

**КРЕМНИЕВЫЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ 320 × 256  
ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ  
НА ОСНОВЕ КРТ-ДИОДОВ****А. И. Козлов, И. В. Марчишин, В. Н. Овсяк***Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск  
E-mail: kozlov@thermo.isp.nsc.ru*

Рассмотрены принципы построения матричных мультиплексоров 320 × 256 элементов с кадровым и построчным накоплением и особенности их функционирования. Проанализировано температурное разрешение инфракрасных фотоприемных устройств на основе КРТ-фотодиодов и разработанных мультиплексоров.

**Введение.** Одним из ключевых компонентов, определяющих параметры гибридных инфракрасных фотоприемных устройств (ИК ФПУ), является кремниевый кристалл мультиплексора. Матричный мультиплексор в составе ИК ФПУ обеспечивает требуемые электрические режимы работы фотодетекторов, считывает электрические сигналы, полученные в результате фотоэлектрического преобразования падающего ИК-излучения в фоточувствительных элементах, и исключает механическую развертку изображения по двум координатам.

Наибольшее распространение получили многоэлементные фотоприемники на основе соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ), работающие в спектральных диапазонах 3–5 и 8–16 мкм [1–3]. В последнее время возрастает интерес к слабоохлаждаемым ИК-фотоприемникам, работающим при температуре существенно выше температуры жидкого азота. Слабоохлаждаемый КРТ-фотодетектор с длиной волны максимума спектральной чувствительности 4 мкм при температуре 150–200 К имеет электрические характеристики, схожие с фотодиодами (ФД) ( $\lambda_{\max} = 10\text{--}12$  мкм) при  $T = 80$  К. Фотоприемники разных спектральных диапазонов отличаются друг от друга своими параметрами. При выборе кремниевой схемы считывания наиболее значимы внутреннее сопротивление и квантовая эффективность фотодетекторов, определяющие диапазон рабочих токов [1–4].

Для КРТ-фотодиодов с низкими темновыми токами и высокими внутренними сопротивлениями можно использовать обычные современные матричные мультиплексоры с кадровым накоплением (ММКН) фототока и умеренными емкостями накопления, расположенными в каждой ячейке матрицы [5–9].

Для достижения хорошего температурного разрешения 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 [7, 10–15].

Принципы организации мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением и их конструкции рассмотрены нами в работах [1–4, 7, 8] и другими авторами в [6, 9–15]. Однако сравнительного анализа фотоэлектрических характеристик ИК ФПУ на базе этих мультиплексоров не проводилось. Цель данной работы – проведение сравнительного анализа температурного разрешения матричных ИК ФПУ на основе мультиплексоров  $320 \times 256$  с кадровым и построчным накоплением, что позволяет оптимизировать области применения таких мультиплексоров.

**Матричный мультиплексор с кадровым накоплением.** Принцип организации матричного мультиплексора с кадровым накоплением  $320 \times 256$  поясняет функциональная схема на рис. 1. Мультиплексор состоит из следующих основных частей: матрица из  $320 \times 256$  ячеек считывания, горизонтальный и вертикальный регистры, 320 каналов считывания, выходной усилитель.

