

А. П. КОВЧАВЦЕВ



ТЕПЛОВИЗОР: лучше один раз увидеть

© А. П. Ковчавцев, 2012

Известно, что человеческий глаз может регистрировать электромагнитное излучение лишь в узком диапазоне длин волн, относящихся к видимому свету. Спектр же излучаемых различными объектами фотонов гораздо шире. Много полезных и интересных деталей можно увидеть, если «посмотреть» на живые и неживые объекты в инфракрасном свете. Такие инфракрасные изображения можно получить с помощью специальных приборов – тепловизоров, которые помогают не только наглядно представить процессы изменения температуры различных тел и измерить ее с высокой точностью, но даже диагностировать заболевания на ранних этапах их возникновения

Удивительно, но первые датчики, реагирующие на инфракрасное излучение, появились еще в 1830 г. В них использовались термопары, которые преобразовывали тепло в электрическое напряжение. Спустя столетия были открыты терморезистивные материалы, сопротивление которых зависит от температуры, и с их использованием были разработаны датчики излучений – болометры.

В 1920 г. появились фотонные датчики излучений (фотоспротивления и фотодиоды) на основе полупроводниковых материалов, в которых падающие кванты излучения непосредственно преобразуются в электрический сигнал. Такие датчики имели уже более высокую чувствительность и быстродействие. А в 1944 г. были созданы фотоприемники на основе сульфида свинца, которые были чувствительны в спектральном диапазоне 1,5–3 мкм.

До середины прошлого века спектральную область чувствительности датчиков удалось расширить до средней инфракрасной области (3–5 мкм), используя датчики на основе антимонида индия, а затем, в 1960-х гг., – и до дальней инфракрасной области (8–14 мкм), при этом использовались датчики на основе сплава кадмий-ртуть-теллур.

Именно с применением таких полупроводниковых фотонных приемников были разработаны современные тепловизионные камеры, которые широко применяются для визуализации в инфракрасной области спектра самых разных объектов.

Первоначально инфракрасное изображение получали с помощью одиночного датчика, сканируя исследуемый объект при помощи вращающихся призм по вертикали и горизонтали. В более поздних разработках стали использоваться многоэлементные датчики излучений – линейки и матрицы.

Наглядно и точно

Появление тепловизоров открыло перед учеными новые возможности в исследовании тепловых процессов. Этот прибор позволяет визуализировать распределения температуры, давая наглядную и, что важно, точную информацию о степени нагрева различных участков изучаемого объекта. А увидев собственными глазами целостную картину происходящих изменений, можно лучше и быстрее понять физический смысл происходящего.

В качестве иллюстрации рассмотрим динамику падения капли нагретой (до 38 °С) воды на поверхность воды комнатной температуры. Трудно представить, какой другой метод исследований, помимо инфракрасного, смог бы дать более подробную картину этого достаточно сложного и быстрого процесса, занимающего не более 0,2 с.

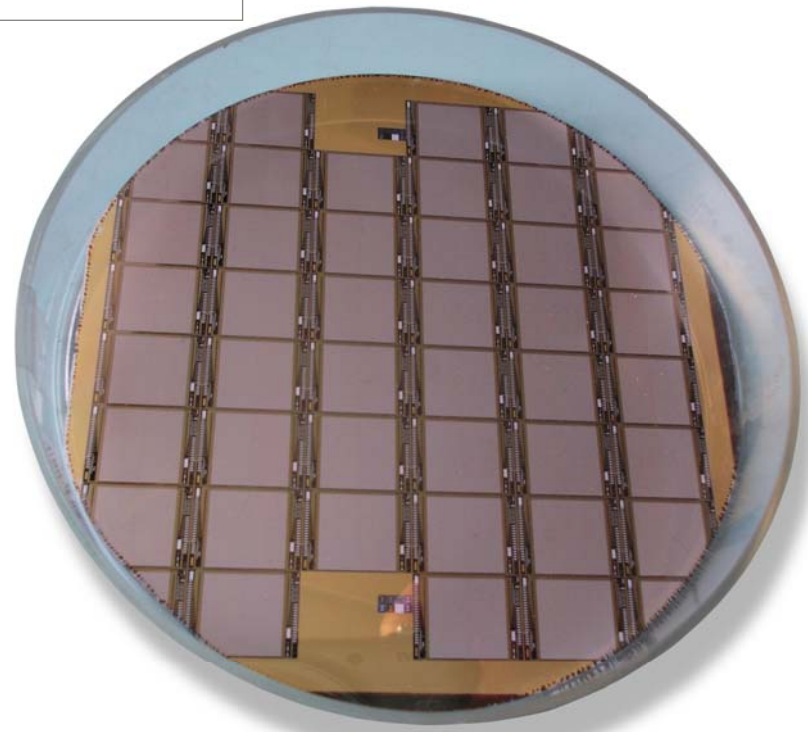


КОВЧАВЦЕВ Анатолий Петрович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микроэлектроники Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск). Автор более 110 научных работ

Ключевые слова: микроэлектроника, измерение температуры, интегральные схемы, медицинская диагностика.
Key words: microelectronics, temperature measuring, integral circuit, medicine testing



Тепловизор «Свит» был разработан под руководством заведующего лабораторией микроэлектроники Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова, д. ф.-м. н., профессора Г. Л. Курышева (1945 — 2012 гг.). С 1990-х гг. он активно занимался фотоэлектроникой, а именно — созданием многоэлементных фотоприемных устройств ближнего и среднего инфракрасного диапазонов, среди которых, помимо «Свита», важно отметить инфракрасный микроскоп высокого пространственного разрешения и спектрометр на основе линейчатых фотоприемных устройств



