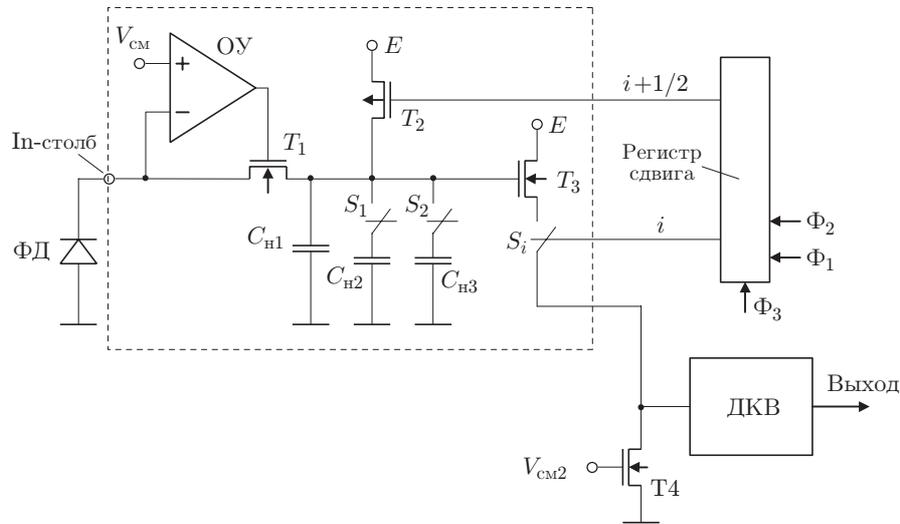


Рис. 2. Схема одного канала мультиплексора ЛМ-2 1×576

ков, используется режим с временной задержкой и накоплением (ВЗН). Линейчатые мультиплексоры МК-М-1 и ЛМ 4 × 288 выполнены по схеме с ВЗН фототоков КРТ-диодов спектральных диапазонов 3–5 и 8–10 мкм [9]. При сканировании изображения тактовая частота 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 четырех детекторов осуществляется четырехкратное когерентное суммирование сигнального фототока. Шумы в то же время складываются некогерентно, за счет чего в режиме ВЗН обеспечивается выигрыш в отношении сигнал/шум, равный $\sqrt{4} = 2$ [9].

За счет ВЗН обеспечивается увеличение эффективного времени накопления фотосигналов и повышение надежности в плане возможности дублирования дефектных ФЧЭ для соответствующего достижения 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 практическом применении [9]. Емкости накопления линейчатых мультиплексоров с ВЗН не превышают величины $\sim 2,5 \times 10^7$ электронов, поэтому область использования таких схем ограничивается средним и началом дальнего спектрального ИК-диапазонов. Кроме того, требуется высокий уровень технологии изготовления многоэлементной фоточувствительной структуры для минимизации темновых токов ФД.

Матричные мультиплексоры. Для КРТ-фотодиодов с низкими темновыми токами и высокими дифференциальными сопротивлениями 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 (рис. 3). Мультиплексор ММ-1 состоит из следующих основных частей: матрица из 320×256 ячеек считывания, горизонтальный и вертикальный регистры, 320 каналов (1) считывания, выходной усилитель.

В каждой ячейке с помощью входного транзистора на фотодиоде устанавливается напряжение смещения $V_{см}$ и считывается фототок. Затем фототок интегрируется на емкости накопления C_{ij} . Накопленный заряд при открытом ключе адресации считывается источником повторителем A_{ij} . Последующая зарядка емкости C_{ij} осуществляется с помощью

