

УДК 621.383.4/5:546.48'49'24

МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ФОРМАТОВ 4x48, 2x96, 4x128, 2x256 НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДОВ ИЗ $Cd_xHg_{1-x}Te$

*Л. А. Бовина, В. Н. Соляков, Н. Г. Мансветов, И. Д. Бурлаков,
С. В. Головин, В. Ю. Иванов, В. И. Стафеев, Ю. К. Ильин, Е. А. Климанов*
Государственное унитарное предприятие
«Научно-производственное объединение "Орион"», Москва, Россия

Представлены результаты разработки многоядных матричных фотоприемников (МФП) форматов 4x48, 2x96, 4x128, 2x256 для работы в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) на спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм. Приведены свойства матриц фоточувствительных элементов (ФЧЭ), изготовленных на основе твердых растворов теллуридов кадмия-ртути (КРТ). Охлаждаемые кремниевые схемы считывания и обработки сигналов выполнены по n-МОП технологии. Описаны методики и результаты исследований МФП в режиме ВЗН. Показана возможность достижения удельной обнаружительной способности до $(1-2) \cdot 10^{11}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2} для МФП 4x48 и 4x128 на спектральный диапазон 8–12 мкм при суммировании сигналов от четырех фоточувствительных элементов в режиме ВЗН и до $(7-10) \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2} для МФП форматов 2x96 и 2x256 при суммировании сигналов от двух ФЧЭ.

В настоящее время доминирующим направлением в совершенствовании и создании новых перспективных тепловизионных и тепловизионных приборов является использование работающих в режиме временной задержки и накопления многоядных матричных фотоприемников на основе фотодиодов из КРТ [1–3].

Разработанные и исследованные МФП состоят из матрицы фотодиодных чувствительных элементов (МФЧЭ) и двух кремниевых интегральных схем (ИС) мультиплексоров, выполненных по n-МОП технологии и размещаемых в "холодной" фокальной плоскости рядом с МФЧЭ. В зависимости от процентного содержания кадмия и ртути в исходном материале КРТ можно изменять спектральный диапазон фоточувствительности от 1 до 12 мкм при незначительной модификации базовых технологических процессов. Мультиплексор обеспечивает считывание и предварительное усиление фотосигналов от отдельных ФЧЭ и их мультиплексирование на четыре выхода.

Структурная схема организации МФП показана на рис. 1. Каждый фотодиод матрицы соединен с соответствующим входным устройством мультиплексора INP. Напряжения U_{B1} и U_{B2} , подаваемые на это устройство, определяют напряжение смещения на фотодиодах. Фототок интегрируется в ячейке накопления INP. Импульсы напряжения F_4 , подаваемые на эту ячейку, задают время накопления. По окончании цикла накопления информация через ключи TR переносится на ячейки хранения ST, после чего начинается следующий цикл накопления фотосигнала. Напряжение U_{RS} предназначено для установки ячеек INT и ST в начальное состояние. Информация из ячейки хранения считывается и выводится на два выхода с помощью сдвигового регистра через ключи K. Информация с рядов фотодиодов A и C выводится на выходы OutA и OutC, а с рядов B и D — на выходы OutB и OutD, соответственно. Сдвиговый регистр управляется тремя импульсными напряжениями F_1 , F_2 и F_3 и одним постоянным напряжением U_R . Напряжение на подложке U_S оптимизирует режим работы мультиплексора. Земляные выводы регистра G_R и МФЧЭ G_A выполнены отдельными.

