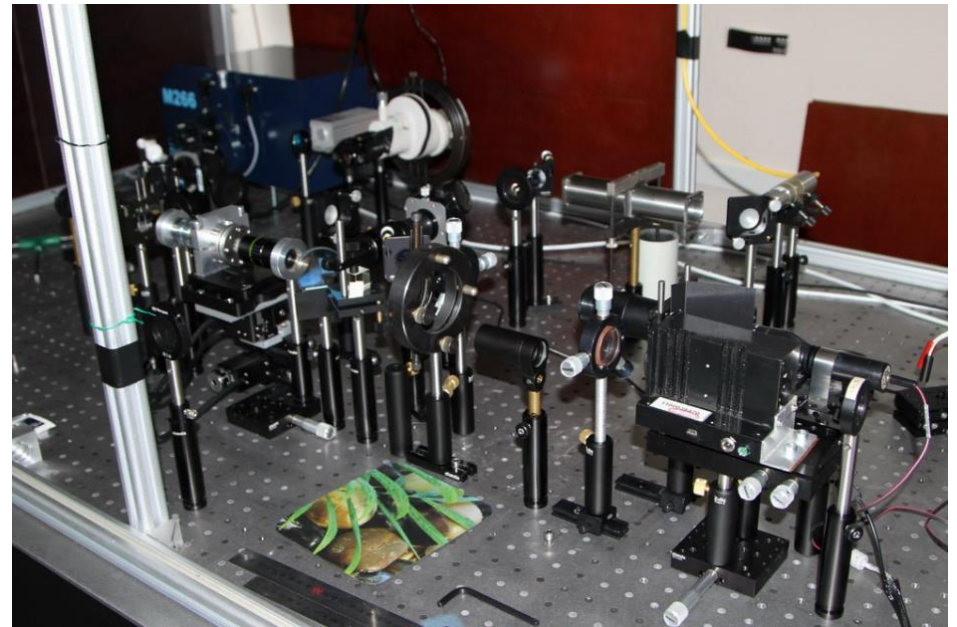


Спектроскопия

Спектроскопия 07: Спектроскопия теплового излучения.



Павел В. Зинин

Измерение температуры



Механизмы передачи тепла

Д.К. Аксенова А.И. Довгялло, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов, А.А. Шиманов. Определение коэффициента излучения материалов ограждающих конструкций при проведении энергетического обследования. Методические указания к лабораторной работе

Температура

Температура (от лат. *temperatura* надлежащее смешение, нормальное состояние), физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Температура одинакова для всех частей изолированной системы, находящейся в равновесии термодинамическом. Если изолированная система не находится в равновесии, то с течением времени переход энергии (теплопередача) от более нагретых частей системы к менее нагретым приводит к выравниванию T (Физическая энциклопедия).

Температура - это физическая величина, характеризующая степень нагрева предмета, измеряемую в градусах по шкале Цельсия, Фаренгейта и некоторым другим.

Температура - физическая величина, характеризующая среднюю кинетическую энергию частиц макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия.

Температура - физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

Температура — физическая величина, характеризующая степень нагретости тел.

Температура

По-видимому, впервые необходимость применения количественной меры к тепловым ощущениям осознали древние медики. Они давно заметили, что здоровье человека как-то связано с теплотой его тела и что лекарства могут влиять на здоровье, принося с собой, в частности, теплоту или холод. Так, знаменитый врач Гален (II век н.э.) использовал классификацию лекарственных препаратов по "градусам" (латинское *gradus* - ступень) : градус тепла, градус холода, градус влажности, градус сухости. Градусов было четыре и каждый градус еще разбивали на три части. Препараты смешивались и эти смеси имели разные градусы (при этом холод и тепло не считали противоположными качествами – тепло побеждалось влажностью, а холод - сухостью). Для каждой болезни составлялось свое лекарство (надлежащая смесь препаратов), которое называлось "температура" (от лат. *temperatura* - надлежащее смешение, правильное соотношение). Таким образом, в медицине впервые была сделана попытка установить 12-градусную шкалу теплового действия лекарств ("температур"). Однако задача теоретического определения градуса смеси по градусам компонент так и осталась нерешенной. Отсутствовали также средства измерений теплового воздействия - приборы либо для качественного обнаружения изменений степени нагрева ("термоскопы"), либо для количественного измерения характеристик теплового состояния ("термометры").

Ньютон в 1701 г. предложил ввести температурную шкалу, разделенную на 12 градусов (как у древних медиков) и воспроизводимую по сопоставлению с характеристиками природных процессов (по реперным 6 точкам). Ноль он отождествил с точкой замерзания воды, а 12 градусов – с температурой тела здорового человека.

Температура

Первые воспроизводимые термометры, аналогичные современным и градуируемые по природным реперным точкам, были изготовлены Габриелем Даниелем Фаренгейтом, стеклодувом из Голландии. В 1714 г. он использовал шкалу, в которой за нуль принималась наименьшая температура смеси льда, поваренной соли и нашатыря, а за 12 градусов - температура человеческого тела. Полученная шкала оказалась слишком грубой для практических измерений, поэтому Фаренгейт впоследствии приписал телу здорового человека температуру 96 градусов. В таком виде шкала Фаренгейта до сих пор используется в США и Великобритании (но сейчас за реперные точки принимают температуры замерзания и кипения воды - соответственно 32 и 212 градусов по шкале Фаренгейта).

Во Франции и некоторых других европейских странах имела широкое распространение (и до сих пор иногда используется) шкала Р. Реомюра (1730 - 1740 г.), с самого начала строившаяся на точках замерзания воды (ноль градусов) и ее кипения (80 градусов). Известная стоградусная шкала была введена в 1742 г. А. Цельсием. Для того, чтобы исключить появление отрицательных значений температуры в медицине и метеорологии, Цельсий поместил ноль градусов в точку кипения воды, а 100 градусов - в точку ее замерзания. Однако такая "перевернутая" шкала оказалась неудобной и вскоре она была приведена к современному виду.

Во всех последующих температурных шкалах, в том числе и в принятых в настоящее время в качестве стандартных, величина "градуса" в точности равна величине деления стоградусной шкалы Цельсия. Реперные же точки могут быть иными - так в "абсолютной" температурной шкале (Кельвина) имеется лишь одна основная реперная точка, а именно тройная точка воды, которой приписано значение 273,16 кельвин для обеспечения точного соответствия единицы этой шкалы - кельвина (К) градусу.

Тепловое излучение

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (температурное излучение) – электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счёт его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции, которая возбуждается внешним источниками энергии). Тепловое излучение имеет сплошной спектр, положение максимума которого зависит от температуры вещества.