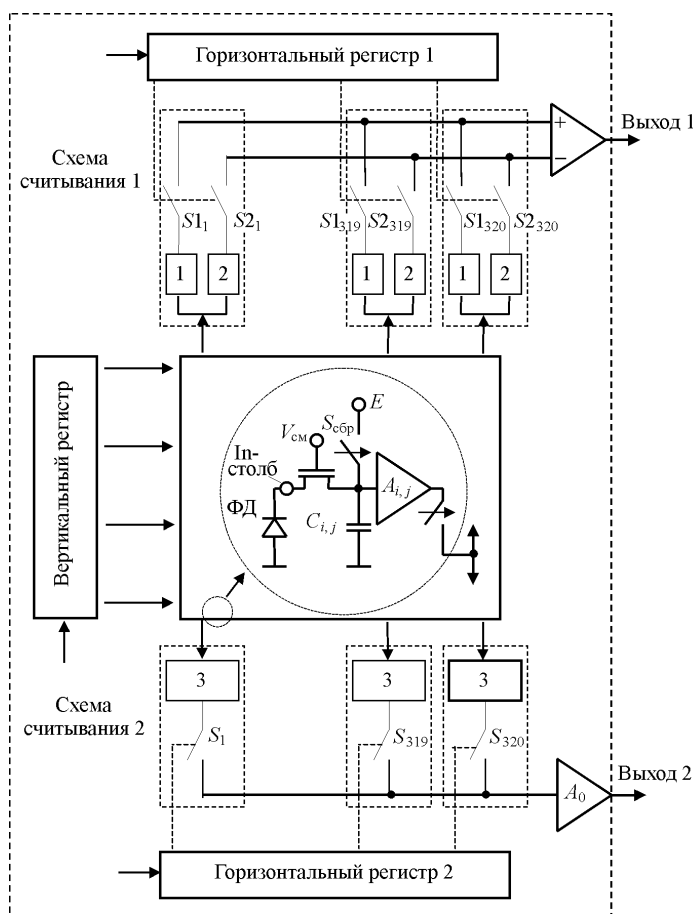


Рис. 1. Функциональная схема кремниевого ММКН  $320 \times 256$  ( $A_0$  – коэффициент передачи выходного усилителя)

Каждая ячейка считывания непосредственно соединена с фотодиодом с помощью индиевого столба. Основные функции ячейки: задание смещения на фотодиоде, ввод и интегрирование фототока и считывание накопленного заряда.

В ячейке считывания с помощью входного транзистора устанавливается напряжение смещения  $V_{см}$  на фотодиоде и считывается фототок, который 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  $S_{сбр}$ .

На основе топологических норм стандартного технологического процесса АТ-12ДМ (на базе ОАО «Ангстрем») разработана топология ячейки считывания. Накопительная емкость формируется между встроенным  $n^+$ -каналом и поликремниевым электродом первого уровня  $Si_{п/к1}$ , что позволяет получить при небольшом размере ячейки ( $40 \times 40$  мкм) достаточно большую емкость накопления ( $C_{i,j} = 1,0$  пФ). Это значение в совокупности с возможностью регулирования времени накопления (от 20 мкс до времени считывания кадра) обеспечивает данному варианту кремниевого мультиплексора гибкость, достаточную для работы с фотодиодами на КРТ спектральных диапазонов 3–5 и 8–10 мкм и с фотоприемниками на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ).

Рассмотрим работу схемы считывания 1 (см. рис. 1). При считывании фотосигнала каждая ячейка опрашивается 2 раза: 1-й раз уровень накопленного сигнала фиксируется схемой выборки–хранения сигнала 1; 2-й раз уровень сброса емкости накопления запоминается схемой выборки–хранения сброса 2. Уровень сброса и уровень сигнала считываются отдельно, что позволяет схеме двойной коррелированной выборки (ДКВ) подавить  $1/f$ -шум и геометрический шум ячеек считывания. Схема двойной  $\delta$ -выборки использована для устранения геометрического шума столбцовых каналов считывания [16]. Реальный уровень сигнала формируется на выходе с помощью дифференциального усилителя.

Рассмотрим принцип работы схемы считывания 2 (см. рис. 1). При считывании фотосигнала каждая ячейка опрашивается 2 раза: 1-й раз уровень накопленного сигнала фиксируется на емкости столбцового канала считывания, правая обкладка которой в этот момент подключена к источнику постоянного смещения; 2-й раз уровень сброса емкости накопления подается на емкость столбцового канала считывания при «плавающей» правой обкладке. Уровень сигнала и уровень сброса таким образом вычитаются, выполняя тем самым операцию ДКВ. Схема ДКВ 3 подавляет  $1/f$ -шум и геометрический шум ячеек считывания. Полученные в результате операции ДКВ сигналы мультиплексируются на выходной операционный усилитель с помощью горизонтального регистра.  $S_i, S1_i, S2_i$  – ключи считывания выходного сигнала канала.

Схемы считывания 1 и 2 обеспечивают сравнимые параметры. Основные параметры разработанного ММКН приведены в таблице.

