

Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности.

Часть 4. Инфракрасные тепловые камеры

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Данная публикация анализирует существующие технологии инфракрасных датчиков — приемников излучения длинноволнового ИК-диапазона, а также предложения тепловых камер, разработанные для автомобильных применений.

Введение

Инфракрасные камеры инфракрасного диапазона, или Far-IR-датчики, позволяющие визуализировать изображение объекта или воссоздать картину нагрева, например прогрева двигателя, — один из наиболее новых и малоизвестных для широкого круга специалистов видов автомобильных датчиков, но при этом — один из наиболее перспективных. Известные также как FLIR (Forward Looking InfraRed), тепловые, термографические камеры или тепловизоры, эти датчики часто называются просто ИК-камерами — устройствами, которые формируют изображение подобно обычным камерам, но используют для этого не видимый свет (450–750 нм), а длины волн порядка 14 мкм.

До недавнего времени ИК-камеры (главным образом из-за высокой цены) применялись только в узкоспециальных областях — таких как военная техника и пожарная безопасность [35–77]. За последние годы цена модулей снизилась в среднем от \$25 000 до \$10 000, а для некоторых модулей она составляет даже \$1000 и менее, что позволяет использовать их в системах безопасности автомобилей верхнего ценового класса. Так, система NightDriver Raytheon успешно применяется в автомобилях Cadillac и Hummer H1 & H2 (начиная с системы Night Vision в автомобилях DeVille 2000 года, введенной GM). С апреля 2006 года компании Flir Systems Inc. и Autoliv Inc. поставляют ИК-датчики в системы ночного видения для автомобилей BMW. В high-end-автомобили тепловые камеры вводит, в частности, Honda.

Дальнейшее распространение длинноволновых ИК-камер возможно при снижении их цены. При условии стоимостной эффективности многих вновь разрабатываемых технологий ИК-считывания тепловые камеры мо-

гут получить более широкое распространение и спустя некоторое время мигрировать в менее дорогие автомобили. Потенциальный рынок ввиду полезности применения тепловизоров в системах автомобильной безопасности и из-за сходимости задач приблизительно сопоставим с продажами автомобильных камер, которые, согласно прогнозам Strategy Analytics, в 2010 году составят почти 20 млн единиц.

В пользу применения тепловых инфракрасных камер в автомобильных системах свидетельствуют следующие признаки:

1. Эти датчики позволяют осуществлять формирование изображений объектов, находящихся как внутри, так и снаружи автомобиля.
2. Отличная работа в условиях плохой освещенности — датчики хорошо «видят» тепло в ночное время суток, в условиях дождя, снега, тумана, смога.
3. Тепловизоры не чувствительны к бликам от солнца и ослеплению от фар встречных автомобилей — датчики позволяют «видеть» события в темном месте между двумя автомобилями.
4. Достигается значительная экономия мощности ИК-светодиодов или ИК-прожекторов фар.
5. Высокая дальность действия — до 500 м и более даже в условиях ночного освещения.
6. Тепловые датчики допускают обзор не только дороги — на пути следования прожектора луча фар или системы ночного видения, но и объектов, находящихся в стороне от дороги.
7. near-IR освещение является менее надежным и более заметным для систем автомобильной охранной безопасности.

Системы активной безопасности — наиболее значительная ниша сбыта тепловых дат-

чиков, осуществляющих мониторинг окружения автомобиля и предотвращающих аварии. Примерами являются автоматические системы переднего обозрения для защиты пешеходов, ночное видение, LDW. В условиях плохой видимости тепловые камеры быстро и эффективно распознают людей, причем независимо от цвета их одежды, животных, мотоциклистов, движущихся по дороге, остановившиеся или сломавшиеся автомобили, не успевшие остыть, которые могут находиться в темных точках дороги.

Условия мониторинга значительно различаются и в зависимости от темноты, дождя, снега, тумана или дымки, смога или дыма. Так, дождь значительно снижает характеристики стандартных видеокамер вследствие того, что капли дождя имеют большую отражательную способность, чем воздух, и становятся видимыми, отражая свет. Снег и туман — ввиду малого размера капель и их высокой плотности — являются еще большими негативными факторами для стандартных видеокамер, чем дождь, но на передачу тепловой энергии практически не влияют. Имеется только очень малая зависимость рассеяния тепловой энергии в условиях дождя или снега, причем на дальних расстояниях (более 30 м) тепловое излучение проникает лучше, чем видимый или близкий к ИК свет.

Смог, пыль, выхлопы и дым представляют собой твердые частицы, полностью рассеивающие видимый свет, но тепловая энергия передается через эти частицы также без рассеяния и практически без поглощения, в отличие от стандартных видеокамер.

Ограничения тепловых камер основаны именно на том, что тепловизор «видит» тепло, поэтому они обнаруживают более эффективно теплые препятствия — нагретые солнцем поребрики, столбы. Тепловые камеры — датчики теплового излучения — «видят» лучше

ночью, так как днем объекты нагреваются солнцем и поглощают тепловую энергию, а ночью излучают тепловую энергию, охлаждаясь.

Исходя из своей природы, IR-камеры распознают разницу температур (объекта и фона, тепловые контрасты), поэтому днем человек может слиться с фоном. Остывающий объект также по-разному будет восприниматься ИК-камерой, в зависимости от времени суток. Тепловые камеры практически не «видят» сквозь стекла, распознавание лиц также затруднено.

Очевидно, что для эффективного мониторинга в любых условиях освещения или погодных условиях требуется объединенное решение, включающее стандартные камеры видимого или близкого к инфракрасному свету и тепловые камеры, которые определяют длинноволновые излучения нагретых объектов или тепла. Логично, следовательно, что самый актуальный вариант для систем активной безопасности — сочетание технологий сканирования невидимого и видимого спектра.

Следующая по важности ниша для сбыта датчиков теплового излучения — мониторинг водителя и пассажиров, системы пассивной безопасности, автоматически реагирующие на присутствие и положение пассажиров.

Помимо того, применения предусматривают автомобильный климат-контроль, системы entertainment, спортивные автомобили SUV (известны применения в задних камерах), системы автомобильного тестирования (контроль прогрева двигателя или нагрева скоб тормозов).

Технологии датчиков ИК-спектра

Инфракрасное излучение представляет собой электромагнитные волны с длинами волн от 0,75 до 1000 мкм, превышающими длины волн видимого спектра, но более короткими, чем микроволновое излучение. Из-за атмосферного поглощения ИК-излучения реальный диапазон, пригодный для детектирования, ограничивается приблизительно 30 мкм. ИК-детекторы используют, как правило, длины волн, лежащие в окнах прозрачности атмосферы — в диапазоне 3–5 мкм (MIR) и 8–14 мкм (FIR).

С помощью FIR-детекторов можно получить значительную информацию о слабонагретых объектах. Так, спектральная длина волны теплового излучения человека с температурой 37 °C составляет примерно 9,3 мкм.

Инфракрасные камеры воссоздают образ теплового объекта по сигналам от первичных преобразователей — датчиков теплового излучения. Современные датчики включают подложку, на которой размещен массив детекторов в фокальной плоскости focal plane array (FPA) — множество детектирующих элементов, представляющих собой пиксели. Подложка также включает ИС, обычно называемую Read Out Integrated Circuit (ROIC),

которая электрически соединяется с детектирующими элементами. Инфракрасная энергия от объектов сцены фокусируется посредством оптики на ИК-детектор, информация от него передается на мультиплексирующую сенсорную электронику для обработки изображения, которое транслируется на стандартный видеомонитор.

За последние годы разработано много типов матричных ИК-детекторов. Многие из существующих технологий считывания тепла интересны для автомобильных применений.

Наиболее широкое распространение получили следующие технологии теплового сканирования:

1. Системы, требующие криогенного охлаждения.
2. Микроболометры — приборы для измерения тепловой энергии, использующие эффект изменения теплового сопротивления, включающие датчики из аморфного кремния, различных модификаций ванадий-оксидных (VOx) и других материалов.
3. Пирометры — приборы, основанные на эффекте тепловой поляризации пироэлектрических материалов.
4. Двухслойные изгибные микробалки Bi-Layer Microcantilevers, отражающие свет на CCD- и CMOS-датчики.
5. MEMS-термопилы (Thermopile MicroElectro-Mechanical Systems).
6. Термооптические датчики (технология RedShift Systems).

