Фотоэлектроника

УДК 621.384.326.2:621.397.13

Зарубежные тепловизионные приборы первого, второго и третьего поколений

Часть I

М. Б. Ушакова
Федеральное государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"», Москва, Россия

Дан 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, антимонида индия, селенида свинца, силицида платины, микроболометров, пироэлектриков и QWIP-структур. Приведены тенденции дальнейшего развития ТВП нового поколения на основе усовершенствованных инфракрасных фокальных матриц.

За последние 30 лет за рубежом наблюдалось быстрое развитие техники тепловидения, которое в основном стимулировалось военными заказами. Этот фактор действует по настоящее время, хотя за счет двойного применения постоянно расширяется рынок тепловизионных приборов как военного, так и коммерческого назначения.

Подавляющее большинство зарубежных ТВП работает в ИК-диапазоне 8—12 мкм (длинноволновый ИК-диапазон). Вторым по значению для тепловидения является ИК-диапазон 3—5 мкм (средневолновый ИК-диапазон), ряд систем предназначены для работы одновременно в двух спектральных диапазонах (3—5 и 8—12 мкм). Последнее направление является перспективным при модернизации и совершенствовании тепловизионной аппаратуры, так как позволяет значительно повысить селективность системы при отслеживании цели на фоне различных помех. Следует напомнить, что вышеуказанные спектральные диапазоны отличаются низким уровнем поглощения излучения в слоях атмосферы, т. е. являются так называемыми "окнами" прозрачности" [1—7].

В данной работе будут рассмотрены зарубежные тепловизионные приборы трех поколений на основе различных фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ), которые по существу являются основным элементным блоком любого ТВП.

Приведены сведения по ТВП, разрабатываемым и выпускаемым в передовых зарубежных странах с мощным военным потенциалом, — США, Великобритании, Франции, Германии, а также в Канаде, Италии, Нидерландах, Швеции, Словении, Турции, Израиле, Японии, Пакистане, Австралии, Южной Африке.

Список использованных сокращений приведен в приложении.

Тепловизионные приборы первого поколения

К тепловизионным приборам первого поколения относятся такие приборы, в которых используются линейки охлаждаемых приемников или фотоприемник типа SPRITE (Signal Processing in The Element) — прибор с обработкой сигнала в элементе; охлаждение до рабочей температуры 80 К; сканирование в двух направлениях и внешние электронные схемы предварительной обработки сигнала.

ТВП первого поколения на основе общих КРТ-модулей и SPRITE-приемников для спектрального диапазона 8—12 мкм

Системы первого поколения получили чрезвычайно широкое распространение с 70-х годов XX века как в США, так и во многих странах мира. При их разработке преимущество было отдано фоторезисторам на основе полупроводникового соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ) для области спектра 8—12 мкм [1—7].

В 70-е годы в странах НАТО были внедрены стандартные общие фотоприемные модули для

© Ушакова М. Б., 2004

тепловизионных систем первого поколения, которые разрабатывались параллельно в США и в Европе:

- CM (Common Module) — в США, затем были внедрены в Германии;
- SMT (Systeme Modulaire Thermique) — во Франции;
- TICM (Thermal Imaging Common Module) — в Великобритании.

В составе тепловизионной аппаратуры первого поколения предусматривался модульный блок детектор/дьюар с отдельным блоком неохлаждаемых предусилителей. В США и ФРГ число элементов в линейках КРТ-фоторезисторов (ФР) было стандартным — 60, 120, 180, во Франции — обычно 55 элементов в линейке, в Англии — от 24 до 88 элементов в линейках (TICM I, Class I). Для ТВП первого поколения были разработаны в Англии также и приборы с внутренним накоплением сигнала в элементе типа SPRITE (TICM II, Class II).

Общие модули до настоящего времени используются в действующей аппаратуре военного и гражданского назначений. Приборы с числом элементов 60 применяются в основном в системах наблюдения, 120-элементные — в прицелах танков и боевых машин, 180-элементные — в прицелах самолетов и вертолетов. По программам модернизации тепловизионных систем происходит замена общих КРТ-модулей на КРТ-матрицы для приборов с временной задержкой с накоплением (ВЗН) и смотрящие матрицы, т. е. ТВП первого поколения преобразуются в ТВП второго и третьего поколений.