Время накопления в этом мультиплексоре определяется длительностью импульса напряжения смещения  $V_{см}$ , подаваемого на входные транзисторы ячеек мультиплексора в интервале времени между считыванием кадров ИК-изображения. Время кадра равно сумме времени накопления и времени опроса кадра изображения. Такой режим работы называют режимом «мгновенного фотоснимка».

Основные параметры мультиплексоров	Тип кристалла	
	ММКН	ММПН
Формат кристалла	320 × 256	
Технология	1,2 мкм КМОП	1,0 мкм КМОП
Предприятие-изготовитель	ОАО «Ангстрем»	
Типы фотоприемников	3–5, 8–10 мкм КРТ и 8–10 мкм МСКЯ	8–16, 3–5 мкм КРТ
Входная полярность фотоприемников	$n^+$ на $p$ -подложке	
Тип входной схемы	прямая инжекция	
Шаг входных контактных площадок, мкм <sup>2</sup>	40 × 40	35 × 35
Коэффициент заполнения ячейки, %	62,9	–
Емкость накопления, пФ	1	1–16
Однородность смещения фотодиодов не хуже, мВ	±15	
Максимальный входной ток не менее, нА	50	300
Время накопления (регулируемое), мкс	20–33000	20–130
Тактовая частота не менее, МГц	2,5	
Максимальный выходной сигнал не менее, В	1	2
Динамический диапазон (при отношении сигнал/шум ≥ 1) не менее, дБ	76	80
Количество работающих ячеек считывания, %	>99	99,99
Потребляемая мощность не более, мВт	100	
Геометрические размеры кристалла, мм <sup>2</sup>	15,0 × 17,4	12,4 × 14,1

**Матричный мультиплексор с построчным накоплением.** Функциональная схема разработанного матричного мультиплексора с построчным накоплением (ММПН) 320 × 256 приведена на рис. 2. Мультиплексор состоит из матрицы входных контактных площадок с индиевыми микростолбами, матрицы коммутирующих ячеек, набора каналов считывания фотосигнала, вертикального и горизонтального регистров и выходной шины считывания. Каждый канал 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, программируемую 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 вертикальный регистр выбирает строку в матрице, ключевые транзисторы в ячейках, подсоединенных к данной строке, включаются одновременно. С по-

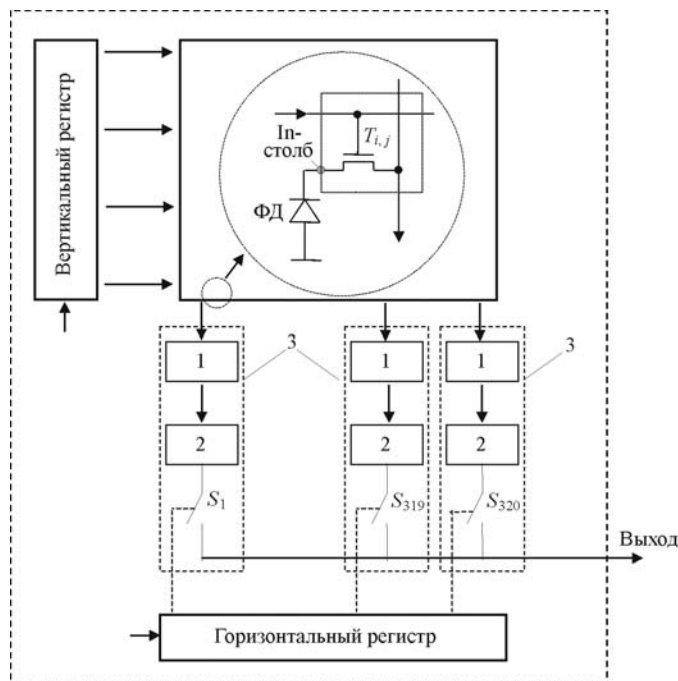


Рис. 2. Функциональная схема кремниевого ММПН 320 × 256

мощью 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 величине накопленного на емкости 2 сигнального заряда.

