

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.382: 621.383.5

СЕРИЯ КРЕМНИЕВЫХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ ДЛЯ КРТ-ФОТОДИОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 8–16 мкм

© 2008 г. А. И. Козлов, канд. техн. наук; И. В. Марчишин; В. Н. Овсяук, доктор физ.-мат. наук;
А. Л. Асеев

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

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

В работе представлены результаты разработки линейных (1×288, 1×576) и матричных (128×128, 320×256) кремниевых мультиплексоров для КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 8–16 мкм. Приведены типичные параметры мультиплексоров и характеристики длинноволновых гибридных ИК фотоприемников, созданных в Институте физики полупроводников СО РАН.

Коды OCIS: 040.3060, 110.3080, 130.5990.

Поступила в редакцию 13.06.2007.

Введение

Во многих практически важных случаях необходима регистрация изображений объектов и сцен в ИК диапазоне 8–16 мкм. Наиболее часто для этой цели используются ИК фотоприемные устройства (ФПУ) на основе соединения кадмий–ртуть–теллур (КРТ) [1, 2].

В основе ИК ФПУ обычно лежит линейный или матричный фотоприемник излучения, который представляет собой гибридное соединение двух кристаллов, один из которых содержит фоточувствительные элементы (ФЧЭ), а второй – интегральную схему мультиплексора, который осуществляет считывание электрических сигналов после фотоэлектрического преобразования ИК излучения в ФЧЭ, исключая или упрощая механическую развертку по одной или по двум координатам [1–3].

Фотодиоды, выполненные на основе соединений КРТ для дальнего (8–16 мкм) ИК диапазона, характеризуются большими темновыми и/или фоновыми токами, наличием избыточных $1/f$ -шумов и жесткими требованиями к однородности напряжений смещения [2, 4].

Ведущими фирмами (“SOFRADIR”, “Indigo Systems Corporation” и др.) разработаны и в настоящее время серийно производятся унифицированные ряды линейных (4×288, 6×460, 1×512) и матричных (128×128, 320×240, 320×256, 384×288, 640×512)

кремниевых мультиплексоров для фотоприемников дальнего, среднего и ближнего ИК спектральных диапазонов [5, 6]. Фирма “Rockwell Science Center” предлагает, например, более 20 моделей мультиплексоров для КРТ-фотодиодов спектральных диапазонов от 1,05 до 14 мкм. Модели отличаются друг от друга форматом, входными схемами, зарядовой емкостью и шагом ячеек. Следует отметить, что максимальный формат матриц уменьшается с увеличением рабочей длины волны фотоприемника: 2048×2048 элементов разложения для спектрального диапазона 0,9–2,5 мкм, 1024×1024 – для диапазона 0,9–5,0 мкм, 256×256 – для диапазона 8–12 мкм и только 128×128 – для диапазона 8–14 мкм.

В данной работе рассмотрены вопросы создания унифицированной серии мультиплексоров, предназначенных для считывания и предварительной обработки фотосигналов с линейных (1×288, 1×576) и матричных (128×128, 320×256) КРТ-фотодетекторов спектрального диапазона 8–16 мкм. Мультиплексоры разработаны в Институте физики полупроводников (ИФП) СО РАН и изготовлены по КМОП-технологии на производственной базе ОАО “Ангстрем”.

Особенностью рассматриваемых мультиплексоров является большая программируемая емкость накопления с максимальной общей величиной до 48 пКл, что обеспечивает работу ИК ФПУ в спектральном диапазоне 8–16 мкм при разной фоноцелевой обстановке.

Матричные мультиплексоры

Общие принципы организации

Для КРТ-фотодиодов с низкими темновыми токами I_{dark} и высокими дифференциальными сопротивлениями R_d можно использовать обычные современные мультиплексоры с умеренными емкостями накопления $C_{\text{нак}}$, расположенными в каждой ячейке матрицы. Примером может служить ИК ФПУ на матрице КРТ-фотодиодов с длинноволновой границей чувствительности $\lambda_{\text{отс}} = 10,3$ мкм, с темновым током $I_{\text{dark}} = 0,7$ нА и дифференциальным сопротивлением $R_d = 10^{10}$ Ом при температуре 78 К [7]. В этом случае $C_{\text{нак}} = 7,9$ пКл, расположенных в каждой ячейке матрицы, было достаточно для достижения высоких значений обнаружительной способности и хорошего температурного разрешения; время накопления ограничивалось величиной 200 мкс [8].