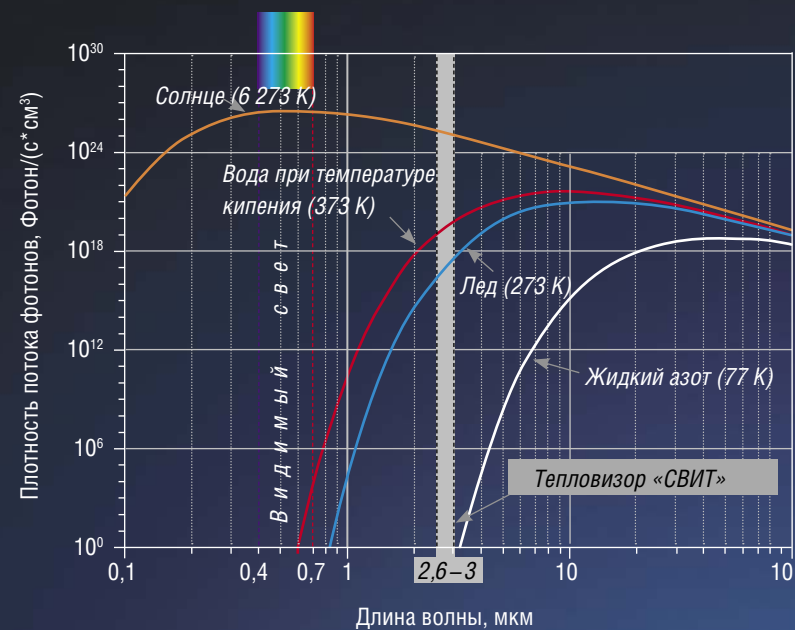
Кремниевые мультиплексоры - важная часть чувствительной к инфракрасному излучению матрицы тепловизора «Свит». Они представляют собой интегральные схемы, собранные на едином кристалле, и предназначены для сбора, усиления и предварительной обработки сигналов матрицы чувствительных к ИК излучению датчиков. В процессе сборки мультиплексоры присоединяются к матрице при помощи холодной сварки. На рисунке – мультиплексоры в заводской сборке, на монолитной технологической пластине

Итак, сначала от кончика пипетки отрывается сферическая теплая капля воды, окруженная тонкой, более холодной водяной оболочкой. По мере падения поверхность капли остывает. Примерно через 0,1 с капля встречается с холодной водой: ее холодная оболочка разрушается, однако внутри капля остается нагретой. В дальнейшем над частью упавшей капли образуется водяной султан, от которого отделяется мелкая капелька, которая движется вверх и также остывает. В какой-то момент эта «дочерняя» капля зависает и ее поверхность нагревается благодаря теплопроводности воды, поскольку внутри капелька остается теплой. Падая, она остывает, но даже при встрече с поверхностью воды тепловизор «видит» ее нагретую сердцевину. Исследование поведения нагретой капли – хорошая модельная задача, очень полезная при изучении теплофизики и гидродинамики струйных течений и формирования эмульсий.

Еще один интересный эффект можно наблюдать при впитывании капли воды комнатной температуры в сухую ткань. При этом в начальный момент видна только ровная, однородно нагретая поверхность ткани. Затем вокруг капли появляется температурный ореол (красное кольцо), температура которого на 6 °С выше температуры середины капли. Ореол смещается по ткани вместе с фронтом впитываемой воды и существует лишь непродолжительное время.

Наблюдаемый нагрев связан с выделением теплоты адсорбции в капиллярах ткани. Эффект будет тем сильнее, чем выше будет впитывающая

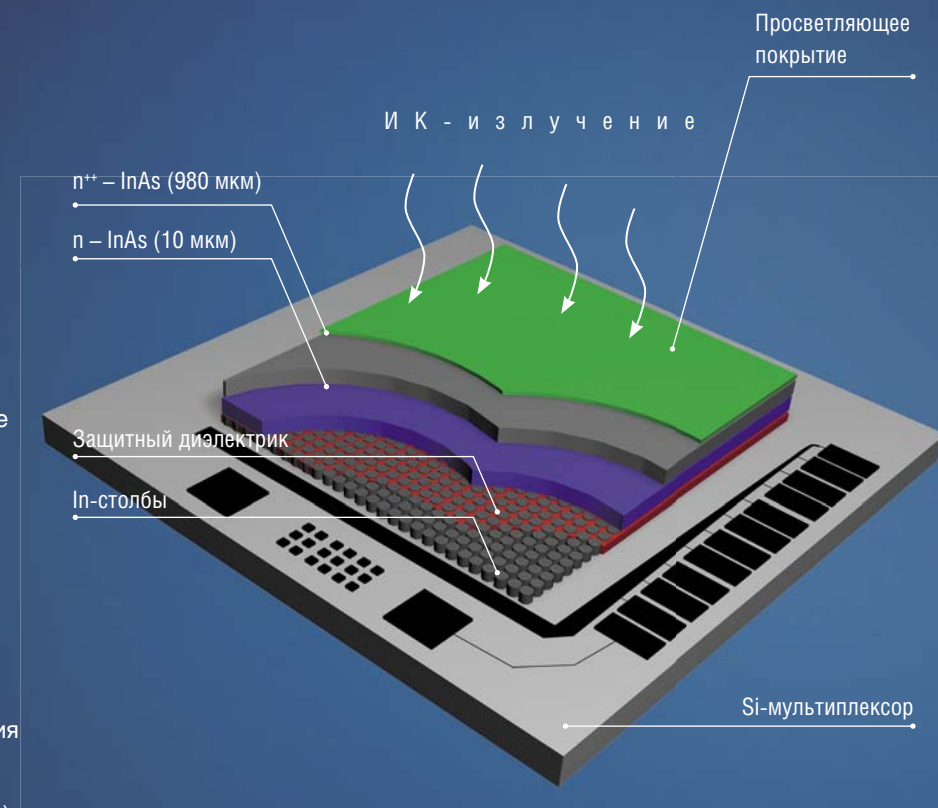
Спектр излучения тел с различной температурой