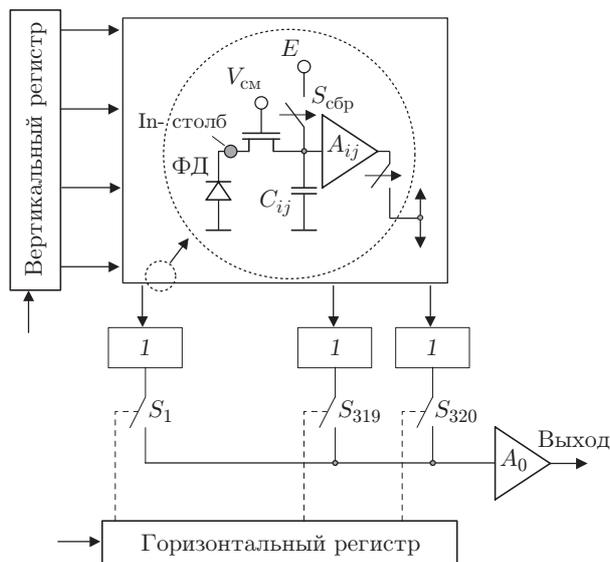


Рис. 3. Схема кремниевого мультиплексора ММ-1 320 × 256

транзистора сброса $S_{сбр}$. Емкость формируется между встроенным n^+ -каналом и поликремниевым электродом первого уровня, что позволяет получить при небольшом размере ячейки ($40 \times 40 \text{ мкм}^2$) емкость накопления величиной $1,8 \times 10^7$ электронов.

При считывании фотосигнала каждая ячейка опрашивается 2 раза: первый раз фиксируется уровень накопленного сигнального заряда, второй раз — уровень сброса емкости накопления. Уровень сброса и уровень сигнала считываются отдельно, что позволяет схеме ДКВ подавить $1/f$ -шум и геометрический шум ячеек считывания [12]. Полученные в результате сигналы мультиплексируются на выход с помощью горизонтального регистра.

Время накопления в этом мультиплексоре определяется длительностью импульса напряжения смещения $V_{см}$, 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 $V_{см}$, длительность которой равна максимально необходимому времени накопления. Это приводит к увеличению доли кадрового времени, когда фотосигналы не считываются, и соответственно 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 и в режиме мгновенного фотоснимка. Универсальные мультиплексоры ММ-В и ММ-А подробно описаны в работе [8].

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 КРТ-фотодиодами спектральных диапазонов 3–5 и 8–10 мкм, а также с фотоприемниками на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ).

Для реализации требуемых величин обнаружительной способности ИК-фотоприемников на базе КРТ-фотодиодов, характеризующихся более высокими темновыми токами, и

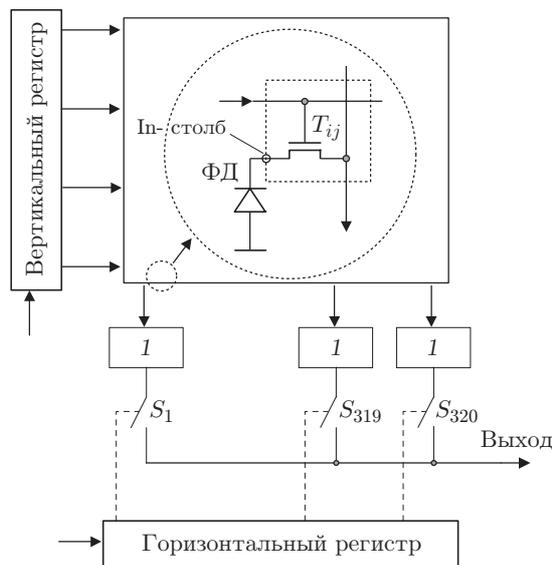


Рис. 4. Схема кремниевого мультиплексора ММПН 320×256

при условиях значительных фоновых токов, свойственных для дальнего и сверхдальнего спектральных ИК-диапазонов, необходимо использовать большие емкости накопления, которые могут быть получены с использованием альтернативного принципа внепиксельного или построчного накопления [13–18].

Принцип построения матричного мультиплексора с построчным накоплением (ММПН) 320×256 поясняет функциональная схема, представленная на рис. 4. Мультиплексор состоит из матрицы коммутационных ячеек, набора каналов (1) считывания, вертикального и горизонтального регистров и выходной шины считывания. Каждый канал считывания соединен с фотодиодом через ключ адресации T_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 320$, $j = 1, 2, \dots, 256$) и контактную площадку с индиевым 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, подсоединенных к данной строке, включаются одновременно. С помощью входной схемы устанавливается напряжение смещения на ФД и считывается фототок. При этом фототок КРТ-диодов выбранной строки через столбцовые шины интегрируется на соответствующих емкостях накопления (C_H), 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 в диапазоне от 1 до 16 пФ с дискретностью 1 пФ (рис. 5). Выходной сигнал мультиплексора, формируемый схемой ДКВ, пропорционален величине накопленного на емкости сигнального заряда.

