

УДК 621.383.4/5

Матричные фотоэлектронные модули среднего и дальнего ИК-диапазонов спектра на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для инфракрасной аппаратуры нового поколения

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

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион" — государственный научный центр
Российской Федерации, Москва, Россия

Представлены 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-ртути. Представлены структура, топология и параметры разработанных фотодиодов, фотодиодных матриц "смотрящего" и многорядного типов, структура и электрические схемы созданных кремниевых мультиплексоров матричных МФПУ. Приведены параметры фотодиодных матриц различных форматов и созданного макета тепловизора на основе МФПУ формата 128×128 элементов.

подавляющее большинство современной оптико-электронной аппаратуры 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], а именно:

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 — $x \sim 0,4$; 3—5 мкм — $x \sim 0,3$; 8—12 мкм — $x \sim 0,2$ (рис. 1);

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

КРТ может быть n -типа проводимости с малой концентрацией носителей и p -типа с высо-

ким структурным совершенством. Это обеспечивает возможность создания как высокоэффективных фоторезисторов на диапазон до 15 мкм и более, 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.

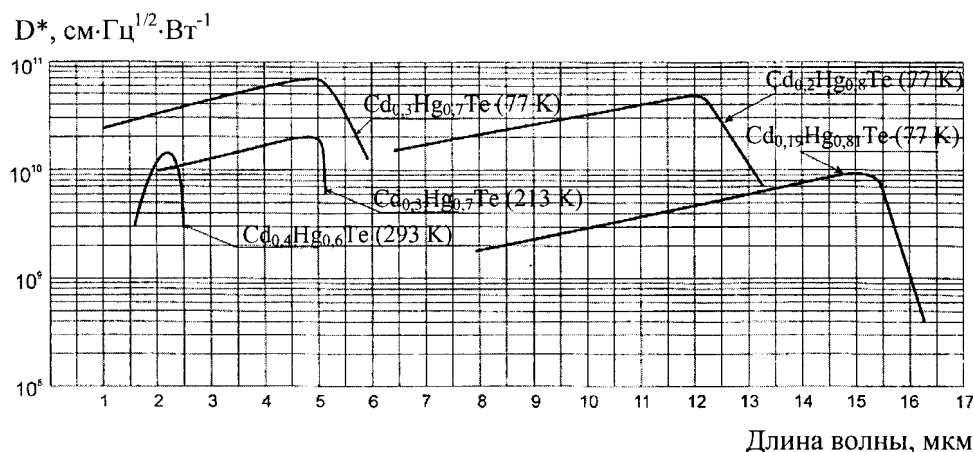


Рис. 1. Спектральные зависимости обнаружительной способности фотоприемников на основе соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ)

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 вглубь кристалла и компенсирующих имевшиеся вакансии. При быстром охлаждении возникший избыток междоузельной 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 сотен 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 [9] еще в 1960 г. Экспериментально этот эффект открыт и исследован в 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 $(2-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, 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 $300 \times 300 \text{ мкм}$, а в одноэлементных приемниках излучения до $2 \times 2 \text{ мм}$ 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 $\sim 20 \text{ мкм}$ реальный размер фоточувствительной площадки по уровню 0,5 составляет 35–40 мкм [11].

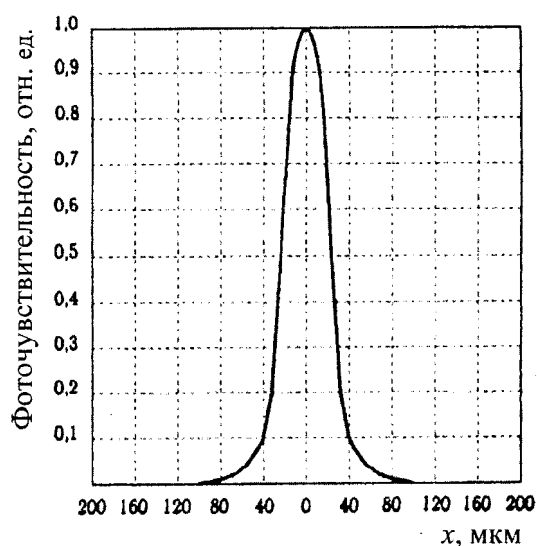


Рис. 2. Распределение фоточувствительности фотодиода на основе КРТ

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, вольт-амперная характеристика фотодиода, изготовленного на объемных монокристаллах КРТ, — на рис. 3. В режиме прямого детектирования быстродействие фотодиодов достигает нескольких десятков МГц, в гетеродинном режиме — до 1 ГГц. NEP на длине волны 10,6 мкм при температуре жидкого азота лучше 10^{-19} Вт/Гц [4, 5, 13]. Частотные характеристики фотодиодов в гетеродинном режиме представлены на рис. 4.

