

# Фотоэлектроника

УДК 621.383.52:621.384.3

## Инфракрасные матрицы и тенденции их развития\* Часть II

А. М. Филачев, В. П. Пономаренко, И. И. Таубкин, М. Б. Ушакова  
Государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"» — ГНЦ РФ, 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. Представлены тенденции дальнейшего развития инфракрасных фокальных матриц для тепловизионной техники нового поколения.*

### Смотрящие матрицы на основе InSb, KPT, PtSi, PbSe и PbTe для спектрального диапазона 3—5 мкм

Фотоприемные матрицы, чувствительные в спектральном диапазоне 3—5 мкм, имеют преимущества при использовании для тепловидения в странах с жарким и влажным климатом. Несмотря на помехи от подсвеченных солнцем объектов, они предпочтительнее при обнаружении воздушных целей. Так, переход в коротковолновый диапазон обеспечивает при тех же относительных входных зрачках объектива возможность использования меньших фоточувствительных площадок, т. е. уменьшение геометрических размеров оптико-электронной аппара-

туры, а также повышение дальности опознавания объектов [1].

В табл. 1 [2—4] приведены сведения по матричным фотоприемным устройствам из антимонида индия, чувствительным в спектральном диапазоне до 5,5 мкм. Необходимо отметить хорошую чувствительность (10—15 мК) матриц из антимонида индия, мало изменяющуюся в пределах их спектрального диапазона, малую неоднородность элементов до коррекции (менее 10—5 %) и малое количество неработающих каналов (менее 1—0,5 % при формате 640×480). В работе [2] отмечается, что до настоящего времени антимонид индия предпочтительнее для создания фокальных матриц для диапазона 3—5 мкм с большим форматом.

Таблица 1

Смотрящие InSb-матрицы для спектрального диапазона 3—5 мкм

Фирма, страна	Формат (спектральный диапазон, мкм)	Размер элемента (шаг), мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Raytheon Infrared Operations, (RIO), США [4, 5]	128×128 (3—5)		$T = 80 \text{ K}; F < 120 \text{ Гц}$	AE-159. Поставлено более 2300 матриц
	256×256 (3—5)	30	NETD (80 K; $F/2$ ; 1 мс; 50 Гц) = 4 мК; $N_d = 2$ ; $f = 5 \text{ МГц}$ ; $\Delta < 5 \%$ ; $N_{op} = 99,5 \%$ ; $P = 40 \text{ мВт}$	AE 166, AE 173, AE 194. Имеется вариант для применения в космосе ( $T = 15 - 30 \text{ K}$ ). Поставлено более 1000 IDDCA 0,5 Вт (вместе с KPT)
	384×256 (3—5)	25	NETD (80 K; $F/3$ , <120 Гц) = 18 мК; $N_d = 2$ ; $f = 6,5 \text{ МГц}$ ; $\Delta < 5 \%$ ; $N_{op} = 99,5 \%$ ; $P = 75 \text{ мВт}$	AE 195 0,5 Вт
	512×512 (0,4—5,5)	25 27	NETD (80 K; $F/3$ ; 1,8 мс; <60 Гц) = 18 мК	AE 187. Имеется вариант для применения в космосе ( $T = 15 - 30 \text{ K}$ ). IDDCA 0,6 Вт
	640×480/512 (0,5—5,4)	20 25	NETD (80 K; $F/5,3$ ; 3,2 мс; 30—120 Гц) = 15—20 мК; $D = 70 \text{ дБ}$ ; $N_d = 4$ ; $f = 5 \text{ МГц}$ ; $N_{op} = 99 \%$ ; $P = 75 \text{ мВт}$	AE 197. Поставлено более 200 IDDCA 1 Вт (вместе с KPT)
	1024×1024 (0,6—5,0)	27	NETD (80 K; 13 Гц) = 35 мК; $N_d = 32$ ; $\Delta = 8 \%$ ; $Q > 0,7$ ; $N_{op} = 99 \%$	Матрица VISMIR. Вход с нетоковым повторителем. Подготовлено производство

\* Часть I данной статьи опубликована в журнале "Прикладная физика" № 1 за 2003 г.

105-120

Фирма, страна	Формат (спектральный диапазон, мкм)	Размер элемента (шаг), мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Santa Barbara Focalplane/ Lockheed Martin, США [3]	128×128 (3-5)	60	$T=80$ К; $f=1-10$ кГц; $N_a=1, 2, 4, 32$ ; $P=50-250$ мВт	Марки SBF 133, 136
	256×256 (3-5)	30	$T=80$ К; $f=60-140$ Гц; $N_a=1, 2$ ; $P=20-25$ мВт	Марки SBF 134, 135
	320×256 (0,4-5,35 без AR) (1,0-5,35 с AR)	30	NETD (80 К; $F/1,5$ ; 60 Гц) = 7-18 мК; $D=80$ дБ; $N_a=1, 2, 4$ ; $N_{op}=99,5$ %; $\Delta=\pm 20$ %; $P=30-130$ мВт; $\tau$ от 0,7 до 99 % от времени кадра; $F=1$ кГц (128×128); $F=400$ Гц (320×256)	Марки SBF 124, 125, 167. Выделение фрагментов от 128×8 до 320×256. Работоспособность до 150 К
	640×512 (0,4-5,35 без AR) (1,0-5,35 с AR)	24 (20)	NETD (80 К; $F/1,5$ ; 60 Гц) = 8-20 мК; $D=77$ дБ; $N_a=1, 2, 4$ ; $f=10$ МГц; $\Delta=\pm 20$ %; $N_{op}=99,5$ %; $P=30-105$ мВт; $\tau$ от 0,7 до 99 % от времени кадра; $F=1$ кГц (128×128); $F=120$ Гц (640×512)	Марки SBF 162, 119, 141. Выделение фрагментов от 128×8. Работоспособность до 150 К
	1280×1024 (3-5)	24	$T=80$ К; $F=60$ Гц; $N_a=2, 4, 8$ ; $P=120$ мВт	Марка SBF 126. Выделение фрагментов от 128×8
BAE Systems, Avionics Infrared, Великобритания [2, 5]	320×256 (3-5)	30	NETD (80 К; $F/2$ ) = 10 мК; $N_a=4$ ; $f=5$ МГц; $\Delta=10$ %; $N_{op}=99$ %; $P=50$ мВт	IDCSA (600 г) $W=8$ Вт (в стационарном режиме)
	1024×768 (3-5)	26		Разработка
Cincinnati Electronic Corporation (с 2001 г. CMC Electronics Cincinnati), США [2]	320×240/256 (3-5)		NETD (80 К; $F/2$ )=5-6 мК	
	640×480/512 (3-5)			
Litton Electro-Optical Systems, США [3]	256×256 (3,4-4,95 с холодным фильтром) (3-5,5 с AR)	30×30	$D^*$ (80 К; $F/2,3$ ; 1 мс) $>4 \cdot 10^{11}$ Jones; $D>72$ дБ; $N_a=4, 8, 16, 32$ ; $f=5$ МГц; $\Delta<8$ %; $Q>0,6$ ; $N_{op}>99$ %; $P=8$ мВт + 7,5 мВт/выход	Матрица M2135-256. Используется режим snapshot. Любой размер и расположение фрагментов
SCD (Semiconductor Devices), Израиль [3]	128×128 (3-5)	40	$T=80$ К; $\tau=0,2$ мкс; $\Delta<5$ %; $Q>0,9$ ; $N_{op}>99$ %	Матрица FPA-M-100. Охлаждители — интегральный Стирлинга, Джоуля-Томсона
	320×256 (1-5,45)	30	NETD (80 К; 400 Гц) $<17$ мК; $N_a=1, 2, 4$ или 8; $f=5$ МГц; $\Delta<5$ %; $Q=0,75$ ; $N_{op}>99,5$ %; $\tau$ меняется в пределах от 0,2 мкс до разницы между временем кадра и временем считывания; $f<400$ Гц (320×256); $f<2000$ Гц (128×128)	Матрица FPA-M-200, BF2. Используется режим snapshot
	640×512 (1-5,45)	(25) (20)	$T=80$ К; $F=30-107$ Гц; $D>72$ дБ; $N_a=1, 2$ или 4; $F=10$ МГц; $N_{op}>99,5$ %; $P=90-180$ мВт; $F=30$ Гц ( $N_a=1$ ); $F=58$ Гц ( $N_a=2$ ); $F=107$ Гц ( $N_a=4$ )	IDCSA FLAMINGO. Мультиплееры Indigo Systems 9803 и 9901. Охлаждитель Стирлинга-Стирлинга. АЦП