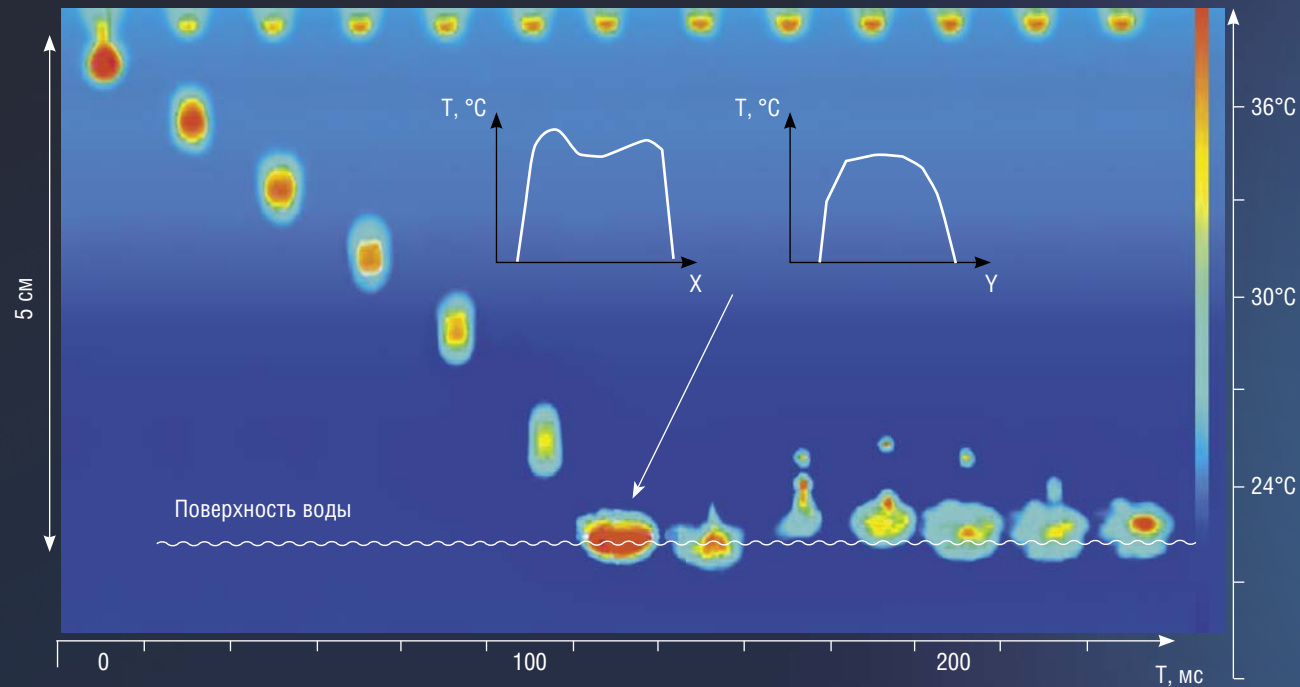


Характер спектра инфракрасного излучения тел, т. е. интенсивность излучения в определенном диапазоне длин волн, зависит от их температуры. Тепловизор «Свит» способен регистрировать ИК-излучение в относительно узком диапазоне длин волн. Сопоставить величину сигнала датчика тепловизора с температурой тела можно с помощью закона Планка, описывающего зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от температуры и длины волны
Рисунок И. В. Мжельского (Институт физики полупроводников СО РАН)

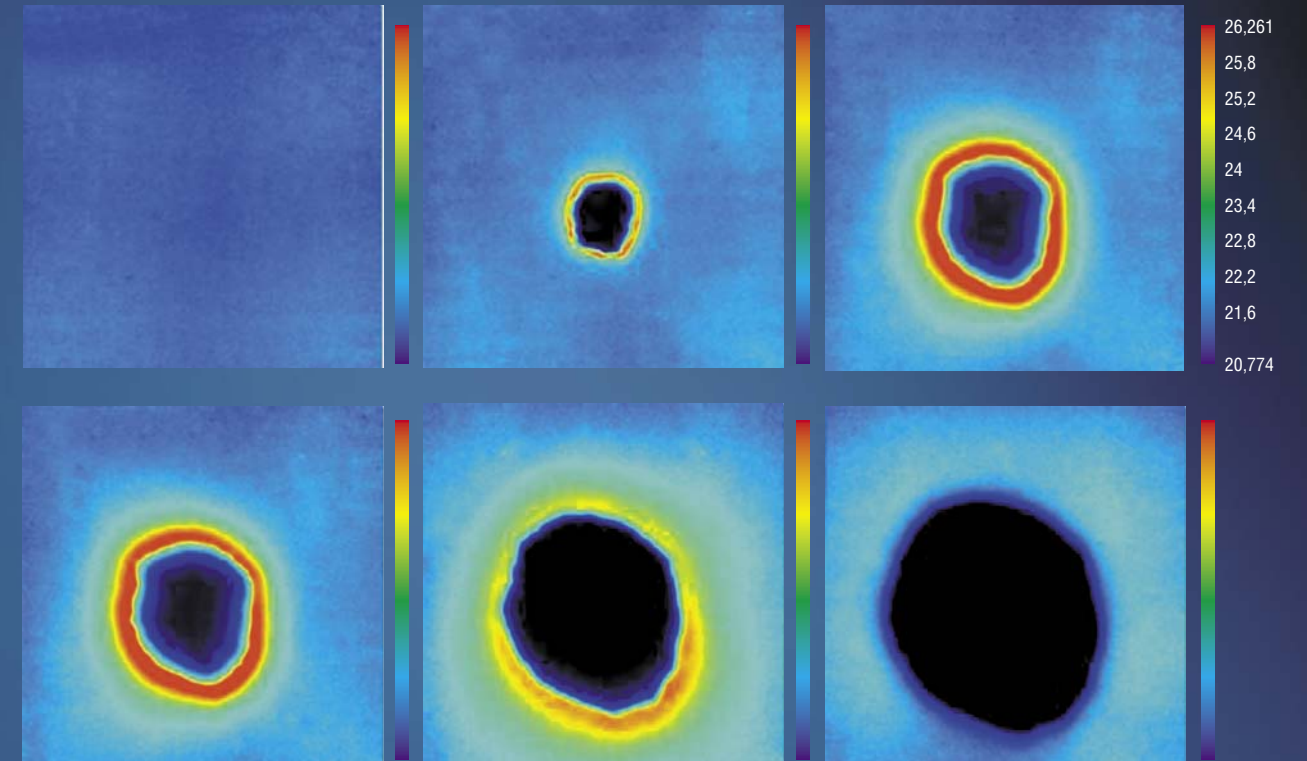
Гибридная фоточувствительная схема состоит из матрицы фоточувствительных МДП-конденсаторов (16 384 штуки) и кремниевого мультиплексора с индивидуальными считывающими ячейками сигналов от каждого конденсатора. Просветляющее покрытие уменьшает паразитное отражение от непланарной полированной поверхности p++-InAs. Поглощение квантов происходит в эпитаксиальном n-InAs слое. Индиевые столбы обеспечивают механическое и электрическое соединение элементов фокальной матрицы со считывающими ячейками кремниевого мультиплексора после совмещения и сдавливания кристаллов. При этом In-столбы расплющиваются и свариваются (холодная сварка). Размер фоточувствительных элементов 40 × 40 мкм, шаг 50 мкм.

