

Фотоэлектроника

УДК 621.384.326.2:621.397.13

Зарубежные тепловизионные приборы первого, второго и третьего поколений

Часть II*

М. Б. Ушакова

Федеральное государственное унитарное предприятие «НПО «Орион»», Москва, Россия

Проведен анализ разработки и выпуска современных тепловизионных приборов (ТВП) в передовых зарубежных странах. Рассмотрены ТВП первого, второго и третьего поколений для среднего и длинноволнового инфракрасного (ИК) диапазонов с применением фотоприемников и фотоприемных устройств на основе теллурида кадмия-ртути, в том числе типа SPRITE, и работающие в режиме временной задержки с накоплением, антимионида индия; селенида свинца; силицида платины; микроболометров, пироэлектриков и QWIP-структур. Рассмотрены также тенденции дальнейшего развития ТВП нового поколения на основе усовершенствованных ИК фокальных матриц.

ТВП третьего поколения

Матричные "смотрящие" фотоприемные устройства обеспечили возможность создания в 90-х гг. сверхчувствительных ТВП третьего поколения, которые характеризуются следующими признаками:

- используются смотрящие матрицы (называемые часто фокальными матрицами) с числом элементов, близким к телевизионному стандарту;
- число элементов в плотно упакованных матрицах квадратного или прямоугольного формата — 256×256, 320×256, 320×240, 640×480 и более;
- матрицы могут быть охлаждаемыми (как правило, используются охладители типа Стирлинг или Сплит-Стирлинг) и неохлаждаемыми;
- сканирование не применяется.

Особенностями ТВП третьего поколения являются: развитая схемотехника обработки сигнала; высокая разрешающая способность; повышенные дальности обнаружения, распознавания и идентификации цели.

Ниже рассмотрены существующие типы ТВП третьего поколения для различных спектральных диапазонов на основе

смотрящих фокальных матриц из твердого раствора кадмий—ртуть—теллур (КРТ), InSb, PtSi, PbSe, микроболометров, пироэлектриков и QWIP [1–7]. Список использованных сокращений приведен в приложении.

ТВП третьего поколения на основе смотрящих КРТ-матриц для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм

Повышение требований к ИК-системам по улучшению разрешающей способности и дальности привело к разработке в 90-е гг. систем третьего поколения на смотрящих КРТ-матрицах. ТВП на КРТ-матрицах смотрящего типа при использовании больших форматов матриц обеспечивают лучшую чувствительность системы (NETD до 14–20 мК) и дальность (зависит от конкретной аппаратуры), кроме того, масса системы значительно снижена (3,5 кг) за счет устранения систем сканирования.

Лидирующими странами по разработке были США и Франция, аналогичные разработки проводились также в Великобритании, Германии. Примеры действующих ИК-систем на основе КРТ-матриц для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм приведены в табл. 5.

* Часть I опубликована в журнале "Прикладная физика", 2004, № 4. С. 70.

ТВП третьего поколения на основе смотрящих КРТ-матриц для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм [1—7]

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы (рабочая температура)	Спектральный диапазон, мкм	Основные параметры	Применение
Boeing (теперь DRS Technologies), (США)	Portable FLIR. Портативная система переднего обзора	256×256 или 320×240 (95×5 К)	3—5 (3,8—4,8 или 3,2—4,7)	NETD < 20 мК. Масса < 3,6 кг (с оптикой)	ТВП наземного применения
BAE Systems Infrared Ltd (Великобритания)	Osprey. Охлаждаемый интегральный модуль	384×288 (120 К)	3—5	NETD = 14 мК (среднее значение). Масса 600 г	Для использования в ТВП
Zeiss Optronik GmbH (Германия)	АТТИСА-С384	384×288 (80 К)	3—5	Модульный тепловизор. Частота кадров 25/30 Гц. Дальность обнаружения — 2100 м	Прицел командира и стрелка танка, возможны разведка, опознавание и идентификация цели
	АТТИСА-С384 μ	384×288	3—5	Модульный тепловизор. Частота кадров 100 Гц. Дальность обнаружения — 3930 м	
DRS Infrared Technologies (США)	IDCA. Интегральный модуль	640×480	5—5,5 или 10—10,5	$D^* > 1,5 \cdot 10^{10}$ Jones $D^* > 5 \cdot 10^9$ Jones	Для использования в ТВП военного назначения
Lockheed Martin (теперь BAE System) (США)	Thermal Imager	128×128 (80 К)	8—12	MRTD = 0, 02 °С. Частота кадров < 480 Гц	Для использования в системах перехвата наземного базирования, в противотанковых и ракетных системах и ракетах В-В; в частности, для ракетной системы Maverick. Поставлено ~40 тыс. матриц
CEDIP Infrared Systems (Франция)	JADE-LW	320×256	7,5—9,6	NETD=30 мК при 30 °С. Частота кадров до 150 Гц при полном кадре, 250 Гц — в окне 128×128	ТВП для точных термографических измерений

* Нумерация таблиц продолжается (начало см. в вып. 4, 2004 г.).

