

Инфракрасные матрицы и тенденции их развития Часть I

А. М. Филачев, В. П. Пономаренко, И. И. Таубкин, М. Б. Ушакова
Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион»», Москва, Россия

Проведен анализ разработки и выпуска современных инфракрасных фокальных матриц в передовых зарубежных странах. Рассмотрены матрицы для ближнего, среднего и длинноволнового инфракрасного диапазонов из теллурида кадмия-ртути, в том числе работающие в режиме временной задержки с накоплением; матрицы из антимонида индия, силицида платины, селенида и теллурида свинца; матрицы на основе гетероструктур с квантовыми ямами из арсенида галлия/арсенида галлия-алюминия; неохлаждаемые матрицы — микроболометрические и пироэлектрические; матрицы из сульфида свинца и арсенида индия-галлия; глубокоохлаждаемые матрицы из кремния с примесной фотопроводимостью. Обсуждены тенденции дальнейшего развития инфракрасных фокальных матриц для тепловизионной техники нового поколения.

За последние 15—20 лет тепловидение вышло на качественно новый уровень, что обусловило продолжающийся стремительный рост производства и широкое внедрение тепловизионной техники в военные системы и многие отрасли хозяйственной деятельности. Без тепловизионных каналов невозможно представить современные средства наблюдения и обнаружения, используемые в наземных и морских условиях, в авиации и космосе, а также многие виды высокоточного оружия, в значительной степени определяющие стратегию и тактику ведения боевых действий. Тепловизионные изделия успешно используются для охраны государственных границ и правопорядка; для мониторинга энерго- и теплотрасс, различных сооружений и установок; для вождения транспортных средств ночью и в сложных условиях (пыль, туман, дым); для раннего обнаружения пожаров и спасения пострадавших; в медицине, экологии и других отраслях.

Как известно, передовые государства выделяют на разработку и закупку тепловизионных средств (в основном для военных целей) значительные финансовые средства. Так, в 2000 г. только в государственном бюджете США на тепловидение было выделено более 1 млрд дол., а во всех странах с годовым бюджетом более 10 млрд дол. (включая США, Японию, Англию, Францию, Германию, Индию и Китай) на эти цели было израсходовано около 2 млрд дол.

Коммерческий мировой рынок инфракрасной продукции (и прежде всего тепловизионных приборов) в 2000 г. превышал 500 млн дол. и, по прогнозу фирм Flow Research и Ducker World-

wide (США), должен в 2005 г. превысить 800 млн дол. Наибольший прирост ожидается в продажах тепловизоров для пожарных (более 1 млн дол. только в США и еще столько же в остальных странах мира) и для автомобилистов (мировой выпуск автомобилей более 50 тыс. в день) [1—3].

Решающим вкладом в создание современных тепловизионных приборов, в том числе для массового применения, явились, как известно, разработка и внедрение в производство матричных инфракрасных фотоприемных устройств с внутренним накоплением, коммутацией и обработкой фотосигнала, определивших облик и предельные возможности тепловизоров. В научнотехнической литературе такие фотоприемные устройства относят обычно к сенсорам второго поколения [4].

Матричные фотоприемные устройства, работающие в режиме временной задержки и накопления сигналов (ВЗН), обусловили существенное уменьшение геометрического шума (неоднородности каналов) и улучшение разрешающей способности и чувствительности сканирующих тепловизоров. Матричные «смотрящие» фотоприемные устройства обеспечили возможность создания нового поколения сверхчувствительных тепловизоров без пространственного сканирования изображения.

Современное фотоприемное устройство (ФПУ), как правило, включает матрицу фоточувствительных элементов, каждый из которых электрически подключен к соответствующему элементу другой матрицы — кремниевой интегральной схемы накопления и считывания фото-

сигналов. Обе эти матрицы помещены в вакуумную полость дьюара, обеспечивающего теплоизоляцию и ограничение фоновой радиационной нагрузки. Дьюар стыкуется с охладителем микрокриогенной системы (МКС), принцип действия которой основан на обратном газодинамическом цикле Стирлинга (практикуется также интегральный вариант стыковки, когда гильза охладителя одновременно является внутренней частью дьюара). Наконец, в комплект ФПУ входят электронные микросхемы контроля и управления, осуществляющие генерацию необходимых постоянных смещений и тактовых импульсов, контроль работы микрокриогенной системы и предварительную обработку сигнала изображения вплоть до оцифровки выходного сигнала.

Очевидно, что при использовании дроссельных теплообменников, термоэлектрического охлаждения или термостабилизации фоточувствительных элементов и особенно в случае неохлаждаемых матриц конструкция фотоприемного устройства значительно упрощается.

В статье проанализированы разработка и производство матричных инфракрасных фотоприемных устройств в лидирующих мировых фирмах, а также основные направления дальнейшего совершенствования этих изделий. При этом основное внимание уделяется не описанию конкретных марок изделий, а выявлению достигнутых объемов производства, уровня основных параметров ФПУ и общих тенденций их развития.

В таблицах приведены сведения о различных матричных инфракрасных фотоприемных устройствах, как правило, с форматом более чем 64×64.

Краткие сведения о лидирующих фирмах в разработке и производстве инфракрасных фокальных матриц и их компонентов, а также список использованных сокращений приведены в прилож. 1 и 2.

КРТ-матрицы с ВЗН 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. Вдобавок в этом диапазоне расположено окно пропускания атмосферы и минимально рассеяние излучения в тумане, пыли и при искусственных помехах [5].

Сведения о матрицах на основе полупроводникового раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ) с ВЗН, работающих в диапазоне 8—12 мкм, приведены в табл. 1 [4, 6—14].

Достоинствами КРТ-матриц с ВЗН являются возможность получения при одномерном сканировании большого числа строк в изображении (особенно при чересстрочном сканировании) при относительно небольшом количестве элементов в матрице и умеренная цена. Эти матрицы также отличают улучшенная однородность и повышенная чувствительность 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 %).

Очевидно, что тепловизоры на основе КРТ-матриц с ВЗН по пороговой чувствительности в спектральном диапазоне 8—12 мкм останутся конкурентоспособными по сравнению с тепловизорами на основе смотрящих матриц до тех пор, пока в последнее время накопления фотоносителей для каждого элемента изображения не станет сравнимым с временем кадра.