В свое время Министерство обороны США закупило более 50 тыс. тепловизоров первого поколения на общих модулях. С 1974 г. фирма Texas Instruments поставила 35 тыс. комплектов приемник/дьюар для военной техники США и других стран. Фирма Santa Barbara Research Center с 1979 г. поставила более 25 тыс. общих модулей и более 18 тыс. комплектов детектор/дьюар. За 1976—1985 гг. цена общих модулей упала с 60 тыс. дол. до 5 тыс. Армия США сэкономила более 900 млн дол. за счет приобретения 80 тыс. общих модулей для 16 видов вооружений вместо нестандартных фотоприемников.

Особо следует отметить применение в ИК-аппаратуре длинных линеек из КРТ (400, 512 и 1024 элемента) для спектрального диапазона 8—12 мкм. ТВП с их применением, которые по существу не являются приборами первого поколения, разрабатываются в ограниченных количествах для применения в теплопеленгационной аппаратуре предупреждения о ракетном нападении на суше, земле и на море, а также в астрофизических исследованиях. В качестве примера действующей системы можно привести IRSCAN (Нидерланды) на основе 1024-элементной линейки из КРТ-ФП. Дальность обнаружения самолетов и сверхзвуковых ракет — 15—20 км, дозвуковых ракет — 12 км. Применяется в Нидерландах, Швеции и других странах. Работа системы изучается в различных климатических условиях, включая Южную Африку, Карибские острова, Средний Восток, Арктику и Юго-Восточную Азию.

SPRITE-фотоприемники были изобретены в 1982 г. и нашли широкое применение в тепловизионных системах. Эти приборы приняты в Великобритании в качестве "общих модулей" 2-го класса (TICM II, Class II) для тепловизионных систем первого поколения. В Великобритании ТВП на основе SPRITE-приемников называют системами поколения 1^+ (1 plus), подчеркивая их превосходство над приемниками линейного типа. SPRITE-приемники и сейчас широко используются в действующих системах военного назначения. Разрабатываются новые ИК-системы на основе SPRITE-приемников.

Разработчиком SPRITE-приемников была фирма Mullard, Великобритания (последующие переименования Philips Components, GEC-Marconi Infrared Limited — GMIRL, а в настоящее время — BAE Systems Infrared Ltd.). Фирме Mullard (GMIRL) в свое время принадлежали все лицензии по производству SPRITE-ФП. Классические общие модули TICM II — это 8-элементные SPRITE-приемники для спектрального диапазона 8—12 мкм (T_p = 80 K) с охладителями Джоуля-Томсона, а в последнее время — с охладителями Стирлинга, применение которых приводит к уменьшению габаритных размеров приборов, снижению массы и расхода мощности. SPRITE-приемники для диапазона 3—5 мкм с термоэлектрическими охладителями получили гораздо меньшее распространение.

Об успешном применении SPRITE-ФП свидетельствует большое число (более 5 тыс.) таких приборов, поставленных в 90-е годы для применения в системах фирмой GMIRL. Фирмой Thorn Emi Electronics Ltd. (Великобритания) было продано более 2 тыс. тепловизионных приборов на SPRITE-приемниках в 20 различных стран мира.

В табл. 1 и 2 приведены примеры действующих ИК-систем первого поколения на основе общих модулей из КРТ и КРТ-ФП типа SPRITE.

Таблица 1

ТВП первого поколения на основе общих КРТ-модулей для спектрального диапазона 8—12 мкм (T_p = 80 К)

