

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 681.7

ВЫБОР ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2023 г. Е. В. Медведев¹, Д. С. Бурый¹, С. А. Гулин¹, В. Г. Страдинь¹, Р. В. Чумарин¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_lab13@mil.ru

Поступила в редакцию 10.10.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Рассмотрены основные типы тепловых детекторов, подробно описан класс неохлаждаемых тепловых детекторов – болометров – как наиболее перспективной основы для тепловизионного канала разрабатываемого прибора многозонального наблюдения. Определен оптимальный по характеристикам образец приемника излучения.

DOI: 10.56304/S2782375X23010072

ВВЕДЕНИЕ

Возможность наблюдать тепловые поля от различных объектов исследовалась еще в XIX веке. В 1800 г. Уильям Гершель доказал существование ИК-излучения, в 1830 г. появились приемники ИК-излучения – термопары. Однако лишь во второй половине XX века ИК-техника смогла сделать существенный шаг вперед. В тот период были разработаны высокочувствительные приемники ИК-излучения, применяя которые можно было обнаруживать малоразмерные объекты, температура которых отличается от фона на десятки и даже сотые доли градуса.

Тепловидение – научно-техническое направление, изучающее физические основы и методы, обеспечивающие возможность наблюдения нагретых объектов главным образом по их собственному тепловому излучению в ИК-области спектра. Невидимое глазом человека ИК-излучение преобразуется в электрический сигнал, который подвергается усилению и обработке, в результате чего получают видимое глазом эквивалентное изображение тепловых полей объекта для его визуального обнаружения и распознавания [1, 2].

Тепловизионные устройства – тепловизоры – позволяют осуществлять наблюдение в условиях плохой видимости, обнаруживать скрытые объекты, вести целеуказание. Они используются в системах технического зрения, для обеспечения безопасности авиа- и судовождения, контроля и охраны любых объектов. МЧС применяет такие устройства при спасательных работах во время ликвидации пожаров, для определения наиболее опасных участков с высокой температурой и т.п. Тепловизионные матрицы находят применение

также в системах дистанционного зондирования Земли (атмосферы).

Тепловизионные приборы можно разделить на два класса – устройства на основе фотонных (охлаждаемых и неохлаждаемых) детекторов и на базе тепловых (неохлаждаемых) детекторов (микроболометров) [3].

Фотонные приемники излучения обеспечивают преобразование падающего потока фотонов в электрический сигнал благодаря непосредственному взаимодействию фотонов с электронной подсистемой материала приемника. Основные материалы для создания фотонных приемников – тройное полупроводниковое соединение кадмий–ртуть–теллур (HgCdTe) для спектральных диапазонов 1.0–2.5, 3.0–5.0 и 8.0–14.0 мкм, двойное полупроводниковое соединение антимонид индия (InSb) для спектрального диапазона 3.0–5.0 мкм, тройное полупроводниковое соединение индий–галлий–арсенид (InGaAs) для спектрального диапазона 0.4–2.3 мкм.

Неохлаждаемый тепловой детектор (болометр) представляет собой резистор, изготовленный из материала с очень малой теплоемкостью и большим температурным коэффициентом сопротивления. В этом случае поглощенное им излучение значительно изменяет его сопротивление. Принцип действия болометра основан на изменении сопротивления, как в фоторезисторе, но основной механизм детектирования другой [3]. В болометре падающее излучение нагревает материал, что, в свою очередь, приводит к изменению сопротивления. Прямого взаимодействия фотонов с электронами материала в данном случае нет. Охлаждаемые фотонные сенсоры имеют темпе-

ратурную чувствительность, равную минимальной эквивалентной шуму разности температур (Noise Equivalent Temperature Difference – NETD) 10–20 мК, что примерно на 2 порядка выше, чем у неохлаждаемых. Но сегмент потребителей приборов на микроболометрах более широк из-за низкой цены.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в создании неохлаждаемых тепловых детекторов ИК-диапазона, которые по пороговым характеристикам приблизились к фотонным детекторам при значительно меньшей стоимости. Излучение регистрируется при накоплении в объеме приемника тепла от воздействия энергии излучения за время кадра. При этом чувствительный элемент максимально теплоизолируется от подложки, что достигается благодаря специальной технологии (технология MEMS), базирующейся на глубоком и сухом травлении кремния с применением “жертвенных” слоев, которые впоследствии удаляются.

Различают пять типов болометров: металлические, термисторные, полупроводниковые, композитные и сверхпроводящие [3, 4].