Особенностью рассматриваемых мультиплексоров является большая программируемая емкость накопления с максимальной общей величиной до 3×10^8 электронов, что обеспечивает работу ИК-фотоприемников в спектральном диапазоне 8–16 мкм при разной фоноцелевой обстановке.

Сравнительный анализ температурного разрешения инфракрасных фотоприемников на основе КРТ-фотодиодов и мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением показывает следующее [3]. В спектральном диапазоне 3–5 мкм ММКН по сравнению с ММПН

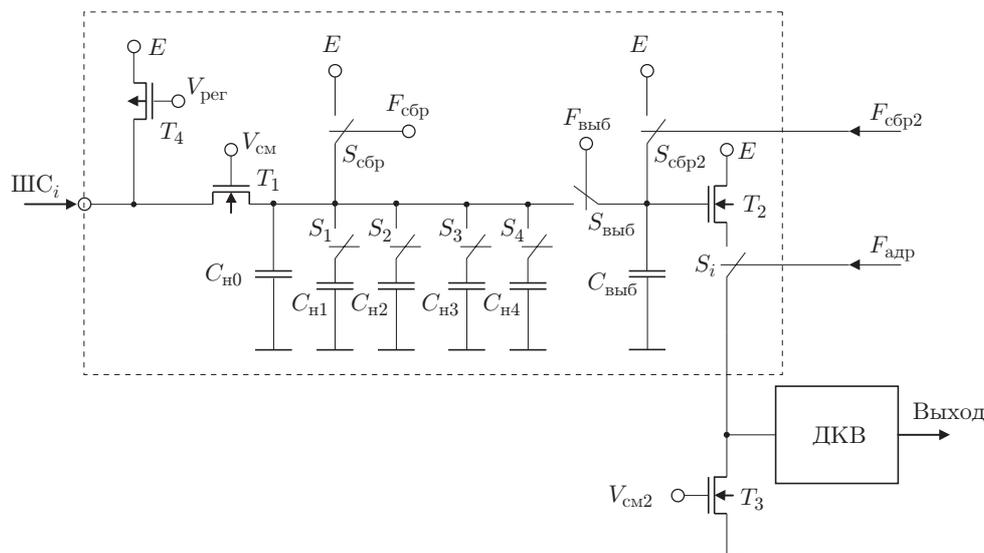


Рис. 5. Упрощенная принципиальная схема одного канала считывания мультиплексора ММПН 320×256 ($C_{н0} = 1$, $C_{н1} = 1$, $C_{н2} = 2$, $C_{н3} = 4$, $C_{н4} = 8$ пФ, ШС — шина считывания)

обеспечивает почти двукратный выигрыш в температурном разрешении. При работе с КРТ-фотодиодами спектрального диапазона 8–16 мкм несомненными преимуществами в улучшении температурного разрешения обладает ММПН. Для слабоохлаждаемых КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 3–5 мкм тип используемого мультиплексора определяется значением параметра R_0A : при $R_0A < 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ выгоднее применять ММПН, а при $R_0A > 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ — ММКН.

В мультиплексорах ММПН 320×256 , Карат 320×240 , ММПН 128×128 и ЛМ 1×288 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. Для мультиплексоров 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 за счет режима вычитания токов шум входных каскадов мультиплексоров увеличивается в $\sqrt{2}$ раз.

Монолитные фотоприемники. В монолитном исполнении ИК-фотоприемника ФЧЭ создаются методом эпитаксии слоев различных материалов в специально отведенных местах в ячейках мультиплексора на его кремниевой подложке.

Линейчатые мультиплексоры. Линейный мультиплексор ЛМ 1×32 предназначен для создания монолитного фотоприемника на основе соединения свинец—олово—теллур (СОТ) 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 1×32 аналогична работе кремниевых ИС считывания для гибридных фотоприемников. Конструкция данного мультиплексора обеспечивает его работу при температуре до 4 К.

