

Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

© В.И. Стафеев[†], К.О. Болтарь, И.Д. Бурлаков, В.М. Акимов, Е.А. Климанов, Л.Д. Сагинов, В.Н. Соляков, Н.Г. Мансветов, В.П. Пономаренко, А.А. Тимофеев, А.М. Филачев

Государственный научный центр «НПО „Орион“»,
111123 Москва, Россия

(Получена 2 ноября 2004 г. Принята к печати 13 января 2005 г.)

Обзор содержит результаты исследований и разработок в ФГУП «НПО „Орион“» фотодиодов и матричных фотоприемников на спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм на основе твердых растворов теллуридов кадмия и ртути. Представлены структура, топология и параметры разработанных фотодиодов, фотодиодных матриц „смотрящего“ и многорядного типов, структура и электрические схемы созданных кремниевых мультиплексоров матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Приведены параметры фотодиодных матриц различных форматов и созданного макета тепловизора на основе МФПУ формата 128×128 элементов.

Подавляющее большинство современной оптико-электронной аппаратуры инфракрасного (ИК) диапазона спектра создается с использованием фотоприемников на основе твердого раствора теллуридов кадмия и ртути (КРТ), несмотря на технологическую сложность и высокую цену этого материала. Основными причинами являются уникальные свойства $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [1–5]:

— КРТ с оптимальными свойствами для регистрации ИК излучения в основных окнах прозрачности земной атмосферы может быть получен простым изменением соотношения кадмия и ртути в этом твердом растворе: диапазон 1–2.5 мкм при $x \approx 0.4$, 3–5 мкм при $x \approx 0.3$, 8–12 мкм при $x \approx 0.2$ (рис. 1);

— фотоприемники из КРТ на все спектральные диапазоны могут изготавливаться по единой планарной технологии;

— КРТ может быть как n -типа проводимости с малой концентрацией носителей, так и p -типа с высоким структурным совершенством. Это обеспечивает возможность создания как высокоэффективных фоторезисторов на диапазон до 15 и более мкм, так и фотодиодов с высоким быстродействием;

— на основе КРТ возможно создание транзисторов [6,7];

— КРТ может выращиваться как в виде монокристаллов, так и в виде тонких эпитаксиальных слоев на прозрачных в требуемой области спектра подложках, что обеспечивает возможность создания крупноформатных диодных фоточувствительных матриц;

— фотоприемники на основе КРТ имеют намного большую стойкость к проникающим излучениям благодаря большей дефектности структуры, чем приборы на основе антимонида индия, кремния и других полупроводниковых материалов.

Диоды создавались на основе КРТ p -типа проводимости с концентрацией дырок порядка 10^{16} см^{-3} легированием ионами бора с энергией $\sim 160 \text{ кэВ}$ или двухзарядного алюминия, либо обработкой в плазме аргона

с энергией ионов порядка нескольких сотен эВ [4,5]. В последнем случае ионы аргона в месте падения расплавляют микрообласти КРТ, что приводит к резкому возрастанию локальной концентрации „свободных“ атомов ртути, быстро диффундирующих по междоузлиям в глубь кристалла и компенсирующих имевшиеся вакансии. При быстром охлаждении возникший избыток межузельной ртути приводит к инверсии типа проводимости [8].

Электроны в КРТ при температуре жидкого азота имеют высокую подвижность порядка $(3-5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, поэтому длина диффузионного смещения может достигать нескольких сот микрон. В диодах прохождение тока в пропускном направлении сопровождается переносом инжектированных из $p-n$ -перехода неосновных носителей на достаточно большие расстояния. Они рождаются в n^+ -области с поглощением энергии, несколько большей ширины запрещенной зоны, которую затем отдают при рекомбинации у второго контакта. Происходит охлаждение n^+ -области и нагрев области второго контакта — инжекционный перенос тепла, предсказанный одним из авторов в 1960 г. [9]. Экспериментально этот эффект открыт и исследован в

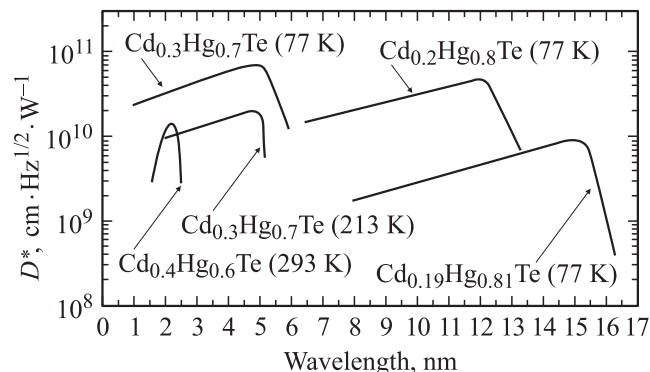


Рис. 1. Спектральные зависимости обнаружительной способности фотоприемников на основе соединения кадмий-ртуть-теллур (КРТ).

[†] E-mail: root@orion.extech.ru

1974 г. [10], при этом было достигнуто дополнительное охлаждение ниже температуры жидкого азота до 5 К.

Диоды создавались также и с использованием барьеров Шоттки. Для улучшения качества границы раздела между металлом и полупроводником наносился туннельно-прозрачный слой диэлектрика Al_2O_3 толщиной 3–5 нм [6,7]. В такой структуре [7] плотность поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны составляет $(2-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, плотность медленных поверхностных состояний $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$, плотность положительного встроенного заряда $\sim (3-5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Фотодиоды в матричных и малоэлементных фотоприемных устройствах имели размеры $p-n$ -переходов от 15×15 до 300×300 мкм, а в одноэлементных приемниках излучения до 2×2 мм и более. Эффективные размеры фоточувствительных площадок больше размеров $p-n$ -переходов, поскольку созданные освещением носители собираются $p-n$ -переходом из окружающей области в пределах длины диффузионного смещения или расстояния до второго контакта. На рис. 2 представлено типичное распределение фоточувствительности диода. При размере $p-n$ -перехода ~ 20 мкм реальный размер фоточувствительной площадки по уровню 0.5 составляет 35–40 мкм [11].

Удельная обнаружительная способность D^* и токовая фоточувствительность S_i несколько больше, а обратные токи меньше у фотодиодов, изготовленных в слоях КРТ, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, чем у фотодиодов, изготовленных в слоях, полученных другими методами эпитаксии [12].