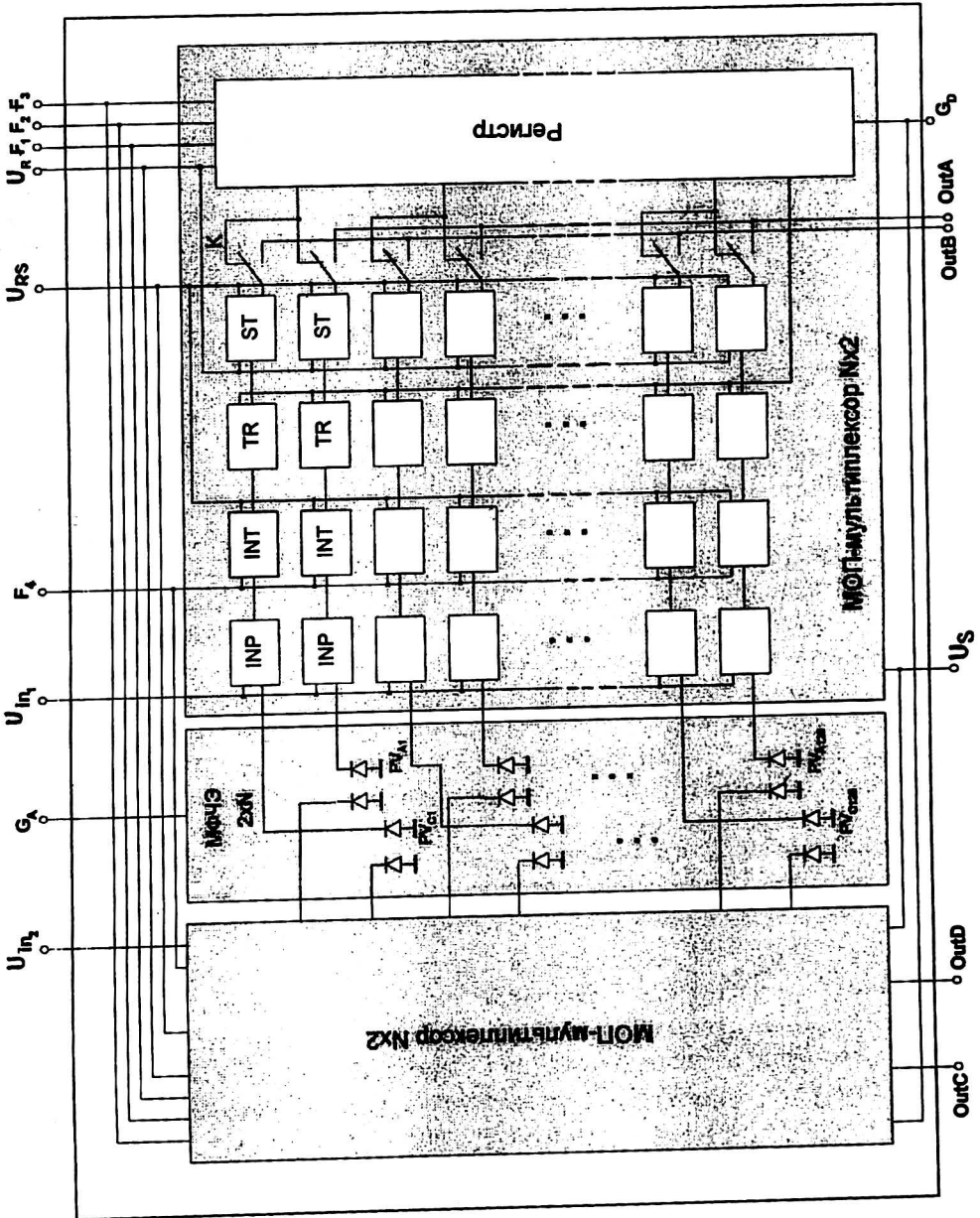


Рис. 1. Схема организации МФЛ

Гибридизация МФЧЭ и двух кремниевых ИС осуществляется стыковкой через индиевые столбики на контактный растр из сапфира, на котором выполнены межсоединения в виде металлизированных токоведущих дорожек, обеспечивающие соединение всех ФЧЭ со входами кремниевых ИС МОП-мультиплексоров, а также контактные площадки для датчика температуры, подачи управляющих напряжений и вывода сигналов от МФП и тестовых фотодиодов.

Охлаждаемый модуль МФП монтируется и герметизируется в специально разработанный криостатируемый корпус, предназначенный для охлаждения системой, работающей на эффекте Джоуля-Томпсона или по циклу Стирлинга. Теплопритоки по корпусу не превышают 0,4 Вт, а тепловыделения при работе МФП — не более 0,05 Вт. МФП имеет 11 выводов для подачи питающих напряжений и управляющих сигналов и 4 сигнальных вывода. При этом общее число выводов из "холодной" зоны с учетом двух термодатчиков и тестовых диодов составляет 24.

Матрица фотодиодов изготавливается в эпитаксиальном слое КРТ, полученном методом жидкофазной эпитаксии на подложке CdZnTe. Состав слоя для спектрального диапазона 8—11 мкм выбирается равным 0,21—0,22 молярных доли CdTe, а для диапазона 3—5 мкм — 0,27—0,3 молярных доли. Толщина исходных слоев КРТ *p*-типа проводимости составляет 15—25 мкм. Концентрация и подвижность основных носителей заряда при 77 К лежит в пределах $(5-10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $300-600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, соответственно.

