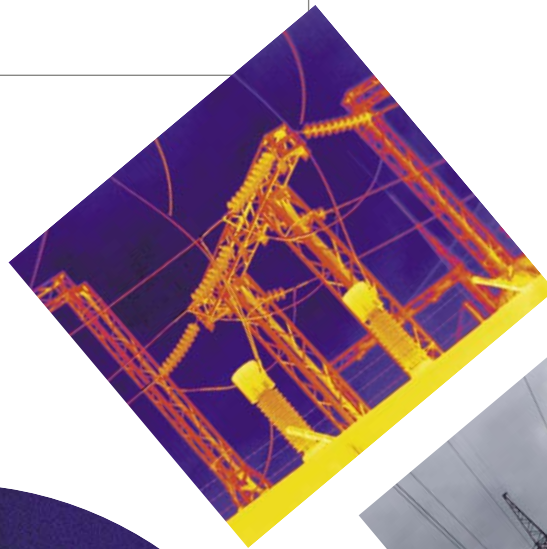


А.А. ГОЛИЦЫН



ГЛАЗ ОМ

ТЕПЛОВИЗОРА



Тепловидение – это получение изображения объектов с помощью исходящего от них теплового (инфракрасного) излучения. На сегодня тепловизионная техника имеет достаточно широкое применение. Это и специальные медицинские тепловизоры, и приборы для энергоаудита – поиска утечек тепла в зданиях и на теплотрассах, и всевозможные приборы наблюдения, используемые спасателями и охранниками в условиях задымления и отсутствия света и т.д. Все чаще тепловизоры устанавливаются на автомобили для езды в тумане. Помимо мирных целей эти приборы нашли и сугубо военное применение в качестве прицелов и в составе головок самонаведения и т.д.



Еще из школьного курса физики все мы знаем, что электромагнитное излучение не ограничивается видимым спектром – существуют еще рентгеновская, ультрафиолетовая и инфракрасная области и радиодиапазон. Также хорошо известно, что каждый объект с температурой, отличной от абсолютного нуля, за счет внутренней энергии испускает так называемое тепловое излучение с непрерывным распределением по спектру длин волн. Примером естественного теплового излучения может служить свечение раскаленного куска железа. При нормальной температуре этот кусок тоже излучает, однако спектр излучения не затрагивает видимую область.

В физике для расчета теплового излучения принята модель *абсолютно черного тела*, тепловое излучение которого описывается *законом Стефана–Больцмана*, который первоначально был выведен экспериментально. Его современный вид основан на представлении, что тепловое излучение генерируется в процессе простого гармонического колебания атомных осцилляторов.

На графиках спектральной плотности излучения черного тела в большом диапазоне температур видно, что спектр меняется в зависимости от температуры: максимум излучения с увеличением температуры смещается в сторону меньших длин волн. Это объясняет причину, по которой не видно свечения железа при нормальной температуре – максимум излучения приходится на невидимую невооруженным глазом область спектра 6–12 мкм. Строго говоря, даже при температуре 1000 К благодаря колоколообразной форме кривой на графике спектральной плотности излучения только часть его приходится на видимую область.

Резюмируя вышесказанное, можно сказать, что:

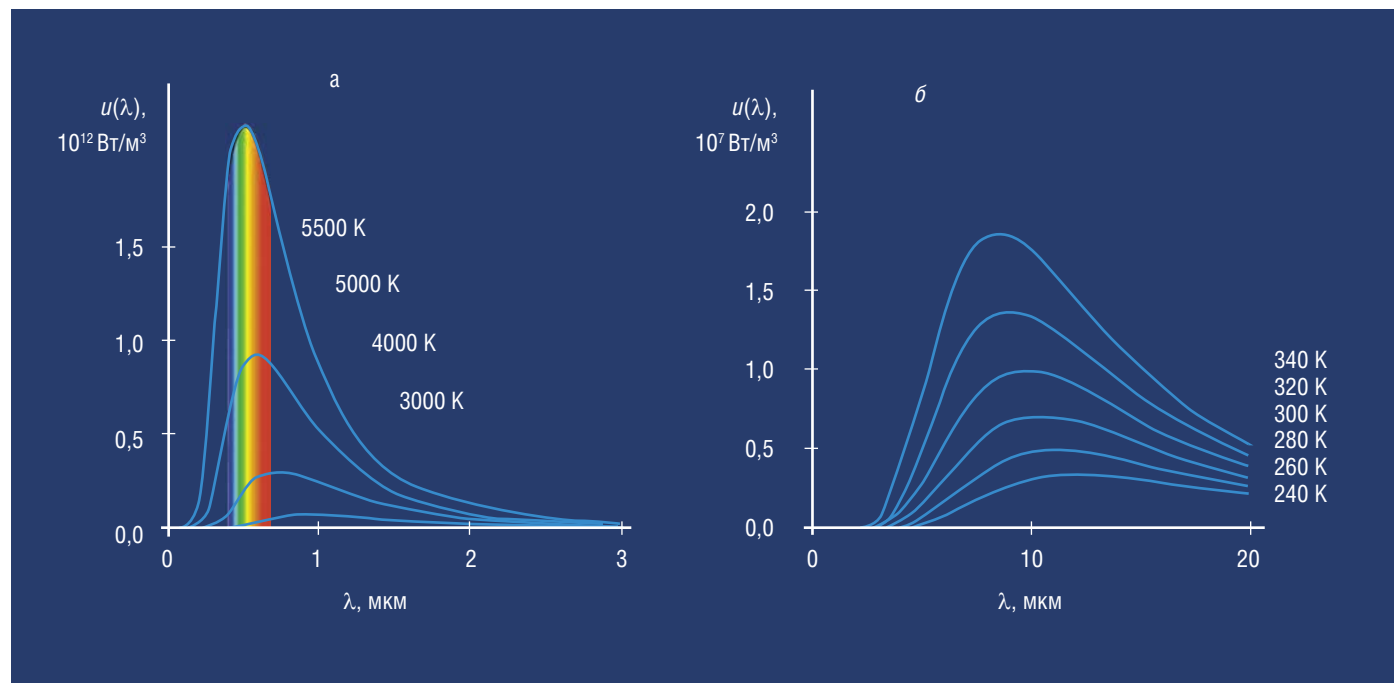
- излучают, т. е. светятся все тела; это означает, что при помощи тепловизора можно наблюдать объекты в условиях полной темноты, так как тепловизор воспринимает собственное электромагнитное излучение объектов;
- чем выше температура тела, тем ярче оно светится; отсюда следует простой алгоритм интерпретации теплового излучения на экране тепловизора: чем выше температура наблюдаемого объекта, тем ярче данный объект;
- при температурах от -30 до $+100$ °С спектр излучения тел попадает на диапазон 6–16 мкм, поэтому этот диапазон оптимален для наблюдения таких объектов, как люди, животные и деревья, здания, автомобили и т.д. В то же время для тепловизионных головок самонаведения, нацеленных на нагретые двигатели самолетов, оптимален диапазон 3–5 мкм.

ГОЛИЦЫН Александр Андреевич – старший инженер-электроник отдела электронных систем Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники (филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск). Аспирант Новосибирского государственного технического университета. Автор и соавтор более 40 научных работ

Ключевые слова: тепловидение, инфракрасное излучение, тепловизионный фотоприемник, тепловизионные приборы наблюдения.
Key words: thermovision, infrared radiation, thermal image sensor, thermal surveillance devices

Современные тепловизоры используются в самых разных целях, как мирных, так и военных. *На фото слева* – тепловизионный прицел производства ИФП СО РАН (Новосибирск)

© А. А. Голицын, 2014



На графиках зависимости спектральной плотности u излучения черного тела от длины волны λ для высоко- (а) и низкотемпературных (б) тел видно, что спектр излучения меняется в зависимости от температуры: с увеличением температуры максимум излучения смещается в сторону меньших длин волн