Спектральные зависимости обнаружительной способности фотоприемников на основе соединения кадмий-ртуть-теллур представлены на рис. 1. Вольтамперная характеристика фотодиода, изготовленного на

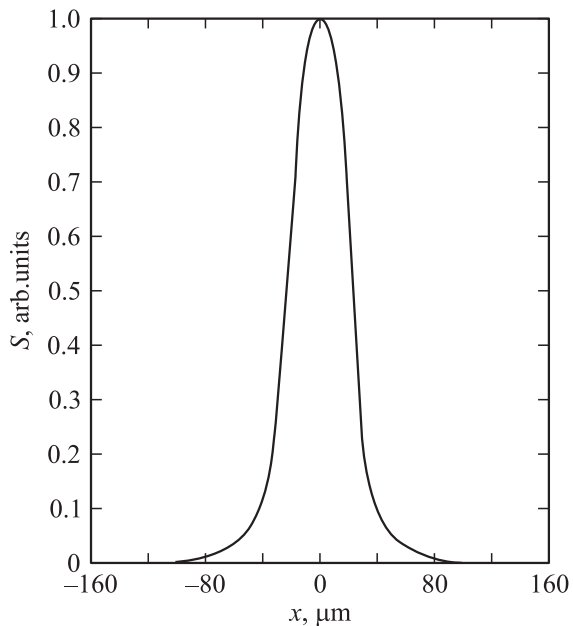


Рис. 2. Распределение фоточувствительности фотодиода на основе КРТ.

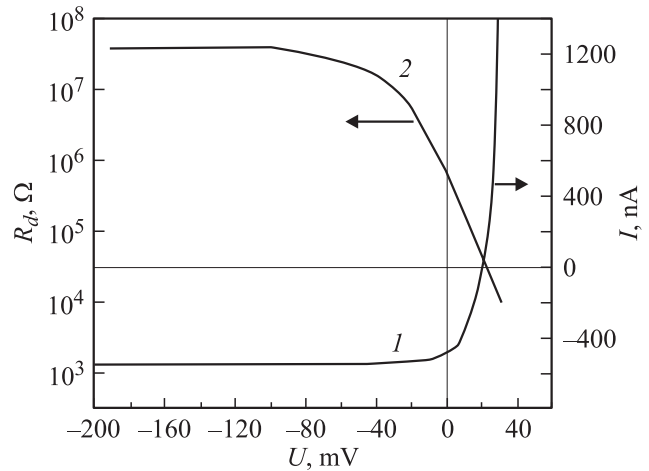


Рис. 3. Вольтамперная характеристика фотодиода, изготовленного на объемных монокристаллах КРТ (1), и дифференциальное сопротивление R_d (2).

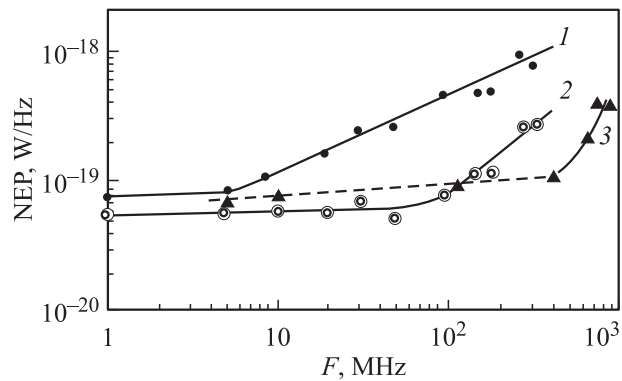


Рис. 4. Частотные характеристики фотодиодов в гетеродинном режиме. Мощность гетеродинного излучения P_b , мВт: 1, 2 — 0.5, 3 — 1; ток фотодиода I , мА: 1 — 0.5, 2 — 5, 3 — 10.

объемных монокристаллах КРТ, представлена на рис. 3. В режиме прямого детектирования быстродействие фотодиодов достигает нескольких десятков МГц, в гетеродинном режиме — до 1 ГГц. Мощность, эквивалентная мощности шума NEP (Noise equivalent power) на длине волны 10.6 мкм при температуре жидкого азота, лучше чем значение 10^{-19} Вт/Гц [4,5,13]. Частотные характеристики фотодиодов в гетеродинном режиме представлены на рис. 4.

Бытующие представления о нестабильности КРТ и фотоприемников на его основе, например, изложенные в работе [14], связаны, по нашему мнению, с нестабильностью поверхности из-за ее плохой подготовки и защиты. Разработанные нами методы предварительной обработки поверхности КРТ и технология нанесения защитного диэлектрического покрытия обеспечили создание высокостабильных и устойчивых к воздействию повышенной температуры фотодиодов. Длительное (до 10 лет) хранение при температурах вплоть до 80°C не приводило к ухудшению параметров фотодиодов. Допустимая

температура длительного хранения фотодиодов достигает $+70^\circ\text{C}$ [15,16]. Проведенные в последнее время исследования в ИФП СО РАН подтвердили наши данные [17].

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) на основе КРТ наиболее полно обеспечивают выполнение требований, предъявляемых к современной тепловизионной аппаратуре по кардинальному уменьшению весогабаритных характеристик, увеличению дальности видения и др. Двумерные матричные фотоприемные устройства (focal plane array — FPA) имеют формат $M \times N$ элементов, где M и N — числа элементов в строках и столбцах соответственно. Разработаны фотоприемные устройства двух типов: „смотрящие“ и многорядные.

МФПУ смотрящего типа (staring focal plane array) содержат десятки и сотни тысяч элементов, причем обычно $M \geq N$. Системы для ИК диапазона с применением смотрящих МФПУ для получения теплового изображения объектов не требуют оптико-механического сканирования, что существенно упрощает и удешевляет тепловизионный прибор.

Многорядные МФПУ предназначены для систем, в которых применяется временная задержка и накопление фотосигналов (режим ВЗН). Суть режима ВЗН заключается в суммировании (накоплении) сигналов от всех M элементов каждой строки, причем задержка считывания суммируемых от каждого элемента строки сигналов согласована со скоростью сканирования изображения вдоль этой строки. Усложнение тепловизионной системы вследствие введения оптико-механического развертывающего устройства окупается повышением отношения сигнал/шум в $M^{1/2}$ раз, поскольку сигнал увеличивается в M раз, а шум в $M^{1/2}$ раз. Кроме того, M -кратное резервирование повышает временную стабильность и надежность МФПУ.

МФПУ включает матрицу фоточувствительных элементов из КРТ и кремниевые микросхемы считывания и предварительной обработки фотосигналов, располагаемые в фокальной плоскости вакуумированного корпуса, обеспечивающего защиту и стыковку с системой охлаждения до требуемой рабочей температуры.