Базовые технологические процессы по формированию планарной структуры МФЧЭ включают:

финишное химическое травление эпитаксиального слоя КРТ, обеспечивающее удаление верхнего нарушенного слоя (окончательная толщина слоя 12—15 мкм);

пассивация поверхности диэлектриком CdTe, обеспечивающая требуемое состояние и защиту границы раздела КРТ-диэлектрик;

формирование двумерной матрицы *p* — *n*-переходов ионным легированием;

нанесение контактных металлов к *n*- и *p*-областям;

создание контактных индиевых столбиков для стыковки на сапфировый растр;

стыковка МФЧЭ на контактный растр;

нанесение антиотражающего покрытия на подложку.

При изготовлении кремниевых ИС накопления фототока и мультиплексирования сигналов следующие технологические процессы являются базовыми:

химическая и плазмохимическая обработка кремниевых пластин и структур;

осаждение диэлектрических пленок и слоев поликремния;

напыление металлов и диэлектриков;

ионная имплантация;

формирование индиевых контактных столбиков;

стыковка на контактный растр с МФЧЭ.

Разработаны и исследованы многорядные МФП форматов 4x48, 2x96, 4x128, 2x256. Шаг ФЧЭ в линейках фотодиодов и зазоры между линейками составляют 60 мкм для первых двух форматов и 70 мкм — для следующих двух. МФП формата 2x*N* с расположением ФЧЭ в шахматном порядке (рис. 2,а) при однократном сканировании позволяет получать 2*N* строк изображения, а сигналы для каждой строки получаются путем суммирования по двум ФЧЭ. В МФП формата 4x*N* расположение ФЧЭ выполнено в регулярном порядке (см. рис. 2,б) и для получения информации о 2*N* строках изображения требуется чересстрочное сканирование со сдвигом на одну строку изображения. При этом сигналы для каждой строки суммируются от четырех ФЧЭ. Следует отметить, что при заданном времени кадра обе топологии равнозначны по отношению сигнал/шум, так как во втором случае требуется в два раза большая скорость сканирования, поэтому время накопления фототока в этом случае будут в два раза меньше. Преимущество второго варианта заключается в лучшей однородности строк и большем запасе резервирования, тогда как преимуществом первого варианта является более простая схема оптико-механического сканирования.

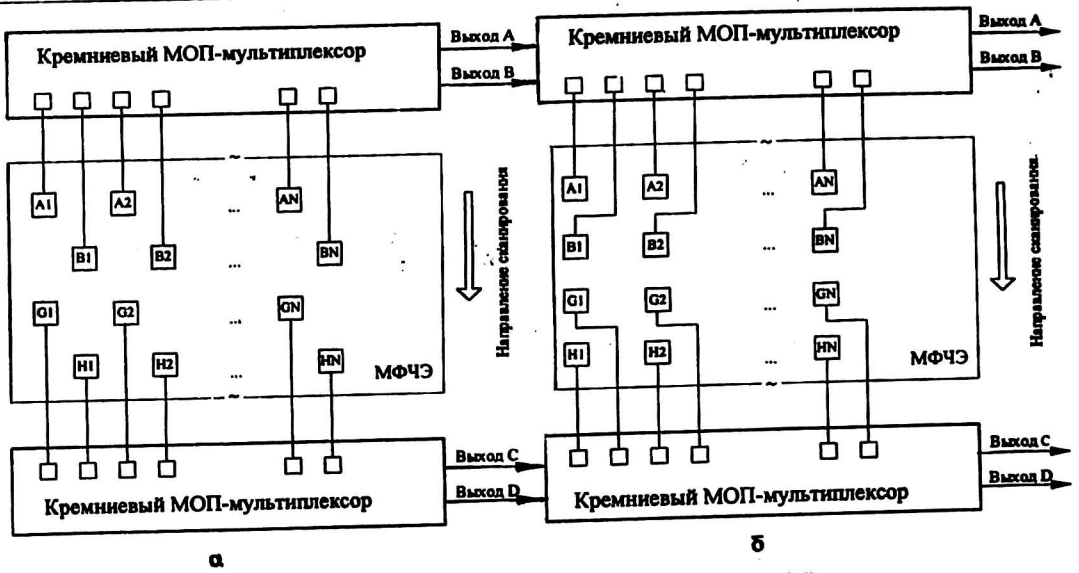


Рис. 2. Топологическая схема организации МФП в шахматном порядке (а) и в регулярном (б) порядке

Структура МФЧЭ выполнена в виде локальных $p-n$ -переходов размером 20×20 мкм со стоп-каналами, ограничивающими диффузию фотогенерированных электронов в p -слое КРТ (рис. 3). Регистрируемое ИК-излучение проходит через широкозонную полупроводниковую подложку и поглощается в фоточувствительном p -слое, в котором выполнена матрица фотодиодов.