Для изготовления металлических болометров обычно используют никель, висмут, платину или сурьму, так как эти металлы отличаются долговременной стабильностью параметров.

Термисторные болометры изготавливаются путем синтеза смеси различных полупроводниковых оксидов с более высоким температурным коэффициентом сопротивления, чем у металлов (2–4% на градус Цельсия).

Полупроводниковые болометры чаще всего выпускаются из легированного галлием и одновременно компенсированного индием германия. В таком германии (типичные концентрации галлия $\sim 10^{16}$ см⁻³, а индия $\sim 10^{15}$ см⁻³) поглощенная энергия быстро передается кристаллической решетке, повышая температуру образца. Чувствительность этих приемников близка к теоретическому пределу в интервале длин волн 5–100 мкм.

Композитный или составной болометр состоит из трех частей: поглотителя излучения, подложки, определяющей рабочую площадь прибора, и датчика температуры.

Пятый тип болометров – сверхпроводящие, работающие вблизи точки перехода в сверхпроводящее состояние, где температурные изменения сопротивления чрезвычайно велики. В производстве микроболометров наиболее широко используются такие материалы, как диоксид ванадия и легированный аморфный гидрированный кремний. Ванадий – металл переменной валентности – образует несколько оксидов. Изме-

нения удельного сопротивления и оптических свойств пленок из диоксида ванадия сильно зависят от условий изготовления материала, кристаллической структуры и стехиометрии. Важнейшая его характеристика – высокий отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС) при температурах, близких к комнатным (более 4% на градус Цельсия). Болометры на основе аморфного кремния не отличаются высоким сопротивлением, но этот материал нестабилен при тепловых обработках и действии УФ-облучения.

Основные этапы производства микроболометров представлены на рис. 1 [3].

На поверхности созданных таким путем мембранных конструкций толщиной менее 1 мкм, удерживаемых над подложкой на расстоянии ~ 2 мкм с помощью пары микробалок (поддерживающих консолей), размещается фоточувствительный элемент – тонкопленочная структура.

Такие болометры – основной тип детекторов для создания неохлаждаемых и относительно недорогих микрофотоприемников (МФП). МФП представляет собой микросхему, объединяющую на одном кристалле матрицу из термочувствительных элементов (пикселей) и схему обработки сигналов, преобразующую изменения сопротивления в выходное напряжение и компенсирующую фоновое излучение. Сопротивление преобразуется в пропорциональный ток с помощью схемы с общим затвором на *n*-канальном МОП-транзисторе. Для компенсации неинформативной составляющей используется комплементарный каскад – схема с общим затвором на *p*-канальном МОП-транзисторе. Стоимость МФП на основе болометров при условии промышленного производства на 2 порядка меньше, чем стоимость матриц на основе HgCdTe, InSb, при этом типичные значения температурной чувствительности NETD для болометрических матриц составляют 50–100 мК (для МФП на основе HgCdTe типичные значения ~ 10 мК).

Важнейшее преимущество болометрических ИК-детекторов – возможность работы без охлаждения при температурах ~ 300 К, в то время как большая часть фотонных детекторов функционирует при криогенных температурах (обычно ~ 77 К). Благодаря перечисленным преимуществам болометрические ИК-детекторы в последние годы активно разрабатываются и производятся [3, 4].

В настоящее время для создания тепловых формирователей изображения наиболее широко используются оксид ванадия и легированный кремний, хотя создание приборов на основе этих материалов сопряжено с некоторыми проблемами. Оксид ванадия отличается высокими значениями ТКС (2–3%), на основе этого материала созданы матрицы форматом 2048 × 1536 с размером пикселя 17 мкм. Однако оксид ванадия – не-