Матрицы фоточувствительных элементов изготавливались на основе эпитаксиальных слоев КРТ p -типа проводимости с концентрацией дырок около 10^{16} см^{-3} , формированием в них матриц фотодиодов по планарной групповой технологии. Применялись эпитаксиальные слои, выращиваемые различными методами: жидкофазной эпитаксией толщиной $\sim 15 \text{ мкм}$ на подложке из $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ (разработчик — ФГУП „Гиредмет“), молекулярно-лучевой эпитаксией толщиной $7\text{--}10 \text{ мкм}$ на подложке из GaAs с подслоем CdZnTe (разработчик — ИФП СО РАН) или эпитаксией из металлорганических соединений толщиной $10\text{--}12 \text{ мкм}$ на подложке из GaAs с подслоем CdZnTe (разработчики: Институт химии высококачественных веществ РАН и Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского).

Поверхность КРТ защищалась слоем диэлектрика. В окнах защитного пассивирующего слоя формировались p - n -переходы, а омические контакты к общему

для всех диодов p -слою создавались на свободных от p - n -переходов периферийных областях эпитаксиального слоя. К n -областям диодов создавались индиевые столбчатые микроконтакты с размером основания около $20 \times 20 \text{ мкм}$ и высотой $\sim 12 \text{ мкм}$. Они обеспечивали стыковку с аналогичными микроконтактами раstra на сапфировой подложке или на кристалле кремниевой микросхемы мультиплексора. Механическая и электрическая стыковка проводилась методом „холодной“ компрессионной сварки индиевых микроконтактов (flip-chip). Совмещение многих тысяч индиевых микроконтактов кристалла матрицы фотодиодов и кремниевого кристалла микросхемы осуществлялось с использованием специально разработанного инфракрасного микроскопа с визуализацией стыкуемых микроконтактов через кремниевый кристалл микросхемы.

Одним из важнейших параметров матричных фотоприемных устройств является величина межэлементной взаимосвязи. Сильная взаимосвязь может привести к существенному размытию тепловизионного изображения. Возможны три типа взаимосвязи: оптическая, электрическая и фотоэлектрическая. Оптическая взаимосвязь определяется качеством оптического тракта тепловизионного устройства. Фотоэлектрическая связана с диффузией фотогенерированных носителей в общем полупроводниковом слое матрицы фотодиодов. Электрическая взаимосвязь определяется падением напряжения при протекании тока от p - n -переходов к неактивным контактам, а также взаимосвязью между входными каналами кремниевой охлаждаемой микросхемы.

Для контроля взаимосвязи между элементами в рабочем режиме МФПУ пятно оптического зонда или полоса ИК излучения, формируемая оптической щелью, фокусируется на один из элементов матрицы и измеряется сигнал расположенных рядом элементов. При перемещении оптического зонда вдоль освещаемого элемента по зависимости фотосигнала от координаты оптического зонда определяется эффективный размер фоточувствительной площадки (рис. 2). Ширина оптического зонда в области длин волн $2\text{--}14 \text{ мкм}$ по уровню 0.5 составляет около 15 мкм , а минимальный шаг перемещения — 3 мкм . Величина взаимосвязи в МФПУ при размере p - n -переходов элементов $\sim 20 \times 20 \text{ мкм}$ и шаге 35 мкм , определенная посредством соответствующей обработки фотосигнала [11], была в пределах 5%. Наличие на поверхности КРТ паразитного приповерхностного слоя инверсного типа проводимости может приводить к увеличению электрической взаимосвязи.

Кремниевые микросхемы считывания и предварительной обработки фотосигналов более перспективно выполнять по технологии МОП или КМОП¹ по сравнению с технологией ПЗС². В этом варианте обеспечивается более высокая величина реализуемой емкости накопительных МОП конденсаторов, что важно при длинах

¹ Технология КМОП — технология производства комплементарных МОП (CMOS process — complementary metal-oxide-semiconductor process).

² ПЗС — приборы с зарядовой связью (CCD—charge-coupled devices).

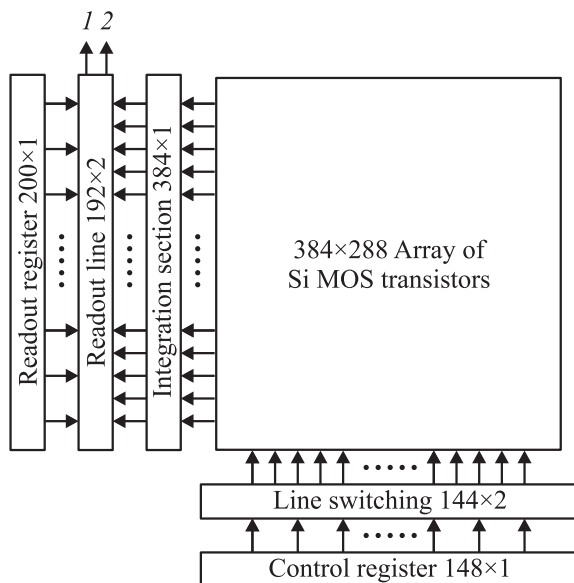


Рис. 5. Структурная схема кремниевого МОП мультиплексора.

волн излучения выше 5 мкм, при которых велика фоновая засветка. Кроме того, достигается большой коэффициент заполнения площади ячейки накопительным конденсатором; более плотная упаковка; более высокие и однородные электрические параметры при 77 К; более низкие управляющие напряжения; большой динамический диапазон.