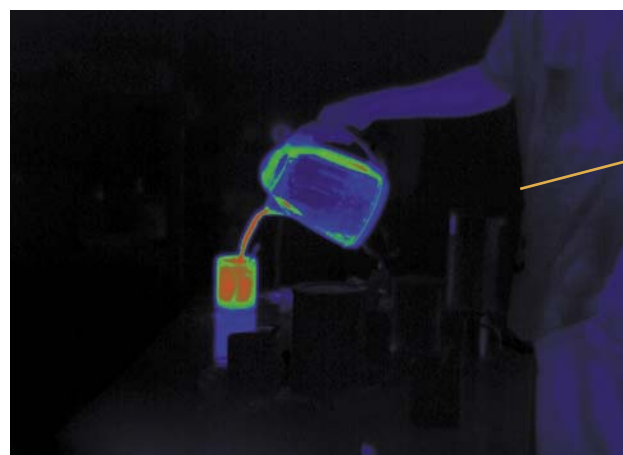
Еще одним преимуществом тепловизоров, помимо способности видеть в полной темноте, является возможность наблюдать объекты сквозь дым, пыль и туман – все эти среды прозрачны для инфракрасного излучения с длинами волн более 3 мкм. Дело в том, что размер частиц пыли, дыма и мелких капель воды в тумане меньше длин волн электромагнитного излучения, поэтому волны попросту огибают находящиеся в воздухе частицы. Можно наблюдать объекты и сквозь небольшой слой полиэтилена.

И напротив, не все вещества, прозрачные в видимом диапазоне, являются такими же для инфракрасного излучения, например, слой воды толщиной в несколько сантиметров или обычное оконное стекло. Поэтому для изготовления тепловизионных объективов применяются особые материалы, такие как германий.

Иногда «температурное видение» тепловизора может быть ошибочным. Так, на тепловизионном изображении полированный металлический чайник кажется менее нагретым, чем вода и стакан, в который она наливается. Более теплыми кажутся пластмассовые накладки и крышка чайника, хотя металлический корпус, безусловно, более нагрет

От серого до радуги

Следует иметь в виду, что закон Стефана-Больцмана справедлив только для абсолютно черных тел. Излучение реальных тел подчиняется *закону излучения Кирхгофа*: отношение излучательной способности любого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной частоты и не зависит от их формы и химической природы. А так как реальные тела имеют поглощательную способность меньше единицы, то они, соответственно, имеют и меньшую излучательную способность. Следовательно, интенсивность излучения для тел с разной шероховатостью поверхности при одной и той же температуре будет разной. Благодаря этому возможно



С помощью тепловизора можно наблюдать объекты сквозь дым, пыль и туман: все эти среды являются прозрачными для инфракрасного излучения с длиной волны от 3 мкм и выше

различать объекты, имеющие одинаковую температуру, например, рельеф местности и деревья.

Нередки случаи, когда интенсивность излучения более нагретого тела оказывается меньшей по сравнению с интенсивностью менее нагретого тела. Примером может служить полированный металлический чайник, из которого горячая вода наливается в стакан. Таким образом, для определения температуры поверхности тела по его тепловому изображению необходимо знать коэффициент поглощения тела, т.е. просто «знать, на что смотришь». Зависимость коэффициента поглощения того или иного тела от температуры определяется заранее экспериментально либо вычисляется теоретически и в дальнейшем хранится в памяти тепловизора.

Медицинские тепловизоры оптимизированы для измерения температуры человеческого тела. Соответственно, они непригодны для определения реальной температуры, к примеру, бетонной стены. В приборах, предназначенных для энергоаудита, для относительно точного измерения температуры предусмотрен выбор типа наблюдаемой поверхности – металлическая или пластиковая труба, бетонная или деревянная стена и т.д. Существует еще ряд подобных приборов для научных исследований, для контроля и автоматизации технологических процессов, для поиска утечек газа и т.п. Все такие устройства относятся к классу измерительных тепловизоров.

Следующий класс – *тепловизионные приборы наблюдения*, предназначенные для наблюдения за местностью. К ним относятся тепловизоры, используемые в поисковых и спасательных операциях, в охране, а также автомобильные и прицелы. В поле зрения этих приборов

могут попадать одновременно самые разные объекты с различными коэффициентами поглощения и температурами поверхности, поэтому они не оптимизированы для измерения температур, а просто отображают на экране «все, что видят».

На экранах измерительных тепловизоров традиционно используется цветовое представление тепловой картины. Объекты с меньшей интенсивностью излучения обычно окрашиваются в холодные цвета, с большей интенсивностью излучения – в теплые. Зеленый цвет и промежуточные оттенки обычно используются для отображения объектов со средней интенсивностью излучения. Такая цветовая интерпретация позволяет наглядно показать температуру объектов. В приборах наблюдения обычно приводится монохромное изображение наблюдаемой сцены, на котором лучше видны детали, поскольку современные мониторы лучше всего передают оттенки именно серого цвета.