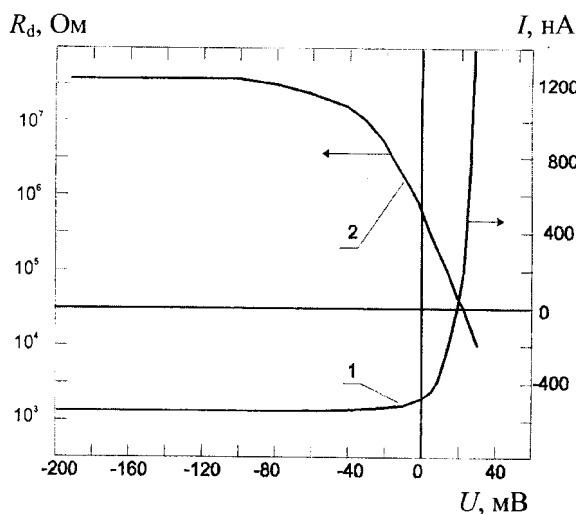


Рис. 3. Характеристики фотодиода, изготовленного на объемных монокристаллах КРТ:

1 — вольт-амперная; 2 — сопротивление R_d

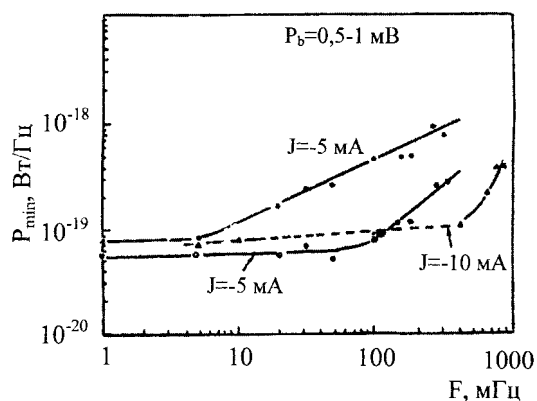


Рис. 4. Частотные характеристики фотодиодов в гетеродинном режиме

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 °С не приводило к ухудшению параметров фотодиодов. Допустимая температура длительного хранения фотодиодов достигает 70 °С [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 массогабаритных характеристик, увеличению дальности видения и др. Двухмерные матричные фотоприемные устройства 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 содержат десятки и сотни тысяч элементов, причем обычно $M \geq N$. ИК-системы 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 (ВЗН-режим). 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. Усложне-

ние 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 ~15 мкм на подложке из $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ (разработчик — ФГУП "Гиредмет"), молекулярно-лучевой эпитаксией толщиной 7–10 мкм на подложке из GaAs с подслоем CdZnTe (разработчик — ИФП СО РАН) или эпитаксией из металлоорганических соединений толщиной 10–12 мкм на подложке из GaAs с подслоем CdZnTe (разработчики: Институт химии высокочистых 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 ~12 мкм. Они обеспечивали стыковку с аналогичными микроконтактами раstra на сапфировой подложке или на кристалле кремниевой микросхемы мультиплексора. Механическая и электрическая стыковки проводились 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 взаимо-

связь 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 (см. рис. 2). Ширина оптического зонда в области длин волн 2–14 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 $\sim 20 \times 20$ 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 МОП- или КМОП-технологии по сравнению с ПЗС-технологией. В этом варианте обеспечивается более высокая величина реализуемой емкости накопительных МОП-конденсаторов, что важно при длинах волн излучения выше 5 мкм, при которых величина фоновая засветка. Кроме того, достигаются

большой коэффициент заполнения площади ячейки накопительным конденсатором, более плотная упаковка, более высокие и однородные электрические параметры при 77 К, более низкие управляющие напряжения, больший 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 выходы 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 этом шумовые характеристики фотодиода не ухудшаются даже при достаточно низких требованиях на шум входного транзистора (до 100 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 — на рис. 7.