Подавляющее большинство систем — военного назначения. Одна из ИК-камер французской фирмы CEDIP предназначена для термографических измерений. В действующей аппаратуре используются матрицы форматов 128×128, 256×256, 320×240, 384×288 и 640×480. На фирме Rockwell Scientific уже разработаны КРТ-матрицы формата 1024×1024 для диапазона 8—12 мкм, но сведений о конкретной астрономической аппаратуре с их использованием пока нет.

ТВП третьего поколения на основе смотрящих InSb-матриц для спектрального диапазона 3—5 мкм

Как уже указывалось выше, в 90-е гг. смотрящие InSb-матрицы практически вытеснили линейки из InSb-фотодиодов из разрабатываемой и выпускаемой аппаратуры военного и гражданского назначения. Технология InSb-матриц с применением эпитаксиальной технологии хо-

рошо отработана: из пластин диаметром 3—4 дюйма (75—100 мм) можно получить достаточное количество матриц среднего формата 320×240 или большего формата — 640×480. Наибольшее развитие технология получения InSb-матриц получила в США, Великобритании и Израиле.

Как известно, InSb-фотоприемники (ФП) отличаются высокой квантовой эффективностью (80—90 %). Для работы InSb-ФП требуется охлаждение, причем оптимальная работа обеспечивается при температуре 80 К.

Матрицы малого и среднего форматов (128×128, 256×256, 384/320×256) на основе InSb-фотодиодов, начиная с 90-х гг., являются за рубежом серийной продукцией. За последние годы стандартными также стали InSb-матрицы большего формата — 640×480 и 640×512. Разработаны сверхбольшие матрицы для астрономических применений форматов 1024×768, 1024×1024 и

1280×1024. Фирма США CMC Electronics Cincinnati Inc. изготовила в 1998 г. InSb-матрицу формата 2000×2000 для замены ранее используемой в бортовой авиационной системе контроля за полем боя PtSi-матрицы.

Подавляющее число InSb-камер выпускается в США, при этом в больших количествах эти приборы экспортируются во многие страны мира. Разработками InSb-камер занимаются также фирмы Великобритании и Израиля.

Данные по InSb-камерам приведены в табл. 6.

печивает высокое разрешение. Промышленно-стью выпускаются ИК-камеры на PtSi-матрицах форматов до 512×512 и 640×480 элементов. Чувствительность ИК-систем на основе PtSi-матриц (NETD в лучших камерах достигает 40–50 мК) удовлетворяет большинству применений. Тем не менее, в последние годы наибольшая часть государственного финансирования по программам, связанным с совершенствованием ИК-систем, направляется на развитие фотоприемников и систем на базе КРТ и микроболометров.

Таблица 6

ТВП третьего поколения на основе смотрящих InSb-матриц для спектрального диапазона 3–5 мкм ($T_p = 80$ К) [1–7]

Фирма, (страна)	ТВП	Формат матрицы	Основные параметры	Применение
FLIR Systems Inc. (США)	Sea Star SAFIRE	320×240	Дальность распознавания, км: корабля — 40 танка — 7	ВМС, авиация, решение наземных задач; поиск и спасение, наблюдение. Представляет интерес для военных и правоохранительных органов
FLIR Systems Inc. (США)	ThermoVision Ranger	256×256	Дальность (по машине), км: обнаружения >9, распознавания 3. Масса 9,9 кг	Для полевых операций в условиях боевых действий
BAE Systems / Cincinnati Electronics (CE) (США)	NightMaster	256×256	Дальность (по танку), км: обнаружения — 3,4, распознавания — 2, идентификации — 1. Масса 2,8 кг (с объективом и батареей)	В военных целях в качестве наблюдательного прибора, а также в комбинации с различными системами как оружие
Indigo Systems Corp. (США)	Phoenix-Mid	320×256 или 640×512	NETD <0,15 (640×512). NETD <0,025 (320×256). Дальность по высоте 12160 м (40000 футов). Масса головки камеры 3,2 кг	Обзор на больших дальностях в качестве системы FLIR в ВМС; отображение событий, происходящих с большой скоростью; неразрушающие испытания; обнаружение проникновения дыма; проверка волоконно-оптических компонентов
CEDIP Infrared Systems (Франция)	JADE-MW	320×256	NETD = 20 мК при 30 °С. Частота кадров до 150 Гц при полном кадре, 250 Гц — в окне 128×128	ТВП для точных термографических измерений

ТВП третьего поколения на основе смотрящих PtSi-матриц для спектрального диапазона 3–5 мкм

Охлаждаемые ИК-приемники на основе PtSi ($T_p = 80$ К) на самой ранней стадии разрабатывались на базе технологии интегральных схем и приборов с зарядовой связью и поэтому вышли на рынок в матричном исполнении.