Фирма (страна)	ТВП	Формат линейки, число элементов	Основные параметры	Применение
Hughes Aircraft Co., Electro-optical Systems (теперь Raytheon) (США)	HIRE (Hughes Infrared Equipment)	60	В HIRE улучшенные общие модули США. Два поля зрения (узкое и широкое)	Прицел HIRE первого поколения — легкий оружейный модульный перископический прицел и тепловизионная система для легких бронированных средств передвижения. В добавление к функциям автономного тепловизионного прибора HIRE используются совместно с системой управления огня (СУО) ракеты TOW и СУО SPRITE. Возможности системы продемонстрированы на боевых машинах США в Великобритании
Texas Instruments, Defense Systems & Electronics (теперь Raytheon) совместно с Kollsman (США)	AN/TAS-6 NODLR (Night Observation Device Long Range)	60, 120, 180	В ТВП общие модули США. Два поля зрения (узкое и широкое). Масса 11 кг	AN/TAS NODLR применяется на поле битвы на пунктах ночного наблюдения при использовании камуфляжа и сквозь листву
Zeiss-Eltro Optronic GmbH (ZEO) (Германия)	RZ601	60	В RZ601 общие модули США. Два поля зрения. Дисплей встроен в очки стрелка. Масса 12 кг	Разработана как основная часть модульной лазерной системы контроля огня, интегрирована в прицел стрелка, может быть использована на многих боевых машинах
EL-OP (Израиль)	COTIM (Compact Thermal Imaging Module)	100	В COTIM КРТ-линейки. Два поля зрения. Масса 2,9 кг	Компактный тепловизор разработан для установки в миниатюрных беспилотных летающих аппаратах ближнего действия, в легких вертолетах и небольших судах ВМС
Officine Galileo SpA (Италия)	VTG120	60	Дальность (по танку), км: обнаружения — 3 идентификации — 2 Масса 11 кг	ТВП предназначен для ночной разведки и прицеливания в средствах вооружения средней дальности, в том числе в установках запуска противотанковых ракет TOW. Может применяться на борту судов для навигации и обзора берегов, а также в системах управления огнем танков
Alenia SpA, Defence Systems Group (Италия)	VIRS-7	60	MRTD (при 3 штр/мм·мрад), 0,4—0,7 °С. Дальность, м: обнаружения — 5000—6500 распознавания — 2000—2500 Масса 19 кг	Тепловизор для наземных средств вооружения
Fotona d.d. (Словения)	PTC-10	Линейка	Температурное разрешение MRTD (при 2 штр/мм·мрад) <0,6 °С. Дальность (по танку), м: обнаружения >600 обнаружения >6000	Тепловизионная портативная аппаратура для разведки, обнаружения, распознавания и слежения за целью; управление огнем, наведением противотанковых ракет
Aselsan Inc., Microelectronics, Guidance and Electro-optical Division (Турция)	Baykus	60	В Baykus применяются общие модули США. Два поля зрения. Масса 15 кг	Тепловизионная система наземного применения для слежения, обнаружения и наблюдения. Портативное исполнение позволяет работать с системой одному человеку. Рекомендуемые области применения: наблюдение на границе, в системе охраны штабов, военных зон и полицейских участков, наблюдение за портами и гаванями, в системах защиты таких гражданских объектов, как трубопроводы, нефтехранилища, плотины, аэропорты и др.
Eloptro (Pty) Ltd., Member of Demel Group (Южная Африка)	TS-20, TS-50/25, TS-72	120	MRTD (при 1 штр/мм·мрад) <0,1 °С. Масса, кг: TS-20 > 24 TS-50/25 > 13 TS-72 > 20	Применяются: TS-20 — для наблюдения, ПВО и ВМС; TS-50/25 — для вертолетных систем разведки, для авиации; TS-72 — танковый прицел

Таблица 2

ТВП первого поколения на основе КРТ-ФП типа SPRITE для спектрального диапазона 8—12 мкм (T_p = 80 К)

