

УДК 621.383.5.029.71/73

В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, А. Г. Клименко, А. И. Крымский,  
И. В. Марчишин, Т. Н. Недосекина, В. Н. Овсяк, Л. Н. Ромашко,  
К. К. Свиташев, А. О. Сусяков, Н. Х. Талипов, Л. В. Тишкова

(Новосибирск)

### ФОКАЛЬНЫЕ МАТРИЦЫ $2 \times 64$ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 8—10 МКМ НА ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛАХ CdHgTe

Разработана технология изготовления линейчатого гибридного фотоприемного модуля (ФПМ)  $2 \times 64$  на объемных кристаллах CdHgTe (КРТ)  $p$ -типа для спектрального диапазона 8—10 мкм. Изготовлены диодные ( $n-p$ ) линейки с длинноволновой отсечкой фоточувствительности в области 8—10 мкм. Разработана принципиальная схема считывающего устройства, на основе которой изготовлены кремниевые 64-канальные мультиплексоры, работающие при  $T = 80$  К. Эти компоненты изготавливаются независимо и затем методом гибридной сборки с помощью гибких полиимидных шлейфов собираются на единой сапфировой пластине. Измерены фотодиодные характеристики каждого элемента. Среднее значение  $R_0A \approx 35$  Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup>. Количество работающих элементов 95%. На основе ФПМ  $2 \times 64$  реализована тепловизионная система с объективом  $F/1$ , позволяющая получить  $NE\Delta T \approx 50$  мК.

**Введение.** Полупроводниковые растворы КРТ широко используются при изготовлении фотоприемников ИК-излучения для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм. До недавнего времени основным препятствием для широкого использования этих приемников являлось недостаточное развитие технологий как выращивания совершенных слоев и кристаллов КРТ, так и изготовления фотоприемных структур на их основе.

В последнее время был достигнут значительный прогресс в развитии технологии выращивания слоев КРТ методами жидкофазной [1] и молекулярно-лучевой эпитаксии [2, 3], пригодных для изготовления многоэлементных матричных фотоприемных устройств с засветкой через подложку. Объемные кристаллы КРТ, на которых технически очень сложно изготовить матричные фотоприемные устройства (необходимо прецизионное утонение кристаллов до толщин  $\sim 10$  мкм без внесения структурных дефектов), обладают высокими электрофизическими характеристиками и структурным совершенством [4]. Поэтому объемные кристаллы КРТ успешно используются для создания малоэлементных и линейчатых фотоприемников.

Разработка фотоприемных устройств на КРТ для длинноволнового ИК-диапазона является более сложной задачей по сравнению с коротковолновыми (1—2 мкм) или средневолновыми (3—5 мкм) ИК-приемниками, так как фотодиоды с узкой запрещенной зоной имеют большие темновые токи, а большой поток фонового излучения приводит к низкому фотонному контрасту.

В данной статье описаны разработанные нами технологии изготовления линейчатого  $2 \times 64$  фотоприемника на объемных кристаллах КРТ для спектрального диапазона 8—10 мкм и гибридной микросборки ФПМ  $2 \times 64$  с двумя кремниевыми мультиплексорами на 64 канала каждый. Приведено описание принципиальной схемы кремниевого мультиплексора и фотоэлектрические параметры изготовленного линейчатого ФПМ. Обсуждена возможность

использования данного модуля для получения сигнального изображения с использованием сканирующей системы в одном направлении.

Технология изготовления фотоприемной линейки  $2 \times 64$ . Для изготовления линейчатых фотоприемных структур  $2 \times 64$  элемента на КРТ разработана топология фотодиодных линеек в планарном исполнении. Данная топология представляет двухрядную линейку по 64 элемента в каждом ряду с шагом 100 мкм, причем линейки сдвинуты относительно друг друга на 0,5 шага. Расстояние между рядами 50 мкм. Геометрический размер фотоприемного элемента  $50 \times 70$  мкм, зазор между элементами вдоль ряда 50 мкм. Контактные площадки к фотоприемным элементам вынесены с помощью металлической разводки по обе стороны от обеих линеек фотодиодов и имеют размер  $100 \times 200$  мкм.