Для реализации требуемых величин обнаружительной способности ИК ФПУ на базе КРТ-фотодиодов, характеризующихся более высокими темновыми токами, и в условиях значительных фоновых токов необходимо использовать большие емкости накопления, которые могут быть получены с использованием альтернативного принципа внепиксельного или построчного накопления [9–14]. Такой матричный мультиплексор с построчным накоплением (ММПН) обычно состоит из матрицы ключей и набора каналов считывания, включающих входные схемы считывания фототока, емкости накопления и усилители на выходе. С помощью схемы адресации осуществляется последовательное мультиплексирование каналов на общий выход. Похожую структуру из набора каналов считывания имеет кремниевый мультиплексор для линеек фотоприемников [15, 16].

Функциональная схема разработанного ММПН 320×256 приведена на рис. 1. Мультиплексор состоит из матрицы входных контактных площадок с индиевыми микростолбами, матрицы коммутирующих ячеек, набора каналов 3 считывания фотосигнала, вертикального и горизонтального регистров и выходной шины считывания. Каждый канал 3 считывания мультиплексора соединен с фотодиодом через ключ адресации $T_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, 320$, $j = 1, 2, \dots, 256$) и контактную площадку с индиевым микростолбом и содержит входную схему 1 , переключаемую емкость накопления 2 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 верти-

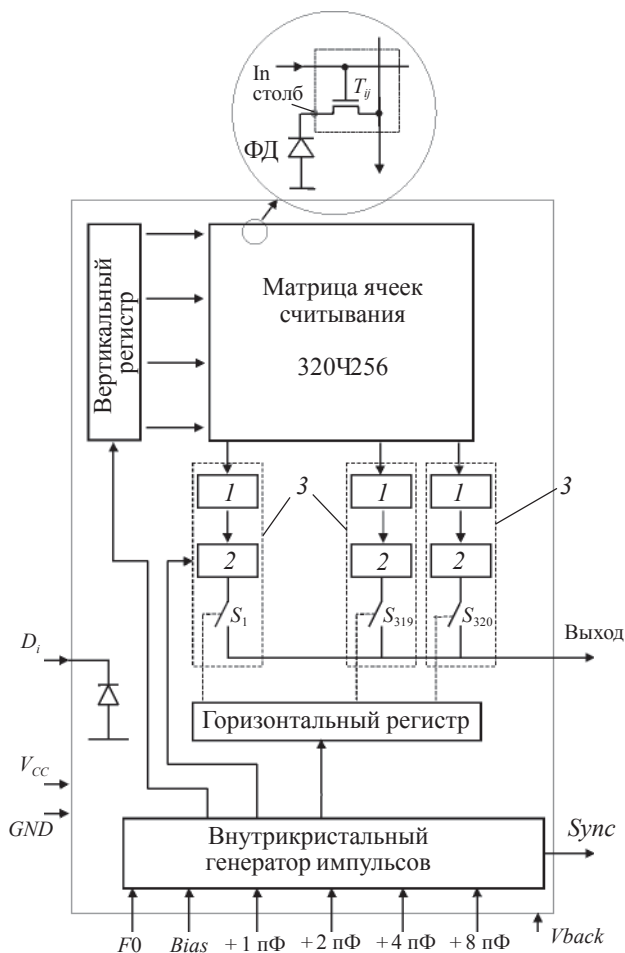


Рис. 1. Функциональная схема кремниевого мультиплексора ММПН 320×256 . 1 – входные схемы считывания фотосигнала, 2 – переключаемые емкости накопления, 3 – канал считывания фотосигнала, S_i – ключ считывания выходного сигнала канала.