Фотонные или тепловые?

Основным элементом каждого тепловизора является *тепловизионный фотоприемник* – устройство, преобразующее поток излучения в электрические сигналы изображения.

В настоящее время наибольшее распространение получили фотоприемники в диапазонах 8–14 и 3–5 мкм. Из-за непрозрачности атмосферы в области длин волн 5–8 мкм и выше 14 мкм детекторы для этих диапазонов применяются только на космических аппаратах. Одновременно оба диапазона также не используются – это связано с трудностью изготовления соответствующих объективов.



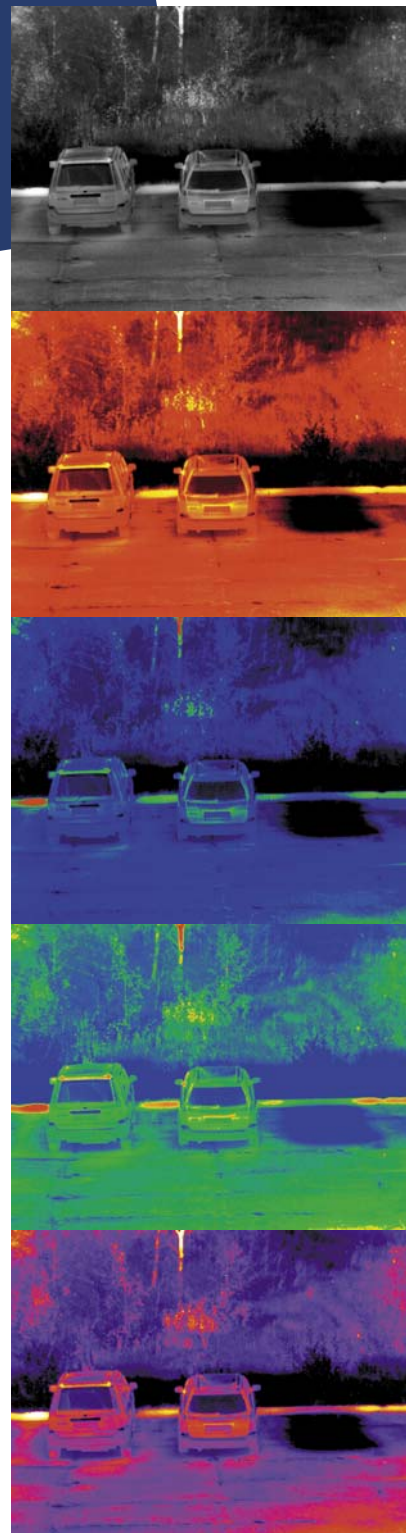
Современные тепловизионные приборы позволяют отображать на экране изображение в нескольких палитрах на выбор оператора – от монохромного до псевдоцветного (справа). На тепловизионных изображениях автомобилей на парковке отчетливо виден ненагретый участок бетона, на котором перед съемкой в течении длительного времени находился еще один автомобиль, закрывавший своей тенью бетон от нагрева солнцем

По принципу действия фотоприемники делятся на два типа – *фотонные* и *тепловые*. Фотонные приемники обеспечивают получение изображения за счет *фотоэффекта*, преобразования падающего потока фотонов в электрический сигнал при взаимодействии фотонов с электронной подсистемой материала приемника. Принцип их действия аналогичен фотоприемникам видимого диапазона с некоторыми отличиями, одно из которых заключается в необходимости охлаждения.

Дело в том, что при комнатной температуре собственные внутренние шумы фотоприемника при детектировании фотонов с низкой энергией значительно превышают полезный сигнал, т. е. фотоприемник в этом случае изменяет собственное тепловое излучение. Уровень шума зависит от температуры, поэтому фотоприемник необходимо охлаждать до температуры, при которой внутренние шумы уменьшаются до приемлемого уровня. Для понижения температуры могут применяться различные методы: охлаждение жидким азотом или сжиженным гелием, термоэлектрическое охлаждение на эффекте Пельтье и т. д.