В разработанных МФПУ кремниевый МОП мультиплексор выполняет накопление сигналов от отдельных фотодиодов на соответствующих конденсаторах, усиление, параллельный перенос накопленного заряда с конденсаторов накопления на конденсаторы хранения и последовательное считывание информации с конденсаторов хранения на выводы из холодной зоны для ее последующей обработки. Структурная схема кремниевого МОП мультиплексора представлена на рис. 5. Таким образом, реализуется пространственное разделение операций накопления и считывания информации. В мультиплексорах применены двухфазные динамические регистры сдвига. Ввод фототока в мультиплексорах осуществляется прямой инжекцией. Коэффициент передачи тока в накопительные конденсаторы выше 0.95, при

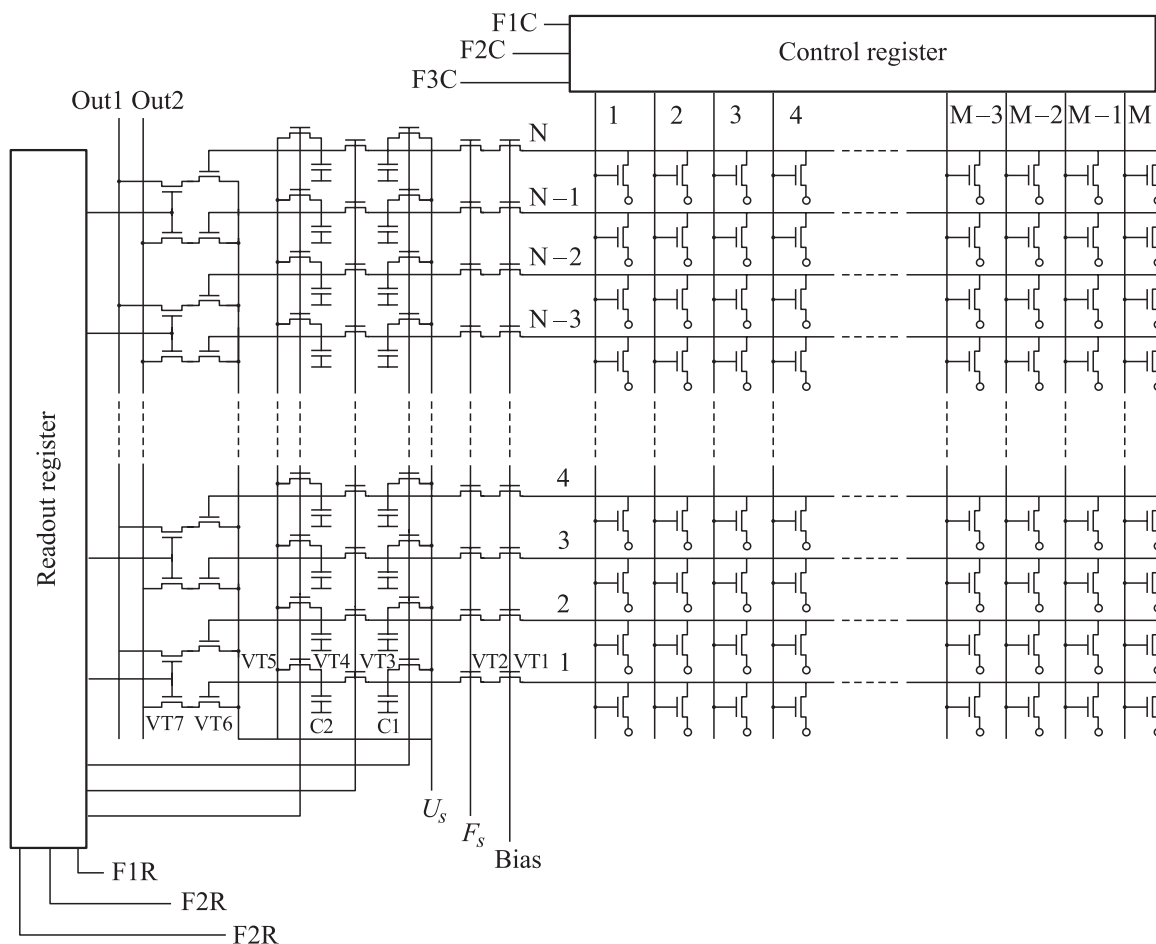


Рис. 6. Схема электрическая МОП мультиплексора.

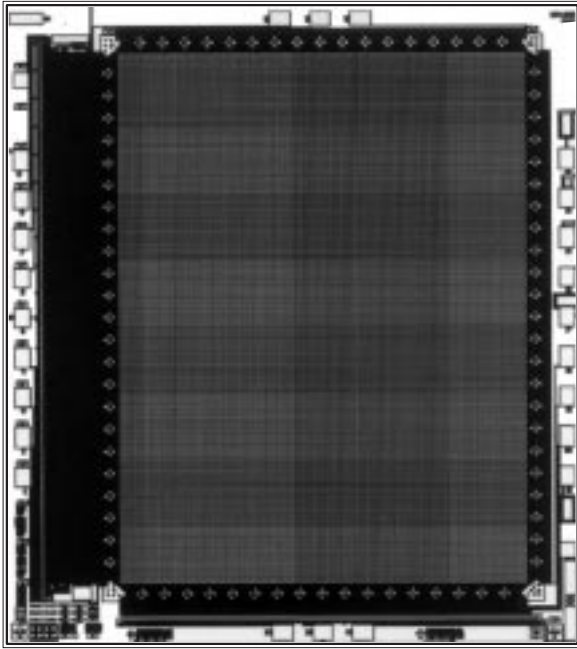


Рис. 7. Топология МОП мультиплексора формата 384×288 элементов с шагом МФЧЭ 28 мкм.

этом шумовые характеристики фотодиода не ухудшаются даже при достаточно низких требованиях на шум входного транзистора (до $100 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$). Микросхема мультиплексора содержит сравнительно небольшое число элементов, не потребляет мощность во время цикла накопления, обеспечивает хороший контроль напряжения на фотодиодах. Подобная схема мультиплексора использована как в многорядных МФПУ, так и в МФПУ смотрящего типа с учетом их особенностей [18,19]. Схема электрическая МОП мультиплексора представлена на рис. 6. Топология МОП мультиплексора формата 384×288 элементов с шагом МФЧЭ 28 мкм представлена на рис. 7.

Мультиплексоры изготавливались по n -канальной технологии с поликремневыми затворами и толщиной подзатворного диэлектрика $\sim 50 \text{ нм}$. Поликремний использовался также и для первого уровня разводки. Для изоляции элементов применялась либо технология LOCOS,³ либо использовались области стоп-диффузии p^+ -типа. Области исток-сток формировались имплантацией ионов фосфора или мышьяка дозой 400 мкКл. Подгонка порогового напряжения области канала проводилась легированием ионами бора дозой до 0.05 мкКл. Межслойная изоляция и планаризация поверхности осуществлялась осаждением слоя двуокиси кремния толщиной 0.45 мкм методом разложения тетраэтоксисилана.

Исследование спектральной плотности шумов входных транзисторов, работающих в подпороговом режиме при 77 и 300 К, показало, что при низких частотах

³ Технология LOCOS (local oxidation of silicon technology) — технология производства МОП ИС с толстым защитным слоем оксида кремния.