Рисунок И. В. Мжельского (Институт физики полупроводников СО РАН)





С помощью тепловизора можно получить временную развертку процесса падения нагретой капли воды на поверхность воды комнатной температуры. Поведение такой капли – хорошая модель, которую можно использовать при изучении теплофизики и гидродинамики струйных течений и формирования эмульсий. На вставках показаны температурные профили по сечению капли в момент погружения в воду. Эксперимент В. М. Базовкина (Институт физики полупроводников СО РАН)



При впитывании капли воды в сухую ткань (в данном случае бязь) наблюдается интересное явление – образование вокруг нее ореола с температурой почти на 6 °С выше начальной. Этот эффект следует изучать и учитывать при разработке спортивной и лечебной одежды и белья. Фото А. Е. Настовьяка (Институт физики полупроводников СО РАН)

способность ткани: например, на синтетических тканях он выражен слабо, либо вовсе отсутствует. Это явление имеет прикладное значение при исследовании разных поглотителей типа цеолитов или разработке спортивных тканей и лечебного белья.

Очень наглядным примером применения тепловизоров является визуализация так называемых ячеек Бенара – диссипативных самоорганизующихся структур, формирующихся в неоднородно нагретых жидкостях при зарождении турбулентных течений. Прибор дает практически моментальную картину распределения температур, помогает увидеть форму и оценить масштаб возникающих конвективных ячеек.

Тепловизор можно эффективно использовать при поиске неисправностей печатных плат по наличию перегрева в электронных компонентах. А добавив к нему специальный инфракрасный микроскопический объектив, можно изготовить инфракрасный сканирующий микроскоп с высоким пространственным разрешением. Такой прибор можно использовать, например, при исследовании неравномерности излучения в ИК-светодиодах.

«Тепловой портрет» болезни

Тепловизор можно с успехом применять для исследования большинства тепловых процессов, в которых температура поверхности неравномерна и быстро меняется. А к таким объектам, безусловно, относимся и мы с вами. Термографическая группа исследователей под руководством В. Я. Беленького, В. В. Ивлوشкина (ООО «Хелс-Сервис»), д. м. н. В. В. Ступака и д. м. н. С. В. Пушкарева (ныне ушедшего из жизни) разрабатывает новые тепловизионные методики диагностики начальных стадий ряда заболеваний.

Что в первую очередь делают при внезапном недомогании? Конечно же, измеряют температуру тела! Диагностика при помощи термографии основана на том, что температура является одним из главных признаков, отражающим состояние здоровья человека. Температурная палитра тела человека характеризует его возможности приспосабливаться к изменениям внешней среды и стрессам, а также отражает его текущее физиологическое состояние.

Температура тела на поверхности тела человека изменяется за счет работы вегетативной нервной системы, регулирующей кровонаполнение подкожной сосудистой сети в рефлексогенных зонах, соответствующих тому или иному внутреннему органу. Наблюдая за этими областями, мы регистрируем не структурные особенности внутренних органов, как это происходит при ультразвуковых, рентгеновских и других методах активной лучевой диагностики, а функциональные изменения, которые и несут информацию о протекании в организме нормальных и патологических процессов.

С помощью такого подхода разработана ранняя диагностика различных заболеваний в широком диапазоне – от онкологии до стоматологии. Тепловизионный метод диагностики абсолютно безопасен. По сути, он не отличается от обычной видеозаписи, однако при этом его можно использовать для контроля за состоянием человека и оценки эффективности лечения. Ведь термограмма практически мгновенно дает настоящий «тепловой портрет» болезни, по которому опытный врач может легко диагностировать и оценить степень развития заболевания.