кальный регистр выбирает строку в матрице, ключевые транзисторы в ячейках, подсоединенных к данной строке, включаются одновременно. С помощью входной схемы 1 устанавливается напряжение смещения на фотодетекторе и считывается фототок. При этом фототок КРТ-диодов выбранной строки через столбцовые шины интегрируется на соответствующих емкостях накопления 2 , которые периодически заряжаются до напряжения источника питания. Накопление фототоков во всех каналах осуществляется одновременно. Емкость накопления может принимать значения в диапазоне от 1 до 16 пФ с дискретностью 1 пФ. Выходной сигнал мультиплексора пропорционален накопленному на емкости 2 сигнальному заряду. Функциональная схема ММПН 128×128 отличается от схемы ММПН 320×256 только форматом матрицы ячеек и количеством каналов считывания.

Принципиальная схема

На рис. 2 изображена упрощенная принципиальная схема одного канала разработанного ММПН 320×256. ММПН выполняет накопление сигналов от отдельных фотодиодов на соответствующих емкостях, фиксацию сигнального напряжения на емкости хранения и последовательное считывание информации с емкостей хранения на общий выход.

Напряжение смещения фотодиодов ($V_{см}$) подается на затвор входного транзистора $T1$ канала считывания (см. рис. 2). Считывание сигнального напряжения на емкости, пропорционального величине накопленного за один цикл заряда, происходит следующим образом. При подаче положительного импульса на шину $F_{выб}$ ключ выборки S_B открывается на время длительности импульса и происходит фиксация сигнального напряжения на емкости хранения $C_{выб}$. Затем на шину $F_{сбр}$ приходит положительный импульс, ключ $S_{сб}$ открывается и емкость накопления заряжается до напряжения питания.

С появлением “1” на адресной шине $F_{адр}$ ключ S_i открывается и на выходной шине, нагруженной на источник тока $T3$, появляется сигнал, соответствующий напряжению на затворе транзистора считывания $T2$. Через $1/2$ такта на шине сброса $F_{сбр2}$ появляется импульс, открывающий ключ сброса $S_{сб2}$, и на шине считывания возникает сигнал, соответствующий напряжению зарядки емкости хранения. Разность двух напряжений пропорциональна величине накопленного в i -м канале сигнального заряда. Эта разность формируется с помощью схемы двойной коррелированной выборки (ДКВ). Также ДКВ позволяет подавить $1/f$ -шум выходного тран-

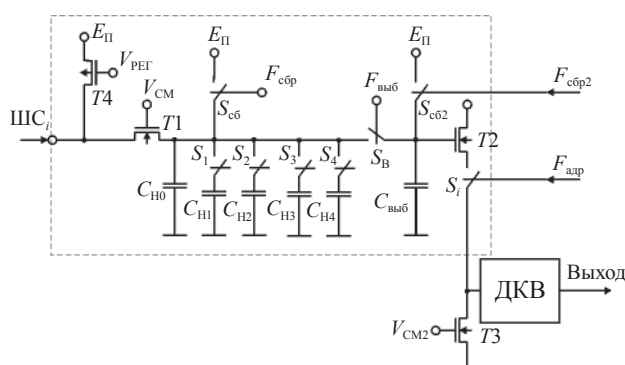


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема одного канала матричного мультиплексора ММПН 320×256.

зистора, шумы и “наводки” по цепям питания и выходного сигнала.

Линейные мультиплексоры

Общие принципы организации

Достижение предельного уровня технических характеристик тепловизионных систем обеспечивается при организации работы линеек фотоприемников в режиме временной задержки и накопления фототоков. Для этого требуются специальные мультиплексоры [4, 17, 18]. Создание и использование таких мультиплексоров связано с определенными трудностями получения приемлемого процента выхода годных кристаллов, сложностью в управлении и практическом применении [3].

В случае, когда не требуется достижения предельных характеристик ИК ФПУ, и/или при обеспечении надлежащего уровня технологии изготовления многоэлементной фоточувствительной структуры может оказаться экономически целесообразным применение гибридных фотоприемников с однорядным расположением ФЧЭ, которые обеспечивают простые линейные мультиплексоры (ЛМ) 1×576 и 1×288. Причем последний выполнен в формате фотоприемников фирмы “Sofradir”, имеет пониженное энергопотребление и при изготовлении обеспечивает высокий процент выхода годных кристаллов.