они могут возрастать в 1.5–2 раза. Снижение уровня таких шумов удалось получить проведением операций формирования диэлектрических слоев и отжига ионно-имплантированных областей при температурах не выше 950°C .

МФПУ „смотрящего“ типа разработаны в форматах 32×32 , 128×128 и 384×288 элементов [12,20,21] на спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм. На рис. 8 показана структура фоточувствительного элемента на примере элемента матричного фотоприемного устройства формата 384×288 элементов, имеющего шаг элементов 28 мкм, размер p - n -переходов $16 \times 16 \text{ мкм}$. Принимаемое излучение падает через прозрачную и просветленную в требуемом спектральном диапазоне спектра подложку эпитаксиального слоя и поступает в активный фоточувствительный слой КРТ. Матрица фоточувствительных элементов стыкуется с помощью индиевых микроконтактов с кремниевой микросхемой мультиплексора. Высота микроконтактов на обоих кристаллах $\sim 12 \text{ мкм}$ при площади $20 \times 20 \text{ мкм}$. Гибридная таким образом сборка со стороны кремниевой микросхемы приклеивается на поверхность несущей сапфировой подложки. На контактные площадки подложки разводятся выводы для считывания фотосигналов, подачи питания и сигналов управления. На эту же подложку устанавливаются термодатчики и крепится охлаждаемая диафрагма. Полученный фотоприемный узел монтируется на посадочное место вакуумного криостатируемого корпуса. Тепловыделение узла не превышает 60 мВт. Полное число сигнальных, управляющих и вспомогательных выводов — 24. Фотосигналы выводятся по двум каналам.

В разработанных и исследованных МФПУ, изготовленных на основе слоев КРТ, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, удельная обнаружительная способность D^* и вольтовая фоточувствительность S_V

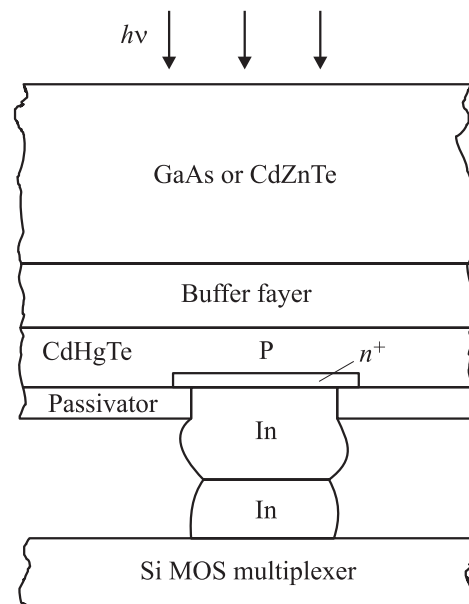


Рис. 8. Структура фоточувствительного элемента.

Таблица 1.

Число элементов	Топология	Размер элемента, мкм	Шаг, мкм	$\lambda_{\text{со}}$, мкм	Апертурный угол	$D_{\lambda_{\text{max}}}^*$, см · Вт ⁻¹ Гц ^{1/2}
32 × 32	$N \times N$	40 × 40	70	10.5–11.5	60°	$(3-4) \cdot 10^{10}$
128 × 128	$N \times N$	30 × 30	35	10.5–11.5	60°	$(4-5) \cdot 10^{10}$
384 × 288	$M \times N$	25 × 25	28	10.3–11.2	60°	$(3-4) \cdot 10^{10}$
256 × 256	$N \times N$	25 × 25	30	10.8	> 40°	$4 \cdot 10^{10}$

Примечание. $\lambda_{\text{со}}$ — граничная длина волны; $D_{\lambda_{\text{max}}}^*$ — обнаружительная способность в максимуме спектральной характеристики чувствительности.

Таблица 2.

Число элементов	Топология	Размер элемента, мкм	Шаг, мкм	$\lambda_{\text{со}}$, мкм	Апертурный угол	$D_{\lambda_{\text{max}}}^*$, см · Вт ⁻¹ Гц ^{1/2}
4 × 48	$4 \times N$	30 × 30	60	≥ 10.5	30°	$\geq 7 \cdot 10^{10}$
2 × 96	$2 \times 2N$	30 × 30	60	≥ 10.5	30°	$\geq 5 \cdot 10^{10}$
2 × 256	$2 \times 2N$	35 × 35	70	≥ 10.5	$\geq 32^\circ$	$\geq 5 \cdot 10^{10}$
4 × 288	$4 \times N$	28 × 28	56	≥ 10.5	$\geq 32^\circ$	$\geq 10^{11}$

несколько выше, чем в МФПУ, изготовленных на основе слоев, полученных другими методами эпитаксии. Однако однородность характеристик МФПУ выше в случае использования слоев, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Основные параметры разработанных смотрящих МФПУ представлены в табл. 1.

Гистограмма распределения удельной обнаружительной способности D^* по элементам МФПУ формата 128 × 128 элементов, измеренной при обратном смещении фотодиодов 50 мВ, времени накопления 60 мкс и апертурном угле 60°, представлена на рис. 9.

Многорядные МФПУ разработаны в форматах 4 × 48, 2 × 96, 2 × 256 и 4 × 288 элементов [22,23] на спектральный диапазон 8–12 мкм. Шаг вдоль и поперек линеек при любой топологии — 70 мкм. Для использования в режиме временной задержки и накопления по 4 элементам — формат 4 × 48 и 4 × 128 (регулярное расположение фотодиодов), по двум элементам — 2 × 96 и 2 × 256 элементов (шахматное расположение). В МФПУ формата 4 × 288 при шахматном расположении фоточувствительных элементов шаг в направлении сканирования 42 мкм, в противоположном направлении 56 мкм.