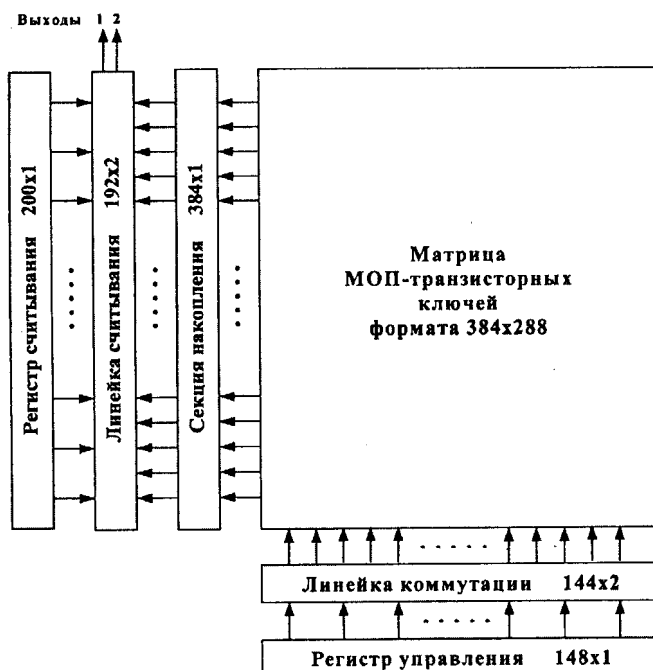


Рис. 5. Структурная схема кремниевого МОП-мультиплексора

Рис. 6. Схема электрическая
МОП-мультиплексора

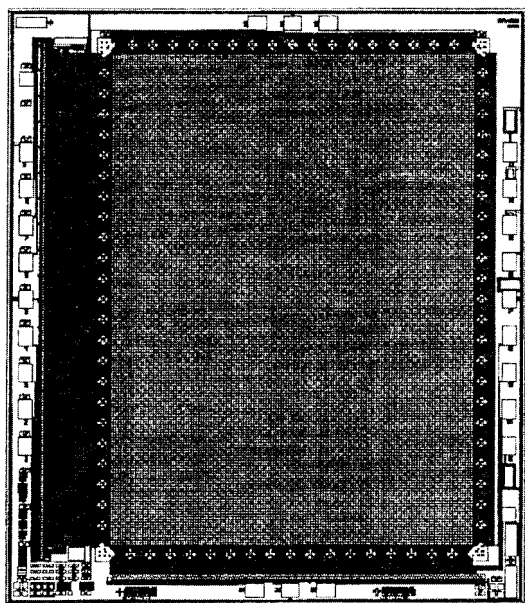
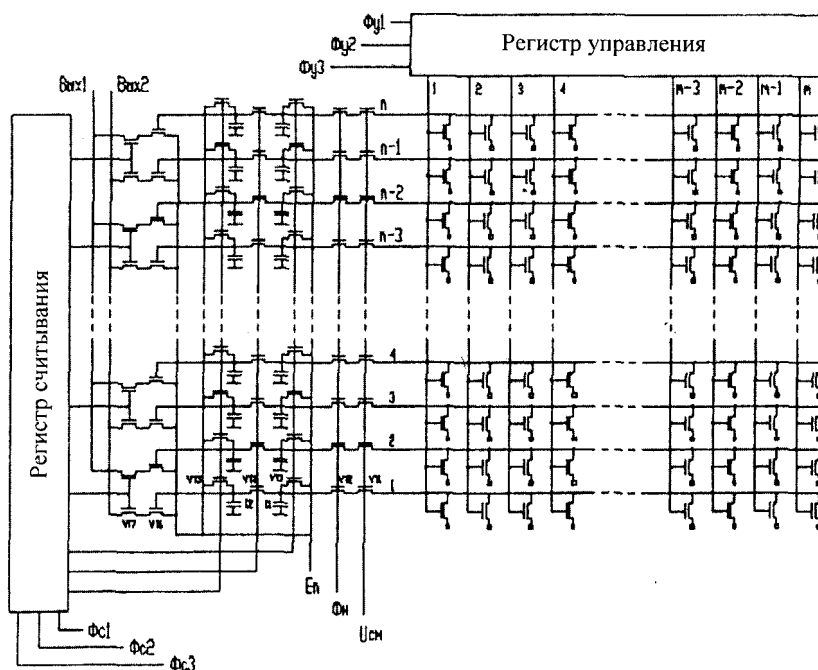


Рис. 7. Топология МОП-мультиплексора формата
384x288 элементов с шагом МФЧЭ 28 мкм

Мультиплексоры изготавливались по n -канальной технологии с поликремниевыми затворами и толщиной подзатворного диэлектрика ~ 50 нм. Поликремний использовался также и для первого уровня разводки. Для изоляции элементов применялась либо LOCOS-технология, 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 осуществлялись осаждением слоя двуокиси кремния толщиной 0,45 мкм методом разложения тетраэтоксисилана (ТЭОС).