ММПН выполняет построчное накопление сигналов от отдельных фотодиодов на соответствующих емкостях, фиксацию сигнального напряжения на емкости хранения и последовательное считывание информации с емкостей хранения на общий выход. Выходной сигнал мультиплексора формируется с помощью схемы ДКВ, которая также позволяет подавить  $1/f$ -шум выходного транзистора, шумы и «наводки» по цепям питания и выходного сигнала.

Особенностью рассматриваемого ММПН является большая программируемая емкость накопления с максимальной общей величиной до 48 пКл, что обеспечивает работу ИК ФПУ на основе КРТ-фотодиодов в спектральном диапазоне 8–16 мкм при разной фоноцелевой обстановке. Другие основные параметры разработанного ММПН приведены в таблице.

**Анализ температурного разрешения** проводился для разработанных матричных мультиплексоров (ММКН, ММПН) и КРТ-фотодиодов спектральных диапазонов 3–5 и 8–16 мкм, а также для слабоохлаждаемых КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 3–5 мкм. Оценка значений эквивалентной шуму разности температур (NETD) получена как отношение шума сис-

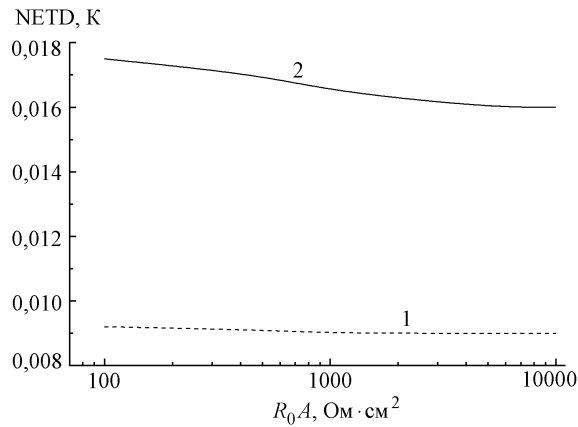


Рис. 3. Зависимости NETD от величины  $R_0A$  КРТ-фотодиодов с  $\lambda_{\max} = 5$  мкм для ММКН (кривая 1) и ММПН (кривая 2)

темы «фотоприемник–мультиплексор» к температурной чувствительности КРТ-фотодиода с внешней квантовой эффективностью  $\eta = 0,7$ . Шум системы «фотоприемник–мультиплексор» рассчитывался в зависимости от параметра  $R_0A$  при температуре фона  $T_{\phi} = 300$  К и апертурном угле  $2\theta = 60^\circ$ . Время интегрирования определялось из условия полного заполнения входным током емкости накопления соответствующего мультиплексора. Найденные зависимости эквивалентной шуму разности температур от  $R_0A$  при  $\lambda_{\max} = 5$  мкм приведены на рис. 3. Видно, что ММКН обеспечивает по сравнению с ММПН почти двукратный выигрыш в температурном разрешении. Аналогичные зависимости для слабоохлаждаемых КРТ-фотодиодов с  $\lambda_{\max} = 4$  мкм представлены на рис. 4. С точки зрения температурного разрешения при  $R_0A < 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  предпочтительнее использовать ММПН, а при  $R_0A > 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  – ММКН.

Зависимости эквивалентной шуму разности температур от параметра  $R_0A$  КРТ-фотодиодов с длиной волны максимума спектральной чувстви-

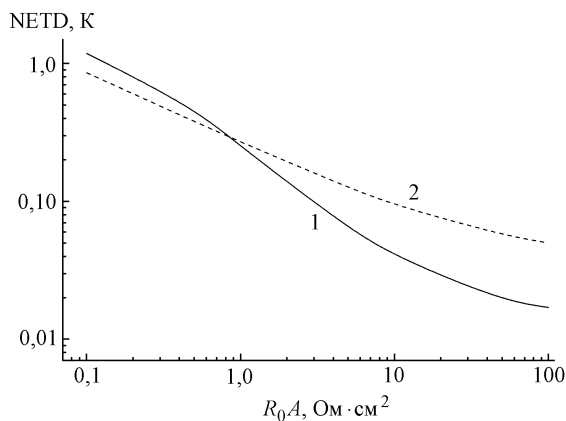


Рис. 4. Зависимости NETD от величины  $R_0A$  слабоохлаждаемых КРТ-фотодиодов с  $\lambda_{\max} = 4$  мкм для ММКН (кривая 1) и ММПН (кривая 2)