Основные рабочие характеристики ИК-камер

Важнейшими характеристиками ИК-детекторов, предназначенными для их сравнения (некоторые из них приведены в таблице 3), являются:

- детектируемый спектральный диапазон и спектральная характеристика;
- NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) — эквивалентная шуму разность температур, выражаемая в мК — показатель чувствительности, разрешения и достижимой точности датчика;
- NEP (Noise Equivalent Power) — эквивалентная шуму сила света (количество света с SNR = 1);
- SNR;
- фоточувствительность — выходное напряжение или фототок, отнесенное к энергии воздействующего света (обычно измеряется в В/Вт);
- квантовая эффективность;
- обнаружительная способность D* — фоточувствительность единицы площади детектора (используется для сравнения различных типов детекторов);
- ограничивающий D* шум фоновых флуктуаций BLIP (Background Limited Infrared Photodetection);
- время срабатывания — показатель быстрого действия датчика;
- размер матриц детекторов, размер и форма активной области датчика, угол обзора, схема обработки сигнала (ROIC), метод охлаждения и другие характеристики, типичные для автомобильных датчиков.

Охлаждаемые и неохлаждаемые FPA-детекторы

Выделяются два наиболее широких класса тепловых камер: с охлаждаемыми cooled FPA и неохлаждаемыми Uncooled Focal Plane Array (UFPA) детекторами. Также ИК-детекторы делятся на фотонные, или квантовые, и тепловые приемники, что практически тождественно первому классификационному делению.

Таблица 3. Сравнительные технические данные некоторых автомобильных тепловых камер

Характеристики/Камера	PathFindIR Fli	UL 04 17 1	NightDriver Raytheon	RedShift 1160
Тип датчика	VOx микроболометр	Резистивный аморфный кремний	Неохлаждаемый сегнетозлектрик (BST)	RedShift TLV (Thermal Light Valve) с КМОП-датчиком
Размер матрицы детекторов, пикселей	320×240	640×480	160×120	160×120
Размер и форма активной области датчика	—	шаг 25 мкм	—	35 мкм Hex
Фактор заполнения, %	—	80	—	—
Детектируемый спектральный диапазон, мкм	7,5–13,5	8–14	7–14	8–14
Чувствительность (уровень сигнала), мВ/К	—	7	—	—
Точность, %	—	<1,5%	—	—
NETD (Noise Equivalent Temperature Difference), мК	—	85	—	150
Частота кадров, с (Гц)	30	—	30	—
Угол обзора камеры, °	36	—	12×9	—
Дальность обзора, м	300–500	—	~457	225 с линзой 17×12°, 25 мм, 75 с 50×37°, 6 мм
Фокусное расстояние, м	—	—	>8	—
Время получения изображения Start-Up, с	<2	—	~45	<5
Время срабатывания, мс	—	8	—	—
Видеовыход	NTSC	Один или два аналоговых видеовыхода	NTSC	NTSC/PAL
Напряжение питания, В	6–16	—	9,5–16	12/24
Потребляемая мощность, Вт	<2	—	—	—
Рабочий температурный диапазон, °C	–40...80	–40...80	–40...75	–10...50
Габариты, мм	58×57×72	32×23,5×7,4	170×150×110	76,2×50,8×50,8 с оптикой
Вес, кг	<0,4	<=30	0,9	—

Фотонные, или квантовые детекторы преобразуют воздействующую ИК-радиацию фотонов в электрический сигнал посредством прямого взаимодействия с атомной решеткой материала детекторов. Тепловые приемники, поглощая фотоны, изменяют температуру материала детектора и за счет этого — его свойства, что также позволяет сгенерировать электрический сигнал. К первому типу устройств относятся фоторезисторы (или фотопроводники), фотогальванические *p-n*-переходы с фотоэлектрическим током, фотодиоды, фотокатодные материалы, фототранзисторы и некоторые другие структуры. Некоторые примеры этих устройств приведены в [37–42]. Ко второму типу — тепловым датчикам — относятся болометры и микроболометры, пироэлектрики, термопилы (все они рассматриваются далее), ячейки Голея (вырабатывающие электрический сигнал при тепловом расширении), сверхпроводники (или фотоэлектроманнитные детекторы) [43–77].

Материалы фотонных детекторов включают силицид платины PtSi, а также недорогие полупроводниковые устройства на основе материалов InSb, InAs, теллуриды кадмия и ртути HgCdTe или CdHgTe (KPT), сульфидно-свинцовые PbS, селенидно-свинцовые PbSe и другие материалы.

Для многих из этих материалов характерна относительно узкая спектральная полоса срабатывания, не позволяющая детектировать длинноволновый ИК-диапазон (1,5–5,2 мкм для PbSe, 1–5 мкм для PtSi; для сравнения, HgCdTe характеризуется чувствительностью в диапазоне 2–25 мкм), и пиковая спектральная чувствительность к определенной длине волны, зависящая от состава материала. Быстродействие и чувствительность этих датчиков является очень высокой, но они требуют глубокого криогенного охлаждения до низких температур порядка 77–80 К (в диапазоне значений 4–110 К) для удаления влияния тепловых шумов вследствие освобождения электронов, сгенерированных температурой, или темнового тока.

В последнее время были разработаны FPA-приемники на квантовых ямах — QWIP-детекторы (Quantum Well Infrared Photo-detector), производимые по технологии молекулярно-лучевой эпитаксии из материалов GaAs/AlxGa1-xAs и некоторых других. В полупроводниковой структуре с широкой запрещенной зоной формируются потенциальные ямы для электронов с низким энергетическим уровнем и фотонов. Фотоны, попадая в ямы, обеспечивают переход электронов в состояние высокого энергетического уровня, которые под действием смещающего напряжения генерируют фотоэлектрический ток. Фиксированное смещение необходимо для того, чтобы образовывать выходной сигнал — фототок, по которому посредством зарядового конденсатора интегрируется ИК-излучение, полученное каждой ячейкой ROIC.

Существенным признаком этого типа устройств является то, что детектор состоит из некоторого числа изолированных квантовых ям, чувствительных только к определенной частоте детектирования, но он может быть настроен так, чтобы определять различные длины волн. Базовые принципы многоцветной технологии раскрыты в патентах [39–40].

Квантовые QWIP-детекторы позволяют детектировать длинноволновый FIR-диапазон 8–14 мкм (и даже более широкий — 6–25 мкм), но для достижения высоких показателей NETD порядка 36 мК для этого типа детекторов также часто, но не всегда, необходимо охлаждение.

В результате охлаждения температура детекторов становится значительно ниже температуры детектируемых объектов — за счет этого удается повысить чувствительность детекторов и избавиться от шумов. В итоге получается изображение высокого качества — с высоким разрешением, чувствительностью, SNR. Эти камеры могут видеть от 0,1 °C с дальностью до 3000 м и быстродействием порядка 1 мкс.

Существуют различные способы охлаждения: термоэлектрическое, криогенное, механическое газоциркуляционное охлаждение, известное как цикл Стирлинга. (Подробнее о способах охлаждения можно прочитать в специальной литературе.)

Охлаждаемые элементы детекторов обычно содержатся в уплотненных металлических или стеклянных вакуумных контейнерах, охлаждаемых жидким азотом при температуре 77 К, которая может быть снижена и далее за счет сжатия (детекторы Дюара). Детектор может работать до 8 часов без заполнения азотом.

Термоэлектрические охладители основаны на эффекте Пельтье, согласно которому при протекании тока по определенным типам полупроводников один конец соединения нагревается, а другой охлаждается, и могут быть реализованы по технологии MEMS.

Размер охлаждаемого элемента — главный ограничивающий фактор охлаждаемых фотонных или квантовых ИК-детекторов, далее следуют заметное потребление мощности и цена. Без охлаждения такие детекторы будут «затопляться» собственным излучением, но с охлаждением оказываются громоздкими, дорогими и трудоемкими. Эксплуатация данных камер характеризуется некоторым временем, необходимым на охлаждение для возобновления работы. Время охлаждения самых первых детекторов достигало 10 минут.

Необходимо учитывать, что для различных материалов охлаждение дает различные результаты (например, спектральное срабатывание селенида и сульфида свинца, а также материала МСТ сдвигается в длинноволновую область ИК-спектра, а материалов InAs и InSb — в коротковолновую).

Таким образом, уровень развития технологий охлаждаемых детекторов подходит для ручных камер, преимущественно специального назначения, но противоречит важней-

шим автомобильным требованиям, таким как единичное соотношение высокие объемы/низкая цена, возможность автоматического распознавания объектов в течение всего времени вождения.