Особый интерес представляют достаточно длинные линейные мультиплексоры 1×576 [4, 15, 16, 18, 19], которые при формировании полноформатного (768×576) ИК изображения позволяют полностью исключить механическую развертку по одной из координат.

Функциональная схема разработанных мультиплексоров 1×576 (общая для ЛМ-1 и ЛМ-2) приведена на рис. 3. Мультиплексор состоит из входных контактных площадок 1 с индиевыми микростолбами, набора каналов 4 считывания фотосигнала, четырех сдвиговых регистров и четырех выходных шин считывания. Каждый канал считывания мультиплексора непосредственно соединен с фотодиодом через контактную площадку 1 с индиевым микростолбом и содержит входную схему 2 , переключаемую емкость накопления 3 , активный транзистор истокового повторителя и ключ S_i ($i = 1, 2, \dots, 576$).

С помощью входной схемы 2 устанавливается напряжение смещения на фотодетекторе и считывается фототок. Фототок интегрируется на емкости накопления 3 , которая периодически заряжается до напряжения источника питания. По сдвиговому регистру, управляемому импульсными напряжениями, продвигается импульс с высоким логическим уров-

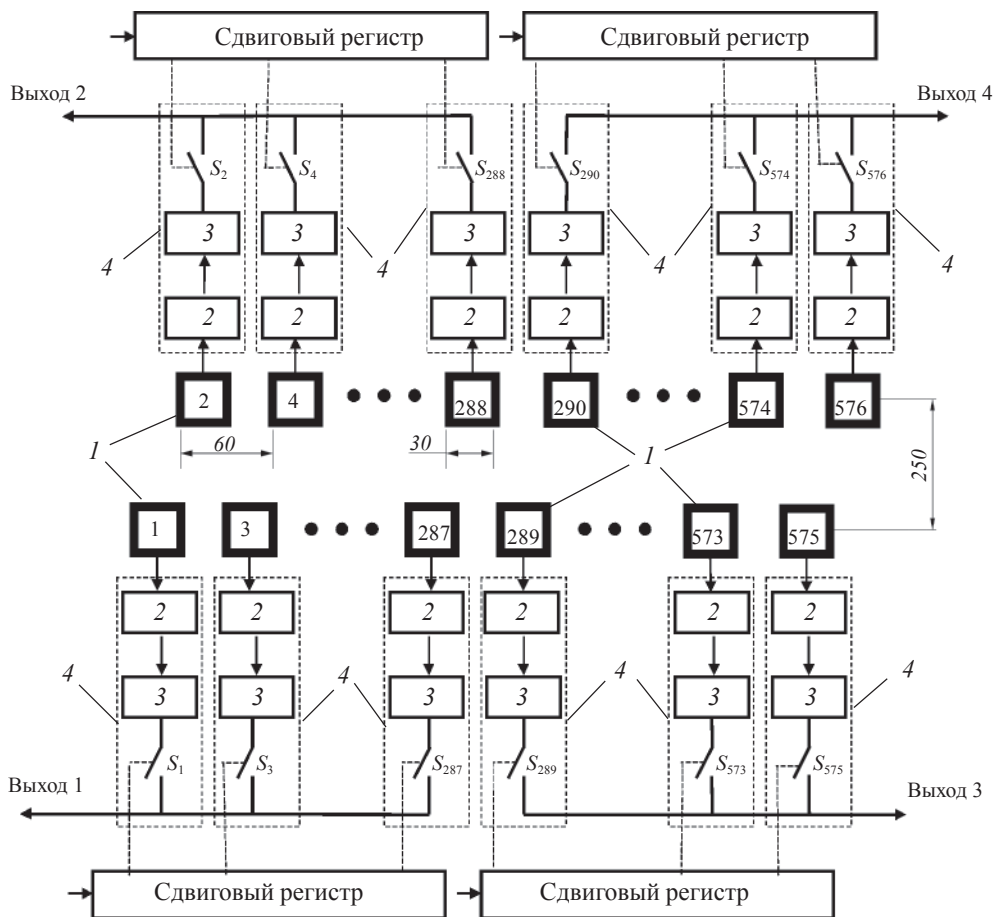


Рис. 3. Функциональная схема кремниевого мультиплексора 1×576 . 1 – входные контактные площадки с индиевыми микростолбами, 2 – входные схемы считывания фотосигнала, 3 – переключаемые емкости накопления, 4 – канал считывания фотосигнала, S_i – ключ считывания выходного сигнала канала.