Таблица 1

КРТ-матрицы с ВЗН для спектрального диапазона 8—12 мкм

Фирма, страна	Формат (спектр. диапазон, мкм)	Размеры элемента, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
DRS Infrared Technologies, США [6, 7]	240×2 (8—10)	33×22 25×28	$T=77$ К; $D=72$ дБ; $N_a=2-4$; $f=2,8$ МГц; $N_{оп}>98$ %	SADA IIIA. Выпуск в течение ряда лет в больших количествах. Вход мультиплексора СТИА, емкость ямы $1,5-3 \cdot 10^7$ электрон. IDDCA с линейным Стирлингом и командно-контрольной электроникой. Технология VIP™
	288×4 (8—10)	28×25	NETD (77 К)=30 мК; $D=72$ дБ; $N_a=2-4$; $f=6$ МГц; $N_{оп}>98$ %	SADA IIIB. Вход мультиплексора СТИА, емкость ямы $1,5-3 \cdot 10^7$ электрон. IDDCA с линейным Стирлингом и командно-контрольной электроникой. Технология VIP™
	240×4 (8—10)	28×25	NETD (77 К)=30 мК; $D=72$ дБ; $N_a=2-4$; $f=6$ МГц; $N_{оп}>98$ %	SADA IIIB
	480×5 (8—10)	28×38	$T=77$ К; $D=72$ дБ; $N_a=8-16$; $f=5$ МГц; $N_{оп}>98$ %	SADA II с линейным охладителем Стирлинга

Фирма, страна	Формат (спектр. диапазон, мкм)	Размеры элемента, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Raytheon Infrared Operations, (RIO) США [6, 8]	288/240×4 (7.65—10.25)	28×38	NETD (78 К; $F/2.31$; 34 кГц)=18 мК; $D = 72$ дБ; $f < 5$ МГц; $N_{op} > 97$ %	SADA IIIB с линейным охладителем Стирлинга (0,454 кг), 12 Вт в стационарном режиме. IDCA (0,295 кг). Выпускается более 40 изделий в месяц
	480×6/4 (8—10)	22×25	NETD (78 К; $F/2.5$; 20 мкс; 20—160 Гц)=20 мК	SADA II с линейным охладителем Стирлинга (1,9 кг) 20 Вт (в стационарном режиме). IDCA (0,635 кг)
Sofradir, Франция [6, 9]	288/240×4 (7.7—10.3)	25×28	NETD (80 К; $F/1.7$; 20 мкс)=20 мК; $N_a=16$; $f=2$ МГц; $\Delta=3$ %; $N_{op}=99$ %	Охладители Стирлинга CRY0400, Франция (марка ID TL001) и K508 0,4 Вт, Израиль (марка ID TL003). IDCA <400 г. Находятся в серийном производстве. В 1999 г. выпущено свыше 1000 ед. В 2000 г. — свыше 2000 ед.
	480×6 (7.7—10.3)	28×38	NETD (80 К; $F/2.5$; 20 мкс)=20 мК; $N_a = 16$; $f = 5$ МГц; $N_{op} > 99$ %; $\Delta = 12,4$ %	SADA I, SADA II, возможна стыковка с охладителями Стирлинга K-508, RM-7i, LS5-7i. SADA I — производство с 1997 г. SADA II — производство с 1999 г.
AIM, Германия [6, 11]	96×4 (7.4—10.5)	25×28	NETD (80 К; $F/1.5$; 2,75 мкс; 25 Гц) = 50 мК; $N_a = 8$; $f = 4$ МГц;	IDCA с командно-контрольной электроникой. Находится в производстве
	240×4 (7.4—10.5)	25×28	NETD (80 К; 30 Гц) = 25 мК; $N_a = 8$; $f = 2$ МГц	STD 288 (1,3 кг) с охладителем Стирлинга (1/3) Вт. IDCA с командно-контрольной электроникой. Находится в производстве
	288×4 (7.4—10.5)	25×28	NETD(80 К; $F/1.5$; 15 мкс)=25 мК; $N_a=8$; $f = 2.5$ МГц	STD 288 (1,3 кг) с охладителем Стирлинга (1/3) Вт. IDCA с командно-контрольной электроникой. Находится в производстве
	480×6 (7.2—10.5)	35×43 28×38	NETD (80 К; $F/1.75$; 5 мкс; 60/120 Гц) = 25 мК; $N_a=16$; $f = 6$ МГц	PIL SADA I TGT (4,3 кг) с линейным Стирлингом 1,75 Вт. IDCA с командно-контрольной электроникой. Опытные образцы (прототипы) — 1997—1999 гг. Производство — 2001—2008 гг.
	480×6 (7.2—11.2)	35×50	$T=80$ К; $F = 60/120$ Гц; $N_a=16$; $f < 6$ МГц	PIL SADA I TGT. IDCA с командно-контрольной электроникой
	480×6 (7.2—11.2)	28×38	$T=80$ К; $F/2.5$; $F = 60$ Гц; $N_a=16$; $f < 6$ МГц	SADA II (вес 2,5 кг). Линейный Стирлинг I Вт. IDCA с командно-контрольной электроникой. Опытные образцы (прототипы) 1998 г. (апрель) — 1999. Производство с 1999 г.
	576×7 (7.4—10.5)	20×20	NETD (80 К; $F/1.7$; 4,5 мкс; 50 Гц)=50 мК; $f = 8$ МГц, $N_a = 16$; $N_d = 4$	HDIR. SADA II (2,5 кг) с охладителем Стирлинга (вес <2,3 кг) и командно-контрольной электроникой. АЦП (16 или 12 бит). Опытные образцы (прототипы) 1995—1998 гг. Производство с 2004 г.
BAE Systems, Великобритания [4, 6, 11, 12]	192×2 (8—10)	30×30	NETD (75 К) = 20 мК; $N_a = 8$	IDCA Kestrel. Автоматическое устранение расплывания изображения
	288×2 (8—10)	30×30	NETD (75 К; $F/1.5$; 50 мкс)=25 мК; $N_a=2, 4$ или 8; $f < 5$ МГц; $\Delta = \pm 20$ %; $P < 150$ мВт	IDCA (600 г) Falcon. Автоматическое устранение расплывания изображения. Охладитель Стирлинга с вращающимся приводом
	384×2 (8—10)	30×30	NETD (75 К; 50 мкс) = 20 мК; $N_a=4$ или 8; $f < 5$ МГц; $\Delta = \pm 20$ %	IDCA (600 г) Kestrel II. Автоматическое устранение расплывания изображения. Охладитель Стирлинга

Фирма, страна	Формат (спектр. диапазон, мкм)	Размеры элемента, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
BAE Systems, Великобритания [4, 6, 11, 12]	576×10 (8–10)	30×30	NETD (75 К; $F/1.5$; 50 мкс) = 25 мК; $\Delta < 20\%$; $N_{op}=100\%$; $P=150$ мВт	IDDCA (600 г). Охладитель Стирлинга с вращающимся приводом. Мощность потребления 10 Вт в стационарном режиме
	768×8 (LWIR)		NETD (77 К; $F/2$; 25–50 Гц)=70 мК; $N_a=2, 4$ или 8; $f=5$ МГц	Применяется улучшенный алгоритм коррекции неоднородности. АЦП 14 бит. Подготовлено производство
SCD, Израиль [6, 13]	480×6 (8–12)	35×28	$F/3.1$; $\tau=20$ мкс; $N_a=4$; $f=7$ МГц; $\Delta < 3\%$; $N_{op} > 99\%$	SADA II, с линейным охладителем Сплит-Стирлинг 1 Вт. IDCA 1,5 кг. 20 Вт (в стационарном режиме)
Fujitsu Laboratories Ltd., Япония [14]	480×8 (7,9–10,3)	51×38	NETD (80 К, $F/1.55$; 10 мкс; 30 Гц) = 18 мК (в составе FLIR — 30 мК)	Охладитель Стирлинга 1 Вт. АЦП 16 бит. Изготовлены образцы

Примечание.