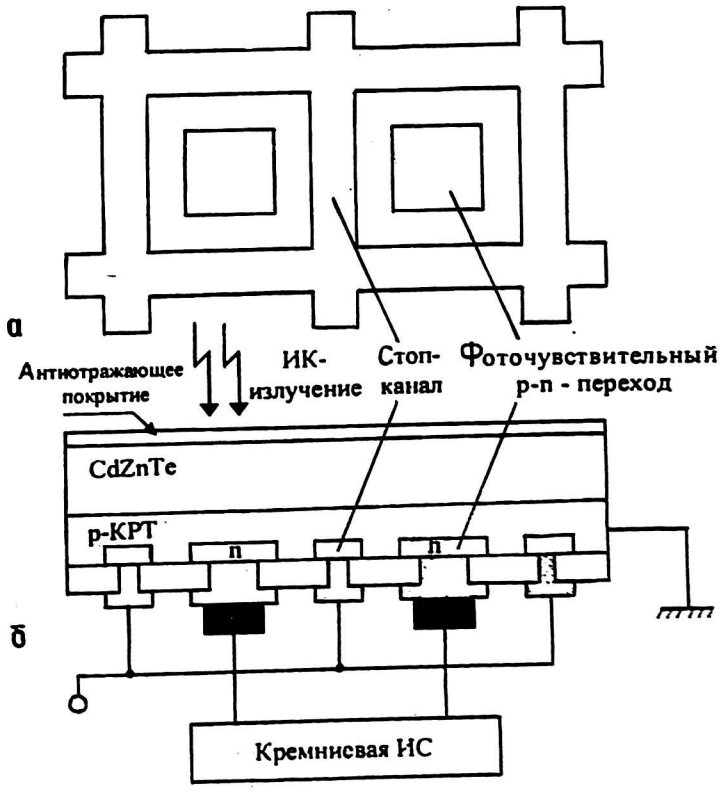


Рис. 3. Структура МФП: а — вид сверху, б — разрез сбоку

Типичные спектр фоточувствительности, вольт-амперная характеристика и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения смещения фотодиодов на спектральный диапазон 8—11 мкм показаны на рис. 4 и 5. Сопротивления фотодиодов при нулевом смещении лежат в диапазоне ~ 0,7—1,0 МОм, а при обратном смещении ~ 50 мВ превышают 10 МОм. Наклон кривой дифференциального сопротивления вблизи нулевого напряжения смещения свидетельствует о том, что темновой ток обусловлен в основном диффузионным механизмом. Точковый шум фотодиодов определяется в основном флуктуациями фонового потока излучения. Удельная обнаружительная способность тестовых фотодиодов $D^*_{\max}(1,2 \text{ кГц}, 180^\circ, 1) \geq 3 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при токовой чувствительности $\geq 3 \text{ А/Вт}$.

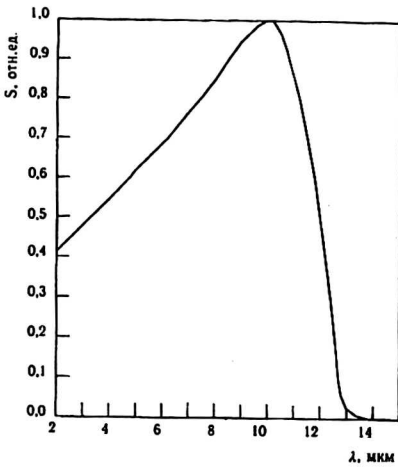


Рис. 4. Характеристика спектральной чувствительности МФП для диапазона 8—12 мкм при рабочей температуре 80 К

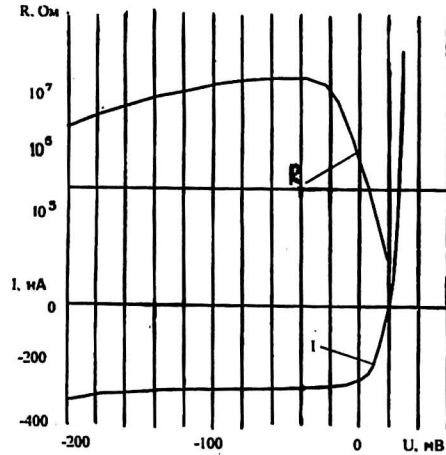


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика (1) фотодиода для диапазона 8—12 мкм и зависимость его дифференциального сопротивления от напряжения смещения (R)