Тепловое излучение тела человека относится к инфракрасному диапазону электромагнитных волн. Впервые такое излучение было открыто английским астрономом Вильямом Гершелем. В 1865 английский физик Дж. Максвелл доказал, что ИК - излучение имеет электромагнитную природу и представляет собой волны длиной от 760нм до 1-2мм. Чаще всего весь диапазон ИК - излучения делят на области: ближнюю (750нм-2.500нм), среднюю (2.500нм – 50.000нм) и дальнюю (50.000нм-2.000.000нм).

Закон излучения Планка (формула Планка) - закон распределения энергии в спектре излучения равновесного при определённой температуре T . Был открыт М. Планком (M. Planck) в 1900 на основе гипотезы квантования энергии вещества. Планк моделировал вещество совокупностями гармонических осцилляторов различной частоты ν - резонаторов, испускающих и поглощающих излучение соответствующей частоты. Он предположил, что энергия вещества распределяется по резонаторам каждой частоты ν в виде дискретных порций $h\nu$ - квантов энергии (h - Планка постоянная).

Формула Планка

Вывод, к которому пришел Планк спустя некоторое время, был обескураживающим. Оказалось, что формула может быть выведена в предположении, что атомы, образующие стенки нагретой полости, в которой заключено равновесное тепловое излучение, способны излучать и поглощать свет данной частоты ω не в любых количествах, а лишь дискретными порциями ("квантами") с энергией

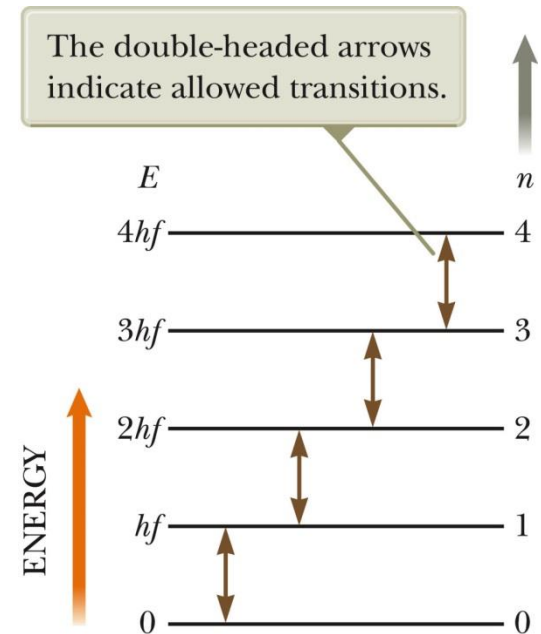
$$E_0 = h/\pi \omega. \quad (1)$$

Данное предположение резко противоречит господствовавшем в то время представлениям классической физики, согласно которым энергия любой физической системы может изменяться непрерывно

Предположим, что атом, взаимодействующий с излучением, может изменять свою энергию не непрерывно, а скачкообразно, некоторыми порциями E_0 . В этом случае возможные значения энергии атома E можно перенумеровать, записать в виде

$$E_n = n E_0. \quad (2)$$

Вероятность того, что атом находится на энергетическом уровне с номером n , определяется распределением Больцмана.



Формула Планка

Вероятность того, что атом находится на энергетическом уровне с номером n , определяется распределением Больцмана.

$$P(n) = C e^{-\frac{n E_0}{kT}} = C e^{-nx} \quad (3)$$

где введено обозначение, $x = E_0/kT$, T абсолютная температура системы, k — постоянная Больцмана, C — постоянная, определяемая условием нормировки

$$\sum_{n=0}^{\infty} P(n) = 1 \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} = \frac{1}{1 - e^{-x}} = C^{-1} \quad (5)$$

откуда $C = 1 - e^{-x}$, т.к. $\sum_{n=0}^{\infty} q^n = \frac{1}{1 - e^{-q}}$ $q < 1$.

Формула Планка

Средняя энергия атома определяется выражением.

$$\langle E \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} E_n P(n) \quad (6)$$

Подставив (2), (5) в (6), получим

$$\langle E \rangle = CE_o \sum_{n=0}^{\infty} ne^{-nx} \quad (7)$$

Сумму ряда в (7) вычислим, используя (6), путем дифференцирования по параметру:

$$\sum_{n=0}^{\infty} ne^{-nx} = \frac{\partial}{\partial x} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{1 - e^{-x}} \right) = \frac{e^{-x}}{(1 - e^{-x})^2} \quad (8)$$

$$\langle E \rangle = \frac{E_o}{e^x - 1} \quad \text{или} \quad \langle E \rangle = \frac{E_o}{e^{E_o/kT} - 1} \quad (9)$$

Формула Планка

Итак, формула (9) определяет среднюю энергию атома в модели дискретных энергетических уровней Планка. Заметим, что согласно этому выражению, средняя тепловая энергия элементарного осциллятора среды (атома), отнюдь не равна величине kT , как этого требует закон равнораспределения энергии по степеням свободы. Выражение $\langle E \rangle = kT$ получается из (9) только в предельном случае $E_0 \rightarrow 0$, т. е. когда планковский элемент энергии E_0 устремляется к нулю.

Спектральную плотность равновесного теплового излучения, т. е. энергию излучения, приходящуюся на единицу объема пространства и спектральный интервал от ω до $\omega + d\omega$, можно представить в виде

$$I(\omega T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \langle E \rangle \quad (10)$$

В силу закона равнораспределения энергии по степеням свободы в состоянии теплового равновесия средняя энергия осциллятора вещества (атома) должна быть равна средней энергии осциллятора поля. Тогда

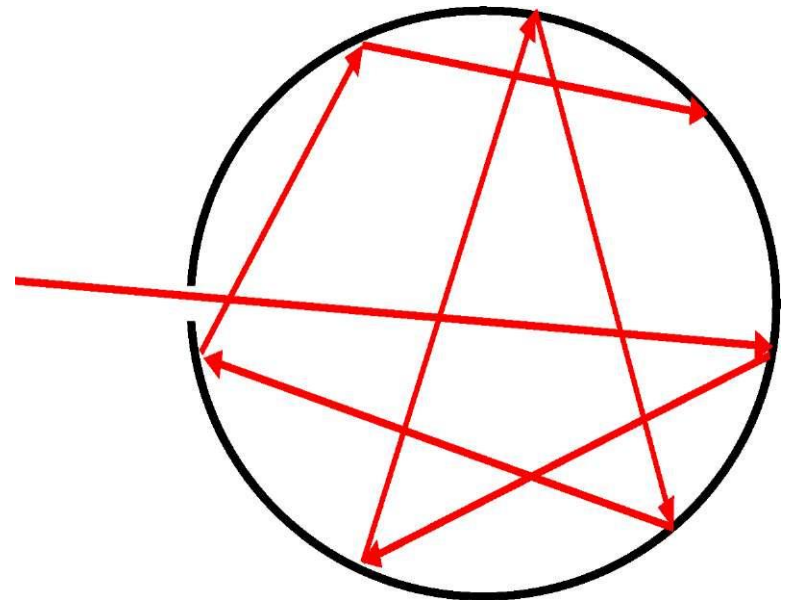
$$I_{BB}(\omega T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{E_0}{e^{E_0/kT} - 1} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{h\omega}{e^{h\omega/\pi kT} - 1} \quad (11)$$