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;

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

$\Delta$  — 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;

$\tau$  — время накопления сигнала в элементе за время кадра (или собственная постоянная времени чувствительного элемента — в случае микролометрических матриц), мс или мкс;

P — выделяемая матрицей мощность, мВт;

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

$\lambda_{max}$  — длина волны в максимуме спектральной характеристики;

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

Охлаждаемые мультиплексоры, как и для предыдущих матриц, изготавливаются или самой фирмой (американская фирма Santa Barbara Focal Plane использовала для изготовления мультиплексоров КМОП-технологии с разрешением 0,8 мкм, а для формата 640×512 — с разрешением 0,5 мкм) или покупаются (израильская фирма SCD комплектует матрицы форматом 640×512 мультиплексорами S901 американской фирмы Indigo Systems).

Фотоприемники также поставляются в виде интегральной сборки, включающей специальный дьюар, состыкованный с холодильной машиной типа Сплит-Стирлинг, или интегральный Стирлинг, и командно-контрольную электронику.

Опубликованы сведения о разрабатываемых в SCD (Израиль) ВЗН-матрицах на основе антимонида индия с числом элементов в линейке 2000 и длиной ~50 мм [6].

В работах [3, 5, 7] сообщается, что легкий тепловизионный прибор MATIS фирмы SAGEM,

Франция (масса 2,0 кг, диаметр объектива 45 мм), изготовленный с использованием матриц на основе антимонида индия или КРТ, со спектральной чувствительностью в диапазоне 3—5 мкм, форматом 320×240 (384×256) и эквивалентной разностью температур 30 мК обеспечивает обнаружение танка на расстоянии более 9 км и опознавание на 3,5 км. Вместе с тем, приведенные в работе [2] для тепловизора OPAL, построенного на аналогичной матрице из антимонида индия формата 230×256, соответствующие дальности достигают уже 17 и 5 км (El-Op, Израиль, масса тепловизора 5,8 кг).

В табл. 2 [3—5, 8—10] приведены основные характеристики смотрящих КРТ-матриц для спектрального диапазона 3—5 мкм. Их выпуск значительно опережал до последних лет выпуск КРТ-матриц для спектрального диапазона 8—12 мкм.

Таблица 2

Смотрящие КРТ-матрицы для спектрального диапазона 3—5 мкм\*

Фирма, страна	Формат (спектр. диап., мкм)	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения	
DRS Infrared Technologies, США [3, 8, 11]	256×256 (3—5)	40	NETD (77 К; 120 Гц) = 8 мК; $D^*$ (500 К) = $5,5 \cdot 10^{10}$ Jones; $D = 74$ дБ; $N_a = 2$ ; $Q = 0,6$ ; $N_{оп} = 98$ %	IDDCА с командно-контрольной электроникой	HDTVITM — технология; вход ROIC-BDI
	640×480 (3—5)	25	NETD (77 К; 60 Гц) = 10 мК; $D^*$ (500 К) = $4 \cdot 10^{10}$ Jones; $D = 74$ дБ; $N_a = 4$ ; $Q = 0,6$ ; $N_{оп} = 98$ %	IDDCА с командно-контрольной электроникой	
	(3,4—4,2) 320×240 (4,2—5,2)	50	NETD (77 К; F/3; 60 Гц) = 8 мК / 8 мК; $\Delta = 4,3 / 3,7$ %; $Q = 0,58/0,58$ ; $N_{оп} = 93,4 / 99,6$ %	IDDCА с командно-контрольной электроникой	
Raytheon Infrared Operations (RIO), США [4, 5]	128×128 ( $\lambda_{оп} > 4,5$ )	50	NETD (F/1,6; 1 мс; < 120 Гц) = 50 мК; $N_{оп} = 99$ %	ТЭО	CdHgTe/Si. Поставлено более 200 матриц (вместе с InSb-матрицами)
	256×256 ( $\lambda_{оп} > 4,5$ )	30	NETD (F/1,6; 1 мс; < 100 Гц) = 65 мК; $N_{оп} = 99$ %		
	640×480 (3—5)	20		IDDCА. Использование фрагментов 320×240 и 256×256	
	320×256 (3,7—4,8)	30	NETD (< 120 К; F/2; 150 Гц) = 8 мК; $N_a = 1-4$	IDDCА	
	640×480 (3,7—4,8)	25 (20)	NETD (< 120 К; F/4; 70 Гц) = 15 мК; $N_{оп} = 99,8$ %	IDDCА	
Boeing, США [3]	256×256 (3,2—4,7)	40	$D^*$ ( $\lambda_{max}$ ) = $4 \cdot 10^{11}$ при $T = 95$ К; $\Delta < 10$ %; $Q = 0,6$ ; $N_a = 1$ ( $T < 120$ К)	IDCA TCM 2000 с командно-контрольной электроникой	Работоспособность до 120 К
	320×240 (3,4—4,8)	30	NETD (95 К; 60 Гц) = 8 мК; $N_a = 1$ ; $f = 5$ МГц; $\Delta < 6$ %; $Q > 0,6$ ; $N_{оп} > 98$ %	IDCA TCM 3000.	
	640×480 (3,4—4,8)	27	NETD (95 К) = 25 мК		
Rockwell Science Center (с 2001 г. Rockwell Scientific), США [3]	1024×1024 (0,9—5,0)	18,5	$T = 50$ К; $N_a = 1, 2$ или 16; $f = 100$ кГц или 5 МГц; $Q > 0,6$ ; $P < 1$ мВт. Специальный режим позволяет менять $f$ плавно от 100 кГц до 5 МГц	HAWAII-1RTM, CdHgTe/CdZnTe. Темновой ток при 50 К < 0,1 электрон/с. Шум считывания 3—10 электронов	
Sofradir, Франция [3, 9]	128×128 (3,7—4,8)	50	NETD (< 120 К; F/2; 120 Гц) = 7 мК	30 мК (280 Гц) с плоским охладителем Джоуля-Томсона. 110 мК (50 Гц) с ТЭО при $\Delta \lambda = 2,5-4,7$ мкм	IDDCА. Использование фрагментов 320×240 и 256×256
	320×256 (3,7—4,8)	30	NETD (< 120 К; F/2; 150 Гц) = 8 мК; $N_a = 1-4$	IDDCА.	
	640×480 (3,7—4,8)	25 (20)	NETD (< 120 К; F/4; 70 Гц) = 15 мК; $N_{оп} = 99,8$ %	IDDCА	
BAE Systems Infrared Ltd., Великобритания [5]	384×288 (3—5)	20	NETD (< 120 К) = 14 мК; $N_a = 4$ ; $f = 5$ МГц; $\Delta = 10$ %; $N_{оп} = 99$ %; $P = 60$ мВт	IDDCА OSPREY (600 г). $H^* = 5$ Вт (в стационарном режиме). Охладитель Стирлинга. Промышленная поставка с 1998 г.	