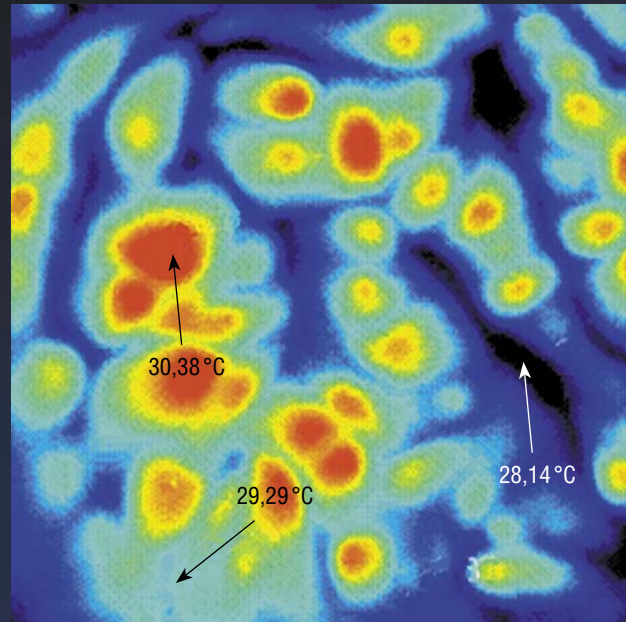
Инфракрасное око «Свита»

Матричный тепловизор «Свита», позволяющий получать в реальном времени инфракрасное изображение различных объектов с предельным температурным разрешением 7 мК, был разработан в лаборатории микроэлектроники Института физики полупроводников СО РАН. Этот уникальный прибор предназначен для измерения поля температуры и визуального анализа статических и меняющихся во времени картин теплового состояния объектов и ориентирован для применения в области медицинской и научной термографии.

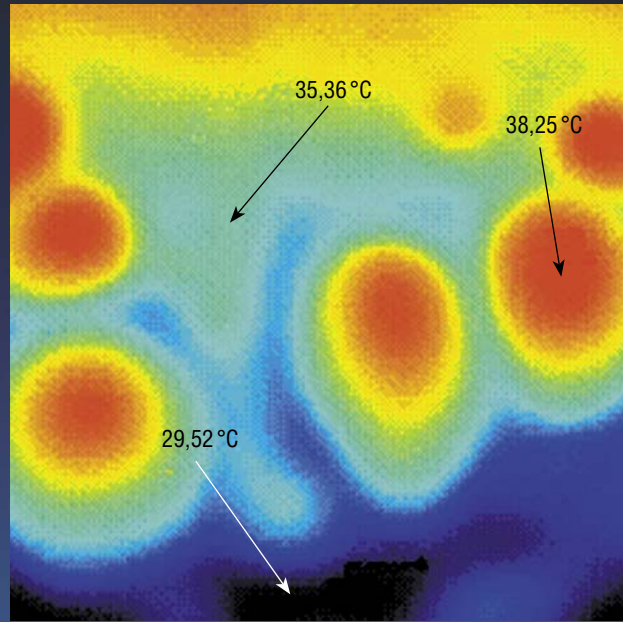
Основное достоинство «Свита» по сравнению с его зарубежными аналогами (российских аналогов у прибора нет) – его доступность и меньшая, в три-четыре раза, цена прибора. Кроме этого, он был сертифицирован как медицинский прибор в нашей стране (Росс Ru.АЯ79.Р15452) и в Европе (EC CERTIFICATE N110176QS/NB).

В «Свите» изображение объектов формируется специальным инфракрасным объективом и регистрируется с помощью матричного датчика излучений,

Вода

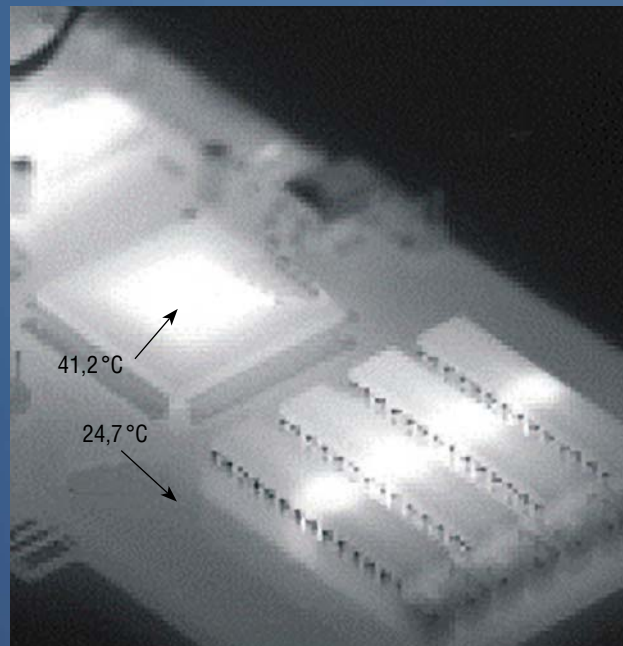
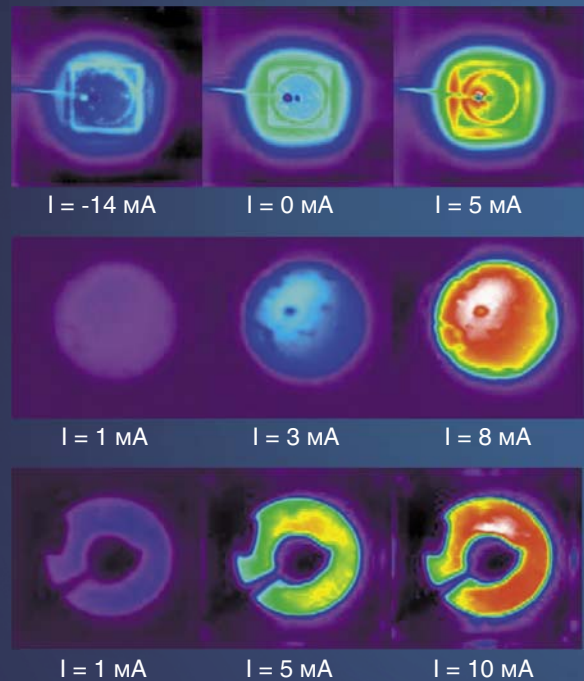