Рассмотрим особенности материала—силицида платины (PtSi). Квантовая эффективность PtSi-фотоприемников менее 1 %, в то время как у фотоприемников на основе кадмий—ртуть—теллур или антимонида индия она составляет 80–90 %. Однако большим преимуществом PtSi-ФП является монокристаллический процесс их изготовления, что позволяет изготавливать матрицы большого формата. Например, фирма Eastman Kodak может изготавливать матрицы размером 1024×1024 элемента и даже 1968×1968, что обес-

Ранее, по соображениям цены, PtSi-камеры можно было заменить на камеры на основе КРТ-ФП и InSb-ФП. Однако Агентство перспективных оборонных исследований (DARPA) вкладывает много средств в исследования и разработки, целью которых является снижение цен на охлаждаемые ИК-системы. Цены на неохлаждаемые системы изначально были сравнительно низкими и продолжают падать с увеличением распространения таких систем и объемов их выпуска. Следует констатировать значительное сужение рынка PtSi-камер, причем этот процесс продолжается и в настоящее время.

В качестве примера можно привести использование PtSi-матрицы формата 1968×1968 фирмы Eastman Kodak Co. (США) в 1996–1998 гг. в американской системе обзора поля битвы. ИК-система прошла летные испытания. NETD системы составила 100 мК. Поскольку для осуществления задач системы требовался приемник с

большей квантовой эффективностью, выбор был сделан в пользу InSb-матрицы формата 2000×2000. Аналогичный процесс идет при выполнении программ модернизации действующей ИК-аппаратуры военного назначения. В ряде случаев применение PtSi-матриц сохраняется как альтернативный вариант, более доступный

по цене. В новые разработки ТВП PtSi-матрицы включаются редко.

Мировой рынок PtSi-камер определяется в основном фирмами США, разработки ведутся в Германии, Японии и Австралии.

В табл. 7 приведены данные по некоторым PtSi-камерам.

Таблица 7

ТВП третьего поколения на основе смотрящих PtSi-матриц для спектрального диапазона 3–5 мкм ($T_p = 80$ К) [1–7]

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы	Основные параметры	Применение
FLIR Systems Inc. (США)	Prism DS	320×244	NETD = 10 мК (при 30 °С). Масса (без объектива) 3 кг	Выявление необходимости ремонта. Контроль промышленных и других процессов, неразрушающие испытания и оценки
FLIR Systems Inc. (США)	MiICAM LE	256×256	NETD <120 мК (при 23 °С). Масса 1,8 кг (включая батарею, объектив и визир)	Разведка на больших расстояниях, обзор и наблюдение передовыми подразделениями, обнаружение и захват цели, обзор границы, поиск и спасение, обеспечение надежности территорий отслеживанием по периметру
Lockheed Martin (теперь BAE Systems) (США)	Mini-FLIR	512×488	Средний радиус действия. Масса <6,5 кг	Разведывательные беспилотные летательные аппараты (БПЛА)
Imaging Sensors & Systems, (ISS) Inc. (США)	M640P	640×486	Прибор работает на больших дальностях. Масса 15 кг	Модель M640P может использоваться в качестве наземной и морской системы наблюдения. Рекомендуемые области применения: наблюдение с движущихся транспортных средств; обзор пограничных территорий; обеспечение безопасности аэропортов, промышленных и правительственных объектов; морской патруль; применение в правоохранительных органах
AEG Infrarot-Module GmbH (AIM) (Германия)	μCAM	256×256	NETD <0,1 (при 27 °С). Масса 1,7 кг (включая все электронные модули)	Отслеживание мест утечки тепла в зданиях; наблюдение за линиями электропередачи, за движением транспорта и промышленными выбросами
Zeiss Optronik GmbH (Германия)	ATTICA-P236	256×256	Частота кадров 25 Гц. Дальность обнаружения 1,84 км. Масса – 2,5 кг	Прицел командира и стрелка танка. Возможны другие применения: системы разведки, опознавания и идентификации цели
Mitsubishi Electric (Япония)	IR-M700	512×801	NETD <80 мК (при 27 °С). Масса >5 кг	Разведка, наблюдение, контроль промышленных процессов
Nicon (Япония)	LAIRD 3A (модификации AS и ZASH)	811×508	NETD = 150 мК (стандартный вариант) или 90 мК (для увеличенного отношения сигнал/шум). Масса 9,2 кг	Программное обеспечение камеры позволяет осуществлять различные термографические измерения с высокой точностью
BAE Systems Australia (Австралия)	LRTS	486×640	Используются два поля зрения. Частота кадров 25/30 Гц. Масса 17 кг	Система навигации, наблюдения морского назначения. Применяется в Австралии. Может широко использоваться на суше, в море и воздухе в военных и коммерческих целях

