

Тепловизионные приборы нового поколения

Авторы:

Волков Виктор Генрихович, кандидат технических наук, доцент

Ковалев Алексей Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент АЭН РФ

Федчишин Виталий Григорьевич, кандидат технических наук, действительный член РАЕН.

Тепловизионные приборы в настоящее время получили широкое распространение в науке и технике. В области специальной техники эти приборы используются для наблюдения, разведки, прицеливания, охраны объектов, таможенного контроля, для криминалистики, вождения транспортных средств, поиска раненных на поле боя или пострадавших во время стихийных бедствий, для работы пограничных служб, обнаружения мин, контроля режимов работы машин и пр. Стремительное развитие тепловидения привело к созданию приборов нового поколения, которым мы посвятим серию статей.

Принцип действия тепловизионных приборов основан на преобразовании естественного теплового излучения от объектов и местности в видимое изображение. Обязательным условием его формирования является наличие температурного контраста между объектом и местностью (фоном), а в пределах контура объекта – между его отдельными элементами. Современные тепловизионные приборы способны воспринимать температурные контрасты до 0,05 – 0,1 К.

Тепловизионные приборы имеют целый ряд достоинств: обеспечение больших дальностей видения независимо от уровня естественной освещенности, что позволяет им работать круглосуточно, возможность работы в условиях интенсивных световых помех и до определенной степени – при пониженной прозрачности атмосферы (туман, дождь, снегопад, пыль, дым и пр.).

Эти приборы способны воспринимать тепловое излучение от объектов через среды, непрозрачные для видимого или ближнего инфракрасного (ИК) излучения, но прозрачные для теплового излучения: листва, маскировочные сети, небольшой слой земли, нагромождение предметов и пр. Это дает возможность наблюдать замаскированные или скрытые объекты.

Тепловизионные приборы с 60-х годов XX века развивались по двум основным направлениям: с использованием дискретных приемников излучения совместно с механическими системами сканирования (развертки) изображения и приборов без механического сканирования. Теоретические основы тепловидения и техника тепловизионных приборов достаточно подробно рассмотрены в литературе [1 – 6]. При этом можно выделить четыре поколения тепловизионных приборов [7]. Нулевое поколение основано на применении одиночных приемников излучения и двумерной развертки изображения с помощью сканирующей оптико-механической системы, первое поколение – на применении одномерных линеек фотоприемников и одномерной оптико-механической развертки изображения, второе поколение – на применении матриц фотоприемников в виде 2 – 6 линеек с ВЗН (временная задержка и накопление) и одномерной оптико-механической развертки изображения. Новое третье поколение основано на применении “смотрящих” фокально-плоскостных двумерных многоэлементных матриц фотоприемников (FPA – Focal Plane Array) без использования

оптико-механических систем развертки изображения [13]. Ниже речь пойдет о приборах третьего поколения.

Основными преимуществами этих приборов являются: отсутствие оптико-механической развертки изображения и соответственно малые масса, габариты и энергопотребление, бесшумная работа, высокое отношение сигнал/шум и качество изображения, широкий динамический диапазон, возможность связи с современными компьютерами, видео- и ТВ-аппаратурой, цифровая обработка изображения в реальном масштабе времени.

Блок-схема тепловизионного прибора третьего поколения представлена на рис. 1 [8], где (1) – ИК-объектив, (2) – матрица ИК-фотоприемников, (3) – блок охлаждения или термостабилизации матрицы, (4) – предусилители, (5) – мультиплексор, (6) – аналоговый корректор неоднородности сигналов, (7) – аналого-цифровой преобразователь, (8) – цифровой корректор неоднородности сигналов, (9) – корректор неработающих элементарных фотоприемников матрицы, (10) – блок формирования изображения с микропроцессорной обработкой видеосигнала, (11) – цифровой выход для подключения к персональному компьютеру, (12) – ТВ-монитор, (13) – окулярная система, (14) – тактовый генератор, (15) – первичный источник питания (аккумуляторная батарея). Наличие элементов (3) и (13) необязательно и зависит от типа прибора. Неоднородности сигналов элементарных фотоприемников матрицы предварительно корректируются в аналоговой форме, преобразуются в цифровую и корректируются с использованием данных, полученных в процессе калибровки. Далее сигналы исправляются (возможно вычитание неработающих элементов матрицы с их заполнением) и направляются в блок формирования изображения (10). На его выходе информация выдается либо в качестве видеосигнала, направляемого в ТВ-монитор, либо в цифровой форме для передачи в персональный компьютер [8]. Для глубокого (криогенного) охлаждения матрицы ($T = 75 - 80 \text{ K}$) используется газовая холодильная машина, работающая по замкнутому циклу Сплит-Стирлинга. Для неглубокого охлаждения ($T = 150 - 250 \text{ K}$) или термостабилизации работы неохлаждаемой матрицы используется система термоэлектрического охлаждения.