NETD — эквивалентная шуму разность температур за время кадра, мК;

T — рабочая температура матрицы, К;

F/number , $F\#$ — относительный входной диаметр объектива;

D — динамический диапазон выходного сигнала, дБ;

N_a — число аналоговых выходов;

N_{op} — доля работающих каналов в матрице (operability), %;

Δ — неоднородность параметров элементов в матрице до коррекции (обычно отношение среднеквадратичного значения к среднему), %;

f — частота выходного сигнала, МГц;

F — частота кадров, Гц;

W — потребляемая мощность;

Q — квантовая эффективность;

τ — время накопления сигнала в элементе за время кадра (или собственная постоянная времени чувствительного элемента — в случае микроболометрических матриц), мс или мкс;

P — выделяемая матрицей мощность, мВт;

$\lambda_{гр}$ — правая граница спектральной чувствительности, мкм;

λ_{max} — длина волны в максимуме спектральной характеристики;

D^* — обнаружительная способность, Jones ($\text{Вт}^{-1}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{см}$).

Охлаждаемые кремниевые чипы для ВЗН-матриц практически всюду изготавливаются по КМОП-технологии с технологическим разрешением 0,5–0,8 мкм (так, известная французская фирма Sofradir, успешно использовавшая ранее ПЗС-мультиплексоры, в 1993–1995 гг. также перешла на КМОП-технологии [9, 15]).

Чипы в сочетании с последующей электроникой, входящей 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 дюарах и комплектуются МКС типа Сплит-Стирлинг или интегральный Стирлинг (IDDCA), с линейным или вращающимся приводом, холодопроизводительностью от долей ватт до 1–2 Вт и командно-контрольной электроникой. Последняя, как уже отмечалось выше,

обеспечивает генерацию необходимых смещений и тактовых последовательностей, управление работой холодильной машины и первичную обработку сигнала изображения. Часто на выходе электронного тракта ВЗН-матрицы устанавливается аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) с разрешением до 14 и даже 16 бит.

По желанию потребителя ВЗН-матрицы могут поставляться и без микрокриогенной системы.

Необходимо отметить, что по пороговой чувствительности (или эквивалентной шуму разности температур — NETD) ВЗН-матрицы близки к теоретическому пределу, обусловленному шумами фонового излучения в пределах их апертурного угла. Так, коэффициент шума матрицы фирмы Fujitsu (Япония) при накоплении по 8 элементам и указанных в табл. 1 условиях измерения не превышает 2,2.

В рекламных проспектах приведены следующие данные для тепловизоров, в которых

использованы КРТ-матрицы с ВЗН формата 288×4: IRIS (масса 10 кг, диаметр оптики 9,5 см, NETD порядка 20 мК), фирмы SAGEM (Франция) и SOPHIE (масса 2,4 кг; диаметр оптики 5,5 см; NETD менее 70 мК), фирмы Thomson-CSF (Франция). Так, для тепловизора IRIS при поле зрения 2° дальности обнаружения и распознавания составляют по танку 16 и 6,7 км, по человеку — 13 и 5 км. Соответствующие дальности для носимого тепловизора SOPHIE: по танку — 9 и 3,5—4 км, а по человеку — 4,5 и 1,5—2 км [6].

Объемы выпуска ВЗН-матриц из КРТ в США и Франции значительны. Так, фирма Raytheon Infrared Operations (США) изготавливает в настоящее время более 40 матриц форматов 288/240×4 и 480×6 в месяц; по некоторым данным объем производства фирмы Sofradir (Франция) в 2000 г. был близок к 2000 матрицам. Фирма Sofradir помимо ВЗН-матриц также поставляет заказчикам и линейные КРТ-приемники для диапазона 8—12 мкм с числом элементов 1500 и общей длиной линейки около 50 мм.

Смотрящие КРТ-матрицы для спектрального диапазона 8—12 мкм

В табл. 2 [6—9, 16] приведены данные по смотрящим матрицам на основе КРТ для длинноволновой области спектра. В последние годы их разра-

ботка и выпуск получили большое развитие (ранее лидировали смотрящие КРТ-матрицы для диапазона 3—5 мкм).

Из сравнения табл. 2 и 1 видно, что NETD за время кадра у выпускаемых смотрящих матриц в среднем немного лучше, чем у матриц с ВЗН. При этом, например, матрицы фирмы AIM (Германия) с форматом 256×256 отличаются по этому параметру от теоретического предела, обусловленного шумом фонового излучения, в 3,5 раза. Таким образом, примерно одинаковая чувствительность тепловизоров с ВЗН-матрицами и смотрящими матрицами объясняется суммированием сигналов по 4—8 элементам и меньшим коэффициентом шума при ВЗН.

Время накопления, используемое в смотрящих матрицах, ограничивается, как известно, углом поля зрения на фон и емкостями накопления в ячейке мультиплексора, которые в настоящее время достигают $3 \cdot (10^7 - 10^8)$ электронов. Очевидно, что дальнейшее и существенное улучшение чувствительности смотрящих матриц из КРТ может быть достигнуто после увеличения емкости накопления в ячейке мультиплексора и/или частоты кадров до величины, равной обратному времени накопления (для 256×256-матрицы AIM — до 14,3 раза!).

Таблица 2

Смотрящие КРТ-матрицы для спектрального диапазона 8—12 мкм*

Фирма, страна	Формат (спектр. диап., мкм)	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения	
DRS Infrared Technologies, США [6, 7, 16]	256×256 (8,0—10,5)	40	NETD (77 К; < 120 Гц)=8 мК; D=74 дБ; N _n =2; Q=0,55—0,6; N _{оп} >98 %	IDDCА с командно-контрольной электроникой	HDVIP™ технология. Вход ROIC-BDI
	640×480 (8,0—10,5)	25	NETD (77 К, < 60 Гц)=13 мК; D=74 дБ; N _n =4; Q=0,55—0,6; N _{оп} >98 %	IDDCА с командно-контрольной электроникой	
	(3,0—5,2) 320×240 (8,0—10,2)	50	NETD (77 К; F/3; 60 Гц)=9/23 мК; Q=0,6/0,35; Δ=4,8 %/4,2 %; N _{оп} =97,1 %/96,3 %	Изготовлено около 40 образцов	
Raytheon Infrared Operations (RIO), США [6, 8, 11]	256×256 (8,5—11,0)	30	T=77 К; τ<8,6 мс; F=120 Гц; D>66 дБ; f=5 МГц; N _{оп} >99 %; P<100 мВт	Поток квантов 10 ¹⁴ —10 ¹⁶ фотон/см ² ·с. На входе — прямая инжекция. Работоспособность до 100 К	
Rockwell Scientific, США [6]	128×128 (8—12)	40	T=80 К; F< 300 Гц; D = 77 дБ; N _{оп} > 98 %; P < 50 мВт	CdHgTe/CdZnTe	С выделением фрагментов
	256×256 (8—12)				
Lockheed Martin, США [6]	128×128 (8—12)	45	NETD (80 К; F/2,4; < 480 Гц) = 20 мК		

* См. примечание к табл. 1.