Неохлаждаемые методы детектирования для автоэлектроники (и не только) имеют много преимуществ — во-первых, отсутствие охлаждающего фрейма и, следовательно, сниженный размер, малое потребление мощности и меньшую стоимость.

Неохлаждаемые UFPA-датчики, широко известные и как Uncooled Infrared Detectors или Uncooled Thermal Cameras, используют датчик, работающий при окружающей температуре, или датчик, стабилизированный при температуре, близкой к окружающей. Современные неохлаждаемые детекторы используют датчики, срабатывающие на изменение сопротивления, напряжения или тока при нагреве инфракрасным излучением. Эти изменения затем измеряются и, например, в болометрах сравниваются со значениями при рабочей температуре датчика.

Основные материалы неохлаждаемых датчиков — пироэлектрические или материалы для микроболометров.

Сверхпроводники также могут служить в качестве инфракрасных датчиков. Соединение Джозефсона (два сверхпроводника, соединенных очень тонким изолирующим оксидным барьером), отличающееся тем, что в нем возникает ток через сверхпроводники, при приложении малого магнитного поля может быть преобразовано в туннельное соединение Гивье Superconducting Tunneling Junction (STJ), которое используется как очень чувствительный фотонный детектор в широком спектральном диапазоне, включая ИК. Каждый фотон разрывает число существующих пар, которое зависит от энергии фотона и зазора материалов соединения. Высокая чувствительность этих датчиков требует изоляции от фонового излучения и охлаждения до температур ниже 1 К.

Для снижения шумов неохлаждаемые ИК-датчики могут быть стабилизированы к рабочей температуре. Такие камеры меньше по размеру и цене. Хотя их разрешение и качество изображения ниже, чем у охлаждаемых, уровень развития технологий предполагает адекватные результаты при их использовании в автомобильных системах (например, скорость работы 200 кадр/с и другие показатели).

Микроболометры

Болометры в наиболее широком смысле — это приборы для измерения энергии электромагнитного излучения. Болометры, используемые для детектирования ИК-излучения, представляют собой резистивные устройства, чувствительные к нагреву (например, первый известный тепловой болометр Лэнгли включал мостовые платиновые RTD).

Традиционные микроболометры также определяют IR-сигналы в полупроводнике,

используют термоэлектрический эффект [43–52]. Изменение в сопротивлении измеряется и преобразуется в температуры, которые с двумерным массивом детекторов и ROIC могут быть визуализированы графически. Стандартные размеры решеток обычно бывают двух видов — 320×240 или 160×120 — при этом разрешение получается одинаковым, но, как и в случае с видеокерами, большая матрица позволяет захватить большую область обзора с наименьшими искажениями. Хотя матрицы большего размера более дорогие, наметилась тенденция перехода именно к ним, вплоть до размера 640×480.

Микроболометр, выполненный как массив в фокальной плоскости, представляет собой форму MEMS-устройства, которая использует массив малых элементов — детекторов излучения. Каждый элемент детектирования микроболометра включает мембрану, подвешенную над подложкой, для того чтобы обеспечивалась тепловая изоляция. Мембрана предусматривает температурно-чувствительный элемент, например на основе модификаций оксида ванадия VOx, и два электрода, связывающие температурно-чувствительный материал и ROIC на подложке. Излучаемая ИК-энергия, получаемая каждым детектором микроболометра, увеличивает температуру детектора. Изменение в температуре наводит изменение в сопротивлении каждого детектора, что регистрируется мультиплексирующей интегрированной схемой, размещенной на той же полупроводниковой подложке. Существующие схемы ROIC разрабатываются с целью достижения совместимости с требованиями входного импеданса соответствующих элементов детектирования. MEMS-микроболометры обычно достаточно хорошо чувствительны к излучению, так как отдельные детекторы имеют очень малые тепловые массы и термически изолированы от мультиплексирующей схемы и подложки.

Хотя инфракрасные устройства этого типа обычно адекватно выполняют функции, соответствующие назначению, их недостатки включают ограничения в отношении тепловой массы мембраны, сложность в уравновешивании механических напряжений между слоями в мембране, относительно высокие уровни шумов, относительно низкий температурный коэффициент сопротивления (TCR), где TCR — стандартный измеритель тепловой энергии и показатель чувствительности датчика. Чувствительность главным образом ограничивается теплопроводностью каждого пикселя. Скорость работы определяется отношением тепловой емкости и теплового сопротивления. Снижение тепловой емкости увеличивает не только скорость работы, но и тепловые флуктуации — шумы. Увеличение теплопроводности повышает скорость работы, но снижает чувствительность (а для того, чтобы она возросла, нужно повысить TCR и базовое сопротивление).

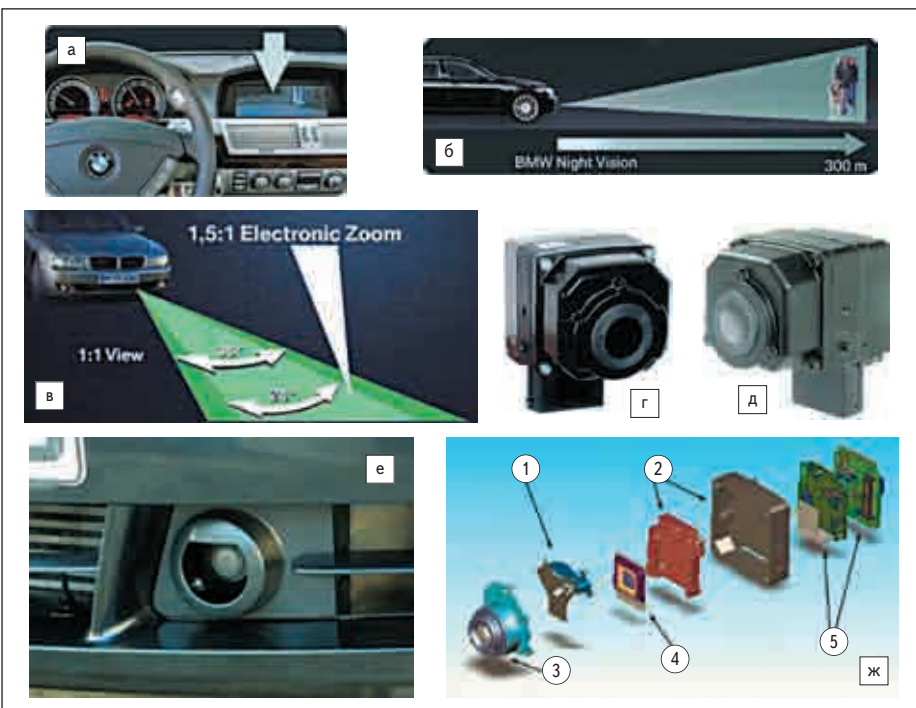


Рис. 38. Технологии неохлаждаемых автомобильных тепловых ИК-камер Autoliv /Flir:

- а — дисплей системы ночного зрения Autoliv в автомобилях BMW;
- б — стандартный диапазон дальности тепловых ИК-камер — 300 м;
- в — иллюстрация угла обзора и функции электронного зуммирования камер Autoliv в автомобилях BMW;
- г — PathFindIR FLIR — автомобильный тепловой датчик изображения;
- д — камера ночного видения Autoliv;
- е — установка камеры ночного видения Autoliv в бампер автомобиля;
- ж — модульный вид камеры в системе ночного видения автомобилей BMW, созданной с участием различных производителей: 1 — затвор (Cherry); 2 — теплоотводы (Dynacast); 3 — сборка линз (Umicore); 4 — датчик (Indigo); 5 — платы питания и обработки видео (Autoliv)

Подход к решению некоторых проблем VOx-микроболометров основан на применении аморфного (некристаллического) кремния в качестве термочувствительного материала [51]. Аморфный кремний характеризуется более высоким значением TCR, что дает более высокий уровень чувствительности. Это обычно достигается за счет обеспечения низкого уровня допирования или отсутствия такового. Так как эффективное сопротивление каждого детектора связано с уровнем допирования, обеспечивается высокое базовое сопротивление кремния, поэтому возникает проблема согласования высокого выходного импеданса с входным импедансом ROIC.

Но, несмотря на все недостатки, микроболометры представляют собой неохлаждаемые тепловые датчики, что является значимым преимуществом по сравнению с прежними высокоразрешающими типами охлаждаемых устройств на основе охлаждения согласно циклу Стирлинга и жидким азотом.