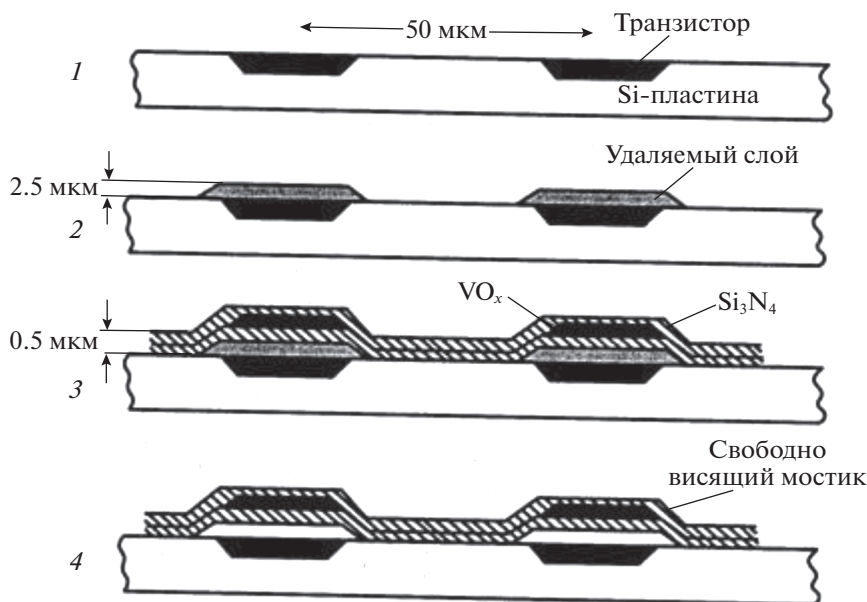


Рис. 1. Основные этапы производства микроболометров.

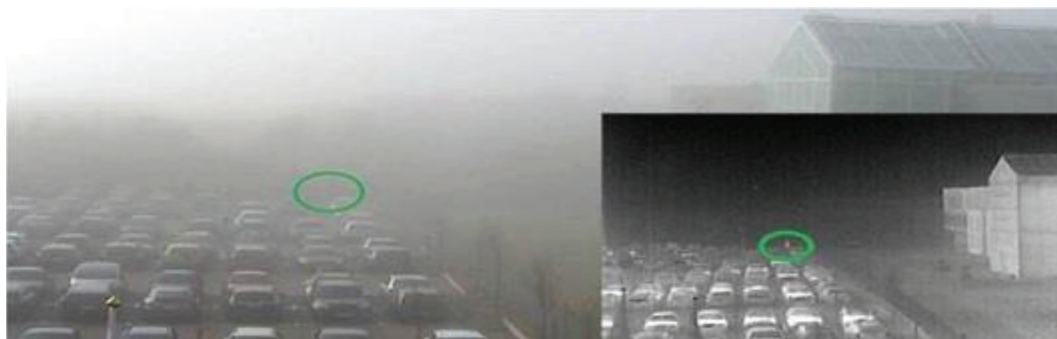


Рис. 2. Изображение с обычной и тепловизионной камеры в условиях тумана.

стандартный материал для КМОП-технологии, получение оксида ванадия в виде тонких пленок является сложным для управления процессом из-за узкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих стабильность и оптимальность характеристик оксида. Кроме того, из-за наличия гистерезиса возникают проблемы при построении тепловых изображений горячих объектов, а теплопроводность таких пленок на порядок больше, чем значения этого параметра для полупроводников (обычно 0.05 Вт/(см·К)). Для болометров на основе аморфного легированного кремния характерно высокое сопротивление, но этот материал нестабилен при тепловых обработках и действии УФ-облучения. Стабильная и метастабильная фазы данного материала разделены потенциальными барьерами, что препятствует формированию равновесного состояния.

Рынок ИК- и тепловизионных систем в основном зависит от военного сектора. Именно со стороны данной отрасли поступают большие заказы на тепловизоры, приборы ночного видения и другие подобные изделия.

Тепловизоры способны эффективно работать в значительно более сложных условиях по сравнению с обычными камерами видеонаблюдения. Матрица устойчива к самым сложным погодным условиям и способна работать в полной темноте (рис. 2). Система на базе тепловизионного оборудования является надежным и эффективным решением для круглосуточного видеонаблюдения.

Ахиллесова пята классических систем видеонаблюдения — это встречная засветка. Наиболее распространенный вид встречной засветки — засветка лучами солнца. В зависимости от местоположения солнечные лучи могут значительно



Рис. 3. Сравнение влияния засветки фарами автомобиля на обычную и тепловизионную камеры.



Рис. 4. Внешний вид тепловизионных модулей: а – XTM 640 PAL, б – mIR-1024M14TS, в – Eye R Core XGA.

ухудшать качество изображения, вплоть до полного ослепления камеры.

Тепловизионные камеры видеонаблюдения полностью лишены этого недостатка (рис. 3).