Фирма (страна)	ТВП	Тип ФП, число элементов	Основные параметры	Применение
GEC-Marconi Infrared Limited (GMIRL), (теперь BAE Systems Infrared Limited) (Великобритания)	ТВ-модуль TICM II	SPRITE-приемник, 8	NETD <100 мК. Объектив и дисплей — по выбору. Масса, кг: сканера ~9,5 электроники 6,5	Сменяемый модуль для ТВП разнообразного назначения. Ночные системы навигации. Системы обнаружения и слежения за целью. Системы прицеливания оружия. Системы наблюдения и разведки
BAE Systems Avionics Sensors and Communications Systems (Великобритания)	V3900	То же	Масса, кг: сенсорной головки — 26 электронного блока — 8	Устанавливается в прицелах на морских судах
Pilkington Optronics (теперь Thales Optronics) (Великобритания)	HDTI (High Definition Thermal Imager). Типы 9-3S, 5-2F и 16-SF	"	Масса ТВП, кг: типа 9-3S — 13 типа 5-2F — 23 типа 16-5F — 15	ТВП 9-3S выпускается в больших объемах, два других типа предназначены для модернизации систем
Raytheon Systems Company (США)	AN/VLR-1	"	Минимальная разрешаемая разность температур MRTD 0,35 °С при пространственной частоте 1,8 циклов/мрад. Масса ТВП — 21 кг	Стоит на вооружении (поставки с 1988 г.) в Армии и ВМС США. Общий запланированный выпуск — 1004 системы, к 2001 г. было поставлено 750 систем
Officine Galileo, Avionics Systems and Equipment Division of Alenia Difesa (Италия)	PACIS (Pilot Aid and Close-in Surveillance)	"	ТВ-модуль TICM II фирмы GMIRL (теперь BAE Systems Infrared Ltd.) (Великобритания)	Системы навигации на самолетах и вертолетах. Дневные/ночные системы наблюдения и разведки. Патрулирование границ. Операции спасения и поиска. Дистанционное зондирование и мониторинг
ATCOP Al Technique Corporation of Pakistan (Pvt) Ltd. (Пакистан)	Thermal sight	"	То же	Ночной прицел для стрелка и командира, а также для системы управления огнем танка Т-серии

ТВП первого поколения на основе линеек из InSb-ФП и PbSe-ФР для спектрального диапазона 3—5 мкм

В развитии тепловидения с 70-х гг. XX столетия, как уже говорилось выше, в связи с внедрением общих модулей основное внимание уделялось ИК-системам на основе КРТ для спектрального диапазона 8—12 мкм. Известно, что для обнаружения минимальных температурных контрастов при температурах фона, близких к 300 К, оптимальным является спектральный диапазон 8—12 мкм. В этом диапазоне наблюдается также минимальное рассеяние излучения в тумане, пыли и в условиях задымления. Фотоприемные матрицы, чувствительные в спектральном диапазоне 3—5 мкм, имеют преимущества перед ФП для диапазона 8—12 мкм при использовании для тепловидения в странах с жарким и влажным климатом. Кроме того, несмотря на помехи от подсвеченных солнцем объектов, ФП для спектральной области 3—5 мкм предпочтительнее при обнаружении воздушных целей. Наконец, переход в средневолновый диапазон обеспечивает, при тех же относительных входных зрачках объектива, возможность использования меньших фоточувствительных площадок, т. е. уменьшение геометрических размеров оптико-электронной аппаратуры, а также повышение дальности обнаружения и распознавания объектов.

В тепловизионных приборах первого поколения для диапазона 3—5 мкм используются фотоприемники на основе антимонида индия и селенида свинца. Линейки из КРТ-ФП для спектрального диапазона 3—5 мкм практического распространения не получили.

В 90-е г. XX столетия системы первого поколения военного назначения на основе линеек из InSb-ФП почти полностью были вытеснены системами второго и третьего поколений, но остались на вооружении в Израиле (табл. 3). Недорогие InSb-системы первого поколения применяются за рубежом также в науке, медицине и промышленности (термографическая камера Thermovision 782 фирмы FLIR Systems, Inc., США), но в настоящее время активно вытесняются относительно дешевыми неохлаждаемыми системами.

Таблица 3

ТВП первого поколения на основе линеек из InSb и PbSe для спектрального диапазона 3—5 мкм [1—7]