ТВП третьего поколения на основе смотрящих микроболометрических матриц для спектрального диапазона 8–12 мкм

Неохлаждаемые ИК-системы с применением микроболометрических (МБ) фокальных матриц большого формата были разработаны в 90-е гг. и к настоящему времени достигли стадии промышленного производства. Основное их преимущество: отсутствие охлаждения — делает их экономичными по потребляемой мощности, более легкими и более дешевыми, чем охлаждаемые тепловизоры. МБ-системы способны выйти на рабочий режим за несколько секунд. Другое важное преимущество микроболометрических систем, например на пироэлектрических приемниках излучения, заключается в возможности работы без механических модуляторов. МБ-системы являются бесшумными — в условиях скрытого наблюдения они не обнаруживают себя. Кроме того, чувствительность МБ-приемников в широком спектральном диапазоне (8–12 мкм), МБ потенциально пригодны для изготовления перспективных многоспектральных систем.

Наибольшее распространение в настоящее время получили микроболометрические матрицы, в которых термочувствительный элемент изготовлен из оксида ванадия VO_x или аморфного кремния (в последнем случае технология ближе к обычной кремниевой КМОП-технологии).

Микроболометрические матрицы изготавливаются непосредственно на кремниевых считывающих интегральных чипах и помещаются в откачанные корпуса с термоэлектрическим стабилизатором температуры. В последнее время в ряде случаев вместо термоэлектрической стабилизации используются электронные схемы для коррекции ухода параметров с изменением температуры. Записав предварительно в память корректора температурные коэффициенты чувствительности элементов, удается уменьшить размеры, массу и потребляемую мощность фотоприемной матрицы, а также обеспечить мгновенный выход ее на режим и большой динамический диапазон при считывании. Впервые такая электронная схема была разработана фирмой Boeing Co. (США).

Помимо наиболее распространенных матриц формата 320×240, в настоящее время изготавливаются также более дешевые матрицы формата

160×120. Выпускаются также крупноформатные матрицы 640×480 с шагом 25–28 мкм, разрабатываются сверхбольшие матрицы формата 1024×1024 (Raytheon и DRS, США).

МБ-системы пока уступают по чувствительности КРТ- и QWIP-системам, но с первой половины 2000 г. в США по инициативе DARPA начала действовать программа по совершенствованию неохлаждаемых МБ-тепловизоров. Программа общей стоимостью в 15 млн. дол рассчитана на три года. Цель программы — разработка МБ-систем чрезвычайно компактных, с малой массой (уже в настоящее время имеются МБ-сенсоры массой 200 г), с низкой потребляемой мощностью и недорогих. Системы предназначены для разведки, прицеливания и предупреждения об угрозе нападения. Эти системы смогут найти также применение на малых платформах, включая роботы и микро-БПЛА (беспилотные летательные аппараты). Исследования будут сфокусированы на следующих проблемах: структура пикселей, механизмы потери чувствительности, электрические и оптические источники шумов, проблемы стыковки приемника со считывающей электроникой и упаковка матриц в корпуса. Задачей является достижение NETD менее 10 мК при шаге матрицы 25 мкм и меньше. Форматы МБ-матриц с высокими характеристиками будут достигать 960×1280 элементов, в то время как в микросенсорах смогут использоваться матрицы обычного формата — 320×240 элементов. По программе MicroSTAR фирма BAE Systems, ранее Sanders/Lockheed Martin (США), планирует довести массу ИК-приемника на МБ-матрицах с улучшенными параметрами до 25 г за счет интеграции и уменьшения размеров электрических и механических компонентов сенсора.

Анализ материалов выставок “Aerosense” позволяет судить о нарастающем успехе разработки и выпуска микроболометрических матриц — в последние годы подавляющее большинство показанных образцов тепловизоров было на основе микроболометров. В разработку подобной аппаратуры включился и Китай — две фирмы показали свои ИК-камеры на микроболометрах.

Объемы выпуска МБ-матриц также довольно высоки. Например, фирма Raytheon (США) производит более 1000 матриц в год (формат 320×240).