нем “1”. Разность уровней зарядки и разрядки каждой емкости 3 фиксируется один раз за период опроса всех каналов считывания и передается на выход с помощью адресного ключа S_i .

Принципиальные схемы

На рис. 4 изображена унифицированная принципиальная схема одного канала созданного 576-канального мультиплексора ЛМ-2.

Считывание сигнального напряжения на емкости, пропорционального величине накопленного за один цикл заряда, происходит следующим образом [16]. С появлением “1” на адресной шине $F_{\text{адр}}$ ключ S_i открывается и на выходной шине, нагруженной на источник тока $T3$, появляется сигнал, соответствующий напряжению на затворе транзистора считывания $T2$. Через $1/2$ такта на шине сброса $F_{\text{сбр}}$ появляется импульс, открывающий ключ сброса $S_{\text{сб}}$, и на шине считывания возникает сигнал, соответствующий напряжению зарядки емкости. Разность

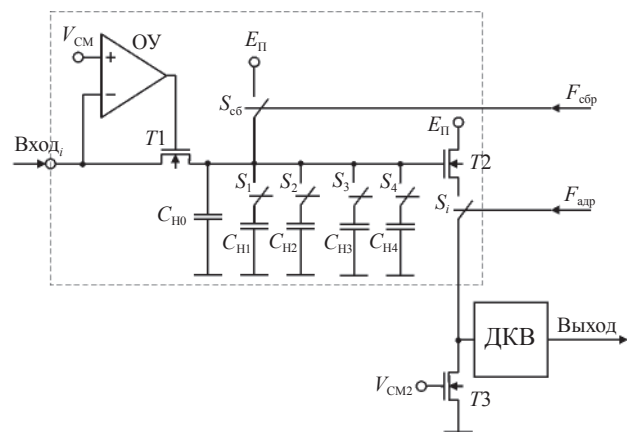


Рис. 4. Унифицированная принципиальная схема одного канала линейного мультиплексора ЛМ-2 1×576 .

двух напряжений пропорциональна величине накопленного в i -м канале сигнального заряда. Эта разность формируется с помощью схемы ДКВ.

Дифференциальный усилитель в данной схеме помимо функции формирования точного, термостабильного смещения обеспечивает низкое входное сопротивление схемы считывания. Параметры транзисторов дифференциального каскада выбирались из условия минимизации шума при небольшом потребляемом токе. Минимальное сопротивление детектора, которое обеспечивает режим считывания мультиплексора с шумами, ограниченными флуктуациями фонового потока ИК излучения, составляет около 200 кОм при времени накопления $t_n = 40$ мкс.

Принципиальная схема канала мультиплексора ЛМ-1 отличается только отсутствием дифференциального усилителя. Напряжение смещения фотодиодов подается непосредственно на затвор входного транзистора ($T1$) канала считывания. Считывание сигнала на емкости, пропорционального величине накопленного за один цикл заряда, происходит аналогично рассмотренному выше. Следует отметить, что по сравнению с мультиплексором ЛМ-2 отличительной особенностью мультиплексора ЛМ-1 является более низкая потребляемая мощность.

Мультиплексор ЛМ 1×288 выполнен по схеме мультиплексора ЛМ-1 в формате фотоприемников фирмы “Sofradir” с шагом 28 мкм.

Разработанные линейные мультиплексоры ЛМ, ЛМ-1 и ЛМ-2 удобны в обращении, так как требуют для работы только два источника постоянного напряжения: напряжение питания ($+E_n$) и точно подстраиваемое обратное смещение фотодиода ($V_{см}$), а также три импульсных напряжения для управления регистрами сдвига.

Входные схемы считывания фотосигнала

Входные схемы мультиплексоров должны удовлетворять многим требованиям. В нашем случае особенно важно, чтобы они обеспечивали высокую однородность смещения фотоприемников и эффективность считывания фототока [1].