Технологический маршрут изготовления линейчатых фотоприемных структур на КРТ *p*-типа состоит из более тридцати операций, включающих следующие основные технологические процессы:

- удаление нарушенного слоя и планаризация рабочей поверхности путем химико-механической полировки и последующего химико-динамического травления в бром-этанольном травителе, загущенном этиленгликолем;
- формирование *n-p*-переходов методом ионной имплантации бора и/или отжигом под анодным окислом в окнах из фоторезиста [5];
- обработка поверхности КРТ во фторсодержащем травителе с целью удаления бромидов ртути и других примесных элементов (К, Na, Ca, Si и др.) и выращивание естественного окисла КРТ [6];
- нанесение низкотемпературного двухслойного диэлектрического пассивирующего покрытия  $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$  (диэлектрические слои  $\text{SiO}_2$  наносились методом осаждения из газовой фазы в процессе окисления моносилана в кислороде в потоке аргона при  $T = 100^\circ\text{C}$  [7], слои  $\text{Si}_3\text{N}_4$  наносились в процессе химической реакции моносилана с аммиаком в плазме тлеющего разряда при температуре подложки  $50^\circ\text{C}$  [8]);
- формирование омического контакта к *n*-области в окне размером  $10 \times 30$  мкм с помощью индия, напыленного термоиспарением в вакууме;
- нанесение трехслойной металлической разводки Ni—Al—Ni методом термического испарения в вакууме в одном цикле; соотношение толщин слоев Ni и Al подобрано специальным образом для уменьшения механических напряжений между диэлектриком и металлической разводкой, а также для предотвращения химического взаимодействия между индием и алюминием;
- формирование индиевых «столбиков» высотой 8—10 мкм с использованием термоиспарения индия в вакууме;
- прецизионное разделение пластины КРТ на кристаллы с линейчатыми фотоприемными структурами  $2 \times 64$  на специальном станке с толщиной реза  $\sim 100$  мкм.

Следует отметить, что при изготовлении фотоприемных линеек на КРТ необходимо соблюдать ограничение по температуре (не более  $100^\circ\text{C}$ ) всех технологических процессов, включая процессы фотолитографии по диэлектрикам и металлам. Исходя из этого требования был разработан процесс фотолитографии с термообработкой слоев фоторезиста при  $T < 90^\circ\text{C}$ .

Свойства границы раздела КРТ — диэлектрик. Характеристики детекторов, изготовленных на материалах с узкой запрещенной зоной, зависят как от объемных свойств исходного полупроводникового материала, так и от свойств диэлектрических покрытий, используемых для защиты (пассивации) поверхности полупроводника. Избыточные токи утечки в фотодиодах обусловлены не только процессами межзонного туннелирования и туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне в объеме полупроводника, но и туннелированием через уровни ловушек вблизи границы раздела полупроводник — диэлектрик и поверхностные состояния. Более того, для узкозонного КРТ большой фиксированный заряд на границе раздела приводит к инверсии типа проводимости у поверхности и, следовательно, к увеличению туннельных процессов вблизи нее. Таким образом, пассивирующие покрытия должны

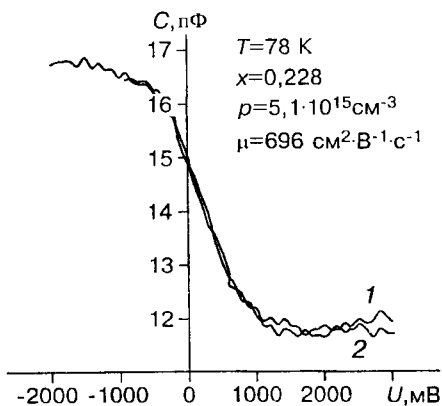


Рис. 1. Типичные вольт-фарадные характеристики тестовых МДП-структур:  
кривая 1 — 136 кГц, 2 — 1 МГц

иметь малую плотность зарядовых состояний вблизи поверхности, обеспечивать хорошую однородность и стабильность параметров границы раздела.