Глицерин

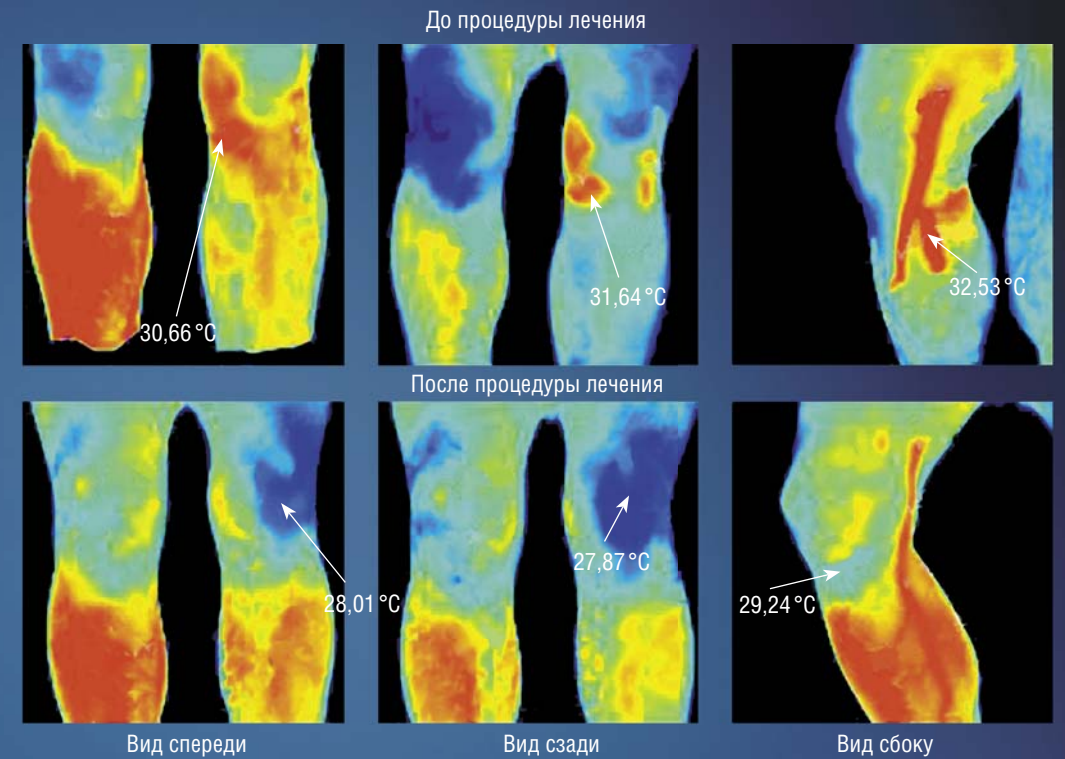


Наглядную и полезную информацию можно получить, исследуя с помощью тепловизора конвекционные явления – так называемые ячейки Бенара, возникающие при медленном нижнем нагреве жидкости. Термограмма позволяет с высокой точностью измерить пространственное распределение поля температуры

При изготовлении инфракрасных светодиодов важно, что бы их излучение было однородным (рисунок в среднем ряду слева). Тепловизионный микроскоп помогает контролировать качество светодиодов разной конструкции – на рисунке представлено три типа диодов, верхний ряд образцов демонстрирует сильную неоднородность излучения. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН. Фото И. В. Мжельского, С. М. Кожевникова (Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск)



Термограмма помогает врачу контролировать процесс лечения травмы левого колена



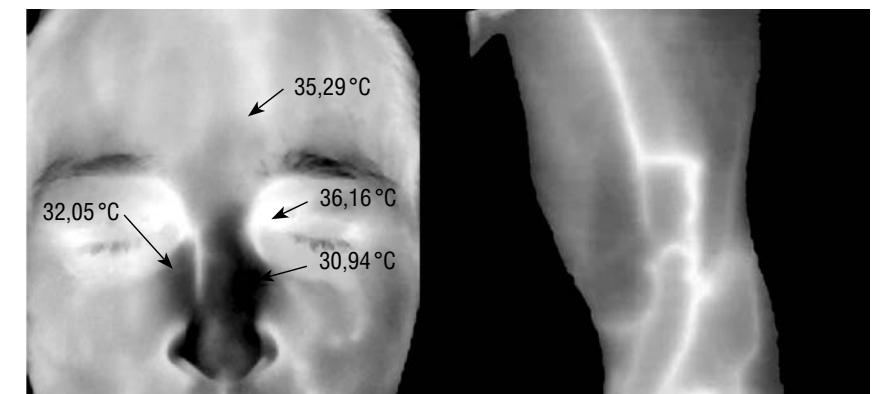
установленного в фокальной плоскости объектива. Поскольку величина выходного сигнала с фоточувствительных элементов датчика пропорциональна температуре объекта, можно произвести визуализацию изображения в виде черно-белой или цветной термограммы.

Датчик инфракрасного излучения прибора представляет собой гибридную интегральную схему, состоящую из полупроводниковых конденсаторов на основе арсенида индия (InAs), установленную на охлаждаемом пьедестале криостата. Фоточувствительные элементы полупроводниковой матрицы преобразуют кванты света в электрические заряды, которые считываются еще одним интегральным устройством – кремниевым мультиплексором, а затем усиливаются, преобразуются и передаются в компьютер.