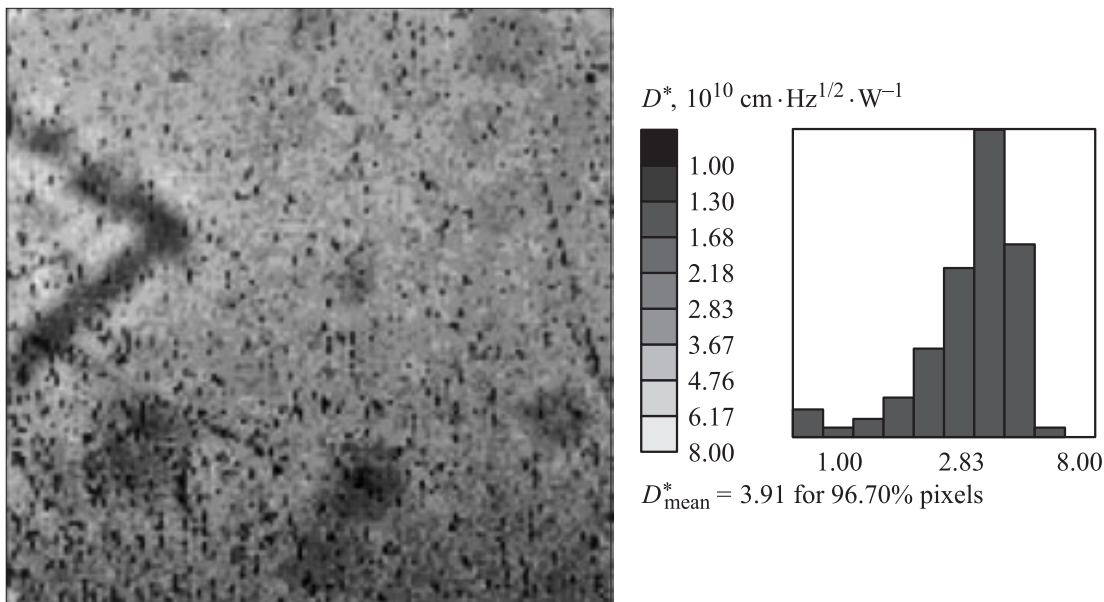


Рис. 9. Гистограмма распределения удельной обнаружительной способности D^* МФПУ формата 128 × 128 элементов.

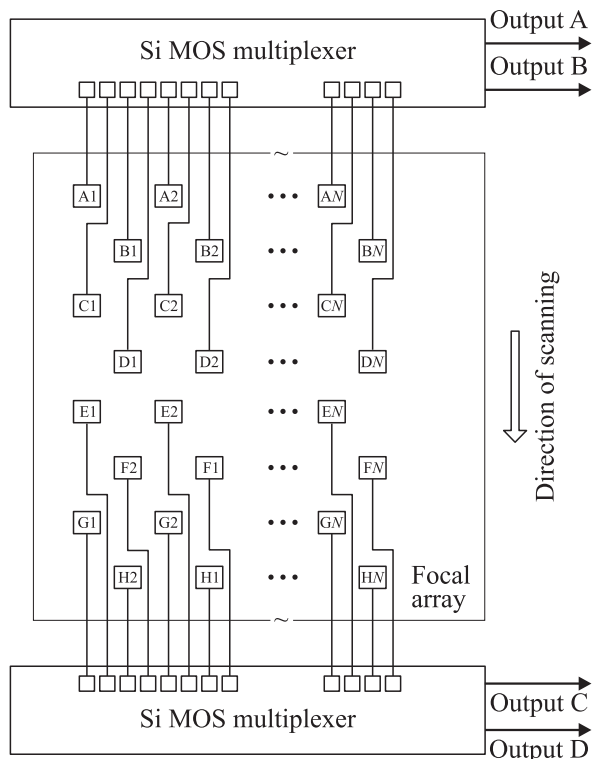


Рис. 10. Структурная схема охлаждаемого узла формата 2×256 элементов.

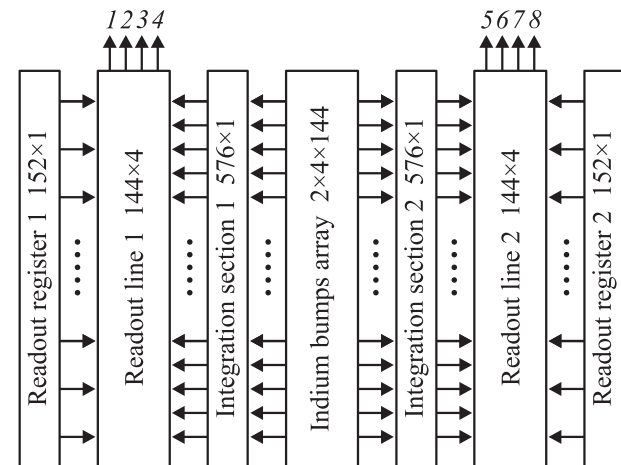


Рис. 11. Структурная схема МФПУ формата 4×288 элементов.