Сведения по МБ-камерам приведены в табл. 8.

Таблица 8

ТВП третьего поколения на основе неохлаждаемых смотрящих МБ-матриц для спектрального диапазона 8–12 мкм [1–7]

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы	Основные параметры	Применение
Raytheon Systems Company (США)	Sentinel	320×240	NETD < 100 мК при 25 °С. Масса 1,9 кг (включая батарею)	ТВП широкого применения

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы	Основные параметры	Применение
Lockheed Martin (теперь BAE Systems) (США)	LTC500	320×240	NETD < 100 мК. Масса 2,2 кг	Камера разрабатывалась по требованиям военных, но нашла широкое применение и в гражданских целях. В качестве визира водителя, прибора для наблюдения и разведки, в системах обеспечения безопасности и контроля, в карательных подразделениях для дистанционного наблюдения, а также в медицине для выявления различного рода отклонений в организме человека
FLIR Systems Inc. (США)	Thermovision 570	320×240	NETD < 0,1. Масса 2,3 кг (с батареей)	Контроль состояния различного рода оборудования, инспекция линий электропередач. В связи с отсутствием внешних батарей и кабелей питания целесообразно применение камеры на опасном производстве, например, в нефтехимии
Boeing Company (теперь DRS Technologies) (США)	UMFLIR (Uncooled Man-portable FLIR)	320×240 (VO _x)	NETD < 100 мК. Масса < 3,5 кг	Легкий тепловизор широкого применения
Thomson-CSF Optronique (теперь Thales Optronique) (Канада)	PowerVision DVE (Driver Vision Enhancer)	320×240	MRTD = 0,15 °С при пространственной частоте 0,16 циклов/мрад. Масса < 5 кг	В перископах AN/WS-501 и Viper, на танках Badly и БМП LAV, может использоваться на любых средствах передвижения.
Pilkington Optonics Ltd (теперь Thales Optonics) (Великобритания)	MINI STAG (U) (Surveillance Targeting Acquisition and Gunnery Sights Uncooled). Неохлаждаемый ТВП	320×240	Преимущества по дальности (по сравнению с ТВП первого поколения). Меньшая масса по сравнению с массой охлаждаемых ТВП (в -4 раза). Масса 10,5 кг	Прицел стрелка на неохлаждаемом ТВП третьего поколения

ТВП третьего поколения на основе смотрящих пироэлектрических матриц для спектрального диапазона 8–12 мкм

Конкурентами МБ-камер могут считаться в первую очередь камеры на основе пироэлектрических (ферроэлектрических) приемников излучения (ППИ), хотя для их работы требуются механические модуляторы. ППИ также не требуют охлаждения и работоспособны в таком же широком, что и МБ, спектральном диапазоне. ППИ изготавливаются на основе титаната бария-стронция (Raytheon Commercial Infrared, США) и танталата скандия-свинца (BAE Systems Infrared Ltd, Великобритания).

Накоплен многолетний и успешный опыт по разработке пироэлектрических приемников, в том числе матричного типа. ППИ-технология ранее характеризовалась большими инвестициями, исследования стимулировались целым рядом правительственных программ, например, LOCUSP (Low Cost Uncooled Sensor Prototype), HIDAD (High Density Array Development). Легкие ИК-прицелы для винтовок на матричных

ППИ небольшого формата (100×100) были разработаны в 80-е гг., т. е. значительно раньше МБ-систем (90-е гг.). Действующие ППИ-камеры по чувствительности несколько уступают МБ-камерам — NETD порядка 100–150 мК. В камерах используется чаще всего типовой формат матриц 320×240 элементов, но выпускается ночной бинокль LION (фирма Delft Sensor Systems, Нидерланды) на ППИ-матрице, в котором используется микросканирование и обеспечивается практическое разрешение 512×256 пикселей при формате матрицы 256×128.

Следует отметить, что фирма Raytheon будет поставлять ППИ-системы для оснащения автомобиля "Cadillac" фирмы General Motors в целях улучшения условий вождения днем (в туман, дождь, снегопад) и ночью. При положительных результатах проекта фирмы General Motors ее примеру могут последовать и другие автомобильные фирмы. Это создаст большой коммерческий рынок неохлаждаемых ИК-систем, в том числе и микроболометрических (уже имеются сведения об установке аналогичной ИК-камеры на автомобиле "Jeep").

Объемы выпуска ППИ-матриц довольно высоки: например, известный модуль Wizard с ППИ-матрицей формата 256×128 фирмы BAЕ Systems IR Ltd. (Великобритания) выпускается в объеме более 1000 матриц в год.

Данные по ТВП на основе ППИ-матриц камер приведены в табл. 9.