Формула Планка: коэффициентом излучения

Понятие излучательной способности тесно связано с уравнением Планка для абсолютно чёрного тела (АЧТ). Так как обычные (серые) тела в общем случае не являются чёрными телами, то законы теплового излучения можно применять к ним только при условии внесения определённых поправок. Величина, связывающая излучение реальных тел с излучением АЧТ, называется спектральным коэффициентом излучения $\varepsilon(T)$.

Коэффициент излучения зависит от многих факторов, таких как температура, длина волны, давление, а также от состояния поверхности образца

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(T) \cdot \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$



Модель черного тела - замкнутая полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которого зачернена.

Коэффициент излучения

Коэффициент излучения (или степень черноты) - ϵ показывает отношение энергии теплового излучения 'серого тела' согласно Закону Стефана Больцмана, к излучению 'абсолютно черного тела' при той же температуре. Коэффициент излучения абсолютно черного тела $\epsilon = 1$.

Коэффициент теплового излучения различных материалов

Для температуры $t=20(0C)$

Название материала	Значение ϵ
Серебро полированное	0,3
Алюминий полированный	0,04-0,06
Золото	0,04
Латунь матовая	0,22
Стекло	0,7
Эбонит	0,9
Дерево	0,6-0,8
Цемент	0,9
Вода(толщина >0.1мм)	0,96

Формула Планка-формула Вина

$$I(\lambda, T) = \frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (12)$$

$c_1 = 2\pi h c^2$, $c_2 = hc/k$, где h - постоянная Планка, c - скорость света, k - константа Больцмана: $c_1 = 3.7410 \cdot 10^{-12}$, вт см², $c_2 = 1.438$ см·град, ε - коэффициент излучения

Формула Планка — выражение для спектральной плотности мощности излучения (спектральной плотности энергетической светимости) абсолютно чёрного тела, которое было получено Максом Планком для плотности энергии излучения $I(\lambda, T)$. При не очень высоких температурах, когда выполняется условие, $\exp(c_2/\lambda T) \gg 1$, тогда закон Планка принимает более простую форму

$$I(\lambda, T) = \frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5} \exp\left[-\frac{c_2}{\lambda T}\right] \quad \text{Если ввести новую переменную } J = \ln\left(\frac{I(\lambda, T)\lambda^5}{c_1}\right), \text{ тогда}$$

$$J = \ln \varepsilon - \frac{c_2}{T} \lambda^{-1} \quad (13)$$

Формула (13) носит название второго закона Вина. Погрешность закона Вина составляет менее 1% при $T < 4000$ К

Закон Стефана-Больцмана

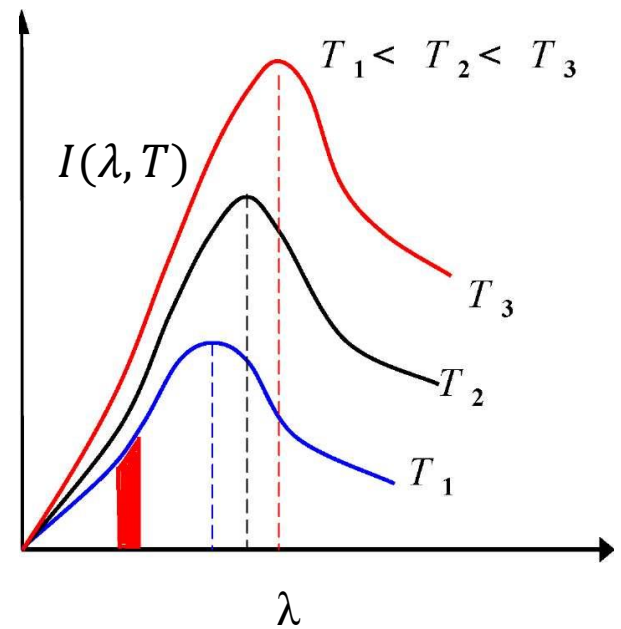
• **Закон Стефана-Больцмана.** Согласно этому закону, полная мощность теплового излучения возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела. Из формулы Планка для объемной плотности энергии равновесного теплового излучения получаем:

$$W = \int_0^{\infty} I(\omega, T) d\omega = \frac{\hbar}{\pi c^3} \int_0^{\infty} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1} = \frac{\hbar}{\pi c^3} \left(\frac{kT}{\hbar}\right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \alpha T^4$$

$$\alpha = 7,55 \times 10^{-15} \text{ эрг см}^{-3} \text{ К}^{-4}$$

Закон смещения Вина. Согласно этому закону, длина волны $\lambda_{\text{мах}}$, на которую приходится максимум спектральной плотности теплового излучения, уменьшается обратно пропорционально абсолютной температуре тела:

$$\lambda_{\text{мах}} = \frac{2898 \text{ нм}}{T(\text{К})}$$



Площадь dS под кривой пропорциональна спектральной плотности энергетической светимости черного тела.

Инфракрасное излучение

Инфракрасное излучение — электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света (с длиной волны $\lambda = 0,74$ мкм и частотой 430 ТГц) и микроволновым радиоизлучением ($\lambda \sim 1—2$ мм, частота 300 ГГц).

Оптические свойства веществ в инфракрасном излучении значительно отличаются от их свойств в видимом излучении. Например, слой воды в несколько сантиметров непрозрачен для инфракрасного излучения с $\lambda = 1$ мкм. Инфракрасное излучение составляет большую часть излучения ламп накаливания, газоразрядных ламп, около 50 % излучения Солнца; инфракрасное излучение испускают некоторые лазеры. Для его регистрации пользуются тепловыми и фотоэлектрическими приёмниками, а также специальными фотоматериалами.