\* См. примечание к табл. 1.

Фирма, страна	Формат (спектр. диапазон, мкм)	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения	
AIM, Германия [3, 10]	128x128 (3-4,2)	40	NETD ( $F/1.5$ ; 1,2 мс; <400 Гц) = 15 мК; $N_n = 1$ ; $f = 9$ МГц	IDDCA SL 035	Охлаждитель Сплит-Стирлинг 1/3 Вт. Электронный блок смещений и тактов. АЦП 14 бит. W=30-35 Вт
	256x256 (3-5)	40	NETD ( $F/1.5$ ; 0,8 мс; <200 Гц) = 15 мК; $N_n = 2$ ; $f = 16$ МГц	IDDCA SL 100	
	384x288 (3-5)	24	NETD ( $F/2$ ; 1,0 мс; <100 Гц) <25 мК; $N_n = 2$ ; $f = 18$ МГц	IDDCA SL 035	
	640x512 (3-5)	24	NETD ( $F/1.5$ ; 2 мс; <100 Гц) = 18 мК; $N_n = 2$ (4); $f = 18$ (36) МГц	IDDCA SL 100	
	(3,4-4,0) 192x192 (4,2-5,0)	50	NETD ( $F/2$ ; 1,25 мс; 870 Гц) = 39 мК/25 мК; $N_n = 8$		Разработка

Эти изделия выгодно отличаются от фотоприемных устройств на основе антимонида индия рабочей температурой: без заметного ухудшения параметров рабочая температура матриц из КРТ на диапазон 3-5 мкм может быть поднята до 120 К.

Ряд фирм (Raytheon Infrared Operations — США, Sofradir — Франция и др.) выпускает фокальные КРТ-матрицы на диапазон 3-5 мкм с форматом 128x128, 320x240 и др. с термоэлектрическим четырехкаскадным охладителем и эквивалентной шуму разностью температур 30-60 мК [4].

При использовании более глубокого охлаждения фотоприемные устройства выпускаются в обычной комплектации: дьюар, охладитель Стирлинга (по договоренности), командно-контрольная электроника.

Сотрудники фирмы ORS Infrared Technologies опубликовали статью об изготовлении первых матричных двухцветных фотоприемных устройств на основе КРТ формата 320x240 на спектральные диапазоны 3,0-5,2 и 8,0-10,2 мкм. Такие матрицы собирались на ранее изготовленных мультиплексорах формата 640x480. Параметры образцов измерены при температуре,

обеспечивающей оптимизацию длинноволнового канала. Указывается, что двухдиапазонные матрицы необходимы для помехоустойчивых тепловых головок самонаведения и ряда других систем и обеспечивают селекцию объектов по их цветовой температуре [11].

В табл. 3 [3, 4, 12] включены сведения по разработкам КРТ-матриц с ВЗН для спектрального диапазона 3-5 мкм. Матрицы такого типа имеют значительно меньшее распространение, чем КРТ-матрицы ВЗН для диапазона 8-12 мкм, которые разрабатывались как новые отдельные модули 2-го поколения. Однако многие зарубежные фирмы в настоящее время объявляют в своих проспектах о наличии КРТ-матриц с ВЗН не только для 8-12 мкм, но и для 3-5 мкм. Очевидно в перспективе предполагается их применение в двухцветных системах, но в существующих системах предпочтение для 2-го канала оказывается матрицам на основе InSb [5].

В табл. 3 включена также матрица из КРТ формата 40x16, чувствительная в спектральном диапазоне 3-5 мкм и обеспечивающая суммирование сигналов по 16 пикселям. Фирма Raytheon уже изготовила более 6500 таких матриц [4, 12].

Таблица 3

КРТ-матрицы с ВЗН для спектрального диапазона 3-5 мкм\*

Фирма, страна	Формат (спектр. диапазон, мкм)	Размер элемента, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Raytheon Infrared Operations (RIO), США [4, 12]	40x16 (3-5)		Охлаждение ТЭО до 175 К	Поставлены фирмой SBRC/Hughes (с 1998 г. в Raytheon) более 6500 матриц. В производстве с 1994 г.
Sofradir, Франция [3]	288x4 (3-5)	28x25 (28x43)	NETD (>130 К) = 40 мК; $N_n = 16$ ; $\Delta = 3$ %; $N_{np} > 99$ %	ПЗС-мультиплексор. Охлаждитель Стирлинга CRYO400 (Франция) или K508 (Израиль). Франция. IDDCA (марки ID TM001 и ID TM001) <400 г. Находится в производстве
	288x6 (3-5)			КМОП-мультиплексор. Марка ID TM056.
	480x6 (3,7-4,7)	28x38	NETD (<120 К; $F/1.3$ ) = 38 мК. Более высокая однородность параметров, чем у ВЗН-матриц для 8-12 мкм	Охлаждитель Сплит-Стирлинг LS10-111 с линейным приводом от фирмы Cryotechnologies, Франция. IDDCA (марка ID TM056) <2,1 кг. Находится в производстве
BAE Systems, Великобритания [3]	192x2 (3-5)		NETD = 20 мК (тип.); $N_n = 8$	IDCA (Kestrel). Автоматическое устранение распыливания изображения
	288x2 (3-5)		NETD = 20 мК (тип.) $N_n = 8$	IDCA (Falcon). Автоматическое устранение распыливания изображения
	384x2 (3-5)		NETD = 20 мК (тип.) $N_n = 8$	IDCA (Kestrel II). Автоматическое устранение распыливания изображения

\* См. примечание к табл. 1.