ТВП третьего поколения QWIP-структур для спектральных диапазонов 8—9 (8—10) и 3—5 мкм

В 90-е гг. на рынке ИК-систем появились ИК-камеры на QWIP-матрицах с многослойной структурой чередующихся тонких слоев GaAs-GaAlAs для спектрального диапазона 8—9 (8—10) мкм (другие полупроводниковые QWIP-структуры пока не достигли промышленного выпуска). В последние годы в эксплуатации появились также QWIP-камеры для спектрального диапазона 3—5 мкм. QWIP-камеры представляют собой тепловизионную аппаратуру третьего поколения — на смотрящих матрицах без сканирования. Матрицы отличаются высокой технологичностью, воспроизводимостью, однородностью параметров по элементам.

Технология изготовления QWIP-матриц для камер основана на хорошо отработанной GaAs-технологии. На больших пластинах диаметром 3—4 дюйма, которые имеются в свободной продаже, можно изготовить много матриц разного формата с использованием различных эпитаксиальных методов. Форматы используемых матриц: 256×256, 320×240, 320×256, 640×512 и др.

Чувствительность QWIP-камер по NETD находится на высоком уровне: у лучших — 10 мК и даже ниже, у типовых ~20 мК, у средних ~35 мК. NETD зависит от рабочей температуры QWIP-матрицы: лучшие показатели обеспечиваются при рабочей температурах 60—65 К, средние — при 70—75 К. В настоящее время разработкой и производством QWIP-матриц и выпуском ИК-камер на их основе занято несколько фирм в США, Германии, Великобритании и Швеции. Следует отметить, что некоторое количество ИК-систем на основе QWIP-матриц состоит на

вооружении в США, Швеции, Финляндии и других странах.

Отрасль QWIP-камер является весьма перспективной. Предпосылками к этому могут служить, помимо малых значений NETD, возможность изготовления многодиапазонных систем путем управления спектральной чувствительностью QWIP-матриц в широких пределах, достижение больших форматов при сохранении однородности параметров, снижение цен в будущем до нескольких тысяч долларов за камеру при увеличении объемов выпуска. QWIP-матрицы отличаются еще одним важным свойством — возможностью в будущем перейти от гибридных структур фокальных матриц к монокристаллическим. При этом схемы обработки и считывания сигнала должны быть изготовлены на той же GaAs-подложке, на которой выращивается многослойная структура с квантовыми ямами.

Известными недостатками QWIP-матриц являются относительно низкий квантовый выход (обычно 5—10 % для QWIP по сравнению с 80—90 % для КРТ- и InSb-ФП) и необходимость работы при охлаждении ниже температуры жидкого азота для получения лучших параметров (60 К — для QWIP, 80 К — для InSb и КРТ, 220—250 К — для PbSe с термоэлектрическим охлаждением).

Ведутся интенсивные работы по повышению рабочей температуры QWIP-матриц за счет оптимизации фоточувствительных структур и мультиплексоров. Например, QWIP-матрицы в тепловизорах фирмы Indigo Systems (США) охлаждаются до рабочей температуры 71 К.

Основное применение QWIP-приборов в тепловизионных системах военного назначения: противотанковые и зенитные ракетные комплексы; системы наблюдения, разведки, прицеливания, однако они рекомендуются для использования и в коммерческом секторе. При расширении применения и повышении объемов выпуска их цена может стать вполне приемлемой для коммерческих покупателей — несколько тысяч долларов.

Данные по QWIP-ТВП приведены в табл. 10. Следует обратить внимание на появление в выпускаемой аппаратуре QWIP-матриц, работающих в диапазоне 3—5 мкм.

Таблица 9

ТВП третьего поколения на основе неохлаждаемых смотрящих ППИ-матриц для спектрального диапазона 8—12 мкм [1—7]

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы (материал матрицы)	Основные параметры	Применение
Raytheon Systems Company (США)	Night 200 series	320×240 BST (титанат бария-стронция)	Дальность обнаружения (по человеку) 731,5 м. Масса 3,4 кг	Системы наблюдения для военного, коммерческого и промышленного применения