Фирма (страна)	ТВП	Материал ФП	Число элементов	Охладитель T_p	Основные параметры	Применение
Rafael (Израиль)	TD-22	InSb	100	Джоуля-Томсона 80 К	Дальность обнаружения, км: по танку — 6,5 по человеку — 2,5	Прибор наблюдения и разведки
Opgal Optronic Industries Ltd. (Израиль)	FALCON TD42	"	128	То же	NETD <0,150 мК. Применение телескопической насадки удваивает дальность. Дальность обнаружения (без насадки), км: по человеку — 1,2 по машине — 3 по самолету — 8 по кораблю — 7 Масса визира — 1,8 кг	В качестве широкопольного бинокля или наблюдательной камеры средней дальности. В сухопутных войсках для изучения местности, разведки и корректировки огня. В ВВС тепловизор обеспечивает всепогодное обнаружение и захват воздушных целей. В ВМС Falcon TD42 применяется как прибор наблюдения за людьми и техникой во время морских операций. Может быть использован в системах охраны, для поиска и спасения, в промышленности и для научных целей
FLIR Systems, Inc. (США)	Thermovision 782	"	100	"	Масса сканера — 4,5 кг	Для точных температурных измерений в диапазоне от −20 до +850 °С
FLIR Systems, Inc. (США)	Thermovision 210S	PbSe	48	ТЭО	Дальность обнаружения 0,46 м	В качестве прибора наблюдения для полиции и органов безопасности
FLIR Systems, Inc. (США)	Thermovision 510S	"	160	"	Дальность обнаружения, км: по самолету — 5,3 по человеку — 1,0	Портативная бесшумная камера для наблюдения
Raytheon (США)	MAG-600	"	64	"	Поле зрения 6,2° x 4,4°. Время выхода на режим < 10 с. Масса < 1,8 кг	Легкий прицел для индивидуального оружия, а также прибор наблюдения
Raytheon (США)	AN/PAS-20 HHTI	"	160	"	Дальность обнаружения, км: по машине — 1,5 по человеку < 0,5	Патрульный прибор наблюдения и охраны безопасности

Фоторезисторы на основе солей свинца (PbS и PbSe) ранее других материалов (с 40-х гг.) стали использоваться в ИК-технике и до настоящего времени сохранили свое значение. Фотоприемники на основе PbSe работают на эффекте фотопроводимости, а не на фотовольтаическом эффекте. Это означает, что для получения выходного сигнала требуется приложить к фоторезистору напряжение смещения. По частотным характеристикам PbSe-ФР также уступают приемникам с p—n-переходом. Однако ИК-системы на PbSe могут быть значительно дешевле систем на основе InSb, так как могут работать без охлаждения. При этом они меньше по массе и габаритным размерам и требуют меньших энергетических затрат.

Неохлаждаемые ФР чувствительны в диапазоне 1—4,5 мкм (λ_{max} = 3,8 мкм). Охлаждение PbSe-ФР приводит к сдвигу правой границы спектральной чувствительности приборов в длинноволновую область спектра — до 6 мкм (λ_{max} = 4,8 мкм); при охлаждении до 80 К наблюдается сдвиг области чувствительности до 7 мкм (λ_{max} = 5 мкм).

Охлаждение вносит эксплуатационные трудности, увеличение габаритных размеров, массы и цен, но это оправдывается ростом обнаружительной способности фоторезисторов в несколько раз, т. е. повышением чувствительности системы. Оптимальная работа PbSe-ФР достигается при термоэлектрическом охлаждении до 195 К.

ИК-системы первого поколения на основе PbSe-линеек не обеспечивают такой же высокий уровень характеристик, как системы на основе InSb-фотодиодов (ФД), поэтому они весьма ограниченно применяются в новой усовершенствованной военной аппаратуре.

В ближайшее десятилетие зарубежные системы первого поколения будут полностью вытеснены системами второго и третьего поколений, в особенности с учетом широкого внедрения неохлаждаемых систем низкой стоимости.

Тепловизионные приборы второго поколения

К тепловизионным приборам второго поколения относятся приборы, в которых: используются многорядные длинные линейки из ФД (условно матрицы); охлаждение — до рабочей температуры 80 К; временная задержка с накоплением сигнала; сканирование в одном направлении и охлаждаемые схемы предварительной обработки сигнала, расположенные непосредственно в плоскости приемника.

ТВП второго поколения на основе матриц из КРТ-ФД с ВЗН для спектральных диапазонов 8—12 и 3—5 мкм

Тепловизионные модули на основе матричных КРТ-ФД с ВЗН, работающие в спектральном диапазоне 8—12 мкм, были разработаны в конце 80-х гг. XX века, в 90-х гг. продолжалось их развитие и начато внедрение в действующую аппаратуру. Первые разработки были выполнены в США (Santa Barbara Research Center и Texas Instruments) и во Франции (SAT, LETI, Sofradir). В настоящее время ВЗН-матрицы продолжают выпускаться ведущими фирмами разных стран: Sofradir (Франция), Raytheon и DRS (США), BAE Systems (Великобритания), AIM (Германия), SCD (Израиль), Fujitsu (Япония).