Отметим, что фирма Sofradir, помимо ВЗН-матриц для диапазона 3—5 мкм, поставляет заказчикам и линейные КРТ-приемники для того же диапазона с числом элементов 1500 и общей длиной линейки около 50 мм.

Матричные фотоприемники на основе Шоттки-барьеров Si(Pt) имеют низкий квантовый выход  $\sim 1\%$ , уменьшающийся с увеличением длины волны, и критичны к рабочей температуре. Однако некоторое время назад они были весьма популярны в связи с относительной доступностью их кремниевой МОП-технологии, большими форматами и прекрасной однородностью параметров (неоднородность не более 0,2—1,0%). В настоящее время эти фотоприемники вытес-

няются матрицами из КРТ и антимонида индия, а также микроболометрическими матрицами. Тем не менее, данные, приведенные в табл. 4 [1, 3, 13—16], позволяют судить о высоком уровне параметров PtSi-матриц. В особенности следует отметить разработанную японской фирмой Nikon Corp. PtSi-матрицу большого формата (811×508) для систем очень высокого разрешения.

В табл. 4 приведены также сведения по матрицам на основе сульфида и теллурида свинца. PbSe-матрицы предназначены для недорогих тепловизионных систем военного назначения, матрицы на основе PbTe разработаны для экспериментальных целей.

Таблица 4

Смотрящие матрицы на основе PtSi, PbSe и PbTe для спектрального диапазона 3—5 мкм\*

Фирма, страна	Материал ФП	Формат (спектр. диапазон, мкм)	Размер элемента (шаг), мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Boeing, США [3]	PtSi	324x240 (1,0—5,0)	30	NETD (80 К; $F/1.5$ ; 16,5 мс; 60 Гц) < 60 мК; $N_a = 1$ ; $f = 4$ МГц; $\Delta = 4\%$ ; $N_{op} = 99,92\%$ ; $P < 50$ мВт; $\tau$ от 20 мкс до $> 99\%$ времени кадра	PtSi 3100. В производстве
Sarnoff Corporation, США [3]	PtSi	320x240 (1—5,5)	40	NETD (80 К; $F/1.4$ ; 33 мс; 60 Гц) < 80 мК; $D = 72$ дБ; $f = 6$ МГц	Антиблужинг. Двухточечная коррекция неоднородности. АЦП 12 бит. Автоматическое управление экспозицией. Выделение фрагментов
	PtSi	640x480 (1—5,5)	24	NETD (80 К; $F/1.66$ ; 33 мс; 30—300 Гц) < 100 мК	
AIM, Германия [1, 3, 14]	PtSi	256x256 (3—5)	24	NETD (80 К; $F/1.5$ ; 33 мс; 50 Гц) = 75 мК; $N_a = 1$ ; $f = 8$ МГц	IDCA SL035. Электронный блок с АЦП 14 бит. Охладитель Силит-Стирлинг 1/3 Вт. Общее потребление 30—35 Вт
	PtSi	640x486/512 (3—5)	24	NETD (80 К; $F/1.4$ ; 33 мс; 50 Гц) < 75 мК; $N_a = 1$ ; $f = 12$ МГц	IDCA SL100. Электронный блок с АЦП 14 бит. Охладитель Силит-Стирлинг 1 Вт. Общее потребление 30—35 Вт
Mitsubishi Electric Corporation, Япония [13]	PtSi	256x256 (1,2—5)	26x20	$N_a = 1$	Технологическая норма 0,8 мкм
	PtSi	512x512 (1,2—5)	26x20	NETD (80 К; $F/2$ ; 30 Гц) = 33—70 мК; $N_a = 1$	
	PtSi	801x512 (1,2—5)	17x20	NETD (80 К; $F/1,2$ ; 30 Гц) = 37 мК; $N_a = 1$ ; $\Delta = 0,3\%$	
	PtSi	1040x1040 (1,2—5)	17	NETD (80 К; $F/1,2$ ; 30 Гц) = 100 мК; $N_a = 1$	
Nikon Corporation, Япония [3]	PtSi	537x505 (3—5)		NETD (80 К; 30 Гц) < 200 мК	Охладитель Стирлинга
	PtSi	811x508		NETD (80 К; 30 Гц) < 90—150 мК	То же
New England Photo-conductor, США [3]	PbSe	128x128 (3—5)	50	$D^* > 3 \cdot 10^9$ Jones при $T < 253$ К (ТЭО). Матрица с мультиплексором	Сигнал в аналоговой и цифровой форме. Разработана технология изготовления
SenseArray, BAE Systems, США [15]	PbSe	160x160		$D^* = (1-2) \cdot 10^{10}$ Jones при $T = 273-295$ К; $\lambda_{np} = 4,4$ мкм; $\tau$ от 160 до 20 мкс	Разработаны КМОП-ROIC 160x160 с разрешением 0,5 мкм и молекулярно-лучевая технологии получения слоев PbSe
Swiss Federal Institute of Technology, Швейцария, Ingenieurbüro, Германия [16]	PbTe	128x96		$T = 95$ К; $Q = 0,6$	Молекулярно-лучевое наращивание PbTe через буферный слой CaF <sub>2</sub> на считывающий мультиплексор. Выход годных матриц более 97%

\* См. примечание к табл. 1.

**Смотрящие матрицы на основе КРТ, PbS и InGaAs для спектрального диапазона 1–3 мкм**

Сведения о матрицах, чувствительных в ближнем инфракрасном диапазоне 1–3 мкм на основе КРТ, PbS и соединения InGaAs, приведены в табл. 5 [3, 9, 12–17]. Этот спектральный диапазон используется в системах наведения и тепловизионной аппаратуре, астрономии, для неразрушающего контроля, спектроскопии и других целей.

Уникальные КРТ-матрицы рекордно большого формата (1024×1024 и 2048×2048) фирмы Rockwell Science Center (США) разработаны специально для космических астрономических исследований. На этой фирме для изготовления мультиплексоров использовали КМОП-технологии с разрешением 0,8 мкм, а с 1997 г. работают с разрешением 0,5 мкм. Фирма Sofradir (Франция) выпускает КРТ-матрицы формата 320×256 и 640×512 с термоэлектрическим охлаждением, в ближайшее время закончится разработка матрицы 1000×256.