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы (материал матрицы)	Основные параметры	Применение
Raytheon Systems Company (США)	Night™ S1000 series	328×245 BST (титанат бария-стронция)	Дальность обнаружения >2 км. Неохлаждаемые ТВП имеют преимущество по цене	Для наблюдения за военными объектами, пограничными зонами, тюремными территориями и в других ситуациях повышенной значимости
	PWS (Portable Weapon Sight) W1000 series	328×245 BST (титанат бария-стронция)	То же	Портативный оружейный прицел
	AN/VSS-5	328×245 BST (титанат бария-стронция)	Масса датчика, кг: <6,4 (для бронемашин), <1,4 (для колесных машин)	Тепловизор водителя DVE (Driver Vision Enhancer) для колесных транспортных машин; для увеличения их маневренности в любых погодных условиях днем и ночью и на поле боя. Модификация CV-DVE (Combat Vehicle DVE) предусмотрена для боевых бронетанковых машин
FLIR Systems Inc. (США)	SeekIR	200×200	NETD <200 мК. Масса (с объективом и батареей) 1,9 кг	Наблюдательная камера для правоохранительных органов
BAE Systems (Великобритания)	STAIRS A (Sensor Technology for Affordable IR Systems)	256×128 PST (танталат свинцаскандия)	Время выхода на режим менее 1 с после включения. Масса 1,5 кг	Базовый легкий тепловизионный прицел для солдат пехоты
Delft Sensor Systems (Нидерланды)	LION (Lightweight Infrared Observation Night Sight Binocular Viewer)	256×128 PST (танталат свинцаскандия) (используется микросканирование, обеспечивающее разрешение 512×256)	NETD <150 мК. Дальность (по средствам передвижения): обнаружения — 2 км, распознавания — 700 м, идентификации — 350 м. Работоспособен через несколько секунд после включения. Бесшумен с расстояния от 2 м. Масса < 2 кг (с батареей)	ТВП широкого применения, в частности наблюдательный прибор для солдат пехоты

Таблица 10

ТВП третьего поколения на основе смотрящих QWIP-матриц для спектральных диапазонов 8–9 (8–10) и 3–5 мкм [1–7]

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы (спектральный диапазон)	Основные параметры	Применение
Indigo Systems (США)	Phoenix™	640×512 или 320×256 (8–9 мкм)	NETD = 30 мК. Частота кадров, Гц: 100 (640×512), 340 (320×256)	Камера широкого применения
Digital Imaging Infrared (США)	DI-9800	320×240 (8–9 мкм)	NETD < 50 мК. Преимущества по чувствительности по сравнению с первым и вторым поколениями ТВП	Портативная камера широкого применения
FLIR Systems (США)	BIRC (BILL Infra-Red Camera)	320×240 (8–9 мкм)	Два поля зрения: Частота кадров 50 Гц	Портативный ИК-прицел
FLIR Systems (США)	FTI	320×240 (8–9 мкм)	NETD < 50 мК	Портативный ТВП

Окончание табл. 10

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы (спектральный диапазон)	Основные параметры	Применение
FLIR Systems (США)	Triple QWIP Imaging Module	320×240 (конструкция совместима с форматом 640×480) (8–9 мкм)	Температурная чувствительность 30 мК	ТВП для применения на земле и в воздухе
BAE Systems Avionics Sensors and Communications Systems (Великобритания)	V4500	256×256 (1997 г.) "смотрящая матрица" (2003 г.) (3–5 или 8–10 мкм)	NETD < 20 мК. Два поля зрения	ТВП для ВМС (состоит на вооружении)
Thales Optronics (ранее Avimo Ltd) (Великобритания)	TDNGS	"Смотрящая матрица" (3–5 мкм)	Два поля зрения	Прицел стрелка или командира (первый контракт на выпуск прицелов)
AIM (AEG Infrarot Module) (Германия)	Thermography System	640×512 (640 Q) (8–9 мкм)	NETD < 18 мК. Преимущества по чувствительности по сравнению с ТВП первого и второго поколений	Термографическая система
Zeiss Optronik GmbH (Германия)	ATTICA-G690	640×480 (8–9 мкм)	Частота кадра 25/30 Гц. Дальность обнаружения 3,2 км	Прицел командира/стрелка танка. Возможны другие применения. Системы разведки, опознавания и идентификации цели
Saab Bofors Dynamics (ранее Celsins Tech Electronics) (Швеция)	BIRC	320×240 (в будущем 640×480) (8–9 мкм)	Дальность, км: обнаружения — 10 распознавания — 4 идентификации — 2	Для противотанкового ракетного комплекса и других применений ночью и в условиях плохой видимости (состоит на вооружении)
FLIR Systems AB (Швеция)	LIRC	320×240 (в будущем 640×480) (8–9 мкм)	Дальность, км: обнаружения — 4 распознавания — 3,8 идентификации — 2	Компактный ТВП военного применения
FLIR Systems AB (Швеция)	MilCAM Recon-QWIP	320×240 (8–9 мкм)	Дальность, км: обнаружения — 6 распознавания — 3	ТВП военного применения

Выводы

1. Разработка за рубежом в 70-е гг. XX столетия тепловизоров первого поколения на основе "общих модулей" и SPRITE-приемников позволила решить задачу оснащения военной техники стандартными приборами и наладить выпуск серийной тепловизионной аппаратуры для ночного видения, систем прицеливания, навигации, предупреждения об угрозе нападения.