Технология VOx-микроболометров была разработана Honeywell в середине 1980-х годов по контракту с US Department of Defense. Затем с 1990-х лицензии на эту технологию приобретали различные производители.

В настоящее время технологиями микроболометров располагают компании Raytheon, Flir (рис. 38), внедряющие их в автоэлектро-

нику, а также некоторые другие — BAE Systems, L-3 Communications, DRS Technologies, InfraredVision Technologies Corp., NEC, Institut National d'Optique (INO), ULIS (рис. 39, www.ulis-ir.com).

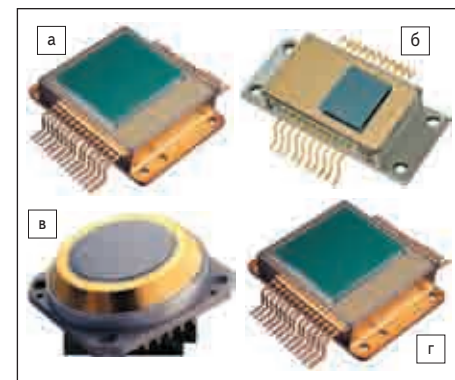


Рис. 39. Технологии неохлаждаемых инфракрасных датчиков на основе аморфного кремния ULIS:

- а — FPA детектор UL 03 04 1 с размерами матрицы пикселей 384×288 — новинка 2005 года;
- б — двумерный детектор UL 02 05 1 с размерами матрицы пикселей 160×120;
- в — двумерный модуль UL 03 08 1 с размерами матрицы пикселей 384×288 или 320×240 (разрешение, выбираемое пользователем);
- г — UL 04 17 1 — ИК-детектор с размерами матрицы 640×480 и шагом 25 мкм, специально рекомендуемый компанией для автомобильных систем повышения качества водительского видения

В апреле 2006 года известный производитель тепловых камер компания Flir Systems Inc. предоставила необходимые лицензии компании Autoliv Inc. для интеграции IR-датчиков в автомобильные инфракрасные камеры ночного видения. Основу устройств составляют неохлаждаемые ИК-болометры FLIR Indigo Systems Division (разработанные ранее Indigo для военных и правоохранительных ведомств) — датчики из оксида ванадия с размерами матрицы 320×240 пикселей на основе технологии Flir Autovox.

Система ночного видения от Autoliv NightVision, созданная на основе инфракрасных камер, значительно улучшает видимость в темное время суток, позволяя водителю обозреть расстояния свыше 500 м при идеальных условиях (и до 300 м в любых условиях). Это в 5 раз дальше фар, к тому же можно с большей ясностью видеть объекты в темном месте (или в тумане) между двумя встречающимися автомобилями, обозреть области, окружающие дорогу, определять животных или детей, выбегающих на дорогу.

Autoliv поставляет эти системы разным автопроизводителям, в том числе компании BMW, которая с 2005 года вводит системы ночного видения во многие свои новые автомобили.

Помимо сотрудничества с BMW, Autoliv разрабатывала эту систему в течение 6 лет совместно с FLIR Indigo Systems, Cherry Electrical Products, Umicore (линзы из специального материала Gasir), Dyncast, Tyco Electronics (уплотняющие материалы на основе технологии Vemtech для защиты корпуса камеры от конденсата и влажности). Многие компоненты болометра созданы специально для чувствительных к цене и окружающим условиям автомобильных применений (рис. 38ж).

Новая ИК-камера PathFindIR FLIR, входящая в состав данной системы, — это компактный тепловой датчик изображения (Thermal Imager), разработанный FLIR специально для транспортных средств. PathFindIR интегрируется в переднюю часть транспортного средства (в области левого переднего бампера BMW). Тепловая камера откалибрована таким образом, чтобы быть особенно чувствительной к температуре людей и животных. Вид, получаемый посредством инфракрасной камеры, отображается на дисплее перед водителем.

Камера характеризуется широким углом обзора линзы в 36° (в сравнении с углами в 12–16° других систем), достаточным, чтобы покрывать нормальное поле зрения людей, и снабжается функцией digital zoom-in/zoom-out. Водители могут работать с системой Night Vision system вручную посредством педали, либо система контролируется автоматически — автомобильным спидометром и рулевым колесом. На скорости 80 км/ч спидометр автоматически зуммирует дисплей в 1,5:1 раза, до угла обзора в 24°, и увеличивает объекты обзора. На поворотах рулевое ко-

лесо дает команды автоматического панорамирования изображения на 6° в сторону.

PathFindIR отличается долговечностью, рабочая температура камеры –40...+75 °С. Обеспечивается защита от окружающих условий, влажности и экстремальных температур. Устойчивое к удару стекло и тонкая сетка также защищают камеру.

Нагревательный элемент, имеющийся в составе камеры, помогает содержать линзу в чистоте в условиях повышенной влажности. Камера включает полностью автоматическую обработку изображения для производства NTSC-видео с высоким контрастом. PathFindIR предлагается FLIR как автономный модуль — камера для OEM или как законченное изделие для клиентского рынка (aftermarket package) (рис. 38 г–д). Разносторонние размеры и легкость интеграции обеспечиваются за счет компактности PathFindIR, габариты корпуса которой составляют приблизительно 58×55×72 мм, а вес — 400 г.

Благодаря способности камеры «видеть» в 5 раз дальше, чем обычная камера и фары, водители могут обнаруживать удаленные препятствия и объекты и избегать потенциальных аварий с большей уверенностью. Это происходит потому, что у водителя появляется запас времени, чтобы среагировать на обнаруженное препятствие, и меньше устают глаза от напряжения в темноте — в итоге таким образом обеспечивается большая безопасность в управлении и сокращается число аварий в ночное время суток, плохую погоду, туман, дождь, снег.

Преимущество far-IR технологии над near-IR при обнаружении людей было подтверждено учеными University of Michigan's Transportation Research Institute (UMTRI).

В октябре 2006 года AMI Semiconductor (AMIS), разработчик и производитель ИС со смешиванием сигнала, и компания FLIR анонсировали соглашение для высокообъемного производства неохлаждаемых ИК-детекторов — микроболометров.

Все рассматриваемые далее устройства также относятся к болометрам и микроболометрам, но в связи с тем, что используют нерезистивный метод детектирования, во многих источниках отделяются от термоэлектрических резистивных MEMS-структур. Так, болометры могут использовать свойства температурных зависимостей обратносмещенных диодов, резисторов, емкостей, MOSFET [43, 54–55, 59].

Пироэлектрические детекторы

Это широко распространенный тип датчиков теплового типа, используемых для детектирования ИК-излучения.

Пироэлектрики представляют собой кристаллические диэлектрики со спонтанной поляризацией при отсутствии внешних воздействий, которая увеличивается или уменьша-

ется при изменении температуры, что сопровождается возникновением электрического поля (пироэлектрический эффект). При постоянной температуре поляризация пироэлектрика нейтрализуется за счет взаимодействия поверхностных зарядов со свободными электрическими зарядами воздуха. Если температура материала увеличивается, например, при поглощении любого видимого или невидимого излучения, поляризация также возрастает, что наблюдается как электрический сигнал, обычно при подсоединении электродов для формирования конденсатора. Датчик будет производить выход только при изменении температуры, следовательно, он не будет чувствителен к фоновому излучению, и температурной компенсации не потребуются. Так как пироэлектрики не дают статический сигнал (DC-сигнал), температура поверхности модулируется во времени посредством прерывающегося излучения (известного под названием chopper), для того чтобы измерять температурные контрасты с фоном неподвижных объектов.

Известно также последовательное включение двух заряжаемых конденсаторных пироэлектрических элементов с противоположной полярированностью (соединяемых их однополярными знаками). Этот способ позволяет устранить влияние фоновых температурных воздействий (вследствие солнца, вибраций) и применяется для детектирования подвижных объектов.

Заряды, наведенные в электродах, будут образовывать напряжение сквозь пироэлектрический слой, для снятия которого необходим сравнительно высокий входной импеданс ROIC, либо на выходе первичного преобразователя генерируется переменный ток, обрабатываемый во внешней схеме, подсоединенной к противоположным поверхностям детектора.