При использовании на входе простой схемы прямой инжекции фототока через МОП-транзистор (мультиплексоры ЛМ, ЛМ-1, ММПН) неоднородность смещения фотодиодов повторяет неоднородность порогового напряжения входных МОП-транзисторов [20]. Характерное значение неоднородности порогового напряжения входных транзисторов мультиплексора при изготовлении ИС по современной промышленной КМОП-технологии составляет ± 15 мВ (абсолютное отклонение).

При необходимости улучшения однородности смещения используется свойство корреляции электрических параметров двух смежных транзис-

торов. Схема буферированной прямой инжекции (мультиплексор ЛМ-2) формирует смещение на фотодатчике с ошибкой, равной разности пороговых напряжений двух соседних транзисторов. В этой схеме используется симметрия транзисторов дифференциального каскада операционного усилителя [21, 22]. Неоднородность напряжения смещения на фотодетекторах при использовании на входе схемы с буферным усилителем не превышает ± 6 мВ.

Рассмотрим далее эффективность считывания фототока. Часть фототока шунтируется внутренним сопротивлением детектора или, на высокой частоте, емкостью входного узла и не достигает емкости накопления. Эффективность считывания фототока характеризуется долей инжектируемого в устройство фототока. Условием высокой эффективности считывания является требование

$$g_s R_d \gg 1, \quad (1)$$

где g_s – дифференциальная проводимость входного МОП-транзистора, R_d – дифференциальное сопротивление детектора [16].

В схеме с прямой инжекцией дифференциальная проводимость входного транзистора зависит от тока I через транзистор. В подпороговом режиме в качестве оценки можно использовать формулу

$$g_s = \frac{qI}{kT},$$

где kT/q – тепловой потенциал; в надпороговом режиме формулу

$$g_s = \sqrt{2 \frac{W}{L} \mu C_{ox} I},$$

где W/L – отношение ширина/длина канала транзистора, μ – подвижность, C_{ox} – удельная емкость диэлектрика [16].

В нашем случае при большом темновом токе детектора и/или при высоком уровне ИК фона проблем с эффективностью считывания фототока не возникает [2]. Для того чтобы обеспечить достаточную эффективность считывания фототока на высокой частоте постоянная времени входного узла должна быть меньше времени интегрирования фототока в мультиплексоре.

Схема с операционным усилителем (мультиплексор ЛМ-2), характеризуемым коэффициентом усиления по напряжению K_V , имеет в $(K_V + 1)$ раз большую входную проводимость при том же токе через входной транзистор. Ограничения, накладываемые неравенством (1), ослабляются и схема оказывается более работоспособной в области меньших со-

противлений детектора и меньших произведений $I_{\phi} t_n$, где I_{ϕ} – фототок, t_n – время накопления [2, 16].

В мультиплексорах ЛМ 1×288, ММПН 128×128 и ММПН 320×256 предусмотрена возможность вычитания (компенсации) постоянного уровня входного тока с помощью управляемых источников инверсного тока, размещенных в каждом канале считывания. Организация матричных мультиплексоров обеспечивает вычитание постоянного уровня входного тока индивидуально для каждой строки фоточувствительных элементов матрицы. При этом следует иметь в виду, что шум входных каскадов мультиплексоров увеличивается в $\sqrt{2}$ раз за счет режима вычитания токов на входе.

Экспериментальные данные

Разработанные мультиплексоры предназначены для совместной работы с линейками и матрицами n^+ - p -фотодиодов на основе КРТ в ИК диапазонах 3–5 и 8–16 мкм.

Мультиплексоры изготовлены по стандартной КМОП-технологии с одним слоем поликремниевых затворов, двумя слоями металлической разводки и с максимальным напряжением питания 6 В.