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

МФПУ "смотрящего" типа разработаны в форматах 32x32, 128x128 и 384x288 элементов [12, 20, 21] на спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм. На рис. 8 показана структура фоточувствительного элемента на примере матричного фотоприемного устройства формата 384x288 элементов, имеющего шаг элементов 28 мкм, размер p - n -переходов 16x16 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 ~ 12 мкм при площади 20x20 мкм. Гибридизированная 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.

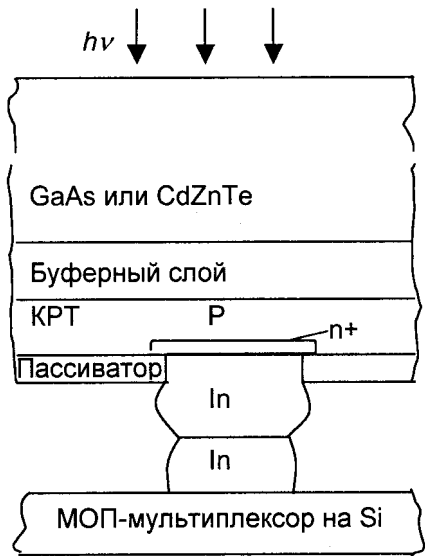


Рис. 8. Структура фоточувствительного элемента

В разработанных и исследованных МФПУ, изготовленных на основе слоев КРТ, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, удельная обнаружительная способность D^* и вольтовая фоточувствительность S_u 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 линейек при любой топологии 70 мкм. Для использования в режиме временной задержки и накопления по четырем 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. 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 формата 4×48—2×256 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, а, структура узла МФПУ формата 4×288 элементов приведена на рис. 10, б. На рис. 11, а представлено распределение обнаружительной способности, а на рис. 11, б распределение вольтовой чувствительности МФПУ формата 2×256 элементов при времени интегрирования фототока 25 мкс. Основные параметры МФПУ разработанных форматов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Число элементов	Топология	Размер элемента, мкм	Шаг, мкм	$\lambda_{\text{ср}}$, мкм	Апертурный угол, град.	$D^*\lambda_{\text{макс}}$, см·Вт ⁻¹ ·Гц ^{1/2}
32×32	N×N	40×40	70	10,5—11,5	60	3—4·10 ¹⁰
128×128	N×N	30×30	35	10,5—11,5	60	4—5·10 ¹⁰
384×288	M×N	25×25	28	10,3—11,2	60	3—4·10 ¹⁰
256×256	N×N	25×25	30	10,8	>40	4·10 ¹⁰

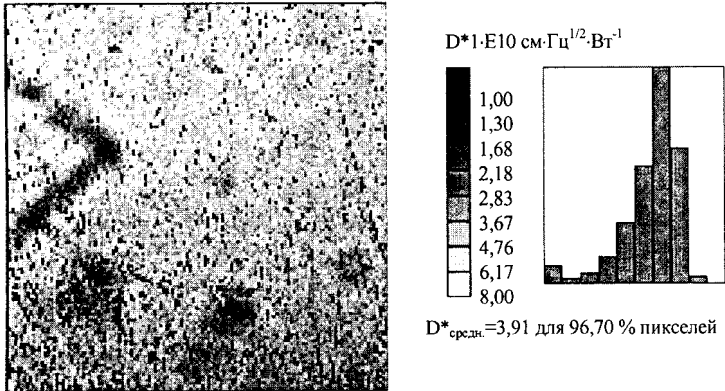


Рис. 9. Гистограмма распределения удельной обнаружительной способности D^* МФПУ формата 128×128 элементов