Пироэлектрические датчики могут изготавливаться, например, из барий-стронциевого титаната Ba₂TiO₃ (BST), танталата лития LiTaO₃, ниобата танталата калия KTaNbO₃ (КТН), модифицированного титаната цирконата свинца PbZrTiO₃ (PZT) или других материалов с высоким пироэлектрическим коэффициентом, генерирующих электрический заряд в ответ на температурные изменения. Благодаря кристаллической структуре пироэлектрики устойчивы к механическим разрушениям и стабильны при значительных перепадах температур и в условиях температурных флуктуаций (шумов).

Ниже температуры T_c порядка 250–450 °С, известной как точка Кюри, многие сегнетоэлектрические материалы (такие как танталат лития), которые входят в группу пироэлектриков, демонстрируют высокую спонтанную электрическую поляризацию (выше температуры Кюри поляризация исчезает).

Пример пироэлектрического детектора указан в описании патента [60]. Этот детектор представляет собой тонкопленочный конденсатор, выполненный из сегнетоэлектричес-

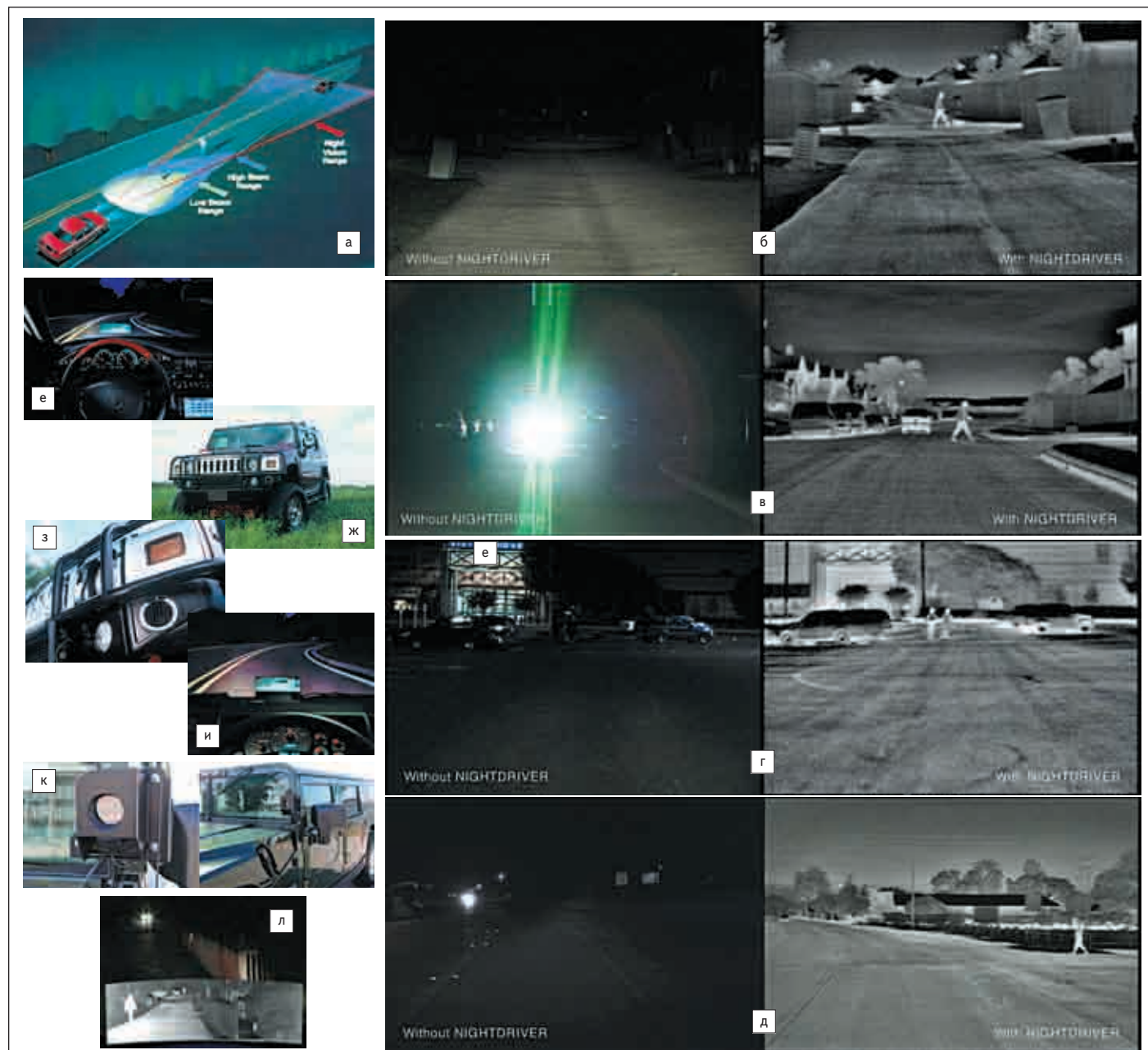


Рис. 40. Иллюстрация работы систем NightDriver Raytheon (иллюстрации с сайтов www.gm.com и www.sigmaautomotive.com):
 а — диапазон дальности ИК камеры в сравнении с фарами дальнего и ближнего света в автомобиле Cadillac Deville (система Night Vision GM);
 б–д — примеры обзора дороги и видимости объектов водителем с системой NightDriver и без нее; б, в, д — человек на дороге; г — обзор места парковки;
 е — система NightDriver в автомобиле Cadillac Deville; ж, з — автомобиль Hummer H2, оборудованный системой NightDriver (ж) и крепление камеры на бампере автомобиля (з);
 и — дисплей HUD в автомобиле Hummer H2; к — внешний вид и крепление камеры в экстерьере автомобиля Hummer H1;
 л — система Night Vision — один из признаков нового автомобиля Volvo XC90 SUV

ких материалов группы, включающей ниобат танталат калия (КТН), BST и титанат цирконат свинца, допированный лантаном.

Как и пьезоэлектрики, пироэлектрики — это пассивные датчики, не требующие питания. За счет этого значительно снижаются шумы ($1/f$) и NETD.

Пироэлектрический процесс не зависит от длины волны воздействующего излучения. Ограничивающим фактором для спектрального диапазона является материал окна, используемый в производстве корпуса датчика. Таким материалом часто служит кремний.

Различные оконные материалы и их комбинации позволяют детектировать излучение различных частот в определенном спектральном диапазоне.

КТН и BST, а также другие материалы имеют диэлектрические постоянные и температуры Кюри, которые могут различаться в зависимости от их химического состава. Максимальное ИК-срабатывание — пироэлектрический эффект — в КТН или BST может быть настроено на любую окружающую температуру, что востребовано рыночной нишей высокообъемных систем. Поскольку пироэлектрический

эффект зависит от поляризации материала, пиродатчики могут иметь чувствительность, варьируемую в зависимости от применения.

Ввиду дифференциального характера сигнала пироэлектрических детекторов повышается чувствительность к ИК-излучению объекта на уровне фона. Еще более высокая чувствительность достигается за счет тепловой изоляции детектора от ROIC, но технология получения теплоизолированных пироэлектрических пленок пока еще не вполне совместима со стандартными технологиями микроэлектроники.

Для пироэлектрических матриц могут также использоваться сополимеры винилиденфторида PVDF, совместимые со стандартными технологиями микроэлектроники, но требующие поляризации пленки.

Первый пироэлектрический датчик изображения — пироэлектрический видикон — был разработан в начале 1970-х.

Затем технология пироэлектрических детекторов постепенно переместилась к массивам в фокальной плоскости, осуществляющим двумерное сканирование изображений.

Компания Texas Instruments в 1976 году впервые создала двумерные массивы термодатчиков, используя пироэлектрические свойства керамических материалов.

Примеры разработок пироэлектрических матриц приведены в описаниях патентов [54–55, 60–65]. Новые разработки ориентированы на создание MEMS-технологий, применение КМР-материалов.

Дальнейшие перспективы технологии относятся к разработке ROIC с ЦОС, выравнивающих неоднородности чувствительности пикселей, корректирующих дефектные пиксели, а также к запасанию и применению различных корректирующих коэффициентов.

В статье [65] опубликованы сведения об успешном создании пироэлектрического электронно-оптического преобразователя (ПЭОП) диапазона 8–14 мкм в излучении видимого спектра способом попиксельной дискретизации ИК-изображения и модуляции однородного (моноэнергетического) потока электронов матричным пироприемником. ИК-изображение, преобразованное в видимое, отображается на катоднолюминесцентном экране ЭОП, без применения схемного мультиплексирования, как у пировидиконов. NETD прибора оценивается в 0,05–0,1 К, стоимость — в 45–50 тыс. рублей.