Формат ВЗН-матриц разнообразен: 96×2, 192×2, 240×2/4, 288×4, 384×2, 480×4/5/6/8, 576×7/10, 768×6/8/10. КРТ-матрицы такого типа считаются стандартными модулями для оптико-электронных систем второго поколения (основной спектральный диапазон 8—12 мкм). Разработка матриц велась по многочисленным программам (HTI, SADA II, SADA IIIB — в США, Synergi — во Франции, STAIRS C — в Великобритании) при полной финансовой поддержке государств. Первоначально КРТ-матрицы с ВЗН разрабатывались только для области спектра 8—12 мкм, а в конце 90-х гг. некоторые фирмы стали предлагать ВЗН-матрицы на КРТ для области 3—5 мкм, что перспективно для создания в будущем двухдиапазонных систем на основе КРТ-ФД с ВЗН.

Достоинство КРТ-матриц с ВЗН — возможность получения при одномерном сканировании большого числа строк в изображении при относительно небольшом количестве элементов в матрице и умеренной цене. Матрицы отличаются улучшенной однородностью и повышенной чувствительностью по сравнению с обычными фотоприемными линейками.

Вместе с тем при малых временах накопления в элементе (десятки микросекунд) требуются фоточувствительные структуры с высоким квантовым выходом. Полупроводниковые фотодиоды с собственным поглощением излучения, в том числе фотодиоды из КРТ, удовлетворяют этому условию (квантовый выход до 90 %).

Охлаждаемые кремниевые чипы для ВЗН-матриц практически всюду изготовляются по КМОП-технологии с технологическим разрешением 0,5—0,8 мкм. Чипы в сочетании с последующими схемами электронной обработки сигнала, входящими в состав фотоприемного устройства, обычно обеспечивают не только временную задержку с накоплением сигнала, но и ряд других необходимых функций: отключение неработающих элементов, деление заряда на входе, автоматический контроль усиления по каналам, возможность работы при встречных направлениях сканирования.

Матрицы с ВЗН, как правило, поставляются в специализированных дьюарах IDDCA (Integrated Detector Dewar Cooler Assembly) и комплектуются микрокриогенной системой типа Сплит-Стирлинг или интегральный Стирлинг, с линейным или вращающимся приводом, холодопроизводительностью от долей ватт до 1—2 Вт и командно-контрольной электроникой ССЕ (Command and Control Electronics). Блок ССЕ обеспечивает генерацию необходимых смещений и тактовых последовательностей, управление работой холодильной машины и первичную обработку сигнала изображения. Часто на выходе электронного тракта ВЗН-матрицы устанавливается аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с разрешением до 14 и даже 16 бит.

Необходимо отметить, что по пороговой чувствительности или эквивалентной шуму разности температур NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) ВЗН-матрицы близки к теоретическому пределу, обусловленному шумами фонового излучения в пределах их апертурного угла.

Объемы выпуска ВЗН-матриц из КРТ весьма значительны: на отдельных фирмах достигают нескольких тысяч в год. Такими матрицами оснащено более 50 % систем, состоящих на вооружении в различных странах. Дальность обнаружения, опознования и идентификации целей в системах второго поколения на основе ВЗН-матриц во много раз выше по сравнению с системами первого поколения.

В табл. 4 приведены наиболее характерные примеры использования КРТ-матриц с ВЗН в конкретной ИК-аппаратуре для диапазона 8—12 мкм, а также данные о разработке в середине 90-х гг. тепловизионного прицела TWS на основе КРТ-ФД с ВЗН нестандартного формата 40×16 для нестандартного спектрального диапазона 3—5 мкм. С 1996 г. было поставлено более 6500 TWS для военного применения. Система состоит на вооружении до настоящего времени.