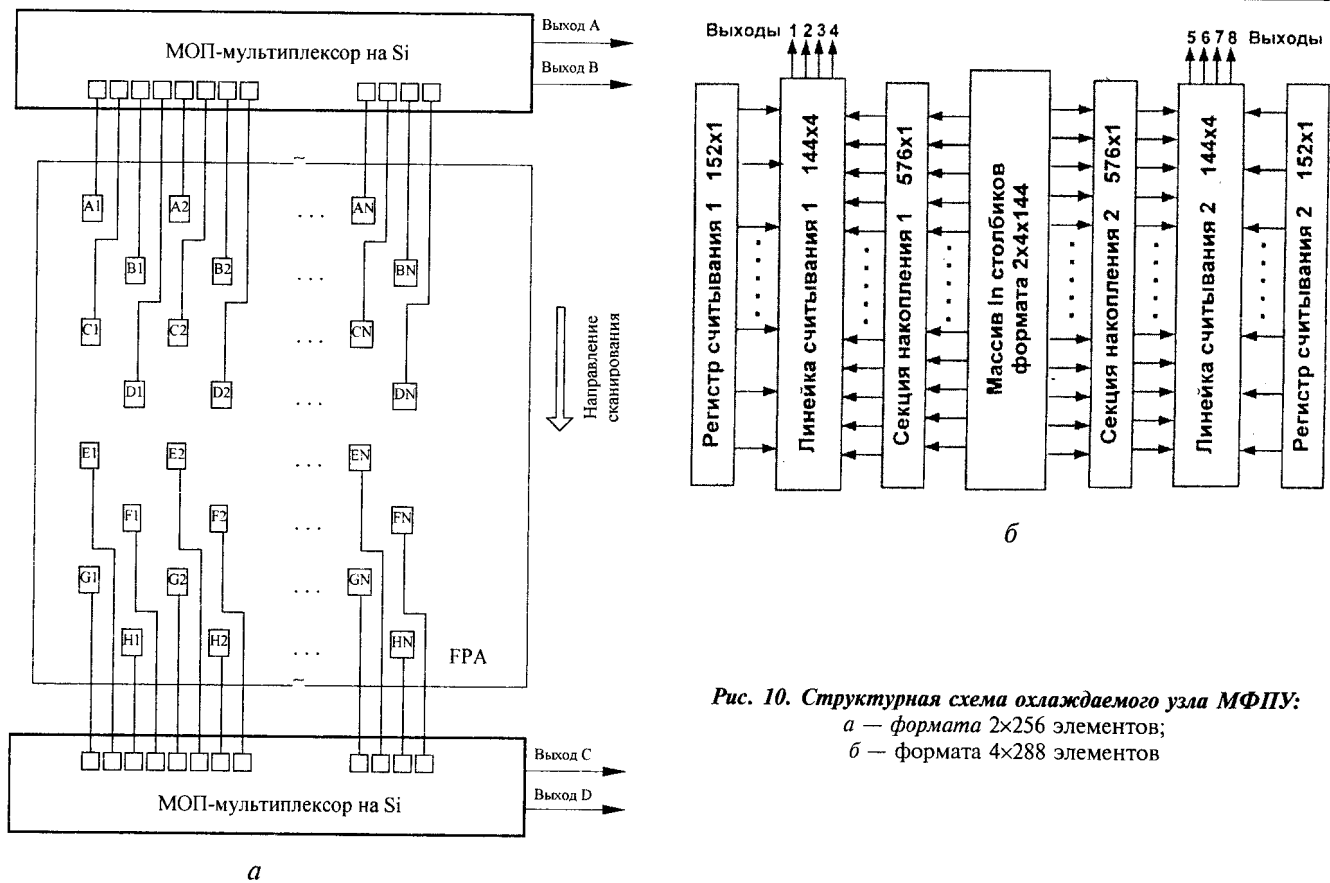


Рис. 10. Структурная схема охлаждаемого узла МФПУ:
а — формата 2×256 элементов;
б — формата 4×288 элементов