Тепловые камеры от Raytheon Commercial Infrared на основе UFPA-массива детекторов из материала BST с ROIC и LCD HUD применяются в системе GM Night Vision Cadillac (рис. 40а) и других автомобилей (Hummer H1 и H2, Volvo XC90 SUV) (рис 40б–л). Для стабилизации температуры детекторов используются термоэлектрические охладители, но эти температуры не криогенные, а комнатные. Массив пикселей, каждый из которых представляет собой температурно-зависимый конденсатор, включает решетку 320×240 или 160×120. Дисковый модулятор (chopper) вращается во фронте детектора, модулируя тепловую энергию сцены для очистки (blank on and off) пикселей. Вращение диска согласовывается по фазе с сигналами синхронизации ROIC, что обеспечивает электронное, не механическое сканирование. Считывание сцены затем преобразуется ROIC в монохроматический видеосигнал, отображаемый HUD.

Для уменьшения размеров устройств система линз использует рефракционную (пре-

ломляющую) оптику, сходную с той, что имеется в камерах видимого диапазона. Дальность видения системы оптимизирована до 80 м, с фиксированным фокусом 20 м. Горизонтальная область обзора HUD — 11°, вертикальная — 4°, изображение объектов на дисплее обеспечивается тех же размеров, что и видимые водителем в хороших условиях освещения.

Современная система NighthDriver Raytheon — высокотехнологичная автомобильная тепловая система, впервые разработанная для военных применений и сейчас применяемая на автомобилях Cadillac и Hummer H1 & H2, а также коммерчески доступная для любых транспортных средств. Эта система «видит» в 5 раз дальше фар дальнего света, как и микроболометрическая камера Autoliv и Flir. Стоимость системы ночного видения для автомобилей Cadillac Deville составила около \$1000–2000, цена систем NightDriver в розницу — приблизительно \$4000. По статистике NHTSA, 25% вождений приходится на ночное время суток, причем смертельные исходы выше ночью (55% от общего числа аварий), 62% пешеходов гибнет ночью, 300 тыс. аварий ежегодно случаются в США вследствие столкновений автомобилей с животными. На скорости 60 миль/час система NighthDriver увеличивает время для реагирования водителя от 3,5 до 15 с, снижая вероятность аварии.

Структуры «кремний на изоляторе» (SOI — Silicon-On-Insulator)

ИК-детекторы данного типа включают несколько последовательно включенных *p-n*-переходов, размещенных на подложке, состоящей из однокристалльной кремниевой пленки, находящейся поверх изолятора — пленки диоксида кремния SiO₂ или другого материала, депонированной на объемную кремниевую подложку.

Пример SOI-микроболометра раскрыт в описании патента [66]. Основной вариант этого устройства основан на вариации электрических свойств в зависимости от температуры изолированных частей кремния — кремниевого диода, транзистора, которые производятся по технологии SOI. Значительным преимуществом данной конструкции, по сравнению с пироэлектриками, является ее полная совместимость со стандартными кремниевыми технологиями микроэлектроники.

Термодетекторы, основанные на пироэлектрическом эффекте в сегнетоэлектриках, также могут применяться в этом устройстве, если оно выполняется как конденсатор с тонкой сегнетоэлектрической пленкой в качестве диэлектрика, однако возможны и другие варианты исполнения.

SOI-детекторы отличаются сниженным уровнем шумов из-за высокой однороднос-

ти структуры из двух монокристаллических кремниевых слоев. Изолятор из диоксида кремния позволяет достичь высокой тепловой изоляции.

Многие разработки технологии SOI достигли уровня промышленного применения (акселерометры, гироскопы, тепловые детекторы), но массовая коммерциализация тепловых датчиков этого типа для автоэлектроники пока еще в перспективе.

Микробалки (Microcantilevers)

Для того чтобы детектировать изменения в тепле, в качестве сенсорных материалов обычно используют разнородные материалы.

У этих датчиков есть перспективы высоких рабочих характеристик и снижения цены (до \$1,000 в условиях массового производства), хотя на данном этапе существенными являются их недостатки — чувствительность к фоновому излучению и эффекты флуктуаций (шумов) рычагов, поэтому многие компании работают над совершенствованием указанного метода.

Исследователи лаборатории Oak Ridge National Laboratory (www.mnl.ornl.gov) разработали микробалку из полупроводниковых материалов, таких как кремний или GaAs.

Инновационный подход к тепловому сканированию основан на изгибе FPA-микробалок из двух материалов при поглощении ими ИК-фотонов (рис. 41). Система включает ИК-линзу, FPA-микробалку и детектор изгиба. Для измерения изгиба могут применяться пьезорезистивный, оптический или емкостной методы, а также преобразовательный метод электронного туннелирования. Исследователи пришли к выводу, что пьезорезистивный метод не является чувствительным вследствие нагрева балки из-за протекающего по ней тока. Более точным считается лазерный оптический метод, однако он не согласуется с измерением отклонений массива балок одновременно. Емкостной метод, основанный на измерении изменений в емкости между балкой и подложкой, занимает промежуточное место по чувствительности и простоте исполнения, поэтому может использоваться в будущем.

Оптические системы, в которых измеренный ими изгиб балок преобразуется в оптическое изображение, проецируемое на обычную монохроматическую CCD- или CMOS-камеру, являются одними из самых перспективных. Характеристики системы в значительной степени определяются характеристиками этих камер (динамический диапазон, шумы, разрешение).

Хотя все эти схемы считывания могут достигать высокой чувствительности и низкого уровня шумов, только оптический метод является бесконтактным для микромеханических сенсорных элементов и не требует размещения однокристалльной электроники и проводной архитектуры. Производство ос-

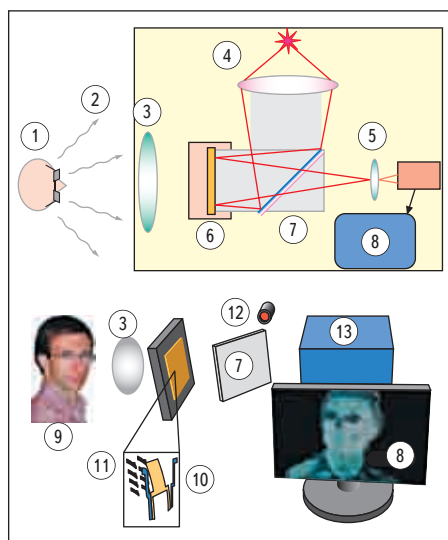


Рис. 41. Иллюстрация принципа работы массива микроболок, разработанного в Oak Ridge National Laboratory:

- 1 — объект; 2 — тепловое излучение;
- 3 — ИК-линза; 4 — точечный источник света;
- 5 — малая апертурная линза;
- 6 — массив балок в вакуумной ячейке;
- 7 — разделитель луча; 8 — дисплей; 9 — цель;
- 10 — MEMS пиксель; 11 — ИК;
- 12 — точечный источник света; 13 — CCD с линзой

новано на методах поверхностной микромеханики, перспективных для массового выпуска и с целью получения больших оптических форматов. В качестве источника света используется малоомощный лазерный диод. Без использования специальной обработки данных исследователям удалось достичь работы устройства при комнатной температуре с алгоритмом вычитания фона. NETD и время срабатывания датчиков составляют 500 мК и 6 мс соответственно.

В качестве значительной потенциальной ниши для сбыта датчиков исследователи рассматривают автомобильные системы ночного видения.

Термопары и термопилы

Термопары, в основе которых лежит термоэлектрический эффект Зеебека, широко используются для температурных измерений.

При возникновении температурной разницы между двумя металлами с различными проводящими свойствами генерируется диффузионный ток. Для его компенсации на концах двух металлических проводов генерируется напряжение Зеебека, измеряя которое, можно определить температурную разницу на концах термопары. В дальнейшем сгенерированное температурой напряжение может быть усилено при последовательном соединении множества пар термопар для того, чтобы формировать термопилы. Выходное напряжение Зеебека термопилы будет равно напряжению одной термопары, помноженной на их число.

Разработка технологий кремниевых MEMS и подвешенных мембранных структур позволила увеличить срабатываемость и скорость работы термопилы за счет снижения тепловой емкости и высокой тепловой изоляции. Кроме производства одиночного датчика, становится возможным выпуск монолитных сенсорных массивов FPA для теплового сканирования изображений [67–70]. Такой термопиль включает подложку и подвешенную мембрану со множеством термопар.