Таблица 4

ТВП второго поколения на основе КРТ-матриц с ВЗН для спектральных диапазонов 8—12 и 3-5 мкм

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы, рабочая температура	Спектральный диапазон, мкм	Основные параметры	Применение
Hughes Aircraft Co., Electro-optical Systems (теперь Raytheon) (США)	HIRE второго поколения (Hughes Infrared Equipment)	240x4, 80 K	8—12	Два поля зрения (узкое и широкое). Увеличенная по сравнению с HIRE первого поколения дальность	HIRE второго поколения — легкий модульный оружейный перископический прицел и тепловизионная система для легких бронированных средств передвижения
Raytheon Systems Co. (США)	Advanced LAV sight на базе HIRE-2 (см. выше)	"	"	То же	Прицел стрелка на легких бронированных машинах (LAV — Light Armoured Vehicles)
Raytheon Systems Co. (США)	CIV (Commander's Independent Viewer)	480×4 (SADA II), 80 K	"	Два поля зрения	Автономный прицел командира на базе HHTI FLIR второго поколения
Thomson-CSF Optronique (Thales) (Франция); Zeiss-Eltro Optronics (Германия); Pilkington Optronics (теперь Thales Optronics) (Великобритания)	Catherine	288×4, 80 K	"	ТВ-модуль, изготовленный по программе Synergi. NETD = 25—45 мК. Два поля зрения. Масса 11 кг	ТВП широкого применения — обнаружение, распознавание, идентификация; разведка; навигация; управление огнем. Ииспользуется в прицеле стрелка основного боевого танка Т-72, в ракетных системах земля—воздух и др.
Thomson-CSF Optronique (Франция)	SOPHIE	"	"	NETD = 90—100 мК. Дальность обнаружения > 3500 м. Масса < 2 кг	Носимый тепловизор в виде бинокля. Предназначен для пехоты и легких бронированных средств передвижения, а также для гражданского применения
Thomson-CSF Optronique, (теперь Thales) (Франция)	MARGO-P	"	"	Используется ТВП Sophie (см. выше) Дальность, м: 9000 (по танку) 4500 (по человеку) Масса системы < 20 кг	Портативная оптико-электронная система многоцелевого применения (MARGO-P — Multi Application Ruggedized General Optronic-Portable)
Thomson-CSF Optronique (теперь Thales) (Франция)	Sylvi	"	"	NETD = 45 мК. Масса 11 кг	Для панорамных танковых прицелов командира и других целей
Sagem S.A., Defence & Security Division (Франция)	IRIS (Infrared Imaging System)	"	"	NETD = 20 мК. Дальность, км (по танку): обнаружения > 1,6 распознавания > 6,8 идентификации > 3,7 Масса 10 кг	Тепловизоры серии IRIS предназначены для применения в системах большой дальности. Модульная конструкция позволяет выпускать несколько версий тепловизора IRIS для применения на земле, на море и в воздухе для Франции и других стран. Существует несколько проектов использования IRIS на танках, в противотанковых и противовоздушных системах обороны, на вертолетах и в авиации, в системах наблюдения и разведки. IRIS применяется также в службах охраны порядка, при спасении людей, для охраны границ
STN ATLAS Elektronik, Zeiss-Eltro Optronic (ZEO) (Германия)	Ophelios	96×4, 80 K	"	Два поля зрения (узкое и широкое). Масса 8 кг	Разведывательные беспилотные летательные аппараты, ПВО на малые дальности, легкие разведывательные средства передвижения, оптронные мачты на подводных лодках; береговая и пограничная охрана
STN ATLAS Elektronik, Zeiss Optronic GmbH (Германия)	PERI-R 17A2	"	"	На базе ТВП Ophelios (см. выше)	Наблюдательные приборы стрелка и командира
Avimo Ltd. (Великобритания)	KITOS	"	"	То же	То же
Pilkington Optronics Ltd. (теперь Thales Optronics) (Великобритания)	STAG FC	288×4, 80 K	"	Преимущества по дальности (по сравнению с ТВП первого поколения). Масса 39 кг	Прицел стрелка на основе ТВП второго поколения