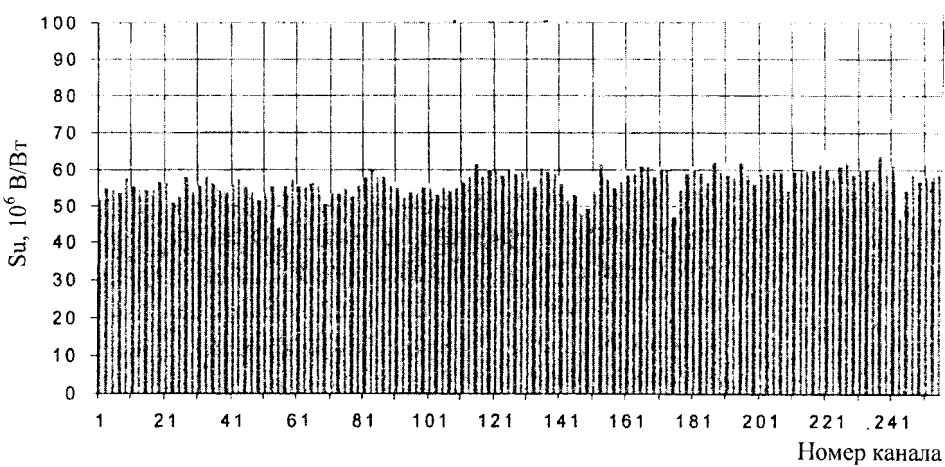
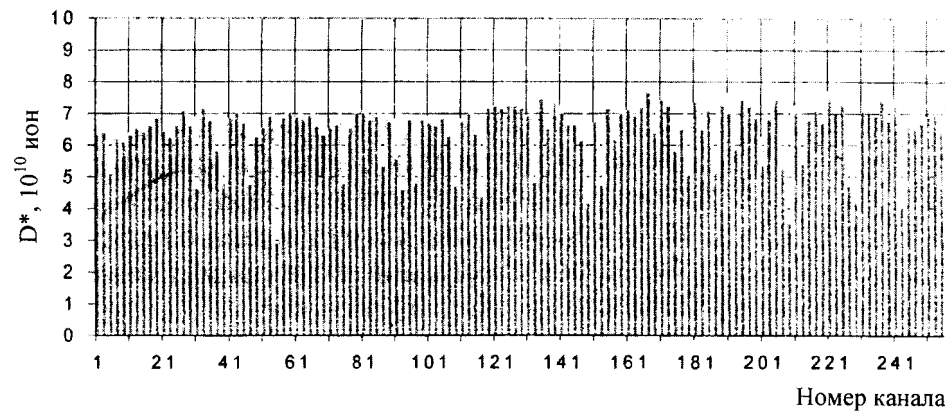


Рис. 11. Распределение обнаружительной способности (а) и вольтовой чувствительности (б) МФПУ формата 2×256 элементов при времени интегрирования фототока 25 мкс

Таблица 2

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

Процессы в больших интегральных схемах (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 быстродействие 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, 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 сохранения (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 — не хуже 0,1 К. Внешний вид МФПУ формата 384×288 элементов с микрокриогенной системой охлаждения представлен на рис. 12.

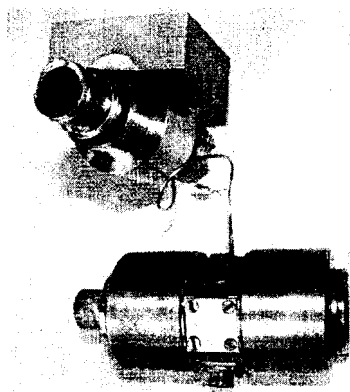


Рис. 12. МФПУ формата 384×288 элементов с микрокриогенной системой охлаждения

Фотоприемный модуль формирует выходной сигнал в стандартном телевизионном формате. Он разработан в составе: МФПУ, submodule сопряжения, submodule аналогово-цифрового преобразования, цифровой обработки и вторичных источников питания. Submodule аналогово-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 могут 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, аналогово-цифрового преобразования, цифровой обработки, ИК-объектив с фокусным расстоянием 70 мм и относительным отверстием 1:1,5, корпус и дисплей.

Среднее значение обнаружительной способности использованного в тепловизоре МФПУ составляет $4,5 \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·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 аналогово-цифровых преобразователей. Разработанный совместно с Сибирским НИИ оптических систем (г. Новосибирск) submodule аналогово-цифрового преобразования и цифровой обработки проводит аналогово-цифровое преобразование фотосигналов, корректировку разброса фоточувствительности, устранение на тепловизионном изображении дефектных и "неработающих" элементов, формирует на выходе стандартный теле-

визионный сигнал. Эквивалентная шуму разность температур ΔT на нулевой пространственной частоте меньше 40 мК. На рис. 13 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.