Рис. 1. Блок-схема тепловизионного прибора третьего поколения

Современные фокально-плоскостные матрицы ИК-фотоприемников могут быть выполнены на основе различных материалов – халькогенидов свинца (PbS , PbSe), соединения кадмий-ртуть-теллур – HgCdTe (КРТ), антимида индия (InSb), силицида платины (PtSi), примесных кремния (Si:x) и германия (Ge:x), многослойных структур с квантовыми ямами на базе GaAs/AlGaAs – так называемых QWIP детекторов (QWIP –

Quantum Well Infrared Photodetector), микроболометров и пироэлектриков [8 – 12].
 Основные параметры типичных образцов матриц ИК-фотоприемников даны в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры фокально-плоскостных ИК-матриц фотоприемников для
 тепловизионных приборов.

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра, мкм	Формат (число пикселей)	Размер пикселя, мкм	Рабочая температура, К	Температурная чувствительность (NETD), мК
США, Raytheon	QWIP	8 ... 12	256x256	28x28	70	15
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	QWIP	8 ... 10	640x512	24x24	70	25
США, Raytheon	QWIP	8 ... 12	640x486	18x18	70	30
Франция, LIR	КРТ	3 ... 5	640x480	23x23	77	14
Германия, AEG Infrared Module GmbH	КРТ	8 ... 10	256x256	40x40	77	20
США, Rockwell	КРТ	8 ... 12	256x256	40x40	77	
США, Hughes, SBRS	КРТ	8,5 ... 11	256x256	30x30	80	65
США, Hughes, SBRS	КРТ	3 ... 4,5	128x128	40x40	300	50
США, Hughes, SBRS	КРТ	3 ... 4,5	256x256	30x30	300	65
РФ, ГУП “НПО “Орион”	КРТ	8 ... 10,5	128x128	35x35	80	
РФ, ГУП “НПО “Орион”	КРТ	8 ... 10,5	384x288	35x35	80	
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	PtSi	3 ... 5	256x256	24x24	75	75
США, Hughes	PtSi	3 ... 5	256x256	30x30	40	
США, Boeing Comp.	PtSi	1 ... 5	324x240	30x30	75	60
США, Boeing Comp.	PtSi	1 ... 5	486x640	24x24	75	70
РФ, ЗАО “Матричные технологии”	PtSi	3 ... 5	128x128 256x256 512x512	27x27 25x25 14x14	80	30
США, Cincinnati Electronics Corp.	InSb	3 ... 5	256x256	30x30	77	40

США, SBRC	InSb	3 ... 5	256x256	30x30	50	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5 ... 5,4	128x128	40x40	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5 ... 5,4	256x256	30x30	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5 ... 5,4	480x640	20x20	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5 ... 5,4	512x512	27x27	35	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5 ... 5,4	1024x1024 4	27x27	30 – 50	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5 ... 5,4	2048x2048 8	27x27	30 – 50	
РФ, ГУП НПО “Орион”	InSb	3 ... 5	128x128	50x50	80	
Франция, LIR	Si:Ga	5 ... 17	128x192	75x75	10	
Япония, Mitsubishi Electric Co.	Ge:Si/Si (барьер Шоттки)	8 ... 12	512x512	34x34	43	80
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbS	1,5 ... 4	128x128	60x60	80	20
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSe	2 ... 6	256x256	60x60	80	30
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSnTe	6 ... 14	256x256	60x60	25	5
Франция, LIR	МБ	8 ... 14	256x64	47x47	300	50
США, Raytheon	МБ	8 ... 14	320x236	50x50	300	100
США, Indigo Systems Corp.	МБ	8 ... 14	320x240	50x50	300	28
США, Lockheed Techsystems	МБ	8 ... 12	640x480	28x28	300	100
США, Lockheed Techsystems	МБ	8 ... 14	320x240	48x48	300	50
США, Lockheed Martin IR Imaging Systems	МБ	8 ... 14	327x245	25x25	300	100
США, Raytheon	МБ	8 ... 14	320x240	50x50	300	20
Великобритания, MES	ППИ	8 ... 12	384x288	40x40	300	130
Великобритания, MES	ППИ	8 ... 12	256x128	56x56	300	90