Таблица 5

**Смотрящие матрицы на основе КРТ, PbS и InGaAs для спектрального диапазона 1–3 мкм\***

Фирма, страна	Материал ФП	Формат (спектр. диапазон, мкм)	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Rockwell Scientific, США [3, 18]	КРТ	1024×1024 (0,85–2,5)	18,5	$f > 1$ МГц; $Q = 0,6$ ; $P < 1$ мВт; $D^* (\lambda_{\text{max}}) = 1,2 \cdot 10^{11}$ Jones при 78 К и фоне $5 \cdot 10^9$ фотон·см <sup>2</sup> ·с	НАВАИ™ (HgCdTe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ). Темновой ток при 78 К < 0,03 электрон/с
	КРТ	2048×2048 (0,85–2,5)	18	$F = 0,25$ Гц; $Q = 0,6$ ; $N_a = 4$ ; $f = 1$ МГц; $F = 2$ Гц; $N_a = 32$ ; $P < 2$ мВт; $D^* (\lambda_{\text{max}}) = 1,2 \cdot 10^{11}$ Jones при 78 К и фоне $5 \cdot 10^9$ фотон·см <sup>2</sup> ·с	НАВАИ 2™ (HgCdTe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ). Темновой ток при 78 К < 0,03 электрон/с. Выходной усилитель с истоковым повторителем
Sofradir, Франция [9, 19, 20]	КРТ	320×256 (0,8–2,5)	30	NETD (190 К; $F/1$ : 10 мс; 50 Гц) = 40 мК	Корпус с ТЭО. Предполагалось изготовить в 2002 г. несколько сотен матриц
	КРТ	1000×256 (0,8–2,5)	30	$T = 140–200$ К; $P < 150$ мВт	Готовится к выпуску
Litton Electro-Optical Systems, США [3]	PbS	320×240 (1–3)	30	$D^*$ (300 К; 0,2 мс; 60 Гц) > $8 \cdot 10^{10}$ Jones; $D^*$ (220 К; 1 мс; 60 Гц) > $3 \cdot 10^{11}$ Jones; $D = 69$ дБ; $N_a = 2$ ; $f = 6,4$ МГц; $N_{\text{оп}} > 99$ %	Монолитная матрица, нанесенная на КМОП-мультиплексор. Используется режим snapshot
New England Photoconductor Corp., США [3]	PbS	128×128 (1–3)	50	$D^* > 8 \cdot 10^{10}$ Jones. $T$ до 253 К (ТЭО). Сигнал в аналоговой и цифровой форме	Матрица с мультиплексором. DC-режим, без модулятора. Разработана технология изготовления
SenseArray, США [15]	PbS	160×160 (1–3)		$D^*$ (295 К) = $(1–2) \cdot 10^{11}$ Jones. $\lambda_{\text{гр}} = 2,8$ мкм. $\tau$ от 160 мкс до 20 мкс	Разработаны КМОП-ROIC 160×160 0,5 мкм в коммерческом исполнении и молекулярно-лучевая технология получения слоев PbS. Окончание разработки матрицы — 2001 г.
Sensors Unlimited, США [3, 21] (Sensors-Demeter Components Group), США [22]	InGaAs	128×128 (1,0–1,6)	60	$D^*$ ( $\lambda_{\text{max}}$ ; 300 К) > $1,5 \cdot 10^{13}$ Jones; $Q > 0,7$ (1,0–1,6 мкм)	В 90-е гг. начал коммерческий выпуск матриц для портативных камер
	InGaAs	320×240/256 (0,9–1,65)	40	$D^*$ ( $\lambda_{\text{max}}$ ; 300 К) > $10^{13}$ Jones; $Q > 0,7$ (1,0–1,6 мкм); $N_{\text{оп}} > 98$ %	Вариант с $\lambda_{\text{гр}} = 2,2$ мкм
	InGaAs	320×240 (1,0–1,7)	40	$\lambda_{\text{гр}} = 1,7$ мкм; $T = 250$ К; $\tau = 10–25$ мс; $P < 100$ мВт; $D^* > 10^{12}$ Jones при $T = 300$ К	Стандартные гибридные матрицы по заказу DARPA
	InGaAs	640×480 (0,9–1,7)	25	$\lambda_{\text{гр}}$ от 1,7 до 2 мкм; $\tau = 10–25$ мс (16 различных времен накопления); $P < 100$ мВт; $D^* > 10^{12}$ Jones при $T = 300$ К	Разрабатывалась по программе SBIR. Работа от уровня низкой дневной освещенности вплоть до света звезды. Цифровой выход 14 бит
Raytheon Santa Barbara Research Center (с 2001 г. RIO), США [17]	InGaAs	640×480 (1,0–1,7)	12	$F = 30$ Гц; $N_a = 8$ ; $Q > 0,95$	Монолитная матрица, полученная наплавлением InGaAs на кремниевую ПЗС-матрицу. Предназначена для применения в ружейных прицелах

\* См. примечание к табл. 1.

PbS-матрицы выпускаются как малого (128×128 и 160×160), так и среднего формата (320×240). Матрицы предназначены для систем наведения и тепlopеленгации военного назначения. Для коммерческих целей используются более простые PbS-фоторезисторы.

Большой интерес представляют новые разработки матриц на основе InGaAs и камер на их основе. Недавно созданная фирма Sensors Unlimited (США) рекламирует несколько типов матриц на основе InGaAs, чувствительных в диапазоне 0,8—1,7 (2,2) мкм, формата 128×128, 320×240 и вплоть до 640×480. На выставке AeroSense-2002 была впервые показана камера с высоким разрешением на InGaAs-матрице формата 640×480 SUI 640-1.7RT. Эта же фирма выпускает линейки 1024×1 для DWDM.

Недорогие камеры на основе InGaAs-матриц различных форматов фирмы Sensors Unlimited используются для наблюдения днем в сложных условиях (например, сквозь туман), для научных исследований, в медицине, а также для обнаружения льда на крыльях самолетов в аэропортах,

для изучения произведений живописи и многих других целей.

Выпуском камер на основе InGaAs-матриц формата 320×240 занимается в последние годы известная американская фирма Indigo Systems: камеры Phoenix и Merlin на основе матриц формата 320×256 предназначены для анализа изображений и контроля оптического волокна, активных компонентов лазерных систем связи.

### Смотрящие матрицы на основе кремния с примесной фотопроводимостью

В табл. 6 [3, 5] приведены сведения о немногочисленных матричных фотоприемных устройствах из кремния, легированного галлием (область спектральной чувствительности до 12—14 мкм, рабочая температура 10—12 К), мышьяком (до 28 мкм, 2—14 К) и сурьмой (до 40 мкм). Эти матрицы в основном предназначены для астрономических исследований на космических станциях.