Фирма, страна	Формат (спектр. диап. или λ_{\max} , мкм)	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Sofradir, Франция [9, 21]	384×288 (8–9)	28	NETD (70 К; $F/2$; 1 мс; 60 Гц)=25 мК	
	640×512 ($\lambda_{\max} = 8,5$)	25	NETD (70 К, $F/2$, 4 мс)=30 мК	Мультиплексор Indigo Systems 9803
AIM, Германия [6, 22]	256×256 (8–10)	40	NETD (60 К; $F/2$; 20 мс; <200 Гц)=10 мК; $N_a=2$; $f=16$ МГц	IDCCA SL100
	384×288 (8–10)	24	NETD (60 К; $F/2$; 4 мс; <120 Гц)=20 мК; $N_a=2$; $f=20$ МГц	IDCCA SL100
	640×512 (8–10)	24	NETD (60 К; $F/2$; 20 мс; 50/100 Гц)=18 мК; $N_a=4$; $f=18$ (36) МГц	IDCCA SL100, включает миниатюрный электронный блок с АЦП 12 бит
	640×512 ($\lambda_{\max}=4,8$)	24	NETD (88 К; $F/1,5$; 20 мс; 30/60 Гц)=15 мК; $N_a=2$ (4); $f=16$ (36) МГц; $N_{op}>99,5$ %	Включает миниатюрный электронный блок с АЦП 14 бит
BAE Systems Infra-Red Limited, Великобритания [6]	320×256 (8–10)	30	NETD (70 К)<20 мК; $N_a=4$; $f=5$ МГц; $\Delta=10$ %; $N_{op}=99,9$ %; $P=50$ мВт	IDCCA Condor (600 г). Охлаждатель Стирлинга с вращающимся приводом. $W<10$ Вт
	640×512/480 (8–10)	24	NETD (70 К)=30 мК; $N_a=4$; $f=5$ МГц; $\Delta=10$ %; $N_{op}=99,9$ %; $P=40$ мВт	IDCCA (600 г), $W<12$ Вт
Saab Tech. Electronics Швеция [4]	320×240	38	NETD ($F/1,5$)=16 мК	Выпускаются для тепловизора BIRC
	640×480			Окончание разработки – осень 2001 г.

Однако в условиях ограничения чувствительности емкостью накопительных элементов в мультиплексоре низкая квантовая эффективность компенсируется при невысоких частотах кадров с увеличением времени накопления (см. табл. 3).

Кроме того, QWIP-матрицы обладают рядом существенных достоинств. Так, они изготавливаются на доступных и однородных подложках из арсенида галлия, которые могут иметь большой диаметр. Кроме того, подгонкой числа и параметров слоев можно в широких пределах менять и диапазон спектральной чувствительности (в пределах от 6 до 20 мкм) и ширину спектрального диапазона — при использовании в наборе разных квантовых ям (от 10 до 50 % от длины волны в максимуме). Наконец, QWIP-матрицы получаются весьма однородными (неоднородность элементов в матрицах формата 640×512 до коррекции меньше 10–5 %), имеют высокий процент годных элементов (обычно больше 99 %), радиационно стойки, обладают малой мощностью рассеяния [23].

Можно отметить, что в настоящее время для коммерческих целей доступны матрицы большого формата (640×480) на длинноволновый диапазон только на основе QWIP-структур и микроболлометров. Большие размеры, малые $1/b$ шумы и радиационная стойкость обуславливают

перспективность использования QWIP-матриц и в космической аппаратуре [24].

В проспектах фирмы AIM (Германия) [6] приводятся сведения по дальности обнаружения и опознавания имитатора танка (Thermal Imaging Model 3) с помощью QWIP-матриц формата 640×512. Эти дальности для поля зрения $3,5 \times 2,8^\circ$ составляют 12,6 и 5,9 км, соответственно. Приведенные цифры приближаются к дальностям действия тепловизоров на основе ВЗН и смотрящих матриц из КРТ.

Можно отметить, что QWIP-матрицы с возможностью обеспечения больших форматов, однородности и подгонки спектральной чувствительности перспективны для создания двухцветных фотоприемных устройств. В табл. 3 приведены основные характеристики двухцветных QWIP-матриц, изготовленных фирмами Jet Propulsion Labs и BAE System (США) [23].

Неохлаждаемые микроболлометрические и пироэлектрические матрицы для спектрального диапазона 8–12 мкм

Сведения о современных неохлаждаемых матричных фотоприемных устройствах, обеспечивающих качественное снижение габаритных размеров, массы и энергопотребления оптико-

электронной аппаратуры, содержатся в табл. 4 [4, 6, 8, 11, 17, 25—34] и табл. 5 [4, 6, 8, 11, 35, 36].

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). Однако фирма Mitsubishi (Япония) достигла успехов в изготовлении микроболометрических матриц полностью по кремниевой технологии СБИС, когда в качестве термочувствительного элемента используются последовательно соединенные $p-n$ -переходы в кремнии или полупроводниковые пленки $YBaCuO$ [36].

Микроболометрические матрицы изготавливаются непосредственно на кремниевых считывающих интегральных чипах и помещаются в откачанные корпуса с термоэлектрическим ста-

билизатором температуры. В последнее время в ряде случаев вместо термоэлектрической стабилизации используются электронные схемы для коррекции ухода параметров с температурой. Записав предварительно в памяти корректора температурные коэффициенты чувствительности элементов, удается уменьшить размеры, массы 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 начали изготавливаться более дешевые матрицы формата 160×120 , а также крупноформатные матрицы 640×480 с шагом $25-28$ мкм (табл. 4).