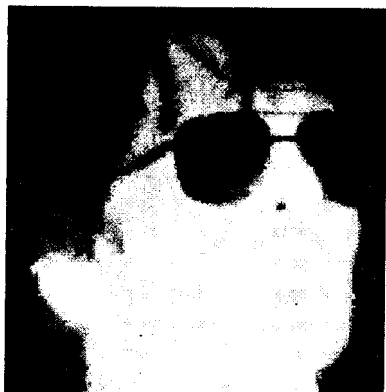


Рис. 13. Тепловое изображение

Литература

1. *Stafeev V. I.* Mercury cadmium telluride: main semiconductor material of modern IR photoelectronics// Pros. SPIE. 2000. V. 4340. P. 240.
2. *Khrypov V. T., Ponomarenko V. P., Butkevich V. G., Taubkin I. I., Stafeev V. I., Popov S. A., Osipov V. V.* Optical Engineering. 1992. V. 31. № 4. P. 678.
3. *Пономаренко В. П., Филачев А. М.* Фотоэлектроника для нового поколения оптико-электронной аппаратуры// Прикладная физика. 2002. № 1. С. 13.
4. *Bovina L. A., Stafeev V. I.* Mercury cadmium-telluride photodiodes and focal plane arrays// Pros. SPIE. 1998. V. 3819. P. 37.
5. *Бовина Л. А., Стафеев В. И.* Фотодиоды и фотодиодные матрицы на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Прикладная физика. 1998. № 2. С. 58.
6. *Салмин Е. А., Пономаренко В. П., Стафеев В. И.* Полевой транзистор со структурой МТДП на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ // ФТП. 1988. Т. 22. С. 1142.
7. *Salmin E. A., Shimansky I. V., Ponomarenko Y. P., Stafeev V. I.* Electron mobility in inversion channels of $p-Hg_{1-x}Cd_xTe$ misfet's// Acta physica polonica. 1990. V. A77. № 2—3. P. 237.
8. *Богоболящий В. В., Ижнин И. И.* Механизм конверсии проводимости при бомбардировке кристаллов $p-Hg_{1-x}Cd_xTe$ // Известия вузов. Сер. Физика. 2000. № 8. С. 16.
9. *Стафеев В. И.* Инжекционный перенос тепла// ФТТ. Т. 2. С. 488.
10. *Пономаренко В. П., Стафеев В. И.* Исследование инжекционного переноса тепла в диодах на основе эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Тр. МФТИ. Сер. Радиотехника и электроника. 1974. Т. 7. С. 57.
11. *Boltar K. O., Iakovleva N. I.* Sensitive element dimensions measurements in focal plants arrays// Pros. SPIE. 1998. V. 3819. P. 40.
12. *Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Головин С. В., Иванов В. Ю., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Акимов В. М., Климанов Е. А., Лакеенков В. М., Сидоров Ю. Г.* Матричные фотоприемники формата 128×128 и 384×288 на основе фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 32.
13. *Bovina L. A., Ponomarenko V. P., Stafeev V. I., Logunenko Y. M.* CMT photodiodes and photodiode matrices for laser radiation reception// Innovative and Appl. Opt.-Elektron. 10th Int. Congress. Germany 1991. Abst. P. 137.
14. *Вурт И. С.* Деградиационные явления в фотодиодах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Известия вузов. Сер. Физика. 1998. Т. 41. № 10. С. 117.
15. *Бовина Л. А., Стафеев В. И., Болтарь К. О., Лакеенков В. М., Лощинина М. А.* Исследование стабильности характеристик фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 41.
16. *Bovina L. A., Boltar K. O., Stafeev V. I., Lakeenkov V. M., Loschinina M. A.* HgCdTe photodiode performance degradation// Pros. SPIE. 1998. V. 3819. P. 73.
17. *Бахтин П. А., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Коробкин А. П., Михайлов Н. Н., Сабина И. В., Сидоров Ю. Г.* Влияние низкотемпературных отжигов на электрофизические параметры пленок $CdHgTe$ // Тез. совещ. "Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники". — Новосибирск, 2003. С. 52.
18. *Акимов В. М., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Климанов Е. А., Лисейкин В. П., Сагинов Л. Д., Шукин С. В., Хромов С. С.* Кремниевые мультиплексоры формата 4×288 для многорядных ИК-приемников// Прикладная физика. 2003. № 2. С. 83.
19. *Акимов В. М., Болтарь К. О., Климанов Е. А., Лисейкин В. П., Микертумянц А. Р., Сагинов Л. Д., Тимофеев А. А., Юнгерман В. М.* Матричные МОП-мультиплексоры различных форматов для фотоприемных устройств смотрящего типа// Там же. С. 80.
20. *Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Климанов Е. А., Патрашин А. И., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Тимофеев А. А.* Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм// Оптический журнал. 1996. № 6. С. 74.
21. *Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Головин С. В., Пономаренко В. П., Стафеев В. И., Бурлаков И. Д., Моисеев А. Н., Котков А. П., Дорофеев В. В.* Матричный фотоприемник формата 128×128 на основе фотодиодов в эпитаксиальном слое КРТ, выращенном методом эпитаксии из металлоорганических соединений// Прикладная физика. 2003. № 5. С. 95.
22. *Бовина Л. А., Бурлаков И. Д., Ильин Ю. К., Климанов И. А., Мансветов Н. Г., Соляков В. Н., Стафеев В. И., Тимофеев А. А.* Многорядные КРТ-фотоприемные устройства для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм// Оптический журнал, 1996. № 6. С. 62.
23. *Bovina L. A., Bourlakov I. D., Ivanov V. I., Golovin S. V., Mansvetov N. G., Soliakov V. N., Stafeev V. I.* Linear HgCdTe scanning focal plane arrays with time delay and integration// Pros. SPIE. 1998. V. 3819. P. 2.
24. *Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Гибин И. С., Малеев В. М.* Тепловизор на основе "смотрящей" матрицы из $Cd_xHg_{1-x}Te$ формата 128×128// Прикладная физика. 1999. № 2. С. 50.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