Исследования матричных фотоприемников в режиме ВЗН проводились на специализированном автоматизированном стенде, обеспечивающим как измерение основных фотоэлектрических параметров, так и интегральную оценку характеристик МФП по тепловизионному изображению тестовых объектов, например, штриховых миш. Стенд позволяет выполнять:

- считывание сигналов от каждого ФЧЭ в динамическом режиме при засветке МФП излучением от калиброванного источника — абсолютно черного тела (АЧТ);
- оцифровку, оперативное запоминание и хранение считываемой информации;
- суммирование сигналов от двух или четырех ФЧЭ каждого канала МФП с необходимой временной задержкой;

определение средних значений и среднеквадратичных отклонений сигналов для каждого ФЧЭ и каждого канала МФП по большому числу измерений;

расчет на основании полученных данных основных фотоэлектрических параметров МФП и их отображение в соответствующих протоколах.

К основным параметрам МФП, работающих в режиме ВЗН, относятся: вольт-амперная чувствительность (S_U) и удельная обнаружительная способность (D^*_{\max}) каждого фоточувствительного элемента и при суммировании по двум или четырем элементам каждого канала матрицы, спектральное распределение фоточувствительности; эффективный размер фоточувствительной площадки ФЧЭ. Исследование параметров многоярких МФП в стенде основано на стробирующих

методах, дающих возможность выделять и измерять в исследуемом видеосигнале МФП любой заранее выбранный участок, относящийся к конкретному фоточувствительному элементу. Наиболее сложным при этом является обеспечение необходимой и достаточно высокой точности измерения амплитуды видеосигнала на любом его участке. Блок аналого-цифровой обработки сигналов, сопряженный с персональной ЭВМ, позволяет производить выборки сигналов от каждого фоточувствительного элемента по четырем каналам одновременно, преобразовывать их в цифровую форму, обеспечивая точность преобразования не хуже 0,025 %, суммировать и хранить их в буферном ОЗУ видеопамяти, а также вводить их в оперативную память персональной ЭВМ. ЭВМ по разработанной программе производит обработку информации и расчет всех необходимых параметров исследуемых сигналов.

Измерения параметров МФП проводились при температуре АЧТ 800 К. Эффективная шумовая полоса частот при расчете D^*_{\max} определялась временем накопления $T_{\text{н}}$, задаваемым при установке режима работы МФП ($\Delta f = 1/2 T_{\text{н}}$). Напряжение сигнала U_c для каждого фоточувствительного элемента определялось по разности напряжений двух сигналов при открытой и закрытой диафрагме АЧТ, а напряжение шума $U_{\text{ш}}$ — как среднеквадратичное отклонение этих сигналов при большом (> 100) числе отсчетов. Эффективный размер фоточувствительной площадки ФЧЭ и спектральный коэффициент использования мощности АЧТ, необходимые для определения $S_{\text{и}}$ и D^*_{\max} , определялись из экспериментальных измерений на тестовых ФЧЭ и вводились в программу расчета перед началом измерений.

На рис. 6 для МФП 4x48 с граничной длиной волны $\lambda_{\text{гр}} \sim 10,4$ мкм показано распределение удельной обнаружительной способности вдоль линеек поэлементно и при суммировании по четырем ФЧЭ каналов в режиме ВЗН. Среднее значение по каналам D^*_{\max} ($\text{FOV} = 180^\circ$) превышает 10^{11} см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}. Средние значения $D^*_{\max}(180^\circ)$ по каналам в МФП 2x96 и 4x128 превышают $7 \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2} и $9 \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}, соответственно, при времени накопления 8 мкс — для МФП 2x96 и 29 мкс — для МФП 4x128. Среднее значение D^*_{\max} при суммировании по четырем элементам для МФП на спектральный диапазон 3—5 мкм составляло $(2-3,5) \cdot 10^{11}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}. Время накопления в МФП может регулироваться в пределах от 5 до 100 мкс и более.