Весь диапазон инфракрасного излучения условно делят на три области:

ближняя: $\lambda = 0,74—2,5$ мкм;

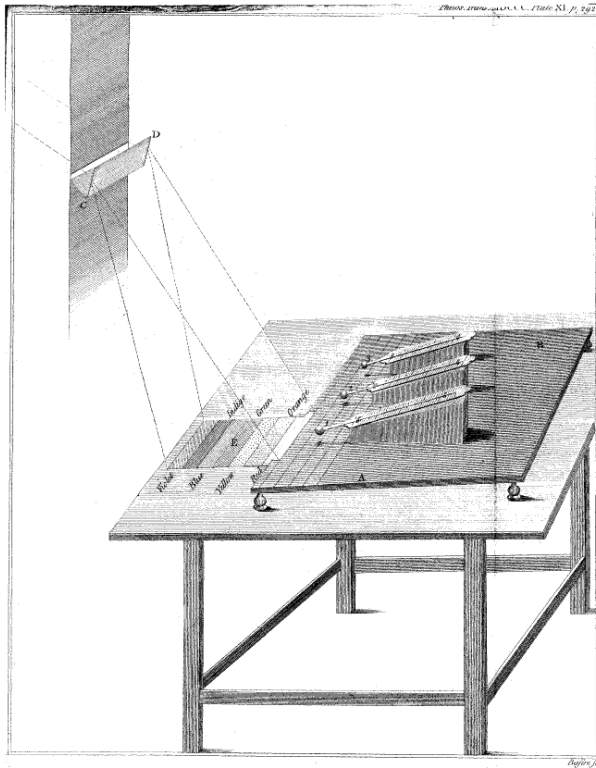
средняя: $\lambda = 2,5—50$ мкм;

дальняя: $\lambda = 50—2000$ мкм.

Длинноволновую окраину этого диапазона иногда выделяют в отдельный диапазон электромагнитных волн — терагерцевое излучение (субмиллиметровое излучение).

Инфракрасное излучение

Инфракрасное излучение было открыто в 1800 году английским астрономом У. Гершелем. Занимаясь исследованием Солнца, Гершель искал способ уменьшения нагрева инструмента, с помощью которого велись наблюдения. Определяя с помощью термометров действия разных участков видимого спектра, Гершель обнаружил, что «максимум тепла» лежит за насыщенным красным цветом и, возможно, «за видимым преломлением». Это исследование положило начало изучению инфракрасного излучения.

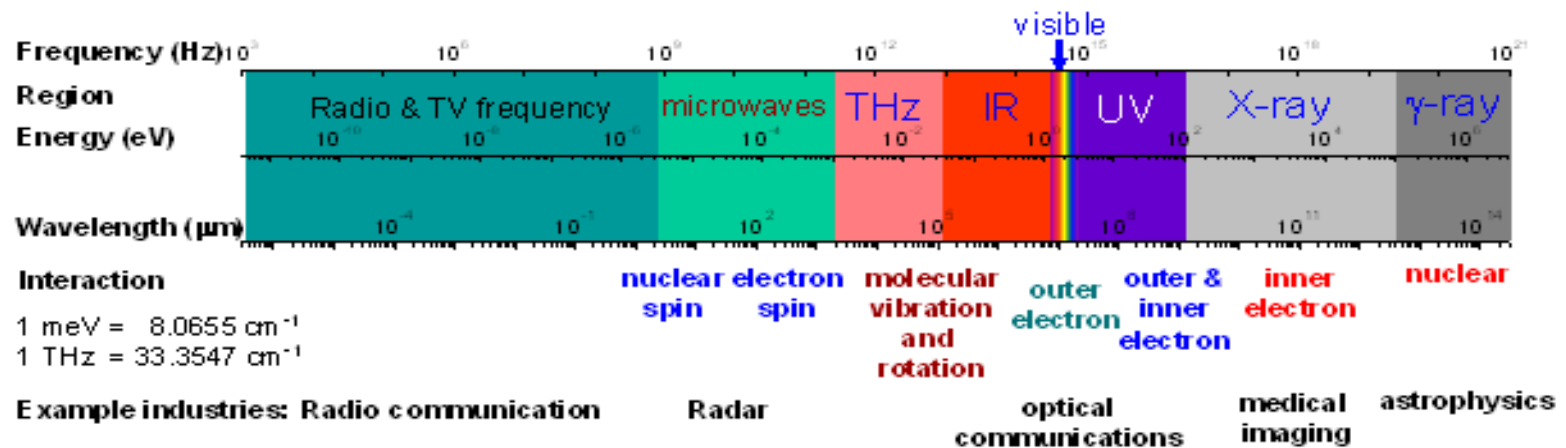


Эксперимент Гершеля

Болометр (др.-греч. βολή — луч и μέτρον — мера) — тепловой приёмник излучения, чаще всего оптического (а именно — ИК-диапазона). Был изобретён Самуэлем Пирпонтотом Лэнгли в 1878 году.

Принцип действия болометра основан на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента вследствие нагревания под воздействием поглощаемого потока электромагнитной энергии.