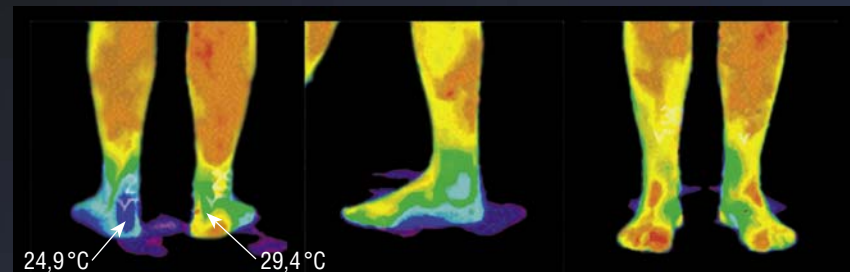
Минимальному сигналу можно присвоить черный или фиолетовый цвет, максимальному – белый или красный, а промежуточные равномерно распределить по 256 градациям серого или цветного оттенков. В конечном итоге на экране монитора появляется цветное или черно-белое тепловизионное изображение объекта – термограмма, позволяющая видеть объект «в инфракрасных лучах».

Термограмма платы с микросхемами АЦП и памяти (штатный режим работы). При возникновении неполадок в микросхемах их местонахождение можно диагностировать по повышению температуры. Фото В. М. Базовкина (Институт физики полупроводников СО РАН)

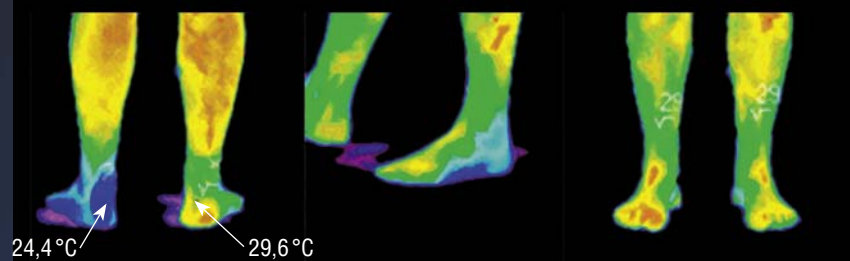
Термограмму можно использовать для диагностических целей: о наличии воспалительных процессов гайморовых полостей свидетельствует температурная асимметрия в области носа (слева); о варикозной болезни – «помеченные» высокой температурой расширенные вены нижней конечности (справа)



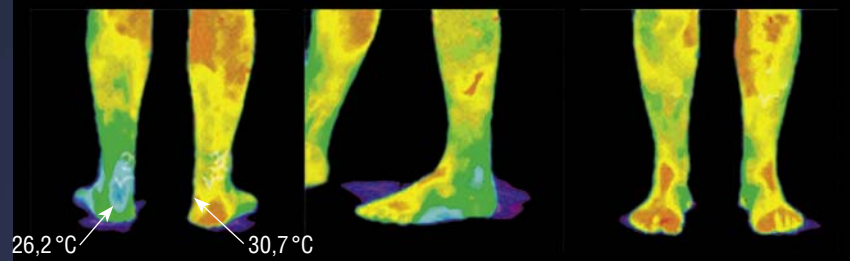
До процедуры лечения



Во время процедуры лечения

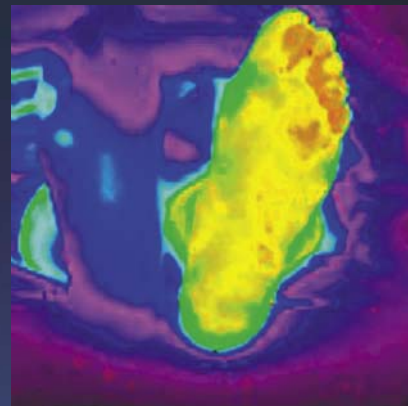


После процедуры лечения

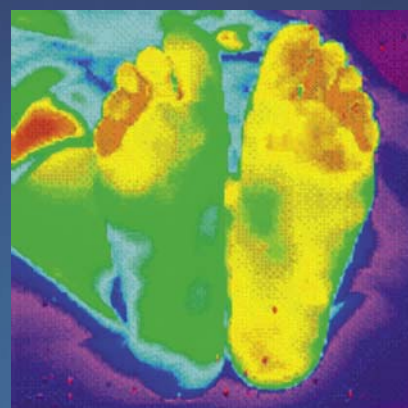


Диабетическая стопа – пораженная нога имеет пониженную температуру по сравнению со здоровой. Повышение температуры после проведения лечебных процедур свидетельствует о восстановлении кровоснабжения больных участков и эффективности назначенного лечения