Принцип действия не требующих охлаждения тепловых фотоприемников основан на регистрации изменения свойств материала при изменении его температуры за счет поглощения приходящего излучения. Наибольшее распространение среди тепловых фотоприемников получили *болометры*, использующие изменение сопротивления тонкой металлической, полупроводниковой или сверхпроводящей пленки при нагреве.

При проектировании тепловизионных систем ранее традиционно использовались фотонные фотоприемники, поскольку до недавнего времени технологии не позволяли серийно производить неохлаждаемые детекторы



В Институте физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова СО РАН и его филиалах разрабатываются и серийно выпускаются тепловизоры на фотонных и тепловых детекторах. В институте проводится полный цикл работ, необходимый для создания тепловизионной техники, включая расчет оптики, разработку электронных схем, производство объективов и т. д. Кроме того, здесь ведутся работы и по созданию тепловизионных фотоприемников. Среди тепловизионных устройств, выпускаемых институтом, – и отдельные тепловизионные модули, и полноценные приборы: медицинские тепловизоры, охранные камеры, бортовые приборы для вертолетов, стрелковые прицелы. Все приборы имеют высокое качество и технические характеристики на уровне ведущих зарубежных производителей

с достаточной чувствительностью. Однако за последние десять лет ситуация резко изменилась, и сейчас большая часть тепловизоров разрабатывается на неохлаждаемых детекторах, которые имеют меньшее энергопотребление, меньшие габариты и массу, относительную простоту конструкции.

Тепловизоры на неохлаждаемых фотоприемниках имеют больший ресурс и обладают большей надежностью, при этом имеют на порядок меньшую стоимость по сравнению с приборами на фотонных детекторах. К недостаткам относятся меньшая чувствительность и быстродействие. Поэтому там, где требуется большая чувствительность и высокая скорость измерений, до сих пор используются фотонные фотоприемники.

Развитие тепловизионной техники, как и электроники в целом, не стоит на месте. Постоянно происходит совершенствование тепловизионных детекторов, что приводит к улучшению их технических характеристик на фоне удешевления. Дорогостоящие германиевые объективы постепенно заменяются недорогими полимерными.

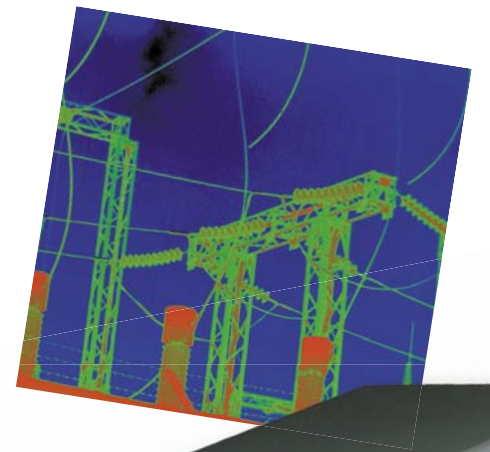
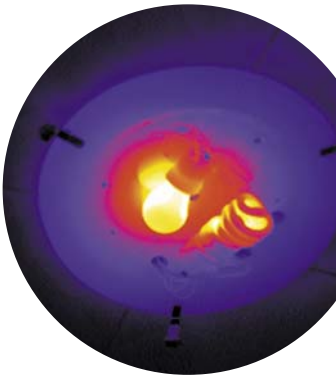
Все это приводит к расширению сфер применения тепловизоров: если в прошлом веке они были доступны только научным лабораториям и военным, то теперь практически любой желающий может купить прибор для анализа тепловых потерь в зданиях, охранную тепловизионную камеру или прибор наблюдения.

Вероятно, в ближайшее десятилетие тепловизионными приборами наблюдения будут массово оснащаться грузовые автомобили и автобусы, как это произошло с устройствами спутниковой навигации. А наличие тепловизионного детектора станет обычной опцией для планшета или мобильного телефона.

Литература

Джемисон Дж. Э. и др. *Физика и техника инфракрасного излучения* / Пер. с англ. под общ. ред. Н. В. Васильченко. М.: Книга по требованию, 2013. 640 с.

Кортаев В. В., Мельников Г. С., Михеев С. В. и др. *Основы тепловидения: Учебн. пособие*. СПб.: НИУ ИТМО. 2012. 122 с.



Медицинская тепловизионная камера производства ИФП СО РАН (Новосибирск)