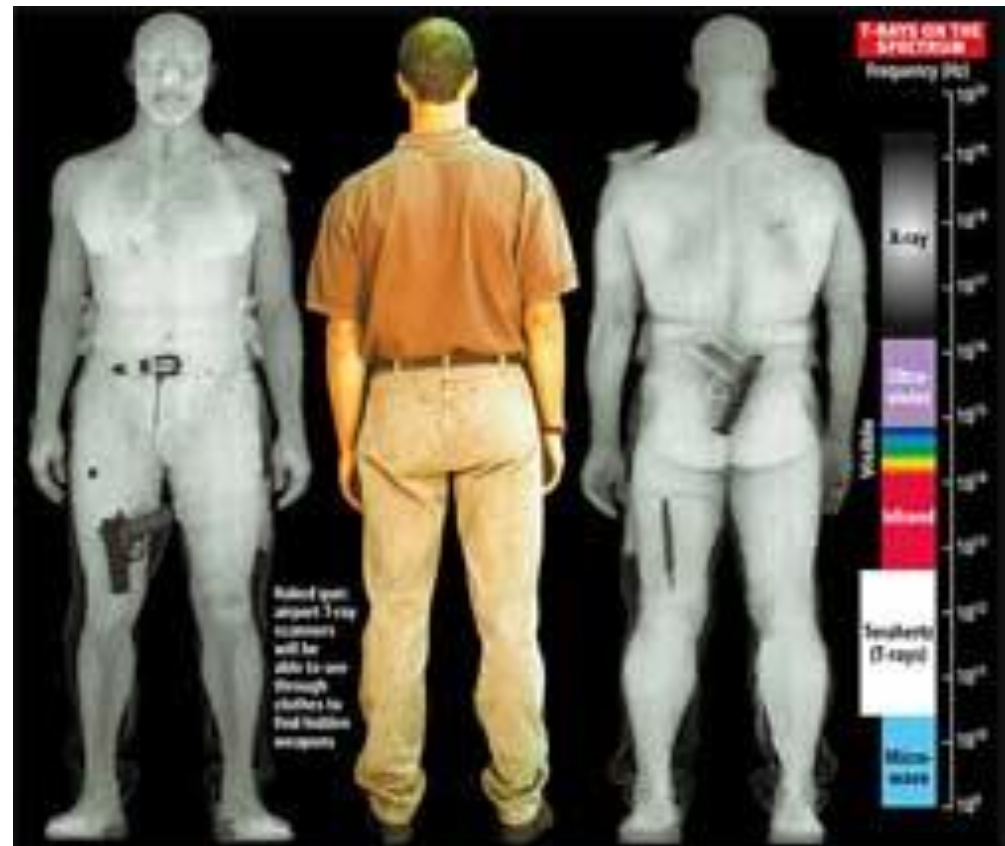
<https://wiki2.org/ru/>



Terahertz

The terahertz (THz or 10^{12} Hz) region (roughly 200 GHz to 10 THz - or 30 μm to 1.5 mm wavelength) situated between infrared light and microwave radiation

Many complex molecules have rotational and vibrational modes in this region, and many materials such as plastics, clothing, and semiconductors are transparent to terahertz radiation. Terahertz spectroscopy could therefore be used to detect and identify explosives, bioweapons, and narcotics, as well as in cancer screening and proteomics (the study of proteins within the body).



Измерение распределения температуры

В НТЦ УП РАН был предложен новый метод измерения распределения температуры образцов, находящихся при высоких температурах, свободный от указанных выше недостатков. Он основан на спектральной визуализации образца на произвольных длинах волн в достаточно широком спектральном интервале и последующей обработке полученных спектральных изображений. В качестве спектрального элемента предлагается использовать акустооптический (АО) видеоспектрометр.

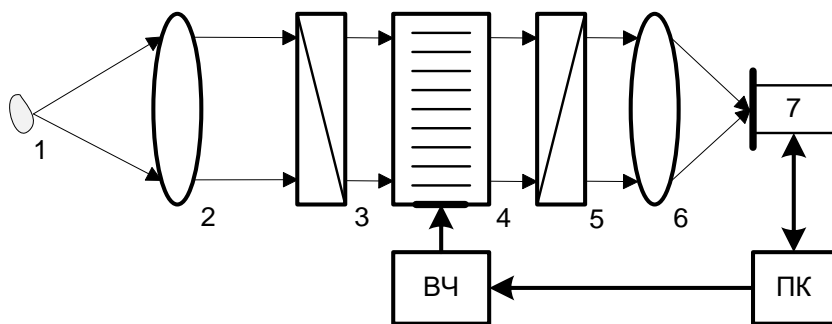
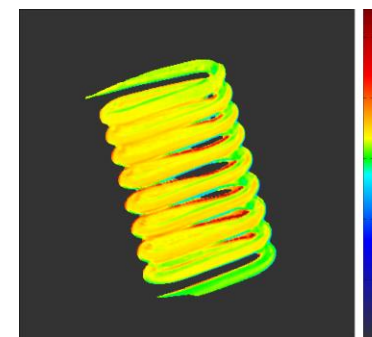
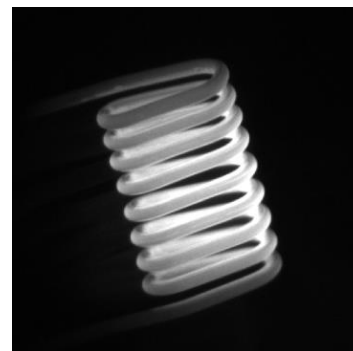


Схема макета установки для измерения пространственного распределения температуры микрообъектов. 1 – исследуемый объект, 2 – микрообъектив, 3, 5 – скрещенные поляризаторы, 4 – АО ячейка, 6 – объектив, 7 – матричный приемник излучения

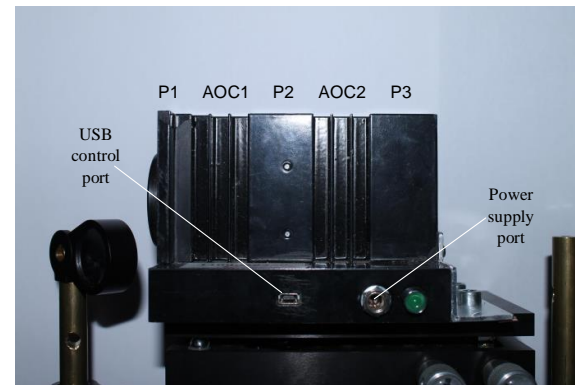
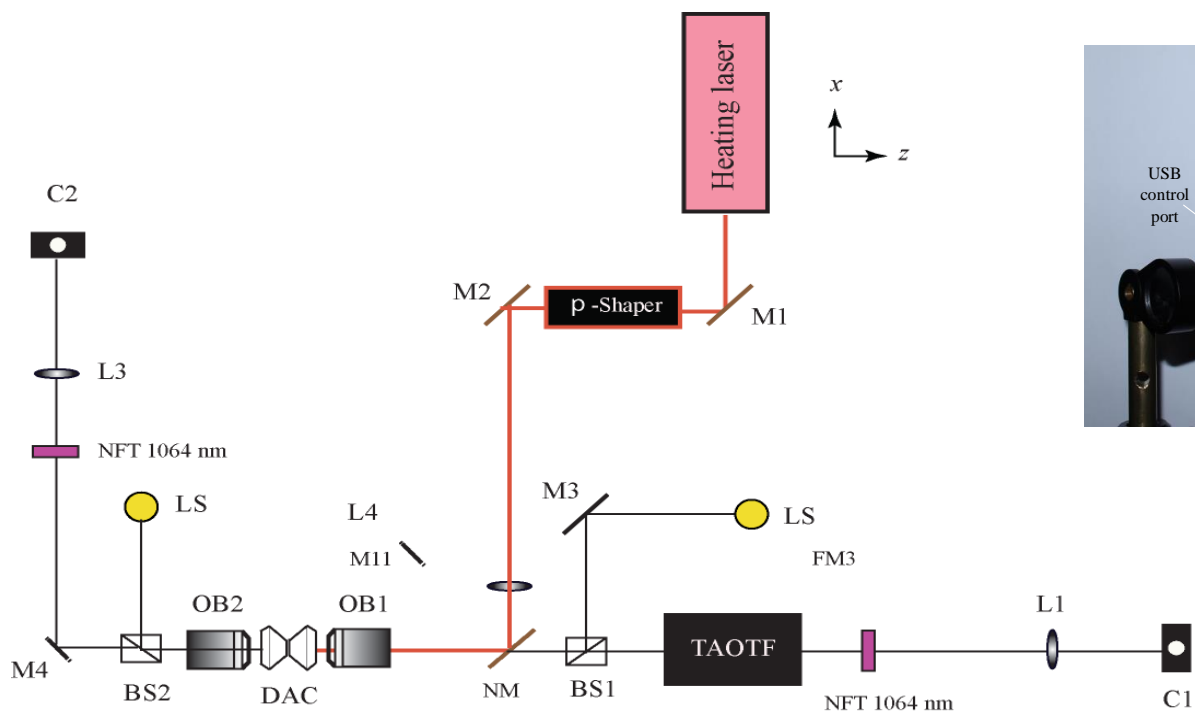