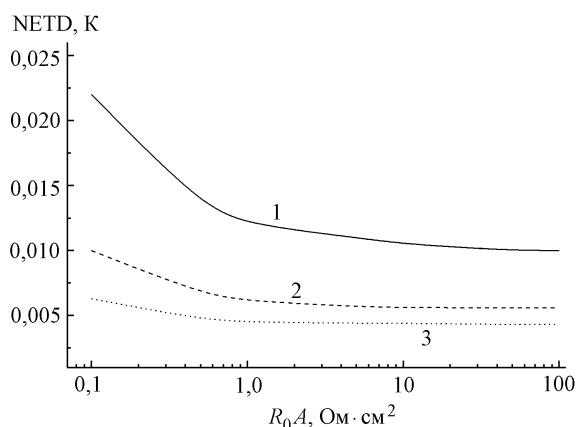


Рис. 5. Зависимости NETD от величины  $R_0A$  КРТ-фотодиодов с  $\lambda_{\max} = 8,5$  мкм для ММКН (кривая 1) и ММПН (кривая 2) и с  $\lambda_{\max} = 11$  мкм для ММПН (кривая 3)

тельности 8,5 мкм для ММКН и ММПН, а также с  $\lambda_{\max} = 11$  мкм для ММПН изображены на рис. 5. При всех реальных значениях параметра  $R_0A$  КРТ-фотодиодов ММПН позволяет достигать температурного разрешения в 2 раза меньшего, чем ММКН.

Заметим, что ММКН не может работать с КРТ-фотодиодами при  $\lambda_{\max} > 10$  мкм, а ММПН, наоборот, может успешно функционировать с КРТ-фотодиодами во всем спектральном диапазоне 8–16 мкм. С другой стороны, ММКН может также успешно работать с фотодетекторами на основе GaAl/AlGaAs, SiGe/Si, PtSi/Si и т. д.

**Экспериментальные данные.** Гибридные фотоприемники, созданные на базе кремниевых мультиплексоров  $320 \times 256$  и матриц КРТ-фотодиодов, испытаны в составе ИК ФПУ с объективом F/1.4 при кадровой частоте 30 Гц.

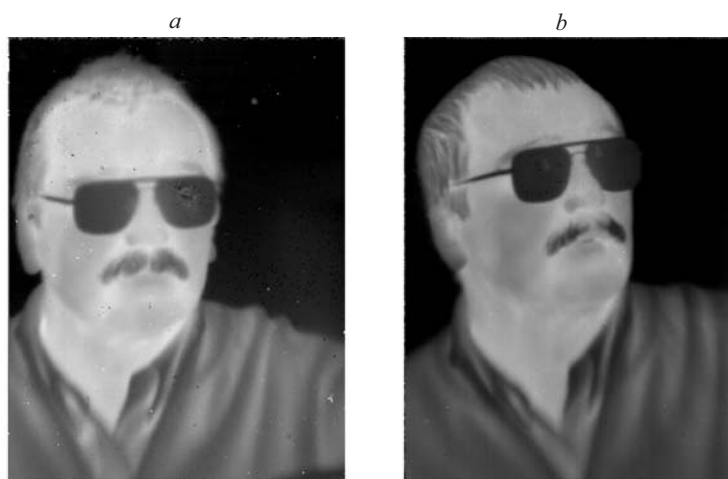


Рис. 6. Тепловые изображения, полученные с использованием КРТ-фотодиодов и разработанных мультиплексоров: с  $\lambda_{\max} = 5$  мкм и ММКН  $320 \times 256$  (a) и с  $\lambda_{\max} = 11$  мкм и ММПН  $320 \times 256$  (b)

Тепловое изображение, полученное на основе КРТ-фотодиодов с длиной волны максимума спектральной чувствительности 5 мкм и ММКН, приведено на рис. 6, *a*; тепловое изображение, полученное на основе КРТ-фотодиодов с длиной волны максимума спектральной чувствительности 11 мкм и ММПН, показано на рис. 6, *b*. Эквивалентная шуму разность температур в первом случае составляет  $\sim 0,025$  К, во втором – около 0,020 К. Достигнутые значения находятся в области типичных величин NETD для тепловизионных камер, выпускаемых ведущими фирмами, например фирмой “SOFRADIR” [17]. Отличие экспериментально полученной NETD от теоретических значений обусловлено наличием у используемых КРТ-фотодиодов избыточного  $1/f$ -шума.