До процедуры лечения

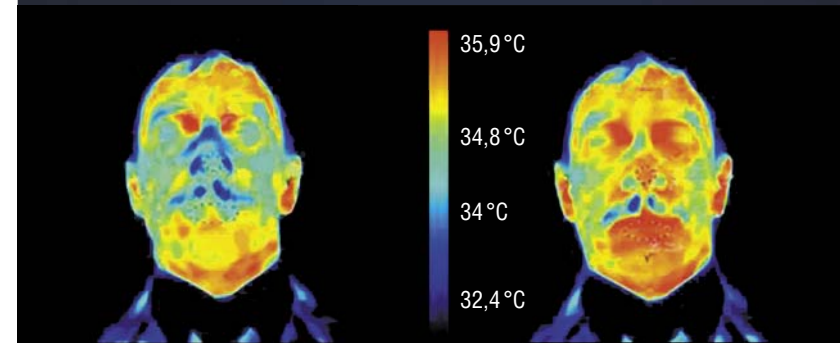


После процедуры лечения

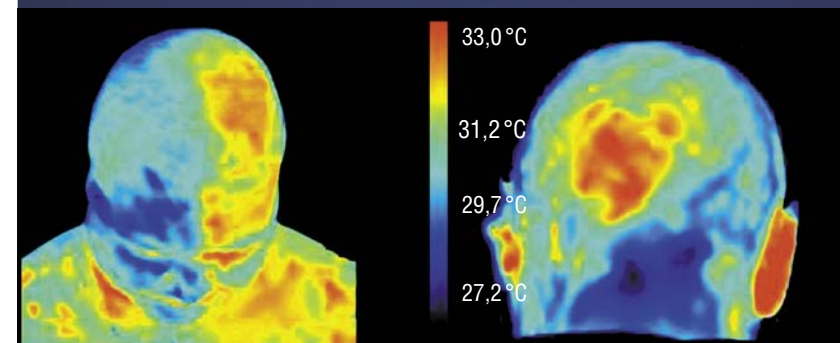


Диабетическая стопа, поражение правой ноги. Хорошо виден рост температуры, свидетельствующий о восстановлении кровоснабжения

Повышение температуры лица здорового испытуемого через пять минут после принятия биологической добавки «Янтарь антитокс» (справа) происходит вследствие улучшения кровообращения



Злокачественные новообразования характеризуются повышенной температурой, поэтому термограмма лица позволяет локализовать опухоли в случае ходжкинской лимфомы (слева) и менингиомы (справа)



О некрозе фаланги безымянного пальца этой руки свидетельствует относительно более низкая температура пораженного пальца

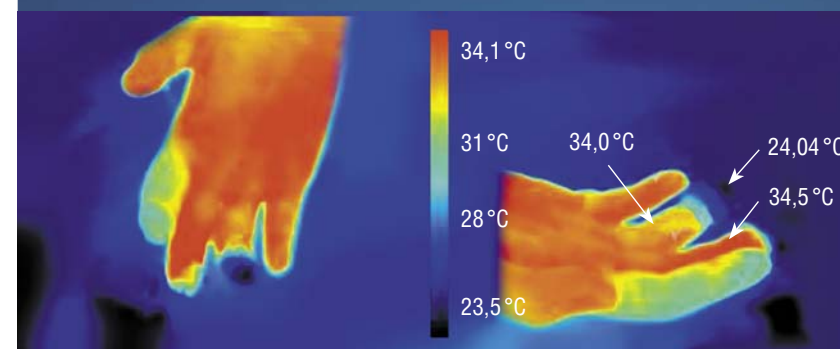


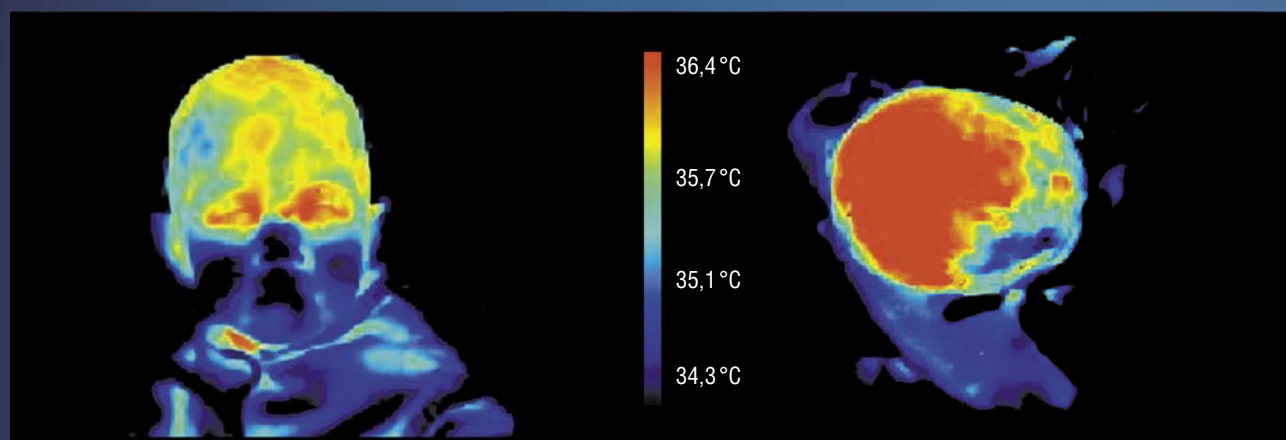
Фото В. Я. Беленького, д. м. н. С. В. Пушкарева, В. В. Ивлюшкина (ООО «Хелс-Сервис»), д. м. н. В. В. Ступак (НИИТО, Новосибирск)

Современные технологии позволяют визуализировать невидимое человеческому глазу, значительно расширяя возможности современной науки, производства и медицины. Например, с помощью «инфракрасного глаза» тепловизора можно распознать болезнь на самых ранних стадиях, не прибегая к другим, более сложным и болезненным процедурам диагностики.

Особое достоинство таких приборов, как тепловизор, в том, что они могут представлять температуру изучаемых объектов не в виде сухого набора цифр, а наглядно. Это позволяет увидеть взаимосвязь между явлениями, уловить общие тенденции происходящих процессов. Но в то же время тепловизор дает и очень точные данные о температуре. Такое уникальное сочетание наглядности и точности открывает перед тепловизорами огромные перспективы для применения в самых разных областях человеческой деятельности.

Литература

Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972.
 Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988 г.
 Vainer B. G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. № 6. P. 065102.
 Вайнер Б. Г. Матричное тепловидение в физиологии: Исследование сосудистых реакций, перспирации и терморегуляции у человека. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. 96 с.



При ударе по голове слева у этого пациента пострадала правая сторона. На термограммах двух проекций головы место ушиба выделяется пониженной температурой. Так удалось определить пораженный участок, требующий оперативного вмешательства