Преимущество термопилы в том, что они не требуют питания, являясь пассивными устройствами. Следовательно, отсутствуют шумы от флуктуаций напряжения питания, присущие микроболометрам. Поскольку ток, текущий через термопиль, мал или равен нулю, низкочастотный $1/f$ -шум от тока также сводится к нулю. В связи с тем, что термопилы определяют температурную разницу между горячим и холодным концом, они не нуждаются в температурной стабилизации, как резистивные болометры.

Коммерчески доступная элементная база датчиков этого типа представлена, например, фирмами Melexis, H1Planartechnik.

MLX90247 Melexis (рис. 1, КиТ № 8'2006) использует термопиль, предназначенный для измерений температурной разницы между объектом и детектором, и термистор для измерения температуры детектора. Кремниевое окно блокирует видимый свет и коротковолновый инфракрасный свет. Измерение абсолютной температуры объекта возможно посредством комбинирования обоих выходов. Горячее соединение термопила позиционировано близко к центру мембраны, холодные соединения расположены выше края объемной кремниевой подложки. Инфракрасное излучение, воздействующее на мембрану с низкой теплопроводностью, создает температурную разницу между мембраной и окружающим объемным кремнием. Напряжение термопила соответствует разнице между температурным объектом и детектором.

Вместе с интерфейсом MLX90313 датчик MLX90247 составляет основу инфракрасных

модулей термометров MLX90601. Основное назначение модулей — автомобильный климат-контроль, а также обнаружение пассажиров.

Основываясь на разработках сенсорных модулей, Melexis также создает автомобильные датчики, включающие массив пикселей 10×10 . Эти ИК-массивы позволят более комплексно оценивать присутствие, число и положение пассажиров.

Совместно с Ann Arbor Sensor Systems LLC компания MemTech производит MEMS-термопилы с низким температурным коэффициентом чувствительности, постоянным срабатыванием в области ИК-спектра, долговременной стабильностью. Достижимы значения точности в $\pm 1^\circ\text{C}$, в зависимости от температурного диапазона. Для узких температурных диапазонов, таких как измерение температуры тела, возможно получение точности в $0,1^\circ\text{C}$.

Термопильный массив MemTech, предлагаемый в корпусе LCC, представляет собой MEMS-устройство верхнего рыночного сегмента, состоящее из массива тонких термопилы 32×32 , чувствительных к тепловому излучению.

Таким образом, термопилы с применением MEMS-детектора предлагают потенциал относительно низкой цены при сравнительно высоком уровне исполнения, что перспективно для многих автомобильных применений. Ограничения технологии — большой размер сенсорных элементов (около 250×250 мкм) — не позволяют пока производить датчики для систем ночного видения, где требуется более высокое разрешение.

Термооптические датчики RedShift

Компания RedShift Systems, Corp. (www.redshiftsystems.com) предлагает еще одно решение по созданию тепловых формирователей изображений для различных рынков, включая автомобильный — тепловые модули на основе технологии Thermal Light Valve (TLV) (рис. 42).

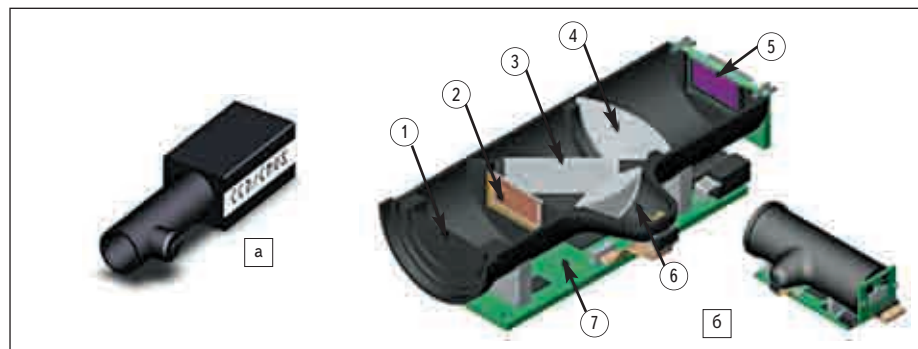


Рис. 42. Технологии термооптических датчиков RedShift Systems:

- a, б — внешний вид (а) и принцип работы (б) тепловой камеры Redshift 1160 на основе технологии Thermal Light Valve;
- 1 — ИК-оптика; 2 — тепловой световой клапан (Thermal Light Valve); 3 — отражатель (рефлектор); 4 — NIR оптика;
- 5 — КМОП формирователь изображения; 6 — NIR источник света и фокусирующая оптика;
- 7 — обрабатывающая и интерфейсная печатная плата

Длинноволновая ИК-камера — машина RedShift 1160 (Infrared Camera Engine) — разработана для OEM-производителей, заинтересованных в быстром вводе в их линейки продукции тепловых камер с высокими рабочими характеристиками, доступных по цене. Цена модулей в настоящее время ниже \$1000, что на порядок меньше в сравнении с ценой около \$10 тыс. многих других коммерчески доступных тепловых систем сканирования.

RedShift 1160 — это конфигурируемая камера на технологии RedShift Thermal Light Valve (TLV), в основу которой заложен термооптический эффект. Массив FPA состоит из мембранных пикселей с термически согласованными тонкопленочными фильтрами [71]. Каждый тепловой пиксель функционирует как волновой транслятор, преобразующий far-IR-сигналы в near-IR-сигналы, которые определяются CCD- или CMOS-камерами.

Настраиваемый оптический RedShift-фильтр — это структура Fabry-Perot. Два зеркальных слоя из нитрида кремния/аморфного кремния (SiNx/a-Si) размещены вокруг кремниевой полости (Si). Это обеспечивает высокий термооптический коэффициент $2,3 \times 10^4/\text{K}$ при температуре в 300 K и допускает передачу спектра, который настраивается на различных температурах от 22 до 82 °C.

CMOS-совместимая тонкопленочная технология, разработанная RedShift Systems, основана на исследованиях, проведенных в Принстонском Университете по применению тонкопленочных проводников к резонансной оптике. Тонкопленочный процесс, используемый RedShift — стандартный процесс, обычно применяемый в дисплеях FPD, приводящий к достижению высоких объемов и низкой цены. Оптические фильтры и MEMS-технологии позволяют получать недорогие пассивные длинноволновые IR FPA без электрических проводов или активного охлаждения. Источник сигнала пробы может быть настраиваемым источником с той же термостабильностью, что и для FPA-фильтров.

Отсутствие потребности в термоэлектрическом охладителе и совместимость со стандартными КМОП-процессами, разъединение сенсорной части и ROIC — важнейшие преимущества технологии.

Модули RedShift TLV характеризуются пиксельным разрешением 160×120 , выбором выходного формата из NTSC и PAL, прочной конструкцией, уплотнением для защиты от окружающих условий, гибким кабелированием и малым размером. Модули включают интегрированную тепловую оптику. Настройки, такие как параметры обработки изображений, конфигурируются при производстве. Устройства обеспечивают законченную обработку изображений для получения высокой чувствительности и низких шумов.

Прототип IR FPA RedShift с разрешением 160×120 пикселей, продемонстрированный в 2005 году, характеризовался способностью пикселей к взаимодействию (pixel interoperability) более чем в 99,9% (с NETD < 1,5 среднего NETD). С фактором заполнения более 92% этот прототип показал температурный коэффициент около 6%/K и среднее поглощение примерно 42% в диапазоне длин волн 8–15 мкм. Значения NETD составили 0,28 K при частоте смены кадров 22 Гц, причем были достигнуты без необходимости температурного контроля.

Температурная чувствительность серийно выпускаемой камеры RedShift 1160 в 150 мК и частота кадров 30 fps сравнимы с показателями других камер, имеющих на рынке. Автомобильные применения включают защиту пешеходов и автоматическое затемнение лучей дальнего света встречной машины, причем, как упоминалось выше, RedShift 1160 позволяет разработку новых систем по ценам, допускающим проникновение на массовый автомобильный рынок.

Заключение

За последние несколько лет цена тепловых камер значительно снизилась — до \$10 000 и даже до \$1000. Один из основных факторов, допускающих это снижение цен, — использование матриц FPA размерами 160×120 вместо решеток 320×240 . Другим важнейшим фактором является повсеместное увеличение спроса на ИК-детекторы, ведь, как известно: чем выше объемы, тем ниже цена. Вероятно, и в дальнейшем стоимость ИК-детекторов будет непрерывно уменьшаться, так как они востребованы автомобильными системами ночного видения, а также робототехникой (машинное зрение), термографией, охранной безопасностью, юридическими службами и пожарной безопасностью, военной и специальной техникой.