Основные параметры разработанных мультиплексоров, приведенные в табл. 1, соответствуют мировому уровню. Мультиплексоры работают в широком диапазоне температур от 300 до 65 К и обеспечива-

Таблица 1. Основные параметры мультиплексоров, разработанных для ИК ФПУ спектрального диапазона 8–16 мкм

Тип кристалла	ЛМ 1×288	ЛМ-1 1×576	ЛМ-2 1×576	ММПН 128×128	ММПН 320×256
Наименование параметра					
Формат кристалла	1×288	1×576	1×576	128×128	320×256
Количество линий считывания	288	576	576	128	256
Типы фотоприемников					
Входная полярность фотодиодов			КРТ 8–16, 3–5 мкм n^+ на p -подложке		
Шаг входных контактных площадок, мкм	28	30	30	40×40	35×35
Технология	1,0 КПОП ДМ	1,2 КПОП ДМ	1,2 КПОП ДМ	1,2 КПОП ДМ	1,0 КПОП ДМ
Тип входной схемы	Прямая инжекция	Прямая инжекция	Буферизованная прямая инжекция	Прямая инжекция	Прямая инжекция
Однородность смещения фотодиодов, не хуже, мВ	± 15	± 15	± 6	± 11	± 15
Принцип накопления	—	—	—	Построчное	Построчное
Вычитание постоянного уровня емкости накопления, пФ	+	—	—	+	+
C_{H0}	1	1,3	1,3	1	1
C_{H1}	1	2	2	1	1
C_{H2}	2	6	6	2	2
C_{H3}	4	—	—	4	4
C_{H4}	8	—	—	8	8
Максимальный входной ток, не менее, нА	300	200	200	300	300
Время накопления, мкс	20	40	40	10–130	10–130
Тактовая частота, МГц	3,5	3,5	3,5	1	2,5
Максимальный выходной сигнал, не менее, В	2	1,9	1,9	1,9	2
Динамический диапазон, не менее, дБ	80	79	79	80	80
Количество сигнальных выходов	4	4	4	1	1,4
Количество работающих ячеек считывания, не менее, %	100	100	100	99	99,99
Потребляемая мощность, не более, мВт	30	50	80	40	100
Геометрические размеры кристалла, мм	5,3×9,7	4×18	5×18	8,2×9,0	12,4×14,1

ют высокую однородность напряжений смещения фотодетекторов. Последнее особенно важно, поскольку избыточные $1/f$ -шумы длинноволновых КРТ-фотодиодов минимальны в узком диапазоне обратных смещений (25–50 мВ) [2, 4, 16, 18]. Основные параметры получены при обследовании целого ряда образцов и могут рассматриваться как типичные.

Хотя созданные мультиплексоры ориентированы на подключение к линейкам и матрицам ИК фотодиодов спектральных диапазонов 3–5 и 8–16 мкм, их можно использовать при работе с фотоспротивлениями или другими источниками сигналов.

Многоэлементные гибридные фотоприемники

На базе разработанных в ИФП СО РАН кремниевых кристаллов мультиплексоров создан целый ряд линейных и матричных фотоприемников длинноволнового ИК диапазона. Характеристики некоторых из этих фотоприемников приведены в табл. 2 [3, 4]. Из таблицы видно, что линейные фотоприемники размерностью 1×576 на основе мультиплексоров ЛМ-1 обеспечивают создание полноформатных тепловизионных систем высокого разрешения. Универсальный мультиплексор ММ-В, подробно описанный в работе [23], с широким диапазоном регулирования времени накопления 40–20 000 мкс обеспечивает работу средне- и длинноволновых фотоприемных матриц, выполненных из различных полупроводниковых материалах с рабочей температурой от 65 до 215 К. Мультиплексоры с построч-



Рис. 5. Тепловые изображения, полученные с использованием мультиплексора ММПН 320×256 .

ным 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.

На рис. 5 приведены примеры тепловых изображений, полученные в спектральном диапазоне 8–16 мкм на основе фотодиодов КРТ и кремниевое мультиплексора ММПН 320×256 [18].

Заключение

Институт физики полупроводников СО РАН в кооперации с ОАО “Ангстрем” разработал и изготовил промышленно ориентированную серию линей-

Таблица 2. Типичные характеристики некоторых длинноволновых гибридных ИК фотоприемников, созданных в ИФП СО РАН

Размерность ФПМ, шаг размещения элементов	Используемый мультиплексор	Тип и материал фотоприемной матрицы	Длинноволновая граница фоточувствительности, мкм	Эквивалентная шуму разность температур, мК	Время накопления, мкс	Частота кадров, Гц
1×576, 30 мкм	ЛМ 1×576	n^+p -фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe	10,2	14	72	25
			4,3*	180	256	50
128×128, 50×50 мкм	ММ-В	фоторезисторы на квантовых ямах GaAs/AlGaAs**	8,7	30	60	50
			8,3	22	5000	50
128×128, 40×40 мкм	ММПН 128×128	n^+p -фотодиоды на основе МЛЭ CdHgTe	10,2	16	65	60
320×256, 35×35 мкм	ММПН 320×256		~ 11	~ 20	65	30