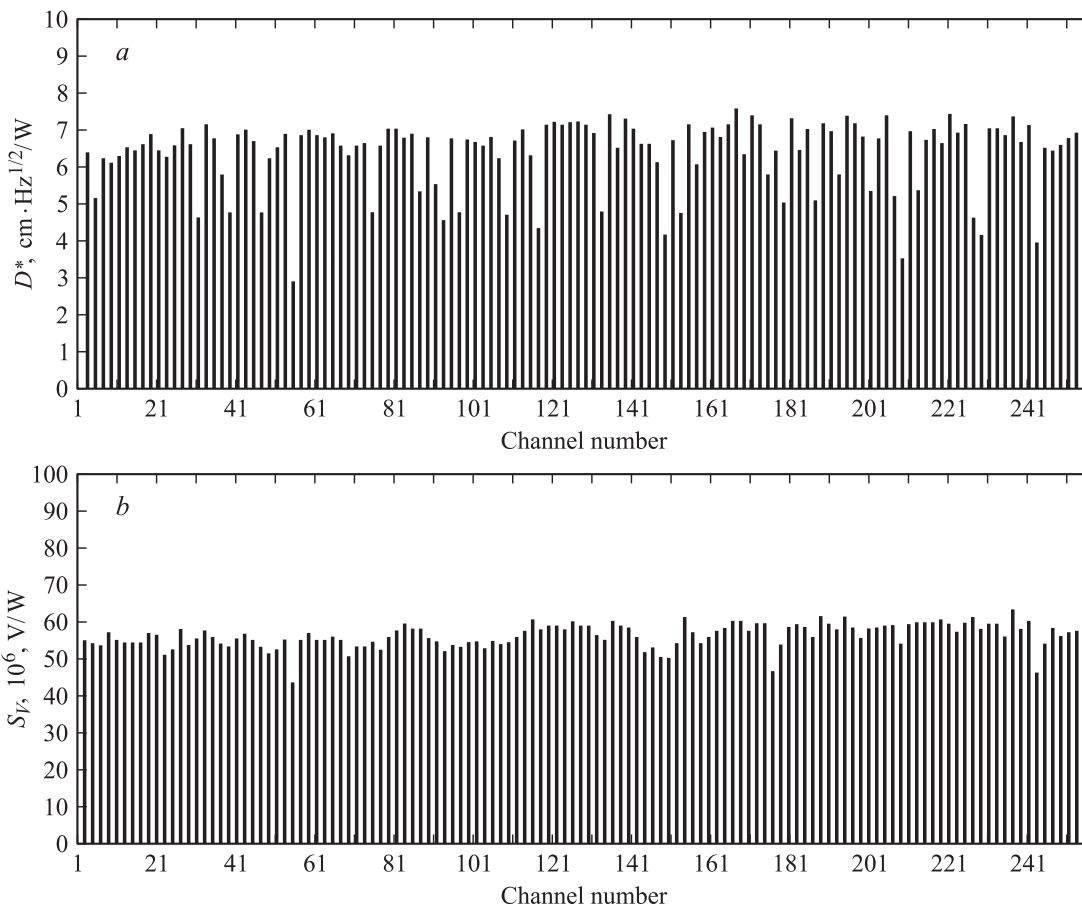


Рис. 12. Распределение обнаружительной способности (а) и распределение вольтовой чувствительности (б) МФПУ формата 2×256 элементов при времени интегрирования фототока 25 мкс.

Кремниевая микросхема содержит два зеркально расположенных МОП мультиплексора формата 4×144 с шагом каналов 14 мкм. МФПУ содержит 8 информационных выходов — по 4 с каждой стороны.

Каждый фотодиод индиевым микроконтактом через промежуточный контактный растр на сапфировой подложке подсоединен к своей ячейке кремниевых мультиплексоров, расположенных на той же подложке. Сигналы выводятся по двум каналам с каждой стороны в МФПУ форматов $(4 \times 48) - (2 \times 256)$ и по 4 в МФПУ формата 4×288 . Они передают сигналы в кремниевые мультиплексоры, которые также пристыкованы с помощью индиевых микроконтактов.

Расположение фоточувствительных элементов охлаждаемого узла МФПУ формата 2×256 представлено на рис. 10, структура узла МФПУ формата 4×288 элементов приведена на рис. 11. На рис. 12, *a* представлено распределение обнаружительной способности, а на рис. 12, *b* распределение вольтовой чувствительности МФПУ формата 2×256 элементов при времени интегрирования фототока 25 мкс. Основные параметры МФПУ разработанных форматов приведены в табл. 2.

Процессы в БИС управляются схемой мультиплексирования, при этом сигналы от каждой линейки ФЧЭ последовательно передаются на один выход МФПУ. Для организации процессов в БИС используются четыре тактовых сигнала, четыре напряжения питания, два из которых обеспечивают подачу напряжений смещения на фотодиоды и должны иметь низкие значения пульсаций. Кремниевые БИС обеспечивают быстроедействие вывода информации до 10 МГц. Тепловыделение в охлаждаемом узле МФПУ не превышает 60 мВт.

Конструкция МФПУ выполняется на основе вакуумного криостатируемого корпуса, предназначенного для стыковки с микрокриогенной системой охлаждения,

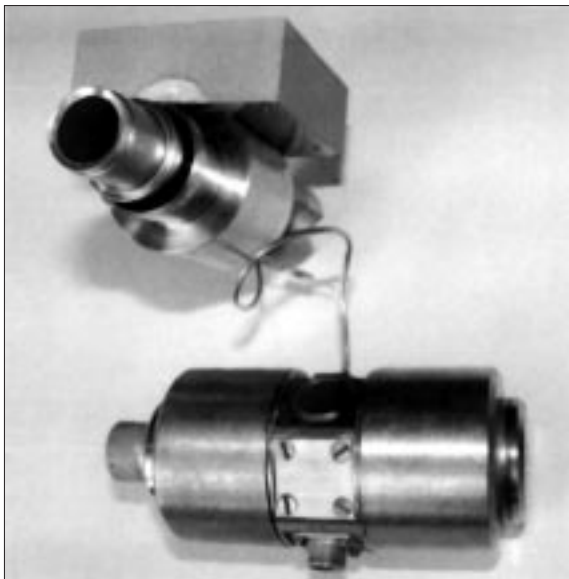


Рис. 13. МФПУ формата 384×288 элементов с микрокриогенной системой охлаждения.

работающей по циклу Стирлинга, или с дроссельной системой охлаждения на эффекте Джоуля–Томпсона (разработчик систем — ООО НТК „Криогенная техника“, г. Омск). Теплопритоки конструкции ~ 0.4 Вт. Излучение поступает на матрицу фоточувствительных элементов через окно из просветленного в требуемом спектральном диапазоне сапфира (для диапазона 1–5 мкм) или германия (для диапазона 8–12 мкм). В корпусе размещается газопоглотитель для поддержания необходимого вакуума в течение срока сохранности (до 10 лет), а на охлаждаемом фотоприемном узле — два кремниевых диода-датчика температуры для работы в цепи обратной связи блока управления микрокриогенной системы охлаждения и контроля рабочей температуры. Точность поддержания температуры на уровне ~ 80 К составляет не хуже 0.1 К. Внешний вид МФПУ формата 384×288 элементов с микрокриогенной системой охлаждения представлен на рис. 13.

Фотоприемный модуль формирует выходной сигнал в стандартном телевизионном формате. Он разработан в составе: МФПУ, submodule сопряжения, submodule аналого-цифрового преобразования, цифровой обработки и вторичных источников питания. Submodule аналого-цифровой обработки обеспечивает вычитание постоянной составляющей фотосигналов, обусловленных фоновым излучением, компенсацию разброса вольтовой чувствительности элементов посредством двухточечной коррекции, интерполяцию или замену дефектных и „неработающих“ элементов, формирование служебных и специальных меток, „раскрашивание“ тепловизионного изображения в псевдоцвета (в случае необходимости) и т.д. Для многорядных МФПУ submodule обеспечивает также выполнение функций временной задержки и накопления фотосигналов, пространственное совмещение четных и нечетных строк при их шахматном расположении, строк при прямом и обратном ходе развертки, „сшивку“ зон сканирования и т.п. В модуль также может входить микрокриогенная система охлаждения и калибровочные средства.

Тепловизор на основе МФПУ смотрящего типа разработан на матричном фотоприемном устройстве формата 128×128 элементов на спектральный диапазон 8–12 мкм [24]. В состав тепловизора входят МФПУ, микрокриогенная система охлаждения, работающая по циклу Стирлинга, submodule сопряжения, аналого-цифрового преобразования, цифровой обработки, ИК объектов с фокусным расстоянием 70 мм и относительным отверстием 1 : 1.5, корпус и дисплей.