Таблица 4

Неохлаждаемые микроболометрические матрицы для спектрального диапазона $8-12$ мкм*

Фирма, страна	Материал матрицы	Формат	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Raytheon Infrared Operations, США [4, 6, 8, 25—29]	VO_x	320×240	50	NETD ($F/1$; 10 мс; 30 Гц)= $20-35$ мК	Производится более 1000 матриц в год (марки SB-151, SB-211)
	VO_x	320×240 (8—14)	25	NETD ($F/1$; 12 мс; <60 Гц) <100 мК; $D=66$ дБ; $f=6,1$ МГц; $\Delta=4$ %; $N_{op}>98$ %; $P=150$ мВт	Потребление 1,8 Вт. Производство подготовлено (марки SB-212, SB-262)
	VO_x	$640 \times 480/512$	25	NETD ($F/1$; 30 Гц)= 20 мК; $N_{op}=98$ %; $P=400$ мВт	Разработка (SB-246)
	VO_x	1024×1024	15	NETD= 50 мК	Разработка
	VO_x	160×120 (160×128 , 128×128)	25	NETD ($F/1$; <60 мс; 30 или 60 Гц) = 20 мК; $N_{op}=98$ %; $P=15$ мВт	Электронная термостабилизация в диапазоне от -40 до $+65$ °С. Разработка (SB-250)
Raytheon Commercial Infrared [6, 17]	Аморфный Si	160×120 (7—14)	46,8	NETD ($F/1$; <21 мс; $20-60$ Гц)= 63 мК; $\Delta<10$ %	С электронной термостабилизацией
BAE Systems Information & Electronic Warfare Systems, США [4, 6, 30]	VO_x	320×240 (7,5—14)	46,2 5	NETD (76 К Т; $F/0.8$; 60 Гц) $<30-75$ мК	Серия SIM300, модуль SIM300H (99 г.). Потребление 2,1 Вт. Производится несколько тысяч матриц в год
	VO_x	160×120 (7,5—14)	46,2 5	NETD (76 К Т; $F/0.8$; 60 Гц) <75 мК	Серия SIM300, модуль SIM300L (55 г.). Потребление 1,5 Вт. Производится
	VO_x	320×240 (7,5—14)	46,2 5	NETD (60 Гц) <100 мК. АЦП 8—14 бит. Потребление 4,5 Вт (ном.)	Модуль SIM205 (<300 г) с электронной обработкой. SIM205S — с затвором. АЦП 8 или 16 бит
	VO_x	320×240	28	NETD= 50 мК (электронная стабилизация)	
	VO_x	$640 \times 480/512$	25	NETD ($F/1$; 30 Гц)= 55 мК; $N_{op}=99$ %	Разработка
	VO_x	1024×1024	15	NETD= 50 мК	

* См. примечание к табл. 1.

Окончание табл. 4

Фирма, страна	Материал матрицы	Формат	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
DRS Technologies, (до 2002 г. Boeing Co.) США [4, 6, 11, 31]	VO _x	320×240 (8—14)	51	NETD (F/1; 25 мс; 60 Гц)=23—100 мК; D>60 дБ; N _и =1; f=5 МГц; Δ<10 %; N _{оп} =98 %	Матрица U3000. С термоэлектрической и электронной стабилизацией. Произведено несколько тысяч за семь лет
	VO _x	640×480/512	25	NETD=50 мК	Разработка
	VO _x	1024×1024	15	NETD=50 мК	
Boeing Co., США [17] (2001 г. DRS)	VO _x	640×480			U6000. Новая разработка
INO, Канада [4]	VO _x YBa-CuO	160×120		NETD<50 мК	Изготовление тепловизионных модулей для тепловизора
Sofradir, Франция [6, 32]	Аморфный Si	320×240	45	NETD (F/1; 4 мс; 25 Гц)<80 мК; f=5,5—10 МГц; Δ<10 %; N _{оп} >99 %	Потребление 8,5 Вт. С электронной стабилизацией. Произведены сотни матриц
		320×240	35	NETD (F/1; 12 мс; 50 Гц)=35 мК	Начато производство
Mitsubishi Electric Corp., Япония [33, 34]	YBa-CuO	320×240	40	NETD (F/1)=80 мК	Первые образцы
	Si (диоды)	320×240	40	NETD (F/1, 17 мс, 30 Гц)=120 К; Δ=1,46 %	

Таблица 5

Неохлаждаемые пироэлектрические матрицы для спектрального диапазона 8—12 мкм*

Фирма, страна	Материал матрицы	Формат	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Raytheon Commercial Infrared, США [6]	BST (титанат бария-стронция)	320×240	50	NETD (F/1; 30 Гц)=80 мК; f=6 МГц; F=30 Гц (тип.) до 90 Гц	С термоэлектрической стабилизацией температуры. Цифровое разрешение 14 бит
BAE Systems, Infrared Limited, Великобритания [4, 11, 35, 36]	PST (танталат свинца-скандия)	256×128	56	NETD (F/1; 50 Гц)=110 мК; N _{оп} =99,9 %; P<150 мВт	Модуль Wizard с матрицей Merlin. АЦП 8 бит. Производство более 1000 матриц в год
		384×288	40	NETD (F/1; 50 Гц)=60—140 мК (в будущем 20—30 мК)	Экспериментальные образцы матриц VLA для модульного тепловизора VLADIMIR (STAIRS B)
		512×256			
NEC, Япония [8]	Пироэлектрик	320×240	37	NETD=34—67 мК	

* См. примечание к табл. 1.

Микроболометрические матрицы изготавливаются обычно в комплекте с командно-контрольной электроникой. Основные функции электронного тракта (помимо генерации тактов и смещений, контроля термоэлектрического охладителя и внешнего управления): автоматический контроль усиления, одно- или двухточечная коррекция, представление изображений (реверсирование, псевдораскраска) и др.

Ожидается, что в ближайшие годы в связи с резким увеличением производства микроболо-

метрических матриц для тактических военных и гражданских применений их цена заметно уменьшится. В этом отношении представляет значительный интерес разработки фирмы Non-eywell (США), использовавшей кремниевую технологию и для изготовления корпусов для матричных микроболометров. Масса интегральной вакуумной упаковки всего 0,2 г, она существенно дешевле и обеспечивает увеличение процента выхода матриц при сборке [37].

В работе [38] описан изготавливаемый фирмой Indigo Systems Co. (США) тепловизор на базе микроболометрической матрицы форматом 160×120, имеющий размеры 3,6×3,3×3,0 см³, масса 102 г и мощность потребления менее 0,6 Вт. Фирма стремится довести стоимость этого прибора при серийном выпуске до 1000 дол. Несколько лет назад такие изделия невозможно было даже представить. Таким образом, создание неохлаждаемых матричных фокальных матриц для тактических систем — несомненно, революционный этап в инфракрасной технике.

В рекламных проспектах носимого тепловизора Sentinel (Raytheon Company, США), изготовленного на базе микроболометрической матрицы 320×240, сообщается, что при использовании объектива диаметром 100 мм дальность обнаружения танка близка к 2,8 км, а человека — 1,2 км [6].

В табл. 5 приведены основные параметры также широко используемых, в том числе и для коммерческой деятельности, неохлаждаемых

гибридных пироэлектрических матриц из тантала скандия-свинца — PST (фирмы BAE Systems Infrared Ltd, Великобритания) и титаната бария-стронция — BST (фирмы Raytheon Commercial Infrared, США).

Фирма Delft Sensor Systems (Нидерланды) продемонстрировала ночной бинокль LION на пироэлектрической матрице формата 512×256. Масса бинокля менее 2 кг.