Для пассивации поверхности КРТ использовали диэлектрические слои пиролитического  $\text{SiO}_2$  и плазмохимического  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , которые наносили на естественный окисел. Параметры границы раздела определяли из измеренных при  $T = 78 \text{ K}$  вольт-фарадных (C-V)

характеристик тестовых МДП-структур, изготовленных рядом с фотодиодами на тех же образцах. Вольт-фарадные характеристики, измеренные на 136 кГц — 1 МГц, имеют высокочастотный (ВЧ) вид (рис. 1). Поверхность находится практически в состоянии плоских зон при нулевом напряжении на электроде. Приняв, что контактная разность потенциалов, рассчитанная из [9], не превышает 0,4 В, плотность фиксированного заряда на границе раздела получается  $N_{\text{fix}} \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Характерная величина гистерезиса ВЧ C-V-кривых не превышает 0,1 В в диапазоне смещений  $\pm 3 \text{ В}$  при скорости развертки 0,03 В/с. Соответствующая этому гистерезису плотность перезаряжающихся состояний у поверхности [10] составляет  $N_{\text{it}} \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Плотность быстрых поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны, оцененная из значений минимумов низкочастотной ( $C_{\text{min}} = 12,8 \text{ пФ}$  при 1 кГц) и высокочастотной ( $C_{\text{min}}$ ) зависимостей [11],  $\approx 1-2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ . Значение концентрации акцепторов в ОПЗ полупроводника  $N_A \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , вычисленное из  $C_{\text{min}}$  ВЧ C-V-характеристики, близко к объемному значению  $N_A$ .

Измерения темновых и световых (при освещении излучением абсолютно черного тела (АЧТ)  $T_{\text{АЧТ}} = 293 \text{ K}$ ) вольт-амперных характеристик и дифференциальных сопротивлений диодов проводили при  $T = 78 \text{ K}$  (рис. 2). Темновые токи диодов при обратном напряжении  $U = -50 \text{ мВ}$  находились в

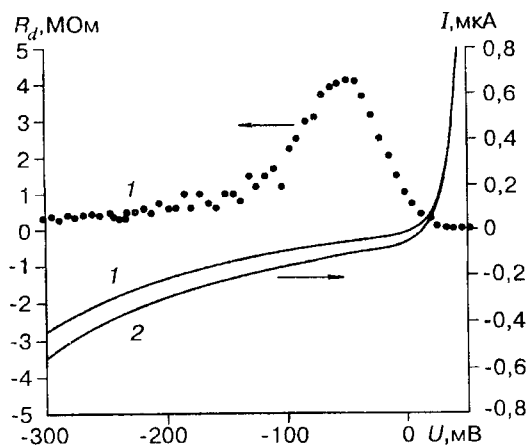


Рис. 2. Типичные вольт-амперные характеристики и дифференциальное сопротивление фотодиодов в матрице  $2 \times 64$ , измеренные при  $T = 78 \text{ K}$ :

1 — в темноте, 2 — при освещении излучением АЧТ,  $T_{\text{АЧТ}} = 293 \text{ K}$

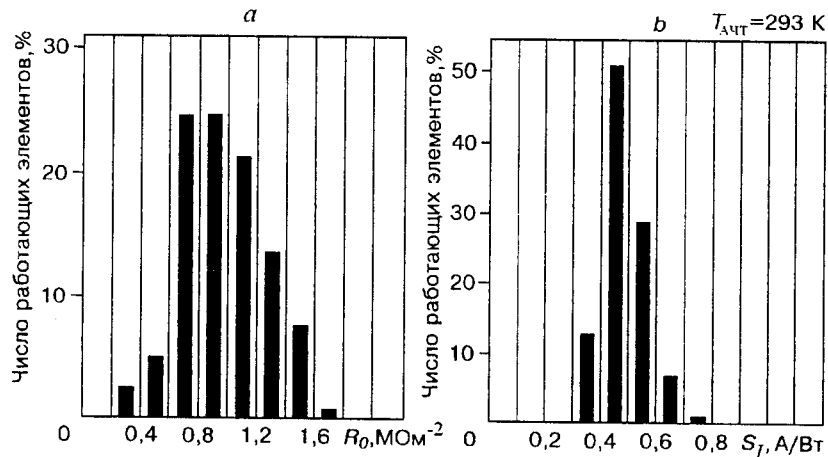


Рис. 3. Гистограммы распределения дифференциального сопротивления  $R_0$  (а) и ампер-ваттной чувствительности диодов  $S_1$  (b) при  $T = 78$  К в матрице  $2 \times 64$

диапазоне  $(5-10)10^{-8}$  А, а максимальное дифференциальное сопротивление достигало  $(4-6)$  МОм. Малая плотность зарядовых состояний вблизи поверхности, однородность параметров полупроводника и границы раздела КРТ — диэлектрик позволили получить однородные вольт-амперные характеристики диодов. На рис. 3 представлены гистограммы дифференциального сопротивления при нулевом смещении  $R_0$  и ампер-ваттной чувствительности  $S_1$  элементов матрицы.