Среднее значение обнаружительной способности использованного в тепловизоре МФПУ составляет $4.5 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Submodule сопряжения обеспечивает управление работой МФПУ, т.е. формирование напряжений питания и тактовых импульсов, усиление фотосигналов (2 канала) и их сопряжение с диапазоном допустимых входных напряжений аналого-цифровых преобразователей. Разработанный совместно с Сибирским НИИ оптических систем (г. Новосибирск) submodule аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки проводит аналого-цифровое



Рис. 14. Тепловое изображение.

преобразование фотосигналов, корректировку разброса фоточувствительности, устранение на тепловизионном изображении дефектных и „неработающих“ элементов, формирует на выходе стандартный телевизионный сигнал. Эквивалентная шуму разность температур ΔT на нулевой пространственной частоте меньше 40 мК. На рис. 14 представлен пример теплового изображения, полученного на этом образце тепловизионного прибора. Тепловизор может быть использован для поиска и идентификации потерь тепла в тепловых сетях, жилых и производственных помещениях, в медицинских целях, а также для широкого круга производственных и специальных применений.

Список литературы

- [1] V.I. Stafeev. Pros. SPIE, **4340**, 240 (2000).
- [2] V.T. Khrypov, V.P. Ponomarenko, V.G. Butkevich, I.I. Taubkin, V.I. Stafeev, S.A. Popov, V.V. Osipov. Opt. Eng., **31**, 678 (1992).
- [3] В.П. Пономаренко, А.М. Филачев. Прикл. физика, № 1, 13 (2002).
- [4] L.A. Bovina, V.I. Stafeev. Pros. SPIE, **3819**, 37 (1998).
- [5] Л.А. Бовина, В.И. Стафеев. Прикл. физика, № 2, 58 (1999).
- [6] Е.А. Салмин, В.П. Пономаренко, В.И. Стафеев. ФТП, **22**, 1142 (1988).
- [7] Е.А. Salmin, I.V. Shimansky, Y.P. Ponomarenko, V.I. Stafeev. Acta Phys. Polon., **A77**, № 2/3, 237 (1990).
- [8] В.В. Богобоящий, И.И. Ижнин. Изв. вузов. Физика, № 8, 16 (2000).
- [9] В.И. Стафеев. ФТТ, **2**, 488 (1960).
- [10] В.П. Пономаренко, В.И. Стафеев. Тр. МФТИ. Сер. Радиотехника и электроника, **7**, 57 (1974).
- [11] К.О. Boltar, N.I. Iakovleva. Pros. SPIE, **3819**, 40, (1998).
- [12] Л.А. Бовина, К.О. Болтарь, И.Д. Бурлаков, С.В. Головин, В.Ю. Иванов, Л.Д. Сагинов, В.И. Стафеев, В.М. Акимов, Е.А. Климанов, В.М. Лакеев, Ю.Г. Сидоров. Прикл. физика, № 3, 32 (1999).
- [13] L.A. Bovina, V.P. Ponomarenko, V.I. Stafeev, Y.M. Logunencko. Proc. Opt.-Elektron. 10th Int. Congres (Germany, 1991). Abst. p. 137 (1991).
- [14] И.С. Вирт. Изв. вузов. Физика, № 41, 117 (1998).
- [15] Л.А. Бовина, В.И. Стафеев, К.О. Болтарь, В.М. Лакеев, М.А. Лощинина. Прикл. физика, № 3, 41 (1999).
- [16] L.A. Bovina, K.O. Boltar, V.I. Stafeev, V.M. Lakeenkov, M.A. Loschinina. Pros. SPIE, **3819**, 73 (1998).
- [17] П.А. Бахтин, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, А.П. Коробкин, Н.Н. Михайлов, И.В. Сабина, Ю.Г. Сидоров. В сб.: Тез. докл. совещ. „Актуальные проблемы полупроводниковой фотозлектроники“ (Новосибирск, 2003) с. 52.
- [18] В.М. Акимов, К.О. Болтарь, И.Д. Бурлаков, Е.А. Климанов, В.П. Лисейкин, Л.Д. Сагинов, С.В. Щукин, С.С. Хромов. Прикл. физика, № 2, 83 (2003).
- [19] В.М. Акимов, К.О. Болтарь, Е.А. Климанов, В.П. Лисейкин, А.Р. Микертумянц, Л.Д. Сагинов, А.А. Тимофеев, В.М. Юнгерман. Прикл. физика, № 2, 80 (2003).
- [20] Л.А. Бовина, К.О. Болтарь, И.Д. Бурлаков, Е.А. Климанов, А.И. Патрашин, Л.Д. Сагинов, В.И. Стафеев, А.А. Тимофеев. Оптич. журн., № 6, 74 (1996).
- [21] К.О. Болтарь, Н.И. Яковлева, С.В. Головин, В.П. Пономаренко, В.И. Стафеев, И.Д. Бурлаков, А.Н. Моисеев, А.П. Котков, В.В. Дорофеев. Прикл. физика, № 5, 95 (2003).
- [22] Л.А. Бовина, И.Д. Бурлаков, Ю.К. Ильин, И.А. Клеманов, Н.Г. Мансвентов, В.Н. Соляков, В.И. Стафеев, А.А. Тимофеев. Оптич. журн., № 6, 62 (1996).
- [23] L.A. Bovina, I.D. Bourlakov, V.I. Ivanov, S.V. Golovin, N.G. Mansvetov, V.N. Soliakov, V.I. Stafeev. Pros. SPIE, **3819**, 2 (1998).
- [24] К.О. Болтарь, Л.А. Бовина, Л.Д. Сагинов, В.И. Стафеев, И.С. Гибин, В.М. Малеев. Прикл. физика, № 2, 50 (1999).

Редактор Т.А. Полянская

HgCdTe diodes and the focal plane arrays development

V.I. Stafeev, K.O. Boltar, I.D. Bourlakov, V.M. Akimov, L.D. Saginov, V.N. Solyakov, N.G. Mansvetov, V.P. Ponomarenko, A.A. Timofeev, A.M. Filachev

State Scientific Center of Russian Federation „RD&P Center ORION“, 111123 Moscow, Russia

Abstract The review presents the results on HgCdTe photodiodes and focal plane arrays operating in the middle and long wavelength ranges of the infrared spectrum research and development in RD&P Center ORION. Structure, topology and performance of HgCdTe photodiodes arrays, silicon readout electronics, staring and time-delay-integration focal plane arrays, thermal imagers are given.