Матричные мультиплексоры. Исследовательский мультиплексор МКРТ 32 разра-

Таблица 2
Типичные характеристики некоторых созданных гибридных ИК-фотоприемников

| Размерность фотоприемников, 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 |
| 4 × 288, 28 | МК-М-1 | | 10,2 | 23 | 64 | 50 |
| 1 × 576, 30 | ЛМ 1 × 576 | $n^+ - p$ -фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe | 10,3 | 7 | 24 | 50 |
| 32 × 32, 100 | МХ2 | | 10,2 | 14 | 72 | 25 |
| 128 × 128, 50 | МХ4 | | 10,6 | 70 | 100* | 10 |
| | | | 8,3 | 17 | 100* | 2,5 |
| 128 × 128, 50 | ММ-В | фоторезисторы на квантовых ямах 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 |
| | | | 10,2 | 16 | 65 | 60 |
| 320 × 256, 35 | ММПН 320 × 256 | $n^+ - p$ -фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe | ~ 11 | ~ 20 | 65 | 30 |
| 320 × 256, 40 | ММ-1 320 × 256 | | ~ 5 | ~ 25 | 6000 | 30 |

Примечания: * — накопление осуществлялось внешним интегратором, ** — слабоохлаждаемый модуль на термоэлектрическом элементе Пельтье (рабочая температура 215 К), *** — рабочая температура 65 К.

ботан для считывания фотосигналов с матричных фотоприемников, измерения вольт-амперных и шумовых характеристик ФЧЭ при отработке конструкции фоточувствительных элементов и при создании технологии изготовления монокристаллических ИК-фотоприемников на основе слоев HgCdTe или SiGe/Si, выращенных на кремниевых подложках.

При работе мультиплексора МКРТ 32 выбранный в произвольном порядке ФД 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 за время адресации к выбранному ФД. Мультиплексор МКРТ 32 обеспечивает прямой доступ к элементам фотоприемной матрицы, высокую однородность смещения ФД и возможность работы с большими темновыми и/или фоновыми токами [19]. Схема удобна в эксплуатации, так как требует для работы только два источника постоянного напряжения и 10-разрядные цифровые коды. Она используется при создании автоматизированной установки на основе ПК для исследования характеристик монокристаллических КРТ-фотоприемников по полю матрицы и получения ИК-изображений.

Мультиплексор для монокристаллического КРТ-фотоприемника форматом 160×128 разработан по схеме с построчным накоплением. Такая схема выбрана потому, что при создании монокристаллических фотоприемников 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 целый ряд линейчатых и матричных ИК-фотоприемников. Характеристики некоторых из них приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что линейчатые фотоприемники 1×576 и 4×288 на основе мультиплексоров ЛМ 1×576 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, ММ-В, ММ-1 обеспечивают работу средне- и длинноволновых фотоприемных матриц, выполненных на различных полупроводниковых материалах с рабочей температурой от 65 до 215 К. Большой зарядовой емкостью и высоким динамическим диапазоном обладают ММПН 128×128 и ММПН 320×256 , что позволяет получать предельные параметры температурной чувствительности для матриц диапазона 8–16 мкм на основе КРТ-фотодиодов.

Заключение. В данной работе рассмотрены концептуальные основы построения мультиплексоров: принципы организации, способы интегрирования фототока и особенности использования различных кремниевых схем считывания фотосигналов.

Известно, что матричные мультиплексоры могут быть построены по схеме с кадровым или построчным накоплением. В работе приводятся данные о том, что оптимальный тип мультиплексора определяется параметрами фотодатчика и заданным спектральным диапазоном. Так, например, матричный мультиплексор с большими (до 3×10^8 электронов) программируемыми емкостями и построчным накоплением фотосигналов низкоомных КРТ-фотодиодов наиболее эффективен в спектральном ИК-диапазоне 8–16 мкм.

Выбор способа накопления фотосигналов матричных мультиплексоров с кадровым накоплением определяется требованиями к тепловизионной системе. 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 считываются. Режим электронной заслонки обеспечивает регулировку времени накопления при фиксированном времени кадра и эффективное использование кадрового времени, однако накопление фотосигналов фоточувствительных элементов происходит неодновременно.

Установлено, что применение линейных мультиплексоров, построенных по схеме с порядным расположением КРТ-фотодетекторов, в некоторых практически важных случаях может быть экономически более целесообразным, чем использование линейчатых мультиплексоров с временной задержкой и накоплением фотосигналов. Линейный мультиплексор с большими (до 3×10^8 электронов) программируемыми емкостями накопления может успешно работать с КРТ-фотодиодами спектрального ИК-диапазона 8–16 мкм.