КМОП-мультиплексор  $64 \times 1$  с буферными усилителями на входе. На рис. 4 изображена схема одного канала разработанного 64-канального мультиплексора, выполненного по КМОП-технологии с  $p$ -карманом. Схема предназначена для считывания сигналов с линейки  $n-p$ -диодов на основе соединения КРТ. Дифференциальный усилитель на транзисторах  $T1-T5$  в данной схеме, помимо функции формирования точного, термостабильного смещения (с однородностью  $\pm 5$  мВ), обеспечивает низкое входное сопротивление схемы считывания. Малощумящая работа схемы с низкоомными фотодиодами обеспечивается детекторами с сопротивлением не менее  $200$  кОм при времени интегрирования  $100$  мкс. Ограничение минимальной величины сопротивления фотодиода определяется  $1/f$ -шумом МДП-транзисторов. Возможности снижения  $1/f$ -шума, например, за счет увеличения площади затворов или удельной емкости диэлектрика весьма ограничены.

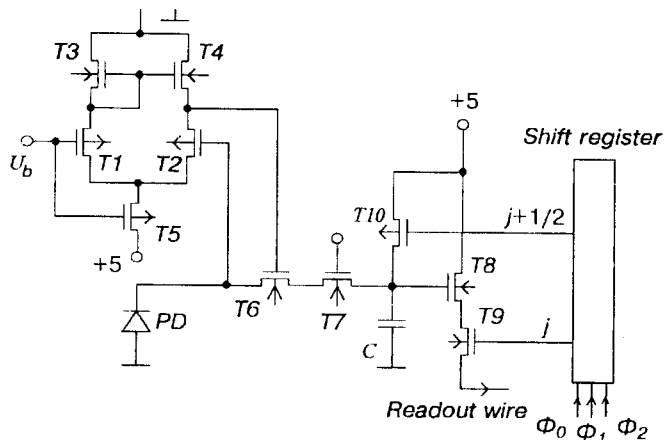


Рис. 4. Принципиальная схема одного канала мультиплексора  $64 \times 1$

Основные параметры фотоприемных модулей

ФПМ	$\lambda_{\text{отс}}$ , мкм	$R_{\text{QA}}$ , Ом · см <sup>2</sup>	$D^*$ (500 К, 1 кГц), $10^{10}$ см · Гц <sup>1/2</sup> /Вт	$NE\Delta T$ , мК		Число работающих элементов, %	Апертурный угол $2\theta$ ( $T = 293$ К)
				Идеал.	Эксп.		
1	8,3	35	$2,92 \pm 0,63$	4,97	20	95,3	40
2	10,0	28	$5,38 \pm 2,42$	7,76	23	88,2	20

Входной узел с буферным усилителем сконструирован по схеме [12]. Фототок через экранирующий МДП-транзистор  $T7$  непрерывно поступает на интегрирующую емкость  $C$ , которая периодически заряжается до напряжения источника питания. Считывание сигнального напряжения на емкости, пропорционального величине накопленного за один цикл заряда, происходит следующим образом. По КМОП-регистру сдвига, управляемому импульсными напряжениями  $\Phi_0$ — $\Phi_2$ , передвигается импульс с высоким логическим уровнем «1». С появлением «1» на  $j$ -м выходе регистра ключ  $T9$  открывается и на выходной шине, нагруженной на резистор или источник тока, появляется сигнал, соответствующий напряжению на затворе транзистора считывания  $T8$ . Через  $1/2$  такта на промежуточном  $j + 1/2$  выходе регистра появляется импульс, открывающий транзистор сброса  $T10$ , и на шине считывания возникает сигнал, соответствующий напряжению зарядки емкости. Разница двух сигналов, пропорциональная величине сигнального заряда, вычисляется с помощью устройства двойной корреляционной выборки.