Примечание: ППИ – пироэлектрический приемник излучения, МБ – микроболометр

Внешний вид типичной ИК-матрицы показан на фото 1, а ее обрамление электронными платами с защитным окном из германия – на фото 2. На фото 3 показаны типичные охладители, работающие по циклу Сплит-Стирлинга, на фото 4 – приемный модуль, содержащий ИК-матрицу, охладитель и электронный блок, включающий буферный усилитель и аналого-цифровой преобразователь. На фото 5 показан микропроцессорный

модуль обработки видеосигнала, приемный модуль и модуль ИК-объектива как составные части тепловизионного прибора. Подобный принцип построения приборов из стандартных модулей (SIM – Standard Imaging Module) вообще характерен для современного тепловидения. Он обеспечивает высокую степень унификации приборов, упрощает сборку и наладку, снижает стоимость.

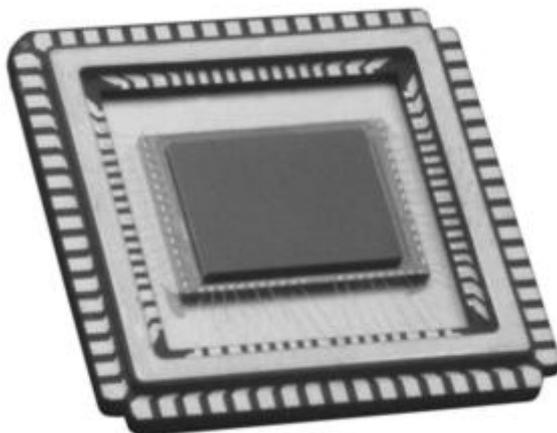


Фото 1. Внешний вид ИК-матрицы



Фото 2. ИК-матрица с защитным окном из германия в обрамлении электронных плат



Фото 3. Охлаждители, работающие по циклу Сплит-Стирлинга



Фото 4. Приемный модуль

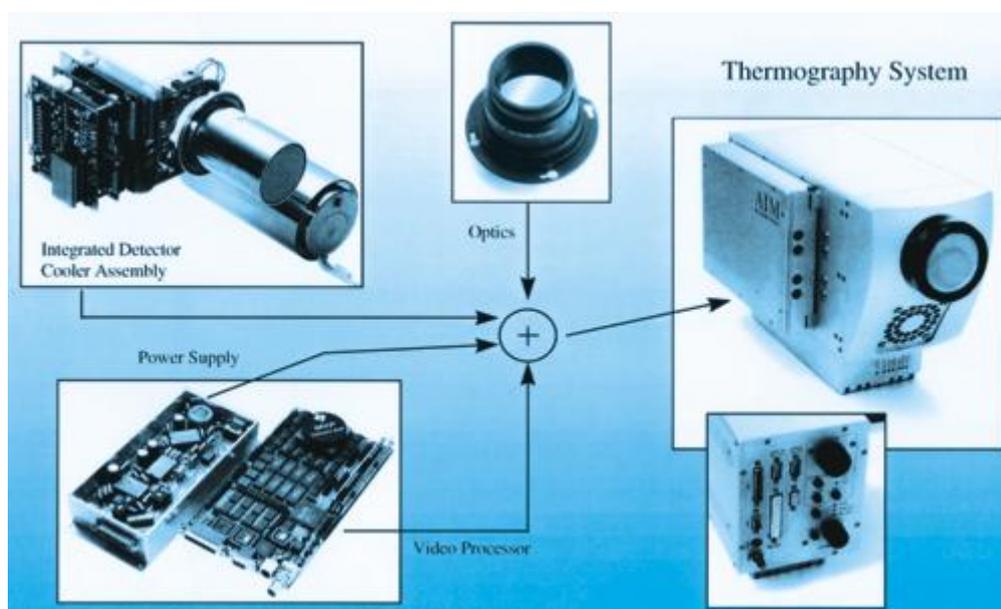


Фото 6. Составные части тепловизионного прибора

В качестве материалов для пироэлектрических приемников излучения используются цирконаты свинца, ниобаты и титанаты бария-стронция, сополимеры виниленфторида. В качестве материалов для микроболометров используются модификации окислов ванадия V_xO_y , поликристаллический и аморфный кремний.