**Заключение.** В предлагаемой работе рассмотрены конструктивные особенности созданных матричных мультиплексоров с кадровым и построчным накоплением и проведен сравнительный анализ температурного разрешения инфракрасных фотоприемных устройств на основе КРТ-фотодиодов и указанных мультиплексоров.

В спектральном диапазоне 3–5 мкм мультиплексор с кадровым накоплением обеспечивает по сравнению с мультиплексором с построчным накоплением почти двукратный выигрыш в температурном разрешении. При работе с КРТ-фотодиодами спектрального диапазона 8–16 мкм несомненными преимуществами в плане улучшения температурного разрешения обладает мультиплексор с построчным накоплением. В случае 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 мультиплексор с построчным накоплением, а при  $R_0A > 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  – мультиплексор с кадровым накоплением.

Авторы выражают благодарность П. Р. Машевичу и А. А. Романову за поддержку и помощь при изготовлении мультиплексоров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Овсяк 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.
2. **Васильев В. В., Дворецкий С. А., Есаев Д. Г. и др.** Фотоприемники на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2001. № 3. С. 4.
3. **Овсяк В. Н., Сидоров Ю. Г., Васильев В. В. и др.** Фотоприемники на основе молекулярно-лучевой эпитаксии слоев кадмий–ртуть–теллур для среднего и дальнего ИК-диапазонов // Наука производству. 2001. № 12. С. 9.
4. **Овсяк В. Н., Сизов Ф. Ф., Сидоров Ю. Г. и др.** Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  для среднего и дальнего ИК-диапазонов // Микроэлектроника. 2002. 31, № 6. С. 414.
5. **Destefanis G., Audebert P., Mottin E. et al.** High-performance LWIR  $256 \times 256$  HgCdTe focal plane array operating at 88 K // SPIE. 1997. 3061. P. 111.
6. **Mottin E., Pantigny P., Boch R.** An improved architecture of IR FPA readout circuits // Ibid. P. 117.



7. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Шашкин В. В.** Кремниевые мультиплексоры для многоэлементных фотоприемников ИК-диапазона // *Автометрия*. 2005. **41**, № 3. С. 88.
8. **Козлов А. И., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Филиппова В. В.** Унифицированные кремниевые мультиплексоры  $128 \times 128$  для инфракрасных фотоприемных устройств // *Автометрия*. 2006. **42**, № 4. С. 109.
9. **Frank J. D.** Off-the-shell readout ICs standardize detector interface // *Laser Focus World*. 1998. N 3.
10. **Kanno T., Saga M., Kajihara A. et al.** Development of LPE grown HgCdTe  $64 \times 64$  FPA with a cutoff wavelength of  $10.6 \mu\text{m}$  // *SPIE. Infrared Technology XIX*. 1993. **2020**. P. 49.
11. **Hsieh C. C., Wu C. Y., Sun T. P.** A new cryogenic CMOS readout structure for infrared focal plane array // *IEEE Journ. of SSC*. 1997. **32**, N 8. P. 1192.
12. **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. of SSC*. 1998. **33**, N 8. P. 1188.
13. **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.
14. **Бовина Л. Ф., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др.** Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов  $3...5$  и  $8...12 \mu\text{m}$  // *Оптический журнал*. 1996. № 6.
15. **Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др.** Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // *ФТП*. 2005. **39**, № 10. С. 1257.
16. **Nixon R. H., Kemeny S. E., Pain V. et al.**  $256 \times 256$  CMOS active pixel sensor camera-on-a-chip // *IEEE Journ. of SSC*. 1996. **31**, N 12. P. 2046.
17. **www.sofradir.com**

*Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.*