Наряду с системами видеонаблюдения с каналом ночного (тепловизионного) зрения матрицы на основе микроболометров могут использоваться в качестве приемника сигнала в ИК-диапазоне в целом ряде иного оборудования. В частности, активное внедрение в отрасли промышленности и науки средств и методов дистанционного зондирования Земли (атмосферы) (ДЗЗА) с использованием оптических систем различных классов (диапазонов) открывает широкие перспективы для применения неохлаждаемых тепловых детекторов ИК-диапазона. Характеристики современных матриц на основе микроболометров ИК-диапазона позволяют использовать их в качестве приемников ИК-канала многоспектральных систем ДЗЗА, в частности гидрометеорологического назначения.

Для примера рассмотрим имеющиеся на рынке тепловизионные модули XTM бельгийской компании Xenics, mIR российской компании Инвитех и Eye R Core израильской компании Orgal. Внешний вид матриц приведен на рис. 4. Основные технические характеристики модулей XTM, mIR, Eye R Core приведены в табл. 1.

Сравнительный анализ приведенных данных показывает, что модуль Eye R Core XGA фирмы

Orgal обладает рядом преимуществ по сравнению с другими образцами. Для него характерны:

- высокое разрешение 1024×768 ;
- высокая чувствительность;
- малый размер;
- точный анализ изображений;
- высокоскоростное распознавание целей;
- высокая частота кадров (до 120 кадров/с);
- дополнительная технология без затвора;
- высококачественная обработка изображений в реальном времени;
- широкий диапазон рабочих температур.

Указанное устройство может быть рекомендовано для использования в ИК-канале многоспектральной аппаратуры ДЗЗА широкого спектра применения.

Отечественный модуль mIR несколько уступает продукции фирмы Orgal, однако по своим характеристикам также может рассматриваться в качестве приемника ИК-канала аппаратуры ДЗЗА гидрометеорологического назначения.

Маркетинговые исследования мировых продаж тепловизионной техники свидетельствуют о существенном снижении в последнее время стоимости новых образцов при сохранении и улучшении их потребительских свойств. Вместе с тем цены тепловизоров и матриц для них, особенно высококачественных зарубежных, на российском рынке в 1.5–2.0 раза выше цен, установленных произво-

Таблица 1. Технические характеристики модулей XTM 640 PAL, mIR-1024M14TS, Eye R Core XGA

Параметры	XTM 640 PAL	mIR-1024M14TS	Eye R Core XGA
Тип детектора	Матрица в фокальной плоскости (FPA) – неохлаждаемый микроболометр		
Размер/формат матрицы	640 × 480	1024 × 768	1024 × 768
Диапазон рабочих температур, °С	от –40 до +60	от –40 до +60	от –40 до +70
Энергопотребление	2 Вт	3 Вт	<9 Вт при 120 Гц
NETD	<50 мК (30 Гц, 300 К)	<55 мК (25–30 Гц, 300 К)	<50 мК (120 Гц, 300 К)
Частота кадров, Гц	9–30	30	30/60/120 (цифровой)
Размер пикселя, мкм	17	14	17
Время экспозиции, мс	3–80	5	5
Спектральный диапазон, мкм	8–14 мкм		
Материал сенсора	aSi (аморфный кремний)	VO _x (диоксид ванадия)	aSi (аморфный кремний)
Питание, В	12	5–24	
Интерфейс камеры	PAL	LVDS	CameraLink
Разрядность, бит	16	16	
Вес, г	99	90 без модуля подключения	<300 г

Примечание. Интерфейс управления Eye R Core XGA – последовательная связь RS232, размер, мм – 56 (В) × 59 (Ш) × 62 (Д).

дителями. Данная особенность должна способствовать развитию отечественных технологий разработки и производства тепловизионного оборудования, в том числе для активно развивающегося направления дистанционного зондирования природных сред.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены современные технологии технического зрения, основное внимание уделено неохлаждаемым тепловым микроболометрам как наиболее распространенным детекторам ИК-диапазона. Активное развитие и, соответственно, удешевление данной технологии с сохранением достаточно высокого уровня целевых характеристик при относительно небольших размерах позволяет рассматривать возможность использова-

ния современных ИК-микроболометров в качестве приемников излучения для ИК-канала разрабатываемых многоспектральных систем дистанционного зондирования Земли (атмосферы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schlessinger M.* Infrared Technology Fundamentals. 2nd ed. Optical Science and Engineering Book 46. 2019. 480 p.
2. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. Пер. с англ. под ред. Горячева А.И. М.: Мир, 2018. 416 с.
3. *Ишанин Г.Г., Челибанов В.П.* Приемники оптического излучения. СПб.: Лань, 2021. 304 с. <https://elibrary.pstu.ru/Record/lanRU-BOOK-168713>
4. *Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 10. С. 613.