Одно из зарегистрированных спектральных изображений ($\lambda = 800$ nm) (а) и вычисленная термограмма (б)

Мачихин, Зинин et al., *Opt. Lett.* 2016

Измерение распределения температуры

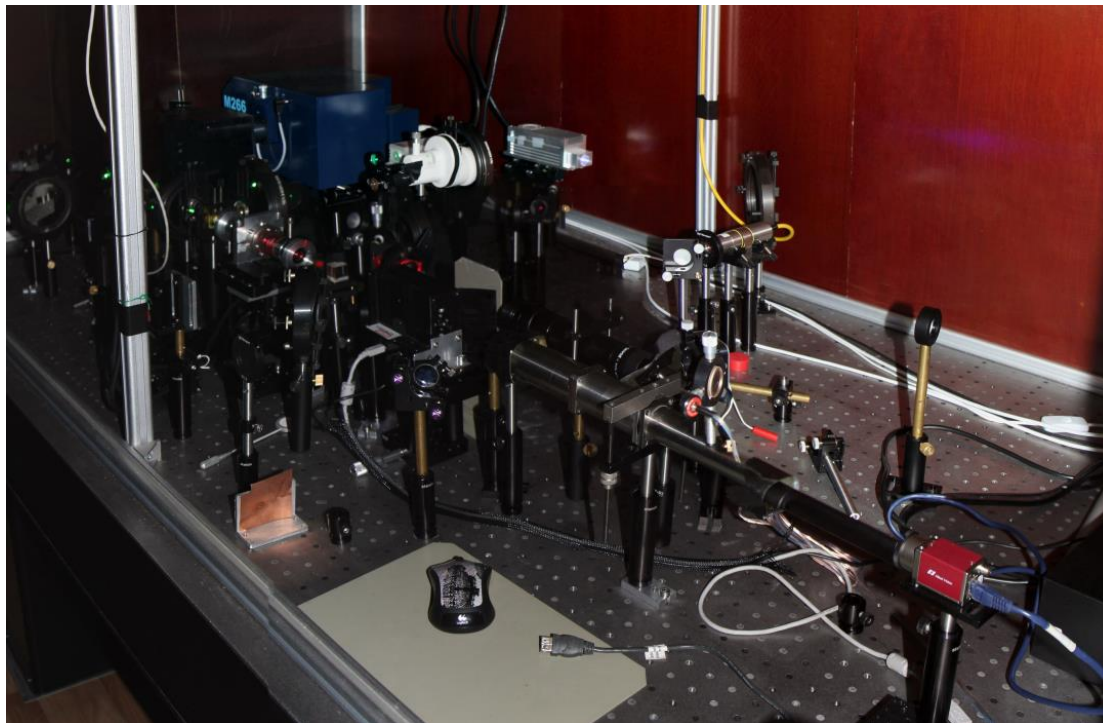
В НТЦ УП РАН был предложен новый метод измерения распределения температуры образцов, находящихся при высоких температурах, свободный от указанных выше недостатков. Он основан на спектральной визуализации образца на произвольных длинах волн в достаточно широком спектральном интервале и последующей обработке полученных спектральных изображений. В качестве спектрального элемента предлагается использовать акустооптический (АО) видеоспектрометр.



Лазерный Нагрев в Ячейке с Алмазными Наковальнями

To determine the spectral radiance of the heated specimen, $I(\lambda)_{\text{corrected}}$, the following equation is used:

$$I(\lambda)_{\text{corrected}} = I(\lambda)_{\text{measured}} \times I(\lambda)_{\text{standard}} / I(\lambda)_{\text{optics}},$$



where $I(\lambda)_{\text{measured}}$ is the spectral intensity of the specimen in a DAC during laser heating. The beam of the heating laser is focused on the sample by a long working distance lens x10 long working distance objective.

Photo of the laser heating system.

Метод наименьших квадратов

Чтобы получить объективную оценку температуры, ее следует определить путем 2-D подгонки с двумя параметрами, T и ε , скорректированных спектральных экспериментальных данных eq. (1). Это можно сформулировать, используя метод наименьших квадратов.

$$S(\varepsilon, T) = \sum_{i=1}^N [I(\lambda_i) - \varepsilon g(\lambda_i, T)]^2, \quad (1) \quad I(\lambda, \varepsilon, T) = \varepsilon g(\lambda, T), \quad g(\lambda, T) = \frac{c_1}{\left\{ \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right] \right\}}$$

что означает, что необходимо осуществить двухмерную минимизацию функции (1). Однако, был найден более метод сведения двумерной минимизации к одномерной минимизации. Новый метод основан на том факте, что коэффициент ε является линейным параметром. Мы знаем, функция $S(T, \varepsilon)$ имеет минимум при значениях T_0 and ε_0 , при которых частные производные равны нулю:

$$\partial S / \partial \varepsilon |_{\varepsilon = \varepsilon_0, T = T_0} = 0; \quad (2)$$