С применением анализа концептуальных основ построения схем считывания фотосигналов разработан унифицированный промышленно ориентированный типоразмерный ряд линейчатых (1×32 , 1×64 , $2 \times 2 \times 480$, 1×288 , 4×288 , 1×576) и матричных (32×32 , 128×128 , 160×128 , 320×240 , 320×256) кремниевых мультиплексоров для фотоприемников среднего и дальнего спектральных ИК-диапазонов на базе соединений кадмий—ртуть—теллур, свинец—олово—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.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hewitt M. J., Vampola J. L., Black S. H., Nielsen C. J. Infrared readout electronics: a historical perspective // SPIE. 1994. **2226**. P. 108–119.
2. Mottin E., Pantigny P., Boch R. An improved architecture of IR FPA readout circuits // SPIE. 1997. **3061**. P. 117–126.
3. Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяюк В. Н. Кремниевые мультиплексоры 320×256 для инфракрасных фотоприемных устройств на основе КРТ-диодов // Автометрия. 2007. **43**, № 4. С. 74–82.
4. Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяюк В. Н. Кремниевые мультиплексоры 1×576 для ИК фотодиодов на основе соединения кадмий—ртуть—теллур // Микроэлектроника. 2008. **37**, № 4. С. 278–286.
5. Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяюк В. Н., Асеев А. Л. Серия кремниевых мультиплексоров для КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 8–16 мкм // Оптический журнал. 2008. **75**, № 3. С. 60–67.
6. Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяюк В. Н., Шашкин В. В. Кремниевые мультиплексоры для многоэлементных фотоприемников ИК-диапазона // Автометрия. 2005. **41**, № 3. С. 88–99.
7. Васильев В. В., Голенков А. Г., Дворецкий С. А. и др. Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для среднего и дальнего ИК диапазонов // Микроэлектроника. 2002. **31**, № 6. С. 414–422.
8. Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяюк В. Н., Филиппова В. В. Унифицированные кремниевые мультиплексоры 128×128 для инфракрасных фотоприемных устройств // Автометрия. 2006. **42**, № 4. С. 109–118.
9. Vasilyev V. V., Klimenko A. G., Marchishin I. V. et al. MCT heteroepitaxial 4×288 FPA // Proc. SPIE. 2004. **45**, N 1. P. 13–23.

10. www.sofradir.com
11. **Frank J. D.** Off-the-shell readout ICs standardize detector interface // *Laser Focus World*. 1998. **34**, N 3. P. 324–325.
12. **Nixon R. H., Kemeny S. E., Pain B. et al.** 256 × 256 CMOS active pixel sensor camera-on-a-chip // *IEEE Journ. SSC*. 1996. **31**, N 12. P. 2046–2050.
13. **Kanno T., Saga M., Kajihara N. et al.** Development of LPE-grown HgCdTe 64 × 64 FPA with a cutoff wavelength of 10.6 μm // *SPIE. Infrared Technol. XIX*. 1993. **2020**. P. 49–56.
14. **Hsieh C. C., Wu C. Y., Sun T. P.** A new cryogenic CMOS readout structure for infrared focal plane array // *IEEE Journ. SSC*. 1997. **32**, N 8. P. 1192–1199.
15. **Hsieh C. C., Wu C. Y., Sun T. P. et al.** High-performance CMOS buffered gate modulation input (BGMI) readout circuits for IR FPA // *IEEE Journ. SSC*. 1998. **33**, N 8. P. 1188–1198.
16. **Акимов В. М., Еремеева Л. Е., Лисейкин В. П. и др.** Разработка охлаждаемых МОП-мультиплексоров для считывания и обработки сигнала с фотодиодных КРТ-матриц // *Оптический журнал*. 1995. № 12. С. 63–70.
17. **Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др.** Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм // *Оптический журнал*. 1996. № 6. С. 74–77.
18. **Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др.** Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // *Физика и техника полупроводников*. 2005. **39**, № 10. С. 1257–1265.
19. **Овсюк В. Н., Васильев В. В., Козлов А. И. и др.** Фотоприемные устройства на основе слоев КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // *Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона*. Новосибирск: Наука, 2001. Гл. 3. С. 180.

Поступила в редакцию 1 июня 2009 г.