Для пожарных систем, например, камеры выпускают компании ISG, Bullard, MSA.

Поскольку на данном этапе для технологии ИК-считывания основными управляющими факторами являются цена и характеристики тепловых камер, производители камер продолжают изучать и оценивать новые подходы для создания следующего поколения тепловых формирователей изображения [72–77]. В ближайшие 10 лет ожидается появление значительного числа новых тепловых камер специального автомобильного назначения, которые станут для водителей столь же привычными, как и обычные видеокamеры или зеркала заднего вида. ■

Литература

35. Певцов Е., Чернокожин В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловизи-

онных камер // Электронные компоненты. 2001. №№ 1–2.

36. Волков В. Г., Ковалев А. В., Федчишин В. Г. Тепловизионные приборы нового поколения // Специальная техника. 2001. №№ 6–7.
37. Cryogenically cooled radiation detection apparatus. US Patent 4,740,702. Оpubл. April 26, 1988 (Huang, et al., Nicolet Instrument Corporation).
38. Uncooled reflective shield for cryogenically-cooled radiation detectors. US Patent 4,820,923. Оpubл. April 11, 1989 (Wellman, Santa Barbara Research Center).
39. Multicolor infrared photodetector. US Patent 5, 013, 918. Оpubл. May 7, 1991 (Choi, The United States of America as represented by the Secretary of the Army).
40. Wide-range multicolor IR detector. US Patent 5, 198, 659. Оpubл. March 30, 1993 (Smith, et al., The United States of America as represented by the Secretary of the Army).
41. Large dynamic range focal plane array. US Patent 6,498,346. Оpubл. December 24, 2002 (Martin, Lockheed Martin Corporation).
42. GaAs substrate with Sb buffering for high in devices. US Patent 6, 888, 179. Оpubл. May 3, 2005 (Uppal, Bae Systems Information and Electronic Systems Integration INC).
43. Micro-bolometric infrared staring array. US Patent 5, 554, 849. Оpubл. 10.09.1996 (Flir Systems, Inc., Gates)
44. Enhanced vision system sensitive to infrared radiation. US Patent 6, 806, 469. Оpubл. 19.10.2004 (Flir Systems, Inc., Kerr).
45. Enhanced vision system sensitive to infrared radiation. US Patent 7,102,130. Оpubл. 5.09.2006 (Flir Systems, Inc., Kerr).
46. Thermal sensor and method of making same. US Patent 6, 144, 285. Оpubл. 7.11.2000 (Higashi, Honeywell International Inc.).
47. Flexible high performance microbolometer detector material fabricated via controlled ion beam sputter deposition process. US Patent 6, 495, 070. Оpubл. 17.12.2002 (Cole, et al. Honeywell Inc.).
48. Infrared focal plane array. US Patent 6,031,231. Оpubл. Feb 29, 2000 (Kimata, et al., Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha).
49. Bolometric focal plane array. US Patent 6,249,002. Оpubл. June 19, 2001 (Butler, Lockheed-Martin IR Imaging Systems, Inc.).
50. Thermal type infrared ray detector with thermal separation structure for high sensitivity. US Patent 6, 441, 374. Оpubл. August 27, 2002 (NEC Corporation, Awano, et al.).
51. Infrared detector with amorphous silicon detector elements, and a method of making it. US Patent 6, 777, 681. Aug 17, 2004 (Schimert, et al. Raytheon Company).
52. Thermally stabilized radiation detector utilizing temperature controlled radiation filter. US Patent 7, 105, 821. Оpubл. Sept 12, 2006 (Kennedy, et al., Raytheon Company).
53. Method and apparatus for generating a visible image with an infrared transmissive window. US Patent 6, 833, 822. Оpubл. 21.12.2004 (Klocek; Paul, Raytheon Company).

54. Thermal detector and method. US Patent 5, 559, 332. Оpubл. Sept 24, 1996 (Meissner, et al., Texas Instruments Inc.).
55. Thermal detector and method. US Patent 5, 708, 269. Оpubл. Jan 13, 1998 (Meissner, et al., Raytheon TI Systems, Inc.).
56. Fabry-Perot micro filter-detector. US Patent 5 550 373. Оpubл. 27.08.1996 (Cole, et al. Honeywell Inc.).
57. Integrated infrared microlens and gas molecule getter grating in a vacuum package. US Patent 5 701 008. Оpubл. 23.12.1997 (Ray, et al. HE Holdings, Inc.).
58. Sealed-cavity microstructure and microbolometer and associated fabrication methods. US Patent 6 252 229. Оpubл. 26.06.2001 (Hays, et al. Boeing North American, Inc.).
59. Uncooled infrared focal plane imager and microelectromechanical infrared detector for use therein. US Patent 6, 300, 632. Оpubл. 9 Oct. 2001 (Liu, et al., The Regents of the University of Michigan).
60. Transpacitor. US Patent 5, 448, 067. Оpubл. 05.09.1995 (Micheli, General Motors Corporation).
61. Electromagnetic radiation detectors having a micromachined electrostatic chopper device. US Patent 6, 586, 738. Оpubл. July 1, 2003 (Dausch, et al., MCNC).
62. Electromagnetic radiation detectors having a microelectromechanical shutter device. US Patent 7, 026, 602. Оpubл. April 11, 2006 (Dausch, Research Triangle Institute).
63. Method of fabricating a ferroelectric/pyroelectric infrared detector using a crystallographically oriented electrode and a rock salt structure material substrate. US Patent 6, 699, 521. Оpubл. March 2, 2004 (Tidrow, et al., The United States of America as represented by the Secretary of the Army).
64. Ferroelectric/pyroelectric infrared detector with a colossal magneto-resistive electrode material and rock salt structure as a removable substrate. US Patent 6, 495, 828. Оpubл. Dec 17, 2002 (Tidrow, et al., The United States of America as represented by the Secretary of the Army).
65. Муртазин А., Олихов И., Соколов Д. Пирозлектрический электронно-оптический преобразователь // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 1.
66. Method of making suspended microstructures. US Patent 5 627 112. Оpubл. 6.05.1997 (Tennant, et al. Rockwell International Corporation).
67. IR sensor with enhanced electrical interference protection. US Patent 6, 765, 209. Оpubл. July 20, 2004 (Kassovski, et al., Melexis NV).
68. Thermopile infrared sensor, thermopile infrared sensors array, and method of manufacturing the same. US Patent 6, 335, 478. Оpubл. Jan 1, 2002 (Chou, et al.).
69. Integrated thermopile sensor for automotive, spectroscopic and imaging applications, and methods of fabricating same. US Patent 5, 689, 087. Оpubл. Nov 18, 1997 (Jack, Santa Barbara Research Center).
70. Heat sink for silicon thermopile. US Patent 6, 987, 223. Оpubл. Jan 17, 2006 (Schneider, Delphi Technologies, Inc.).
71. Tunable optical instruments. US Patent 7, 002, 697. Оpubл. 21.02.2006 (Domash, et al. Aegis Semiconductor, Inc.).
72. Image enhancement in far infrared camera. US Patent 6, 759, 949. Оpubл. July 6, 2004 (Miyahara, Visteon Global Technologies, Inc.).
73. Alternative pixel shapes for uncooled micro-bolometers. US Patent 6, 956, 213. Оpubл. Oct. 18, 2005 (Antesberger, The United States of America as represented by the Secretary of the Army).
74. Multispectral multipolarization antenna-coupled infrared focal plane array. US Patent 7, 095, 027. Оpubл. 22.08.2006 (Boreman, University of Central Florida Research Foundation, Inc., Raytheon Missile Systems).
75. Microbolometer focal plane array with temperature compensated bias. US Patent 7, 105, 818. Оpubл. Sept. 12, 2006 (Anderson, et al., Infrared Solutions, Inc.).
76. Adaptively reducing offset in a thermal imaging camera. US Patent 7, 122, 788. Оpubл. 17.10.2006 (Owen, et al. L-3 Communications Corporation).
77. Uniform, non-disruptive, and radiometrically accurate calibration of infrared focal plane arrays using global scene motion. US Patent 7, 132, 648. Оpubл. 7.11.2006 (Ratiff, et al., Science & Technology Corporation@UNM).