Таблица 6

Смотрящие матрицы на основе кремния с примесной фотопроводимостью ( $\lambda_{гр}$  ~ 12, 28 и 40 мкм)\*

Фирма, страна	Si:X	Формат. (спектр. диапазон, мкм)	Шаг, мкм	Основные параметры	Дополнительные сведения
Raytheon Infrared Operations (RIO), США [3, 5]	Si:Ga	128x128 (1—12)	50	$T = 10-12$ К; $F < 1000$ Гц	AE-188
	IBC Si:As	256x256 (1—28)	30	$T = 4-12$ К; $F = 1-20$ Гц; $N_n = 4$ ; $\Delta = 8$ %; $Q = 0.4$	Рассчитана на работу при высоких фонах
	IBC Si:As	320x240 (1—28)	50	$T = 4-10$ К; $F = 100-500$ Гц; $N_n = 16$ или 32; $\Delta < 8$ %; $N_{оп} > 99$ %; $Q = 0.4$	Рассчитана на значительные фоны. Выпускается вариант матрицы, рассчитанный на низкие фоны. Используется режим snapshot
	IBC Si:As	512x512			В разработке. Предназначены для применения при низких фонах
Boeing, США [3]	BIB Si:As	256x256 (2—28)	50	$T = 2-14$ К; $F = 1000$ Гц; $N_n = 16$ ; $\Delta < 3$ %; $N_{оп} > 98$ %; $P = 40$ мВт	Матрица HF16-256. На входе прямая инжекция. Для астрономии для работы при потоках от $2.4 \cdot 10^{15}$ до $2.7 \cdot 10^{14}$ фотон/см <sup>2</sup> ·с
	BIB Si:As	128x128 (2—28)	75	$T = 2-14$ К; $F = 4000$ Гц; $N_n = 16$ ; $\Delta < 3$ %; $N_{оп} > 98$ %; $P = 55$ мВт	Матрица HF16-128. На входе прямая инжекция. Для астрономии для работы при высоких фонах ( $\sim 3 \cdot 10^{15}$ фотон/см <sup>2</sup> ·с)
	BIB Si:Sb	(6—40)			Выпускаются
SCD (Semiconductor Devices), Израиль [3]	Si:As	256x256 (1—28)		$T = 4-10$ К	
		320x240 (1—28)			

\* См. примечание к табл. 1.

### Перспективные направления развития инфракрасных матриц

Инфракрасная техника, тепловидение и фотоэлектроника являются отраслями высоких "критических" технологий. Уровень их развития напрямую связан с экономическим потенциалом и обороноспособностью государства. В передовых странах фотоэлектроника, в значительной степени финансируемая из средств государственного бюджета, представляет собой динамично развивающуюся и окупаемую отрасль со значительным экспортным потенциалом и постоянно расширяющимся рынком.

Деятельность фотоэлектронных фирм находится в сфере интересов, а часто и происходит в составе ведущих мировых оборонно-экспортных компаний, таких как Lockheed Martin Corp. (США), Boeing Co. (США), BAE Systems (Англия), Raytheon Co. (США), Saab Group (Швейцария), Mitsubishi Electric Corp. (Япония), Hughes Electronics Corp. (США), Rockwell International Corp. (США), NEC Corp. (Япония), DRS Technologies Inc. (США) (порядковые номера 1—4, 22, 31, 46, 65 и 71 в списке ста ведущих оборонно-экспортных компаний мира) [23].

Постоянно происходят структурные преобразования. Только за последние годы отделение фирмы Texas Instruments в США, занимающееся фотоэлектроникой, перешло в состав DRS Technologies, а часть подразделений Rockwell — в состав Boeing Company. Создано объединение Raytheon Infrared Operations, включающее принадлежавшую прежде Hughes фирму Mahwah, отделение Defense Systems из фирмы Texas Instruments, Santa Barbara Research Center, Amber и ряд других подразделений Raytheon. Отделение фотоэлектроники фирмы Lockheed-Martin, некоторое время назад образованной в результате слияния фирм Martin-Marietta, Fairchild и части Honeywell, перешло под контроль BAE Systems. Под контроль BAE Systems попали также Cincinnati Electronic Corporation (США) и GEC-Marconi Infrared Limited (Англия). Недавно DRS Technologies приобрела Boeing's Sensors and Electronic Systems [2, 4].

Основная тенденция структурных преобразований — сосредоточение разработки и производства фотоэлектрических приборов в ограниченном числе крупных специализированных фирм. В США к таким наиболее значительным фирмам относятся DRS Infrared Technologies, Raytheon Infrared Operations, BAE Systems, Rockwell Science Center.

Практически все производство фотоприемных устройств в Великобритании уже сосредоточено в BAE Systems, во Франции — в Sofradir, в Германии — в AIM, в Израиле — в SCD.

Анализ научно-технической литературы и рекламных материалов фирм показывает также, что в разработку и оснащение своих вооруженных сил и промышленности тепловизионными приборами активно включились Япония, Китай, Турция, ЮАР, Австралия, Швеция, Польша и другие государства.

В приложении 1 приведены основные фирмы, лидирующие в мире по направлению инфракрасных фокальных матриц и их компонентов.

Приведенные в статье материалы свидетельствуют о том, что в развитии фотоэлектроники произошел качественный скачок — выработаны научные и технологические основы, выполнены разработки и внедрены в производство и оптико-электронную аппаратуру матричные инфракрасные фотоприемные устройства, обеспечившие создание тепловизоров нового поколения со значительно повышенными чувствительностью и пространственным разрешением. Основные усилия производителей матричных фотоприемных устройств направлены теперь на повышение надежности и ресурса, снижение себестоимости и энергопотребления матриц и комплектующих узлов и расширение объемов их производства.

Вместе с тем широким фронтом развернуты исследования по созданию матричных фотоприемных устройств третьего поколения. Облик этих изделий пока окончательно не сформировался. Исследования проводятся по многим направлениям, основные из которых перечислены ниже.

#### *Уменьшение размеров пикселя почти до дифракционных пределов*

Очевидно, что уменьшение размеров фоточувствительных площадок улучшает пространственное разрешение и дальность распознавания объектов с помощью оптико-электронной аппаратуры, позволяет существенно снизить габариты и стоимость самой аппаратуры или разместить большее количество пикселей на матрице того же размера.

В работе [8] сообщается, что DRS (США) ведет изготовление крупноформатных матриц из КРТ с шагом 20 мкм.

Главная цель программы совершенствования микроболометрических матриц — получение фотоприемных модулей формата 1280×960 с шагом 15 мкм и эквивалентной шуму разностью температур 10 мК [24]. Один из перспективных подходов для уменьшения пикселя в микроболометрах — создание двухуровневой теплоизоляции с удлиненными скрытыми ножками.

### Увеличение формата матриц до 1000×1000 или даже 2000×2000

Учитывая, что объем информации, снимаемой с ИК-матричного фотоприемного устройства при обычных фоновых условиях, прямо пропорционален только числу площадок, это направление совершенствования фотоприемных устройств представляется одним из важнейших. Наибольшие матрицы формата 2000×2000, чувствительные в коротковолновом диапазоне, с шагом 18,5 мкм изготавливает фирма Rockwell Science Center (США) для астрономических применений (см. табл. 5). Фирма RIO изготовила прототип фокальной матрицы из антимонида индия формата 1344×1344. Здесь же ведутся перспективные исследования по созданию матричных микроболометров формата 1280×1024 (из таблиц видно, что форматы 640×480/512 уже освоены RIO и ВАЕ, США). Как уже упоминалось, DRS ведет разработку длинноволновых матриц из КРТ формата 2000×2000 (шаг 20 мкм) [4, 8, 24, 25].