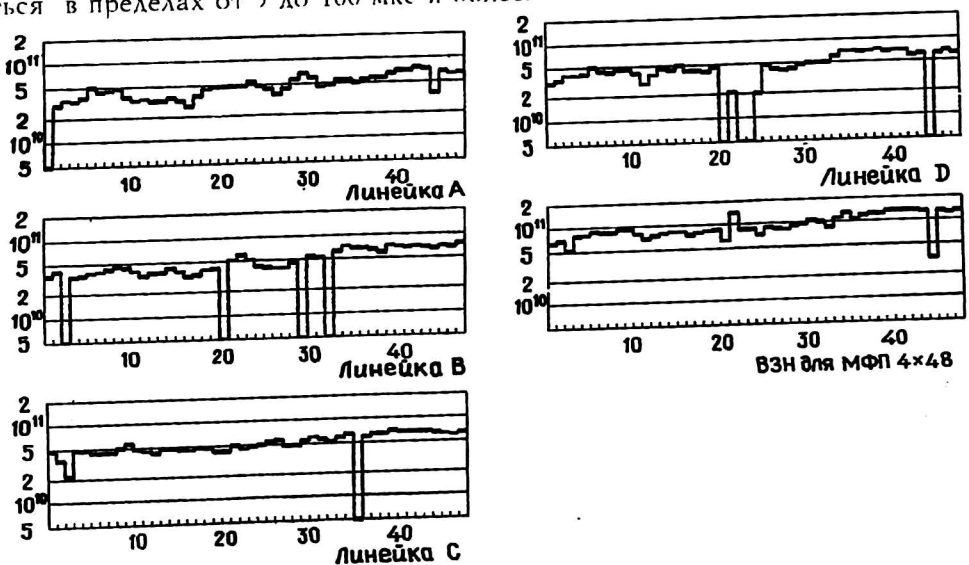


Рис. 6. Распределение удельной обнаружительной способности для МФП 4x48 с граничной длиной волны $\lambda_{\text{гр}} = 10,4$ мкм вдоль линеек поэлементно и при суммировании по четырем ФЧЭ каналов в режиме ВЗН

Матричный ФП формата 2x256 с граничной длиной волны $\lambda_{гр} \sim 13,4$ мкм был смонтирован в криостатированный корпус и охлаждался микрокриогенной системой типа Сплит-Стирлинга до рабочей температуры 67 К. Угол поля зрения в плоскости, перпендикулярной линейкам ФЧЭ, составлял 40 град. При времени накопления 12 мкс среднее значение обнаружительной способности $D^*_{max} \geq 5 \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}, а среднее значение вольтовой чувствительности $\geq 3 \cdot 10^7$ В/Вт. Максимальная тактовая частота мультиплексирования сигналов МФП может достигать 6 МГц. Тепловое изображение, полученное на стенде с использованием МФП 2x256 для целей интегральной оценки, показано на рис. 7.



Рис. 7. Тепловое изображение, полученное на стенде, для интегральной оценки с использованием МФП 2x256

Литература

1. Бовина Л. А., Бурлаков И. Д., Ильин Ю. К., Климанов Е. А., Мансветов Н. Г., Соляков В. Н., Стафеев В. И., Тимофеев А. А. Многорядные матричные фотоприемники на основе теллурида кадмия-ртути на спектральные диапазоны 3–5 и 8–11 мкм. // Оптический журнал, 1996. № 6. С. 62–66.
2. Chatard J. R. Sofradir MCT IRFPA new developments // Pros. SPIE, 1995. V. 2552. P. 767–773.
3. Arthcers C. P. Long linear arrays with time delay integration and element deselection // Ibid. 1997. V. 3061. P. 467–483.

TDI CdHgTe 4x48, 2x96, 4x128 and 2x256 FOCAL PLANE ARRAYS

*L. A. Bovina, V. N. Soljakov, N. G. Mansvetov, I. D. Bourlakov,
S. V. Golovin, V. Y. Ivanov, V. I. Stafeev, Y. K. Iljin, E. A. Klimanov*
The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

A development results of multirows 3–5 μ and 8–12 μ waveband TDI FPA are presented. Formats of FPA are 4x48, 2x96, 4x128, 2x256. Performance of photovoltaic diode arrays based on mercury cadmium telluride (MCT) are introduced. Cooled silicon readout circuits have been made by n-MOS technology. FPA test methods and results in TDI mode are described. For 8–12 μ waveband FPA a detectivity was greater than $(1-2) \cdot 10^{11}$ cm²·W⁻¹·Hz^{1/2} for FPA formats of 4x48 and 4x128 with four elements in TDI and greater than $(7-10) \cdot 10^{10}$ cm²·W⁻¹·Hz^{1/2} for FPA formats of 2x96 or 2x256 with two elements in TDI.