Легкий прицел фирмы BAE Systems (США) обнаруживает человека на расстоянии 980 м при хороших условиях, а при падающем снеге — на 300 м [6]. Наконец, дальность обнаружения человека с помощью носимого тепловизора PalmIR 250 (фирма Raytheon Commercial Infrared, США) с пироэлектрической матрицей формата 320×240, установленной на термоэлектрическом охладителе, при диаметре объектива 75 мм, близка к 750 м [6, 12].

Приложение 1

Лидирующие фирмы в разработке и производстве инфракрасных фокальных матриц

(разработки и продукция фирм указаны в соответствии с содержанием таблиц)

Соединенные Штаты Америки

Raytheon Infrared Operations

75 Coromar Drive, Goleta, California, 93117 USA.

Tel. + 805 562 2888; Fax. + 805 562 2331.

Web site: <http://www.raytheon.com>

КРТ-матрицы с ВЗН (8—12 мкм) (3—5 мкм).

Смотрящие КРТ-матрицы (8—12 мкм) (3—5 мкм).

Микроболометрические матрицы (8—12 мкм).

Смотрящие InSb-матрицы (3—5 мкм).

Смотрящие Si:X-матрицы (Si:Ga с $\lambda_{cp} \sim 12$ мкм; Si:As с $\lambda_{cp} \sim 28$ мкм).

Raytheon Commercial infrared

Sensors and Electronic Systems.

PO Box 660246/MS 37, Dallas, TX, 75266 USA.

Tel. 1 800 990 3275 (USA); 972 344 4000 (Int.); Fax. 972/344 4000.

E-mail: infrared@raytheon.com

Web site: <http://www.raytheoninfrared.com>

Микроболометрические матрицы (8—12 мкм).

Пироэлектрические матрицы (8—12 мкм).

DRS Infrared Technologies

PO Box 740188, Dallas, TX 52104 or TX 75374, USA.

Tel. +877 377 4783; Fax. + 877 344 3574.

Web site: www.drs.com

КРТ-матрицы с ВЗН (8—12 мкм).

Смотрящие КРТ-матрицы (8—12 мкм) (3—5 мкм).

Микроболометрические матрицы (8—12 мкм).

DRS Technologies / Electro-Optical Systems Group

(в 2001 г. приобрела бизнес по сенсорам и электронным системам фирмы Boeing Co., США).

2330 Commerce Park Dr. NE Ste 2, Palm Bay, FL 32905 USA.

Tel. 321/308-4804; Fax. 321/956-0126.

E-mail: marketing@drseosg.com; Web site: www.drs.com

Микроболометрические матрицы (8–12 мкм).

BAE Systems, Information & Electronic Warfare Systems

(взяла под контроль **Lockheed Martin IR Imaging Systems**).

2 Forbes Rd, Lexington, MA, 02421-7306, USA.

Tel. 781/863-4150; Fax. 781/ 863-4193.

Web site: <http://www.baesystems.com>

Смотрящие KPT-матрицы (8–12 мкм).

Смотрящие QWIP-матрицы (8–12 мкм).

Микроболометрические матрицы (8–12 мкм).

BAE Systems / Cincinnati Electronic Corporation, Infra-Red Product Division.

(с 2002 г. CMC Electronics Cincinnati, Infrared Products).

7500 Innovation Wey, Mason, Cincinnati, OH, 45040-69699 USA.

Toll Free: 1-800-852-5105; Fax. 513-573-6290.

Web site: <http://www.cmccinci.com>

Смотрящие InSb-матрицы (3–5 мкм).

Rockwell Science Center (с 2002 г. Rockwell Scientific)

1049 Camino Dos Rios, Thousand Oaks, CA 91360 USA.

Tel. 805/373-4025; Fax. + 805 373 4687.

Web site: <http://rsc.rockwell.com>

Смотрящие KPT-матрицы (8–12 мкм) (3–5 мкм) (1–3 мкм).

Rockwell Scientific, Imaging Division

5112 Verdugo Way, Camarillo, CA, 93012 USA.

Tel. 805/373-4025; Fax. 805/373-4974.

E-mail: wweissbard@rws.com; Web site: www.rsc.rockwell.com

Смотрящие KPT-матрицы (8–12 мкм) (3–5 мкм) (1–3 мкм).

QWIP Technologies (QWIPTECH)

2400 Lincoln Ave., Ste. 217, Altadena, CA 91001 USA.

Tel. + 626 296 6432; Fax. + 626 296 6442.

Web site: <http://www.qwip.com>

Работает совместно с Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.

Смотрящие QWIP-матрицы (8–12 мкм).

Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology,

4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA, 91109 USA.

sarath.d.gunapala@jpl.nasa.gov

Смотрящие QWIP-матрицы (8–12 мкм).

Litton Electro-Optical Systems, Infrared Product Group

1215, 52nd Street, Tempe, Arizona 85281 USA.

Tel. (602) 968-44-71; Fax. (602) 966-90-55.

Смотрящие InSb-матрицы (3–5 мкм).

Смотрящие PbS-матрицы (1–3 мкм).

Sensors Unlimited, Inc.

3490 US Route 1, Bldg 12V, Princeton, NY 08540-5914 USA.

Tel. + 609 520 0810, Fax. + 609 520 1663.

E-mail: careers@sensors.inc.com; Web site: <http://www.sensorsinc.com>

Смотрящие InGaAs-матрицы (1–2,2 мкм).

Boeing Company

(в 2001 г. продала свой бизнес по сенсорам и электронным системам фирме DRS Technologies, США).

3370 Miraloma Ave. P.O. Box 3105 Anaheim, CA 92803 USA.

Tel. +714 762 0723; Fax. 714/762-14-93.

Web site: www.boeing.com

Микроболометрические матрицы (8–12 мкм).

Смотрящие KPT-матрицы (3–5 мкм).

Смотрящие PtSi-матрицы (3–5 мкм).

Смотрящие Si:X-матрицы (Si:As с $\lambda_{\text{эр}} \sim 28$ мкм; Si:Sb с $\lambda_{\text{эр}} \sim 40$ мкм).

Santa Barbara Focalplane

346 Bollay Drive, Goleta, CA 93117 USA.

Tel. + 805/571-2300; Fax. + 805/562 8993.

E-mail: sbfp@sbfp.com; Web site: <http://www.sbfp.com>

Смотрящие InSb-матрицы (3–5 мкм).

Lockheed Martin IR Imaging Systems

(перешла под контроль BAE Systems).

2 Forbes Road Lexington MA, 02421 USA.

Tel. + 781 863 3613; Fax. + 781 863 3496.

Web site: <http://www.lmco.com/lmiris>

Смотрящие KPT-матрицы (8–12 мкм).

Sarnoff Corporation

CN 5300 Princeton, NY 08543 USA.

Tel. + 609 734 2553, Fax. + 609 734 2443.

Web site: <http://sarnoff.com>

Смотрящие PtSi-матрицы (3–5 мкм).

Великобритания**BAE Systems, Avionics Group**

(ранее GEC Marconi InfraRed Limited – GMIRL).