Принцип работы микроболометра заключается в изменении сопротивления материала при поглощении ИК-излучения. Масса лучших тепловизионных приборов на микроболометрах доходит до $\sim 0,5$ кг, а ИК-чувствительных модулей – до 0,2 кг. Чувствительность, характеризуемая NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – эквивалентная шуму разность температур для лучших приборов достигает порядка 50 мК при рекордном значении 20 мК [15], типичных – 100 мК, средних – 150 мК, бывает NETD = 300 – 400 мК. Формат матрицы в основном 320x240 пикселей, хотя известны матрицы с числом пикселей 640x480 с шагом 28 мкм [11]. Конкурентами приборов на микроболометрах являются приборы на пироэлектрических приемниках. В них при воздействии ИК-излучения меняется спонтанная поляризация или диэлектрическая

проницаемость чувствительного конденсаторного элемента. Хотя в таких приборах и используются механические модуляторы, приборы также не требуют охлаждения и работают в той же области спектра. По чувствительности они несколько хуже: NETD не лучше 80 мК, типично 100 – 150 мК. Используется чаще всего тот же формат 320x240 пикселей, но имеется и формат 640x512, а в тепловизионном бинокле LION – 512x256 [11].

В 90-е годы XX века появились тепловизионные приборы на QWIP-матрицах с высокой технологичностью, воспроизводимостью, однородностью параметров по элементам с форматом 256x256, 320x240, 320x256, 640x512 и др. Чувствительность довольно высока: у лучших приборов NETD даже ниже 10 мК, типовых – 20 мК, средних – 35 мК. QWIP-матрицы обладают способностью управления спектральной чувствительностью и возможностью перейти в будущем от гибридных структур фокальных матриц к монолитным [11].

Первое место пока занимают приборы с использованием ИК-матриц на базе КРТ. Возможность их работы в области спектра 1 – 20 мкм является важным преимуществом. Разработаны матрицы с форматом 640x480 пикселей. Чувствительность по NETD очень высока: для лучших моделей – 10 мК, типовых – 15 мК, средних – 20 мК [11].

Неохлаждаемые микроболометрические и пироэлектрические ИК-матрицы не имеют пока достаточно высокой чувствительности. Однако существуют реальные возможности повышения их NETD до 10 мК (при условии использования ИК-объектива с относительным отверстием 1:1) и уменьшения размеров элементарного фотоприемника матрицы до теоретических пределов – 20 мкм для области спектра 8 – 14 мкм. Формат микроболометрических матриц в ближайшем будущем может достигать 960x1280 пикселей. Фирма Sanders/Lockheed Martin (США) планирует довести массу таких ИК-матриц до 25 г [11].

Литература.

1. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1987.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988.
4. Криксунов Л.З., Падалко Г.А. Тепловизоры (справочник). Киев, Техніка, 1987.
5. Макаров А.С., Омелаев А.И., Филиппов В.Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. Казань, Унипресс, 1998.
6. Ковалев А.В., Федчишин В.Г., Щербаков М.И. Тепловидение сегодня.//Специальная техника, 1999, № 3, с. 13 – 18, 1999, № 4, с. 19 – 23.
7. Кошавцев Н.Ф., Федотова С.Ф. Состояние и перспективы развития техники ночного видения. Прикладная физика, 1999, вып. 2, с. 141 – 145.
8. Ерофейчев В.Г. Инфракрасные фокальные матрицы.//Оптический журнал, 1995, № 2, с. 12 – 20.
9. Агранов Г.А., Дахин А.М., Нестеров В.К., Новоселов С.К. Особенности получения и обработки ИК-изображений в матричных фотоприемниках с координатной адресацией на основе халькогенидов свинца.//Оптический журнал, 1996, № 9, с. 53 – 57.
10. Певцев Е., Чернокужин В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловизионных камер.//Электронные компоненты. 2001, № 1, с. 32 – 36, 2001, № 2, с. 30 – 34, 2001, № 3, с. 12 – 20.
11. Ушакова М.Б. Тепловизоры на основе неохлаждаемых микроболометрических матриц: современное состояние зарубежного рынка и перспективы развития. ОНТИ ГУП “НПО

“Орион”, М., 2001.

12. Breen T., Butler N., Kohin M., Marshall C.A., Murphy R., Parker T., Silva R. More Application of Uncooled Microbolometer Sensor. SPIE, Vol. 3446, 1998, pp. 530 – 540.

13. Pengelley R., Hewish M. In the heat of the night. Jane's International Review. 2001, Vol. 34, No. 10, pp. 49 – 57.

Статья напечатана с разрешения редакции журнала

["Специальная техника"](#).

Источник: [Журнал «Специальная техника»](#)