### Повышение рабочей температуры фокальных матриц

DRS уже изготовила из КРТ средневолновую матрицу формата 640×480, имеющую высокие параметры при 150 К [8].

Исследуются оптимизированные для работы при повышенной температуре фоточувствительные элементы из КРТ, представляющие собой *pin*-фотодиоды с минимальным объемом обедненной активной области и легированием, обеспечивающим уменьшение Оже-генерации в ней [26]. Ведутся работы по замене антимонида индия в средневолновой области на соединение индий-галлий-сурьма [6] с повышенной рабочей температурой. В результате оптимизации фотоприемных структур и использования в мультимикроскопе специальной схемы для контроля режимов слива фирма Sofradir (Франция) повысила рабочую температуру длинноволновой QWIP-матрицы до азотного уровня [27].

### Увеличение частоты кадров

Как отмечалось ранее, увеличение частоты кадров (помимо увеличения емкости потенциальной ямы в мультимикроскопе) является одним из главных резервов повышения параметров фокальных матриц. Определенные успехи имеются и в этом направлении: так фирмой АИМ (Германия) изготовлена фокальная матрица 256×256 (шаг 40 мкм), работающая с частотой кадров до 800 Гц и с максимальной частотой опроса

80 мегапикселей в секунду. При этом удалось сохранить хорошую эквивалентную шуму разность температур за кадр — 20 мК при  $F/2$  и времени накопления 1,25 мс [10].

### Улучшение чувствительности

Известно, что теоретический предел пороговой чувствительности инфракрасного фотоприемного устройства определяется дробовым шумом потока фоновых фотонов, падающих на фоточувствительный элемент в пределах его апертурного угла, и определяется соотношением:

$$NETD_r = \frac{NETD_r^*(\lambda)}{b \sin(\beta/2) \sqrt{\tau_i}},$$

где  $NETD_r^*(\lambda)$  — удельная величина, зависящая от спектрального диапазона чувствительности матрицы (для  $\lambda = 10-12$  мкм  $NETD_r^* \approx 10^{-7}$  К·см·с<sup>-1/2</sup>);  $b$  — шаг матрицы;  $\beta$  — угол поля зрения матрицы;  $\tau_i$  — время накопления в элементе матрицы за один кадр [25].

Пользуясь этим соотношением можно посчитать, что при  $b = 15$  мкм,  $\beta = 27^\circ$  (что соответствует объективу  $F/1$ ) и  $\tau_i = (1/30)$  с теоретический предел эквивалентной шуму разности температур составляет 0,37 мК.

Перспективная задача, решаемая разработчиками микроболометрических матриц, — достичь при шаге 15 мкм и поле зрения  $F/1$  чувствительности 10 мК [24]. Однако эта величина оказывается на полтора порядка ниже теоретического разрешенного предела.

Отметим, что у отработанных квантовых фотоприемников коэффициент шума составляет 2—3, поэтому для ИК-систем дальнего действия они остаются предпочтительнее.

### Создание двухдиапазонных матричных фотоприемных устройств

Как уже отмечалось, такие устройства обеспечивают измерение цветовой температуры объектов и выделение цели от фонов и помех в широком диапазоне атмосферных условий [17]. Общеизвестно, что двух- или многоцветность является обязательным качеством перспективных матричных инфракрасных фотоприемных устройств третьего поколения.

В качестве перспективной технологии для создания двухдиапазонных матриц часто называется QWIP-технология, обеспечивающая получение обеих фоточувствительных структур в едином процессе, а также возможность подгонки

диапазонов спектральной чувствительности и отсутствие перекрестных помех. Такие разработки успешно проводят в США — BAE Systems и Jet Propulsion Laboratory, в Германии — AIM и др.

Однако успешные работы по созданию двухцветных матриц выполнены и с использованием КРТ. Это матрицы фирм США — DRS Technologies и Германии — AIM (последняя изготовила двухцветный модуль формата 192×192 с шагом 56 мкм на диапазоны 3,4—4,0 и 4,2—5,2 мкм и эквивалентной шуму разностью температур по обоим каналам ~30 мК [10]) и ряд других (см. табл. 2 и 5\*). Окончательный выбор оптимальной технологии зависит от многих факторов: частоты кадров, рабочей температуры, особенностей применения и т. д.

#### *Расширение функциональных возможностей микроэлектронного тракта, включая мультиплексорный чип*

Это направление развития также является одним из важнейших. Уже сейчас на электронику часто возлагаются дополнительные функции типа автоматической регулировки времени накопления, варьирования усиления, динамического выделения фрагментов кадра, слива сигнала и др. Обсуждаются возможности реализации и таких функций, как динамический перенос изображения, опознавание и идентификация целей.

#### *Поиск принципиально новых технических решений и новых материалов*

Одним из наиболее интересных примеров такого рода является разработка для матриц КМОП-мультиплексора, обеспечивающего аналогово-цифровое преобразование и предварительную обработку фотосигналов в каждом элементе матрицы. Так в работе [28] описан прототип такого мультиплексора, изготовленный по КМОП-технологии с технологической нормой 0,35 мкм. При этом каждый пиксель размером 30×30 мкм включает 103 транзистора, формирующих 8-разрядный АЦП с 8-битной памятью, устройство для слива заряда и уменьшения фонового пьедестала и ЦАП с 16-битной памятью для подавления геометрического шума. Указывается, что такие мультиплексоры могут обеспечить увеличение частоты кадра до 1 кГц при уменьшении потребляемой мощности на 2—3 порядка.

\* См. часть I данной статьи в журнале "Прикладная физика" № 1, 2003.

#### *Несколько заключительных замечаний*

С появлением микрокриогенных систем, основанных на использовании обратного газодинамического цикла Стирлинга, с линейным приводом ресурс работы охлаждаемых фотоприемных устройств удалось поднять до 10 000 ч и более, что во многих случаях удовлетворяет требования оптико-электронной аппаратуры. В настоящее время микрокриогенные системы, укомплектованные электронными блоками управления, с холодопроизводительностью от десятых долей ватт до 1—2 Вт с линейным или вращательным приводом поставляются в составе фотоприемных устройств. Кроме того, фирмы США (Raytheon, DRS, BAE Systems (Cincinnati), Litton, Northrop Grumman), Великобритании (Humatic Engineering Company), Германии (AIM), Франции (Cryotechnologies), Израиля (Ricor) и других предлагают микрокриогенные системы в качестве комплектации.