Описанный мультиплексор удобен в эксплуатации, так как требует для работы только три источника постоянного напряжения, а также три импульсных напряжения для регистра сдвига.

**Микросборка фотоприемного модуля  $2 \times 64$ .** Фотоприемный модуль, состоящий из линейки фотодиодов  $2 \times 64$  на КРТ и двух кремниевых мультиплексоров по 64 канала каждый, собран на единой сапфировой плате. Кристаллы расположены лицевой стороной вверх и соединены между собой с помощью гибких полиимидных микрошлейфов. Толщины полиимида и алюминиевой металлизации составляют 20 и 10 мкм соответственно. Топология микрошлейфов представляет собой 64 параллельные шины с шагом 100 мкм и шириной 55 мкм. Перед сваркой кончики микрошлейфов подвергались лазерной очистке, после чего вакуумным напылением наносился сначала слой Ni толщиной  $\sim 400$  Å, а затем индия толщиной 7 мкм. Использование Ni в качестве подслоя позволило избавиться от наблюдавшихся (в случае отсутствия подслоя) шумящих и возрастающих со временем межслоевых сопротивлений Al—In.

С целью уменьшения механических напряжений при термоциклировании модуля, а также из-за старения полиимида микрошлейфам придана изогнутая форма и в промежутках между шинами полиимид частично удален с помощью лазерной сублимации.

Присоединение микрошлейфов к контактным площадкам мультиплексоров, на которых методом вакуумного термоиспарения напылен In, выполнено способом групповой холодной сварки под давлением на свеженанесенных индиевых «столбах». Прочность соединения In—In была высока, и дополнительных термообработок (оплавления индия) не проводилось.

Присоединение микрошлейфов к контактным площадкам фотоприемной линейки  $2 \times 64$  на КРТ выполнено при комнатной температуре способом индивидуальной холодной ультразвуковой (УЗ) микросварки индиевых «микростолбов» на кончиках шин к индиевым контактным площадкам фотодиодной линейки (толщина индиевых «микростолбов» составляет 6—8 мкм). УЗ-индентор создавал давление, которое в пересчете на эффективную площадь под кончиками Al-шин, не превышало  $1000$  г/мм<sup>2</sup> [13]. Такое давление достаточно для существенной ( $\sim 30$  %) пластической деформации индиевых

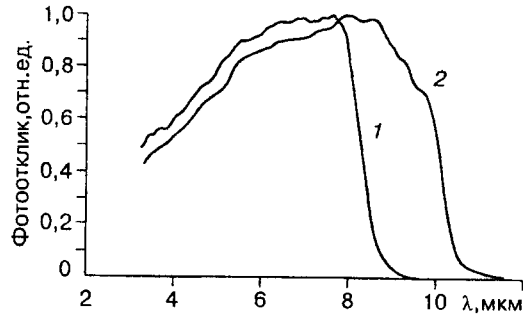


Рис. 5. Типичные спектральные зависимости фотоотклика:  
1 – образец 1, 2 – образец 2,  $T = 78$  К

«микростволбов», приводящей к их надежной сварке. В то же время это давление ниже допустимого предела, составляющего примерно  $1700 \text{ г/мм}^2$ , ниже которого в КРТ не образуются электрически активные структурные дефекты (испытание образцов проводилось методом «балки на опорах» [14]). Однако в работе [3] авторы используют более высокое давление  $3800 \text{ г/мм}^2$  в технологии гибридной микросборки матричного ФПУ  $64 \times 64$  с длинноволновой границей фоточувствительности  $10,7 \text{ мкм}$ , при котором не происходит заметного ухудшения характеристик фотодиодов. Это можно объяснить тем, что в данном случае механическая нагрузка передается «с плоскости на плоскость».

**Параметры фотоприемного модуля  $2 \times 64$ .** Измерение основных фотоэлектрических параметров ФПМ проводилось в азотном криостате с охлаждаемой диафрагмой при температуре  $80 \text{ К}$ . Апертурный угол  $2\Theta$ , определяемый диафрагмой, выбирался по критерию наиболее полного использования динамического диапазона мультиплексора при времени накопления  $t_{\text{нак}} = 100 \text{ мкс}$ . На всех элементах ФПМ измерены вольт-ваттная чувствительность, спектральная плотность напряжения шумов  $U_{\text{ш}}$  и определена предельная обнаружительная способность  $D^*$  ( $500 \text{ К}$ ,  $2\Theta$ ,  $1 \text{ кГц}$ ) в единичной полосе частот. Также определена эквивалентная шуму разность температур  $NE\Delta T$  (для протяженного источника с температурой  $293 \text{ К}$ , соответствующего апертурного угла и времени кадра  $t_k = 128t_{\text{нак}}$ ). Основные результаты и условия измерений представлены в таблице (образец 1).