MWIR and LWIR MCT FPA development

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

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The review contains the results of MWIR and LWIR spectral ranges MCT photodiodes and FPAs research and development in RD&P Center ORION. Structure, topology and performance of MCT photodiodes, silicon readout electronics, staring and TDI FPAs, thermal imager are presented.

УДК 621.383

Матричные фотоприемники из антимонида индия для гибридных матричных фотоприемных устройств

И. Д. Бурлаков, А. В. Голубков, А. И. Дирочка, И. Л. Касаткин, А. А. Лопухин,
В. Ф. Пасеков, В. П. Пономаренко, В. Ф. Чишко

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» —
государственный научный центр Российской Федерации, Москва, Россия

Разработаны и изготовлены матричные фотодиодные приемники с тонкой базовой областью на основе антимонида индия. Проведены исследования фотоэлектрических характеристик и механизмов генерации темнового тока разработанных матричных фотоприемников.

Различные ИК-системы с использованием матричных фотоприемников имеют ряд преимуществ по сравнению с системами с одноэлементными и линейными фотоприемниками: отсутствие сложной механической сканирующей системы, что приводит к значительному снижению массогабаритных и энергетических показателей; упрощение конструкции фотоприемного устройства (ФПУ) за счет уменьшения числа выводов из холодной зоны, в которой находится матричный фотоприемник (МФП), и, наконец, возможность достижения лучших пороговых характеристик за счет больших времен накопления фотосигнала. На область спектра 3–5 мкм разработка МФП ведется с 80-х годов XX века из антимонида индия, КРТ и барьеров Шоттки на основе силицида платины. Достоинства МФП на основе PtSi, связанные с высокой однородностью параметров и совместимостью со стандартной технологией изготовления ПЗС-структур, уменьшаются из-за низкой квантовой эффективности барьера Шоттки, что значительно сужает область их применения [1]. Фотоприемники на основе антимонида индия, полупроводника с собственным поглощением обладают высокой внутренней квантовой эффективностью (до 90 %)

и большим быстродействием. Первые монолитные матричные фотоприемники на его основе были разработаны на основе ПЗИ-структур с $p-n$ -переходом [2]. В таком МФП в ячейке реализовывались функции детектирования ИК-излучения и его накопление на емкости МДП-структуры. Организация ячеек в матричную структуру осуществлялась по схеме с X-Y адресацией, причем все функции по считыванию фотосигнала и его предварительной обработке выполнялись периферийными устройствами. Наряду с очевидными недостатками, связанными со сложностью конструкции МФПУ, которые возрастают по мере увеличения формата, пороговая чувствительность таких МФПУ принципиально ограничена схемой с X-Y адресацией. Кроме этого наличие, кроме $p-n$ -перехода в МФП, еще и двухуровневой контактной системы существенно снижало процент выхода годных МФП.

В настоящее время для построения МФПУ из антимонида индия используется гибридная схема, показанная на рис. 1. Сам матричный фотоприемник содержит только матрицу фотодиодов и выполняет функцию преобразования оптического сигнала в электрический, а обработка электрического сигнала (накопление, фильтра-