P.O. Box 217 Millbrook Industrial Estate,

Southampton Hampshire, UK, S015 0EG.

Tel: + 44 23 80 702300; Fax + 44 23 80 316777.

E-mail: infrared.sales@gecm.com

QWIP-матрицы разрабатываются совместно с Laboratoire Centrale des Recherches – LCR (THALES, ранее Thomson-CSF), (Domaine de Corbeville F-91404 Orsay Cedex, France).

KPT-матрицы с ВЗН (8–12 мкм) (3–5 мкм).

Смотрящие KPT-матрицы (3–5 мкм).

Смотрящие QWIP-матрицы (8–12 мкм).

Пирозлектрические матрицы (8–12 мкм).

Смотрящие InSb-матрицы (3–5 мкм).

Франция**SOFRADIR**

43-47, rue Camille Pelletan, F-92290 Chatenay-Malabry, France.

Tel. + 33 1 46 61 45 30, Fax. + 33 1 46 61 58 84.

E-mail: sofradir@sofradir.com; Web site: <http://www.sofradir.com>

Внедряет разработки по KPT LETI/CEA G. DOPT/Laboratoire InfraRouge – LIR

(17, rue des Martirs, 38054, Grenoble, Cedex, France).

Внедряет разработки QWIP- и микроболометрических матриц Laboratoire Centrale des Recherches –

LCR (THALES, ранее Thomson-CSF), (Domaine de Corbeville F-91404 Orsay Cedex, France).

КРТ-матрицы с ВЗН (8–12 мкм) (3–5 мкм).

Смотрящие КРТ-матрицы (8–12 мкм) (3–5 мкм) (1–3 мкм).

Смотрящие QWIP-матрицы (8–12 мкм).

Микроболометрические матрицы (8–12 мкм).

Германия

AEG Infrarot-Module GmbH (AIM)

Theresienstr. 2, D-74072, Heilbronn, Germany.

Tel. + 49 7131 6212 24; Fax. + 49 7131 178291.

QWIP-матрицы делает совместно с Fraunhofer Institute Angewandte Festkorperphysik.

КРТ-матрицы с ВЗН (8–12 мкм).

Смотрящие КРТ-матрицы (8–12 мкм) (3–5 мкм).

Смотрящие QWIP-матрицы (8–12 мкм).

Смотрящие PtSi-матрицы (3–5 мкм).

Израиль

SCD – Semi Conductor Devices (SCD)

PO Box 2250, Haifa 31021 Israel.

Tel. + 972 4 990 2535, Fax. + 972 4 990 2627.

E-mail: mrking@scd.co.il; Web site: <http://www.scd.co.il>

КРТ-матрицы с ВЗН (8–12 мкм).

Смотрящие InSb-матрицы (3–5 мкм).

Смотрящие Si:X-матрицы (Si:As с $\lambda_{зр} \sim 28$ мкм).

Япония

Mitsubishi Electric Corporation (MELCO)

Advanced Technology R & D Center.

4-1, Mizuhara, Itami, Hyogo, 664-8641, Japan.

Микроболометрические матрицы (8–12 мкм).

Смотрящие PtSi-матрицы (3–5 мкм).

NEC Corporation

1120 Shimikurawa, Sagamihara, Kanagawa 229-1198, Japan.

Пирозлектрические матрицы (8–12 мкм).

Fujitsu Laboratories Ltd

10-1 Morinosata-Wakamiya, Atsugi 243-0197 Japan.

КРТ-матрицы с ВЗН (8–12 мкм).

Nikon Corporation

6-3, Nishi-ohi-1-chome

Shinagawa-ku, Tokyo, 140-8601, Japan.

Tel. +8 135 742 1821; Telefax +8 135 742 1825.

E-mail: tokki.bou@nikon.co.jp; Web site: <http://www.nikon.co.jp>

Смотрящие PtSi-матрицы.

Список использованных сокращений

- AR — Antireflection (coating) — антиотражающее покрытие.
 BDI — Balanced Differential Input — сбалансированный дифференциальный вход.
 BIB — Blocked Impurity Band — блокированная примесная зона.
 BST — Barium Strontium Titanate — титанат бария-стронция.
 CTIA — Capacitor Transimpedance Amplifier — емкостной трансимпедансный усилитель.
 DWDM — Dense Wavelength Division Multiplexing — мультиплексирование с разделением высокой плотности длин волн.
 FPA — Focal Plane Array — фокальная матрица.
 HDIR — High Density InfraRed — инфракрасные структуры высокой плотности.
 HDVIP — High Density Via Interconnect Process — процесс соединения структур высокой плотности.
 IBC — Impurity Band Conductivity — проводимость по примесной зоне.
 IDA — Integrated Detector Assembly — интегральная сборка фотоприемника.
 IDCA — Integrated Detector Cooler Assembly — интегральная сборка фотоприемник/охладитель.
 IDCCA — Integrated Detector Dewar Cooler Assembly — интегральная сборка фотоприемник в дьюаре/охладитель.
 LWIR — Long Wavelength InfraRed — длинноволновый ИК-диапазон (8–12 мкм).
 MWIR — Mid Wavelength InfraRed — средневолновый ИК-диапазон (3–5 мкм).
 NETD — Noise Equivalent Temperature Difference — эквивалентная шуму разность температур.
 PST — Plumbum (Lead) Scandium Tantalate — танталат свинца-скандия.
 QWIP — Quantum Well Photodetectors — фотоприемники с квантовыми ямами.
 ROIC — Readout Integrated Circuits — считывающие интегральные схемы.
 SADA — Standard Advanced Dewar Assembly — стандартная перспективная (интегральная) сборка в дьюаре.
 SIM — Standard Imaging Module — стандартный тепловизионный модуль.
 SWIR — Short Wavelength InfraRed — коротковолновый ИК-диапазон (1–3 мкм).
 VIP — Vertically Integrated Photodiode — фотодиод с вертикальной интеграцией.
 VISMIR — Visible through Midwavelength InfraRed — спектральный диапазон — от видимого до средневолнового ИК-излучения.
 VLA — Very Large Array — матрица с высокой плотностью элементов.
 VLADIMIR — Very Large Array Demonstration Imager for InfraRed — демонстрационный тепловизор на матрице с высокой плотностью элементов.