В качестве примера в таблице также представлены основные параметры фотоприемного модуля с длинноволновой границей фоточувствительности

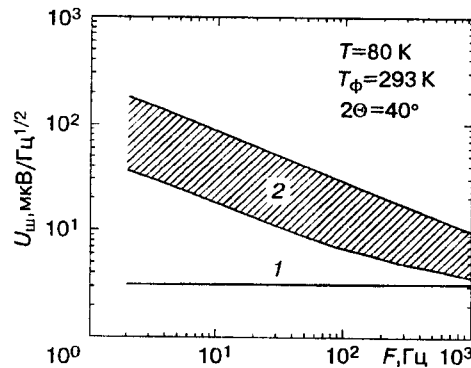


Рис. 6. Частотная зависимость выходного шума элементов ФПМ 1:  
1 – расчетное значение шума, обусловленного флуктуациями фонового излучения; 2 – область значений выходного шума элементов модуля

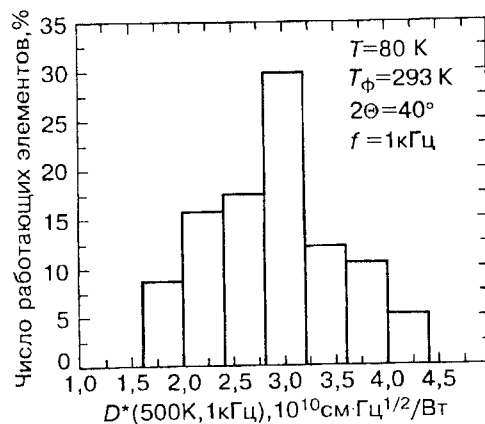


Рис. 7. Гистограмма обнаружительной способности элементов модуля ФПМ 1 ( $\lambda_{\text{отс}} = 8,3$  мкм)

10,0 мкм (образец 2). Спектральные зависимости фоточувствительности этих образцов приведены на рис. 5.

Указанные в таблице идеальные расчетные значения  $NE\Delta T$  получены как отношение проинтегрированного в полосе частот  $[1/t_k, 1/2t_{\text{нак}}]$  шума, обусловленного флуктуациями фонового излучения, к температурной чувствительности фотодиода с внешней квантовой эффективностью  $\eta = 0,6$ .

Существенное превышение экспериментально определенных величин  $NE\Delta T$  над идеальными расчетными значениями объясняется наличием у фотодиодов избыточного « $1/f$ -шума», граничная частота которого находится в пределах 1—50 кГц. Частотная зависимость напряжения выходного шума по всем элементам ФПМ 1 и расчетное значение шума, обусловленного флуктуациями фонового излучения, представлены на рис. 6. Интегральное напряжение шумов, определенное в полосе частот  $[1/t_k, 1/2t_{\text{нак}}]$  для различных элементов, в 1,3—4 раза превышает шум, обусловленный флуктуациями фона.

На рис. 7 показана гистограмма обнаружительной способности  $D^*$  (500 К, 40°, 1 кГц) для ФПМ 1. Сравнительно большая дисперсия обнаружительной способности в основном определяется разбросом величины шумовых напряжений по элементам ФПМ, в то время как вольт-ваттная чувствительность достаточно однородна (относительное среднеквадратичное отклонение 15 и