Окончание табл. 4

Фирма (страна)	ТВП	Формат матрицы, рабочая температура	Спектральный диапазон, мкм	Основные параметры	Применение
Pilkington Optronics (теперь Thales Optronics) (Великобритания)	STAIRS C	768×8, 80 K	8—12	NETD < 70 мК. Дальность прицелов второго поколения обнаружения и распознавания в два раза выше, чем у прицелов первого поколения на основе приемников SPRITE	Базовый модульный тепловизор для прицелов
Pilkington Optronics (теперь Thales Optronics) (Великобритания)	EPIC (Extreme Performance Infrared Camera)	"	8—12 (8—9,4)	Среднее время наработки до отказа 5000 ч. Масса 20 кг	ИК-камера для самолетов и вертолетов, а также для гусеничных средств передвижения
Spar Aerospace Ltd., Spar Applied Systems, Hollandse Signalapparaten BV (Нидерланды)	SIRIUS, двухдиапазонная система	300×10; 300×8; 80 K	3—5; 8—12	Дальность обнаружения, км: ракет 21—35 (зависит от типа ракет); истребителей — 30 Масса сенсорной головки 180 кг	Морская ИК-система разведки, поиска и сопровождения цели дальнего действия
Bofors Weapon Systems (Швеция)	Lemur	288×4, 80 K	8—12	Масса 160 кг	Панорамный прицел на базе ИК-камеры фирмы Celsius Tech (Швеция) для боевых машин
Hughes Aircraft Co., Electro-Optical Systems (теперь Raytheon) (США)	TWS (Thermal Weapon Sight), AN/PAS-13	40×16, 175 K — ТЭО	3—5	Дальность распознавания, км: средний TWS — 1,1 (по человеку); тяжелый TWS — 2,2 (по средству передвижения)	Персональный оружейный прицел, предназначенный для замены ночных прицелов на ЭОП AN/PVS-4 и AN/TVS-5, которые состоят на вооружении пехоты. Имеются 4 модификации TWS: базовый (основной) сенсор для таких применений, как установки запуска противотанковых ракет Stinger; легкие TWS для такого оружия как карабины; средние TWS для такого оружия как пулеметы; тяжелые TWS для оружия большой дальности, таких как пулемет , автоматический гранатомет и снайперская винтовка

ТВП второго поколения на основе матриц из InSb-ФД с ВЗН для спектрального диапазона 3—5 мкм

В работе [8] приведены сведения об использовании InSb-матрицы с ВЗН формата 480×6 в сканере ИК-системы поиска и слежения IRST (Infra-Red Search and Tracking) морского назначения. Разработчик сканера — фирма Raytheon Systems Company (США), разработчик ИК-системы Shipboard IRST — американская фирма Lockheed Martin (теперь BAE Systems). Утверждается, что по мере развития технологии изготовления матриц более привлекательным, по сравнению со сканируемыми, становится вариант смотрящих матриц. Это полностью подтверждается в отношении InSb-матриц — в настоящее время смотрящие матрицы для бесканерных систем полностью вытеснили линейки и матрицы с ВЗН для сканируемых систем. Что же касается КРТ-матриц для сканирующих систем с ВЗН, то они до настоящего времени широко применяются в различных системах.

Приложение

Список использованных сокращений

ВЗН — временная задержка с накоплением
ИК — инфракрасный
КМОП — комплементарные МОП-структуры
КРТ — кадмий—ртуть—теллур
ПВО — противовоздушная оборона
ТВП — тепловизионные приборы
ТЭО — термоэлектрические охладители
ФД — фотодиоды
ФП — фотоприемники
ФПУ — фотоприемные устройства
ФР — фоторезисторы

* * *

CCE — Command and Control Electronics (командно-контрольная электроника)
CM — Common Module (общие модули)
HTI — Horizontal Technology Integration (программа по разработке технологии интеграции в горизонтальной плоскости)
NETD — Noise Equivalent Temperature Difference (разность температур, эквивалентная шуму)

QWIP — Quantum Well Infrared Photodetector (фотоприемник с квантовыми ямами)

SADA — Standard Advanced Dewar Assembly (программа по разработке перспективных сборок в дьюаре)

SMT — Systeme Modulaire Thermique (система тепловизионных модулей)

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)

TICM — Thermal Imager Common Module (общие модули для тепловизоров)

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. Aerosense Exhibit Guide, 25—27 April 2000, Orlando, USA.

4. Aerosense Exhibition Guide, 17—19 April 2001, Orlando, USA.

5. Aerosense Exhibition Guide, 2—4 April 2002, Orlando, USA.

6. Aerosense Exhibitor Directory, 22—24 April 2003, Orlando, USA.

7. *Белозеров А. Ф., Иванов В. М.*// Оптический журнал, 2003. Т. 70. № 10. С. 47—70.

8. Jane's International Defense Review, 1998, V. 10. № 24—26. P. 28—30, 32.

Development of foreign thermal imaging devices of three generations

Part I

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.