Литература

1. Photonics Spectra, 2001. V. 35. № 2. P. 70.
2. Terre W., Frank J. D., Fitzgibbons T., Heath J. L. // Proc. SPIE, V. 4130. P. 263–270.
3. MacCarthy D. C. // Photonics Spectra, 2001. V. 35. № 4. P. 78–84.
4. Pengelley R., Hewish M. // Jane's IDR, 2001. № 10. P. 49–57.
5. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. // Proc. SPIE, 2001. V. 4369. P. 94–105.
6. Рекламные проспекты зарубежных фирм, 1997–2002.
7. Kinch M. A. // Proc. SPIE, 2001. V. 4369. P. 566–578.
8. Brown D., Daniel B., Horikiri T., King P., Nelson D. M., Small M. // Ibid. 2001. P. 419–426.
9. Manissadjian, Tribolet P. M., Chorier P., Costu P. // Proc. SPIE. 2000. V. 4130. P. 480–495.
10. Damkohler R., Eberhardt K., Oelmaler R., Wendler C. J., Ziegler J. // Ibid. V. 4028. P. 192–207.
11. Jane's Electro-Optic Systems, 2000–2001.
12. Aerosense Exhibit Guide, 25–27 April 2000, Orlando, USA.
13. Rosenfeld D. // Proc. SPIE, 2001. V. 4369. P. 467–474.
14. Kobayashi M., Wada H., Okamura T., Kudo J., Tanikawa K., Kihida S., Miyamoto Y., Miyazaki S., Yoshida Y. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 441–449.
15. Tribolet P. M., Chatard J. P. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 422–440.
16. Goldberg A. C., Kennerly S. W., Little J. W., Pollehn H. K., Shafer T. A., Mears C. L., Schaake H. F., Winn M. L., Taylor M. F., Uppal P. N. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 532–546.
17. Technical Program of SPIE's 16th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls, 1–5 April 2002. P. 48, 49.
18. Sundaram M., Wang S. C. // Proc. SPIE. V. 4028. P. 311–317.
19. Gunapala S. D., Kukkonen C. A., Sirangelo M. N., McQuiston B. K., Chehayev R., Kaufmann M. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 498–505.
20. Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K., Rafol S. B., Mumolo J. M., Reiningger F. M., Fastenau J. M., Liu A. K. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 516–523.
21. Costard E., Bois P. F., Marcader X., Herniou E., Manis-saadjan A., Tribolet P. M. // Ibid. P. 506–515.
22. Cabanski W., Breiter R., Koch R., Mauk K. H., Rode W., Ziegler J., Schneider H., Walther M., Oelmaier R. // Ibid. P. 547–558.
23. Bandara S. V., Gunapala S. D., Liu J. K., Rafol S. B., Ting D. Z., Mumolo J. M., Reiningger F. M., Fastenau J. M., Liu A. K. // Ibid. P. 30–39.
24. Riedl G., Assel M., Fendt A., Hetzer W., Keller E., Kilger F., Kuligk T., Popp L., Proels R., Schweyer N. // Ibid. V. 4369. P. 201–209.

25. Anderson J., Kostrzewa T., Cook L., Baker G., Radford W., Jack M., Finch A., Kennedy A., Kojiro J., Murphy D., Ray M., Wyles R. // Ibid. P. 14–24.
26. Horn S., Lohrmann D., Cambell J., Perconti P. // Ibid. P. 210–221.
27. Murhhy D., Ray M., Wyles R., Asbrock J., Lum N. A., Kennedy A., Wyles J., Hewitt C., Graham G. E., Radford W. A., Anderson J. S., Bradley D., Chin R., Kostrzewa T. // Ibid. P. 222–234.
28. Anderson J. S., Bradley D., Chen C. W., Chin R., Jurgelewicz K., Radford W. A., Kennedy A., Murphy D. F., Ray M., Wyles R., Brown J. C., Newsome G. W. // Ibid. P. 559–565.
29. Murphy D. F., Ray M., Wyles R., Asbrock J. F., Lum N. A., Kennedy A., Wyles J., Hewitt C., Graham G. E., Horikiri T., Anderson J. S., Bradley D., Chin R., Kostrzewa T. // Ibid. V. 4454. P. 147–159.
30. Gurnee M. N., Kohin M., Blackwell R., Butler N., Whitwam J., Backer B., Leary A., Nielson T. // Ibid. V. 4369. P. 287–296.
31. Howard P. E., Clarke J. E., Bradley M. G., Ionescu A. C., Li C. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 168–174.
32. Mottin E., Martin J. L., Ouvriver-Buffer J. L., Vilain M., Bain A., Yon J. J., Tissot J. L. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 250–256.
33. Wada H., Sone T., Hata H., Nakaki Y., Kaneda O., Ohta Y., Ueno M., Kimata M. // Ibid. P. 297–304.
34. Kimata M., Yagi H., Ueno M., Nakanashi J., Ishikawa T., Nakaki Y., Kawai M., Endo K., Kosasayama Y., Ohota Y., Sugino T., Sone T. // Ibid. V. 4288. P. 286–297.
35. Cochrane D. M. T., Manning P. A., Wyllie T. A. // Ibid. V. 4369. P. 168–177.
36. Rogalsky A. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 307–322.
37. Cole B. E., Higashi R. E., Ridley A., Wood R. A. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 235–239.
38. Graff J. H., Meyer W. H., Heldner K. E. // Ibid. P. 713–720.
39. Coutris J. F., Dupoux T., Lonnoy J. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 568–576.
40. Jane's Electro-Optical Systems, 1996–1997.
41. Breiter R., Cabanski W. A., Ziegler J., Walthner M., Schneider H. // Ibid. 2000. V. 4020. P. 257–266.
42. Murphy P. F., Jost S. R., Barrett J. L., Reese D., Winn M. L. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 355–359.
43. Alchalabi K., Zimin D., Zogg H., Buttler W. // Ibid. P. 405–411.
44. Cabelli C. A., Cooper D. E., Haas A., Koslowski L. J., Bostrup G., Chen A. C., Blackwell J. D., Montroy J. T., Vural K., Kleinans W. E., Hodapp K. W., Hall D. // Ibid. 2000. V. 4028. P. 331–342.
45. Chorier P., Tribolet P. M. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 698–712.
46. Tiphene D. et al. // Ibid. V. 4130. P. 515–524.
47. SMI's Night Vision 99 Conference (3–4 March 1999).
48. Aerosense Exhibit Guide, 2–4 April 2002, Orlando, USA.
49. Независимое военное обозрение, 2000. № 31. С. 6.
50. Kleinfelder S., Hottes A., Pease R. F. W. // Proc. SPIE, 2000. V. 4028. P. 139–147.

Infra-red focal plane arrays: state-of-the-art and development trends

A. M. Filachev, V. P. Ponomarenko, I. I. Taubkin, M. B. Ushakova
State Unitary Enterprise «RD&P Center "Orion"», Moscow, Russia

Development and production of state-of-the-art IR focal plane arrays (FPA) in leading foreign countries are analyzed. Cadmium-mercury-telluride (CMT) FPA are discussed for near, middle and long infra-red (IR) ranges including those ones operating in the time delay and integration (TDI) mode; FPA of indium antimonide, platinum silicide, lead selenide and telluride; quantum well infra-red photodetectos (QWIP) based on heterostructures of gallium arsenide/gallium-aluminum arsenide; uncooled FPA — microbolometric and pyroelectric; FPA of lead sulfide and indium-gallium arsenide; deep-cooled FPA of extrinsic silicon. Trends of further development of FPA for the thermal imaging systems of a new generation are discussed.