2. В 80-е гг. началась разработка тепловизионных систем второго поколения на основе длинных многорядных линеек с временной задержкой и накоплением, применение которых позволило значительно увеличить разрешающую способность и дальность систем военного назначения. В 90-е гг. начался серийный выпуск ТВП такого типа. Внедрение таких систем в действующую военную аппаратуру в рамках модернизации и разработки новых ТВП на их основе продолжается до настоящего времени; растет число стран, участвующих в этой работе.

3. В 90-е гг. началась разработка тепловизионных систем третьего поколения на основе смотрящих (двухмерных) матриц. Главными задачами при разработке этих систем были следующие: устранение сканирования (т.е. уменьшение массы ТВП и повышение ее надежности), повышение разрешающей способности ТВП за счет роста формата матриц — вплоть до 1000×1000 и более. Особый интерес вызвало появление неохлаждаемых микроболлометрических систем третьего поколения, которые позволили сразу понизить цены на ТВП при сохранении приемлемых параметров, работа над повышением которых (разрешающей способности, чувствительности и дальности) продолжается весьма интенсивно и с заметными положительными результатами.

4. В XXI веке работа в области тепловидения будет вестись в направлении совершенствования уже разработанных приборов; особое внимание будет уделяться ТВП на основе охлаждаемых фокальных матриц на основе KPT, InSb и

QWIP, а также ТВП на основе неохлаждаемых микроболометрических матриц.

5. В XXI веке следует ожидать появления новых разработок в области тепловидения на базе многоспектральных и гиперспектральных систем; большое внимание будет уделяться эффекту смещения сигналов в ИК-системе от сенсоров различного типа (оптических, акустических, радарных и др.). Безусловно, можно ожидать появления принципиально новых разработок на основе матриц уровня современных СБИС, использования в ТВП новых материалов и новых спектральных диапазонов.

Приложение

Список использованных сокращений

- БПЛА — беспилотные летательные аппараты
- КМОП — комплементарные МОП-структуры
- МБ — микроболометры
- ППИ — пироэлектрические приемники излучения
- СБИС — сверхбольшие интегральные схемы

* * *

- BAE — British Aerospace Electronics (наименование фирмы)
- BST — Barium-Strontium Titanate (титанат бария-стронция)

- DARPA — Defense Advanced Research Projects Agency (Агенство перспективных оборонных исследований)
- FLIR — Forward Looking InfraRed (ИК-системы переднего обзора)
- MRTD — Minimum Resolvable Temperature Difference (минимальная разрешаемая разность температур)
- NETD — Noise Equivalent Temperature Difference (эквивалентная шуму разность температур)
- PST — Plumbum-Scandium Tantalate (танаталат свинца-скандия)
- QWIP — Quantum Well Infrared Photodetector (фотоприемник с квантовыми ямами)
- STAIRS — Sensor Technology for Affordable InfraRed Systems (программа по разработке технологии сенсоров для доступных инфракрасных систем)
- SPRITE — Signal PRocessing in The Element (прибор с обработкой сигнала в элементе)

Литература

1. Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Ушакова М. Б.// Прикладная физика. 2003. Ч. I. № 1. С. 105—120; Ч. II. № 2. С. 54—69.
2. Рекламные проспекты зарубежных фирм, 1997—2004 (фонд ОНТИ).
3. Aeresense Exhibit Guide, 25—27 April 2000, Orlando, USA.
4. Ibid. 17—19 April 2001, Orlando, USA.
5. Ibid. 2—4 April 2002, Orlando, USA.
6. Ibid. 22—24 April 2003, Orlando, USA.
7. Белозеров А. Ф., Иванов В. М.// Оптический журнал/ 2003. Т. 70. № 10. С. 47—70.

Development of foreign thermal imaging devices of three generations

Part II

M. B. Ushakova

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Development and production of the state-of-the-art thermal imaging devices (TID) in leading foreign countries are analyzed. TID of the first, second and third generation for mid wave and long wave infrared ranges are discussed: based on focal plane arrays (FPA) of cadmium-mercury-telluride (CMT) including SPRITE photodetectors and FPA operating in the time delay and integration (TDI) mode; based on indium antimonide, lead selenide, platinum silicide; based on microbolometric and pyroelectric (ferroelectric) FPA and based on quantum well infrared photodetectors (QWIP). Trends concerning the perspective development of new generation thermal imaging devices are also discussed.