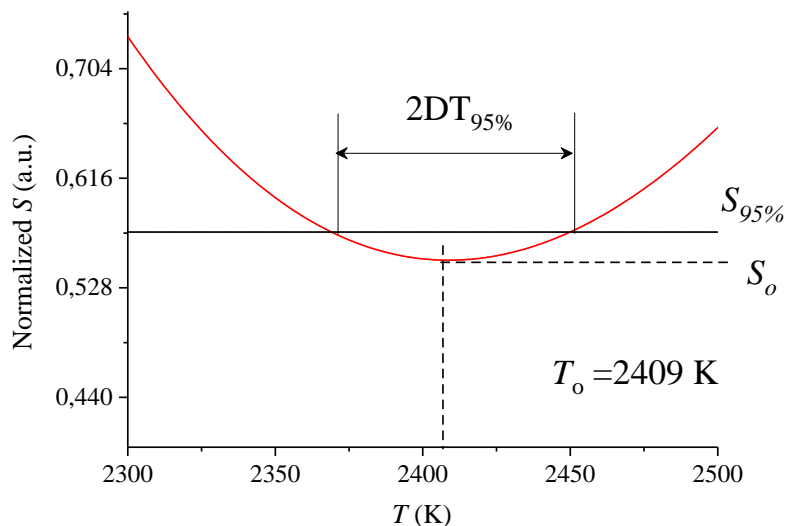
$$\partial S / \partial T |_{\varepsilon = \varepsilon_0, T = T_0} = 0. \quad (3)$$

The eq. (2) gives the value of ε_0

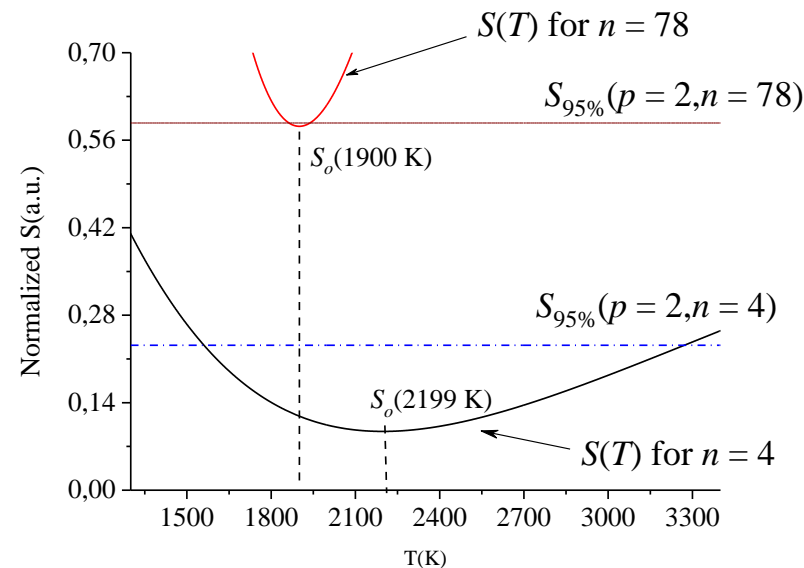
$$\varepsilon_0 = \frac{\sum_{i=1}^N [I(\lambda_i) g(\lambda_i, T)]}{\sum_{i=1}^N [g^2(\lambda_i, T)]}. \quad \text{Тогда (1) переписывается в виде} \quad S(T) = \sum_{i=1}^N \left[I(\lambda_i) - \frac{\sum_{i=1}^N [I(\lambda_i) g(\lambda_i, T)]}{\sum_{i=1}^N [g^2(\lambda_i, T)]} g(\lambda_i, T) \right]^2.$$

K.M. Bulatov, Y.V. Mantrova, A.A. Bykov, M.I. Gaponov, P.V. Zinin, A.S. Machikhin, I. A. Troyan, V.I. Batshev, I. B. Kutuza, V.Y. Fominski, V. B. Prakapenka, S.K. Sharma. "Multi-spectral image processing for the measurement of spatial temperature distribution on the surface of the laser heated microscopic object". *Computer Optics*. 41, (6) 864-868 (2017).

Измерение распределения температуры

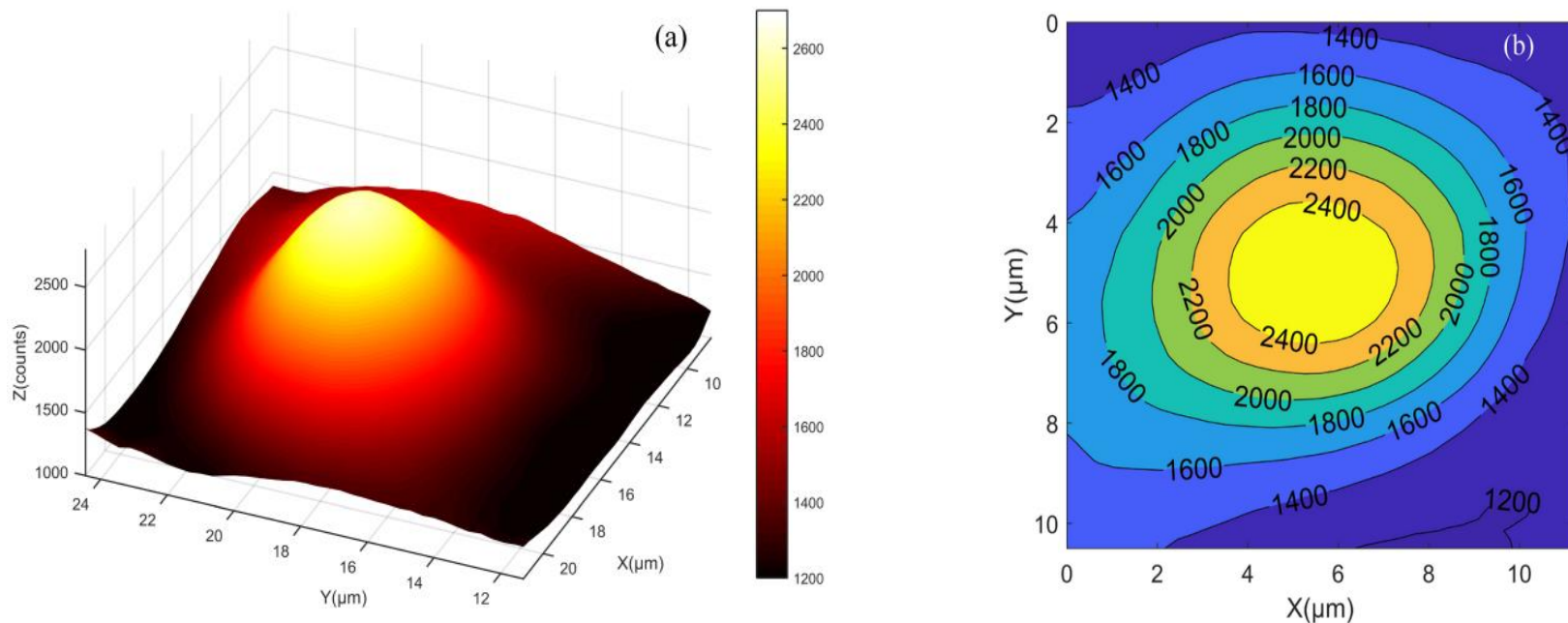


Experimental data fitting using 1-D minimization procedure for a selected point on the tungsten plate in the lamp when the laser power was 14 W. Graph shows the behavior of the normalized S (eq. 1) as a function of temperature. The function S has a minimum S_o at 2408 K. The 95% confidence interval, ΔT , is $\Delta T = \pm 41$ K.