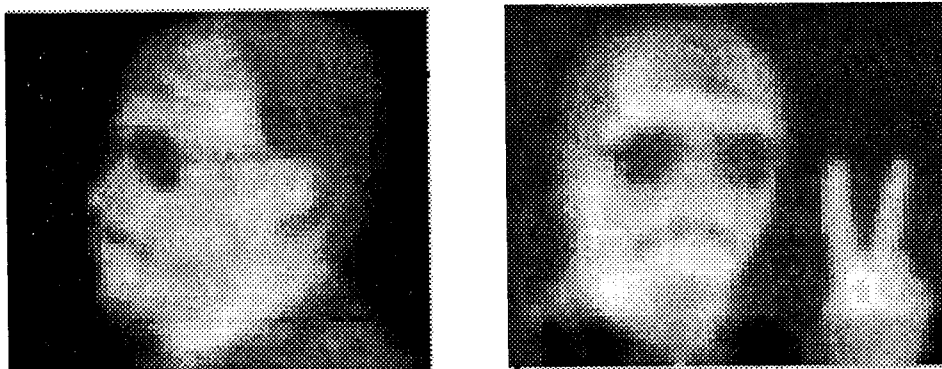


Рис. 8. Примеры теплового изображения

14 % для ФПМ 1 и 2 соответственно) и близка к своему теоретически возможному пределу.

На основе ФПМ 1 реализована тепловизионная система с объективом  $F/1$  и скоростью развертки 1 кадр/с. Используемая оптика позволяет получить эквивалентную шуму разность температур в поле кадра приблизительно 50 мК. Примеры тепловых изображений представлены на рис. 8.

**Заклучение.** Разработана комплексная технология изготовления гибридных фокальных фотоприемных модулей  $2 \times 64$  на объемных кристаллах КРТ с длинноволновой границей фоточувствительности в области 8—10 мкм. Изготовленные ФПМ обладают высокой обнаружительной способностью  $D^* = (3-5)10^{10}$  см · Гц<sup>1/2</sup>/Вт<sup>-1</sup>. Тепловизионные системы, реализованные на основе фотоприемных модулей, позволяют получать эквивалентную шуму разность температур  $NE\Delta T \cong 50$  мК для фонового излучения при комнатной температуре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kanno T., Saga M., Kajihara N. et al. Development of LPE-grown HgCdTe  $64 \times 64$  FPA with a cutoff wavelength of 10,6 mkm // Proc. SPIE. 1993. 2020. P. 49.
2. DeWames R. E., Arias J. M., Kozlowski L. J., Williams G. M. An assessment of HgCdTe and GaAs/GaAlAs technologies for LWIR infrared imagers // Proc. SPIE. 1992. 1735. P. 2.
3. Kanno T., Saga M., Kawahara A. et al. Development of MBE-grown HgCdTe  $64 \times 64$  FPA for long-wavelength IR detection // Proc. SPIE. 1993. 2020. P. 41.
4. Rogalski A., Piotrovski J. Intrinsic infrared detectors // Progr. Quant. Electron. 1988. 12. P. 87.
5. Талипов Н. Х., Попов В. П., Ремесник В. Г., Налькина З. А. Влияние отжига под анодным окислом на изменение состава поверхности и конверсию типа проводимости монокристаллов  $p$ -CdHgTe ( $x = 0,2$ ) // ФТП. 1992. 26. С. 310.
6. Romashko L., Myasnikov A., Ovsyuk V. et al. Formation of oxide films on HgCdTe after fluorine-consist rinsing // Materials Sci. Forum. 1995. 185—188. P. 209.
7. Васильев В. В., Дроздов В. Н., Салеева Г. Ю. Свойства слоев SiO<sub>2</sub>, полученных окислением моносилана кислородом при 100 °С // Хим. физика. 1992. 11. С. 1683.
8. Emeksuzyan V. M., Romashko L. N., Saleeva G. Y. et al. The application of CVD SiO<sub>2</sub> and PECVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in fabrication and passivation of long-wavelength HgCdTe photodiode arrays // Extended Abstracts of SSDM'95. Osaka, Japan, 1995. P. 1061.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1.
10. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. Томск: Радио и связь, 1990.
11. Овсяк В. Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука, 1984.
12. Lockwood A. H., Parrish W. J. Predicted performance of indium antimonide focal plane arrays // Opt. Eng. 1987. 26, N 3. P. 228.
13. Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р. Устройство и метод измерения пластической деформации образцов микронных размеров // ПТЭ. 1996. № 4. С. 1.
14. Cole S., Willoughby A. F. W., Brown M. The mechanical properties of CdHgTe // J. Crystal Growth. 1982. 59. P. 370.

Поступила в редакцию 25 марта 1996 г.