Следует подчеркнуть, что гарантийный ресурс работы современных термоэлектрических охладителей близок к 40 000 ч.

Очевидно, что алгоритмическое и программное обеспечение, конструкции и характеристики микроэлектронных блоков фотоприемных устройств и тем более их элементная база (процессоры, память, аналого-цифровые преобразователи и др.) требуют отдельного рассмотрения.

#### **Заключение**

В развитии фотоэлектроники и тепловидения произошел качественный скачок, выразившийся в создании и промышленном освоении инфракрасных матричных фотоприемных устройств, работающих в режиме временной задержки с накоплением, и "смотрящих" фотоприемных устройств, по основным параметрам приближающихся к принципиальным физическим пределам и обеспечивших создание тепловизионной техники нового поколения со значительно улучшенными чувствительностью и пространственным разрешением.

Разработка и промышленное освоение охлаждаемых инфракрасных матричных фотоприемных устройств обеспечили решение многих тактических задач и привели к началу массового выпуска тепловизионной техники для военных и гражданских целей.

Современные матричные фотоприемные устройства представляют собой комплексные изделия, включающие, как правило, блок фоточувствительных элементов, кремниевый мультиплексор, вакуумный корпус, микрокриогенную систему (или термоэлектрический охладитель) с системой управления и микроэлектронные бло-

ки (вторичные источники питания, генераторы тактовых последовательностей и платы первичной обработки информации).

Основные направления создания следующего поколения инфракрасных матричных фотоприемных устройств: уменьшение размеров пикселя и увеличение формата матриц и частоты кадров,

разработка двух- и многодиапазонных матриц, расширение функциональных возможностей микроэлектронных блоков.

В передовых странах происходит концентрация разработки и производства инфракрасных матричных фотоприемных устройств в ограниченном числе мощных фотоэлектронных фирм.

## Приложение 1

### Лидирующие фирмы в разработке и производстве инфракрасных фокальных матриц

(разработки и продукция фирм указаны в соответствии с содержанием табл. 1—6)

#### 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  $\lambda_{zp} \sim 12$  мкм; Si:As с  $\lambda_{zp} \sim 28$  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](mailto:infrared@raytheon.com)

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

*Микроболометрические матрицы (8—12 мкм).*

*Пирозлектрические 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](http://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](mailto:marketing@drseosg.com); Web site: [www.drs.com](http://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, 45040-6969 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 VerdugoWay, Camarillo, CA, 93012 USA.  
Tel. 805/373-4025; Fax. 805/373-4974.  
E-mail: [wweissbard@rws.com](mailto:wweissbard@rws.com); Web site: [www.rsc.rockwell.com](http://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](mailto:sarath.d.gunapala@jpl.nasa.gov)  
*Смотрящие QWIP-матрицы (8–12 мкм).*

**Litton Electro-Optical Systems, Infrared Product Group**  
1215, 52<sup>nd</sup> 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](mailto: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](http://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  $\lambda_{эр} \sim 28$  мкм; Si:Sb с  $\lambda_{эр} \sim 40$  мкм).*

**Santa Barbara Focalplane**

346 Bollay Drive, Goleta, CA 93117 USA.

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

E-mail: [sbfp@sbfp.com](mailto: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, SO15 0EG.

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

E-mail: [infrared.sales@gecm.com](mailto: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](mailto: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](mailto: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  $\lambda_{zp} \sim 28$  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. +81-3-574-2-1821; Telefax +81-3-574-2-1825.

E-mail: [tokki.bou@nikon.co.jp](mailto: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.

Авторы выражают глубокую благодарность Л. А. Гончарову за помощь в оформлении рукописи.

## Литература

1. Riedl G., Assel M., Fendt A., Hetzer W., Keller E., Kilger F., Kuligk T., Popp L., Proels R., Schweyer N. // Proc. SPIE, 2001. V. 4369. P. 201—209.
2. Pengelley R., Hewish M. // Jane's IDR, 2001. № 10. P. 49—57.
3. Рекламные проспекты зарубежных фирм, 1997—2002.
4. Brown D., Daniel B., Horikiri T., King P., Nelson D. M., Small M. // Proc. SPIE, 2001. V. 4369. P. 419—426.
5. Jane's Electro-Optic Systems, 2000—2001.
6. Rosenfeld D. // Proc. SPIE, 2001. V. 4369. P. 467—474.
7. Coutris J. F., Dupoux T., Lomoy J. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 568—576.
8. Kinch M. A. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 566—578.
9. Manissadjian, Tribolet P. M., Chorier P., Costa P. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 480—495.
10. Cabanski W., Breiter R., Koch R., Mauk K. H., Rode W., Ziegler J., Schneider H., Walther M., Oelmaier R. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 547—558.
11. Goldberg A. C., Kennerly S. W., Little J. W., Poltehn H. K., Shafer T. A., Mears C. L., Schaake H. F., Winn M. L., Taylor M. F., Uppal P. N. // Ibid. P. 532—546.
12. Jane's Electro-Optical Systems, 1996—1997.
13. Kimata M., Yagi H., Ueno M., Nakanashi J., Ishikawa T., Nakaki Y., Kawai M., Endo K., Kosasayama Y., Ohota Y., Sugino T., Sone T. // Proc. SPIE, 2001. V. 4288. P. 286—297.
14. Breiter R., Cabanski W. A., Ziegler J., Walchner M., Schneider H. // Ibid. 2000. V. 4020. P. 257—266.
15. Murphy P. F., Jost S. R., Barrett J. L., Reese D., Winn M. L. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 355—359.
16. Alchalabi K., Zimin D., Zogg H., Buttler W. // Ibid. P. 405—411.

17. Anderson J., Kostrzewa T., Cook L., Baker G., Radford W., Jack M., Finch A., Kennedy A., Kojiro J., Murphy D., Ray M., Wyles R. // Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 14–24.
18. 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.
19. Chorier P., Tribolet P. M. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 698–712.
20. Tiphene D. et al. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 515–524.
21. SMI's Night Vision 99 Conference (3–4 March 1999).
22. Aerosense Exhibit Guide, 2–4 April 2002. Orlando, USA.
23. Независимое военное обозрение. 2000. № 31. С. 6.
24. Horn S., Lohrmann D., Cambell J., Percanti P. // Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 210–221.
25. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. // Ibid. P. 94–105.
26. Howard P. E., Clarke J. E., Bradley M. G., Ionescu A. C., Li C. // Ibid. 2000. V. 4130. P. 168–174.
27. Costard E., Bois P. F., Marcader X., Herniou E., Manis-sadjian A., Tribolet P. M. // Ibid. 2001. V. 4369. P. 506–515.
28. Kleinfelder S., Hottes A., Pease R. F. W. // Ibid. 2000. V. 4028. P. 139–147.

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

A. M. Filachev, V. P. Ponomarenko, I. I. Taubkin, M. B. Ushakova  
ORION Research-and-Production Association, 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.*