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

** Рабочая температура 65 К.

ных (1×288, 1×576) и матричных (128×128, 320×256) кремниевых мультиплексоров для гибридных фотоприемников дальнего ИК спектрального диапазона в первую очередь на основе соединения кадмий–ртуть–теллур. 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 с кадровой частотой до 60 Гц.

Авторы выражают благодарность П.Р. Машевичу и А.А. Романову за поддержку и эффективную помощь при изготовлении мультиплексоров на технологической базе ОАО “Ангстрем”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы. Пер. с англ. / Под ред. А.В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. *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. 376 с.
3. *Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Шашкин В.В.* Кремниевые мультиплексоры для многоэлементных фотоприемников ИК диапазона // *Автометрия*. 2005. Т. 41. № 3. С. 88–99.
4. *Овсяк В.Н., Сизов Ф.Ф., Сидоров Ю.Г. и др.* Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, для среднего и дальнего ИК диапазонов // *Микроэлектроника*. 2002. Т. 31. № 6. С. 414–422.
5. www.sofradir.com
6. www.indigosystems.com
7. *Destefanis G., Audebert P., Mottin E. et al.* High performance LWIR 256×256 HgCdTe focal plane array operating at 88 K // *Proc. SPIE*. 1997. V. 3061. P. 111–118.
8. *Mottin E., Pantigny P., Boch R.* An improved architecture of IR FPA readout circuits // *Proc. SPIE*. 1997. V. 3061. P. 119–128.
9. *Kanno T., Saga M., Kawahara A. et al.* Development of LPE grown HgCdTe 64×64 FPA with a cutoff wavelength of 10,6 μm // *Proc. SPIE*. 1993. V. 2020. P. 49–56.
10. *Hsieh C.C., Wu C.Y., Sun T.P.* A new cryogenic CMOS readout structure for infrared focal plane array // *IEEE J. of SSC*. 1997. V. 32. № 8. P. 1192–1199.
11. *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. V. 33. № 8. P. 1188–1198.
12. *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.
13. *Бовина Л.Ф., 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.
14. *Стафеев В.И., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д. и др.* 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.
15. *Chamonal J.P., Audebert P. et al.* Long MWIR HgCdTe butted linear arrays // *Proc. SPIE*. 1997. V. 3061. P. 467–475.
16. *Крымский А.И., Фомин Б.И., Черепов Е.И.* Особенности проектирования и некоторые реализации кремниевых мультиплексоров для линеек ИК фотодиодов. // *Автометрия*. 1994. № 2. С. 79–92.
17. *Приборы с зарядовой связью / Под ред. Хоувза М., Моргана Д.* Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981. 376 с.
18. *Ovsiuk V.N., Sizov F.F., Vasilyev V.V. et al.* MCT heteroepitaxial 4×288 FPA // *Infrared Physics and Technology*. 2004. V. 45. P. 13–21.
19. *Forsthoefel J.J., Davis R.M. et al.* Performance of a linear multiplexed MWIR FPA featuring buffered direct injection // *Proc. SPIE*. 1989. V. 1157. P. 329–338.
20. *Longo J.T. et al.* Infrared focal planes in intrinsic semiconductors // *IEEE J. of Solid-Stat Circuits*. 1978. V. SC-13. № 1. P. 139–151.
21. *Bluzer N., Jensen A.S.* Current readout of infrared detectors // *Opt. Engin.* 1987. V. 26. № 3. P. 241–248.
22. *Lockwood A.H., Parrish W.J.* Predicted performance of indium antimonide focal plane arrays // *Opt. Engin.* 1987. V. 26. № 3. P. 228–236.
23. *Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н.* Унифицированные кремниевые мультиплексоры 128×128 для инфракрасных фотоприемных устройств // *Автометрия*. 2006. Т. 42. № 4. С. 109–118.