Experimental data fitting using 1-D minimization procedure for temperature determination of the tungsten lamp when the electrical current was $i = 11.25$ A with different number of experimental points, n . For $n = 78$, $S(T)$, (eq. 9), has a minimum at 1900 K (95% confidence interval is 1900 ± 38 K), for $n = 4$, $S(T)$ has a minimum at 2199 K (95% confidence interval is 2199 ± 850 K).

Измерение распределения температуры

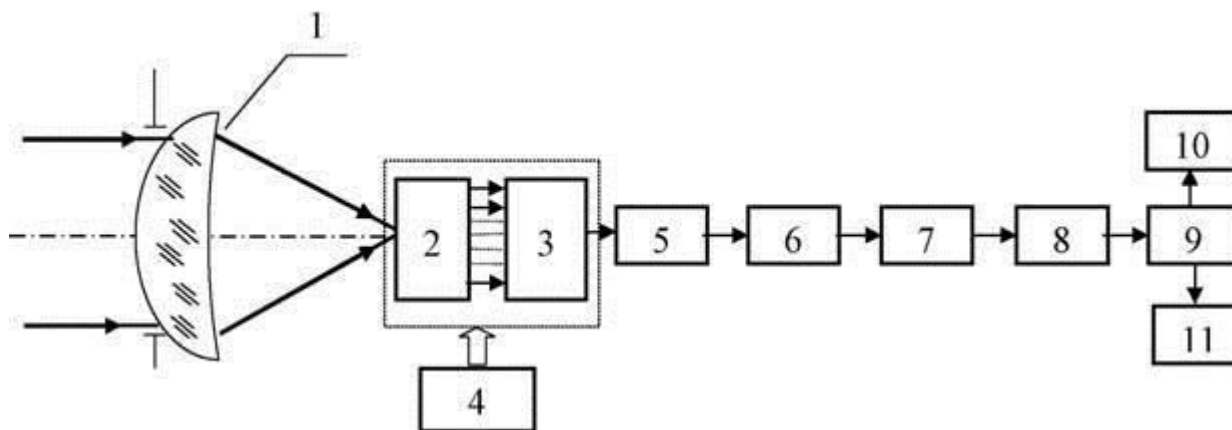


The 2-D temperature distribution on the surface of a Fe plate heated in the DAC₂ at 43 GPa with 5 W laser power, 620-750 nm, and 2 s exposure time. (a) A color map and (b) a filled contour plot displaying isolines of the color map with filled areas between the isolines.

P.V. Zinin, A.S. Machikhin, I.A. Troyan, K.M. Bulatov, A. A. Bykov, Y.V. Mantrova, V.I. Batshev, M.I. Gaponov, I.B. Kutuza, S.V. Rashchenko, V.B. Prakapenka, S.K. Sharma. “Measurement of the Temperature Distribution on the Surface of the Laser Heated Specimen in a Diamond Anvil Cell System by the Tandem Imaging Acousto-Optical Filter”. *High Pressure Research*. **39**(1) 139-141 (2019).

Матричные тепловизоры

Матричные тепловизоры – это тепловизоры, обладающие матрицей в фокальной плоскости (FPA — focal plane array). Обобщённая функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей представлена на рисунке. В фокальной плоскости оптической системы матричных тепловизоров устанавливается многоэлементный приемник ИК-излучения — матрица



Обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей: 1 – оптическая система; 2 – фокальная матрица с предусилителями; 3 – мультиплексор; 4 – система охлаждения; 5 – корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – цифровой корректор неоднородности; 8 – корректор неработающих ячеек; 9 – формирователь изображения; 10 – дисплей; 11 – цифровой выход.

Измерение распределения температуры

Для проведения данного исследования пользуются следующей последовательностью действий:

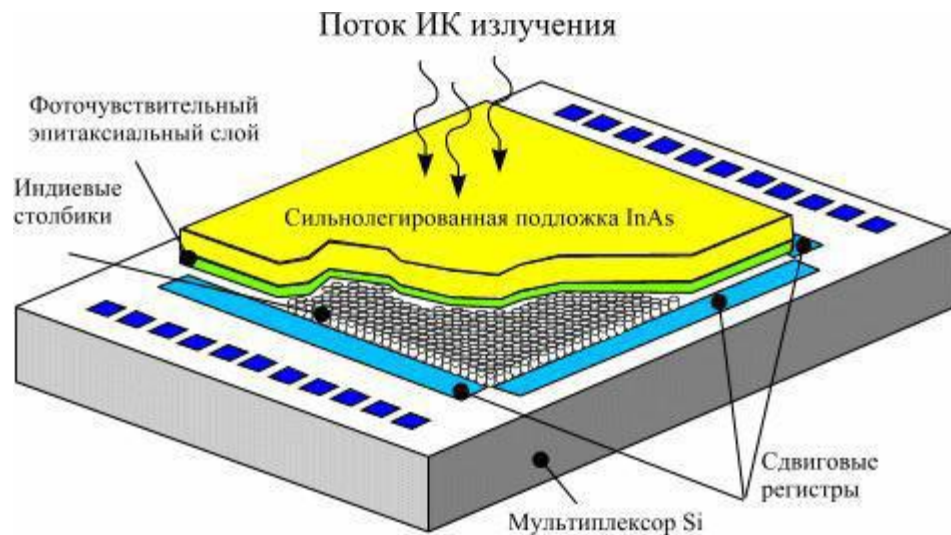
- 1) На поверхность исследуемого объекта наклеивается специальная пленка с известным коэффициентом излучения.
- 2) В тепловизор вводятся значения КИ используемой пленки.



Перед следующим пунктом необходимо сделать перерыв в работе, для того чтобы не исказить результаты исследования и дать пленке адаптироваться к поверхности исследуемого объекта.

- 3) Измеряется температура поверхности объекта на участке, покрытом пленкой. Данное значение температуры впоследствии будет считаться эталонным значением.
- 4) Проводится измерения температуры поверхности объекта, не покрытой пленкой.

Устройство матричного ИК-детектора

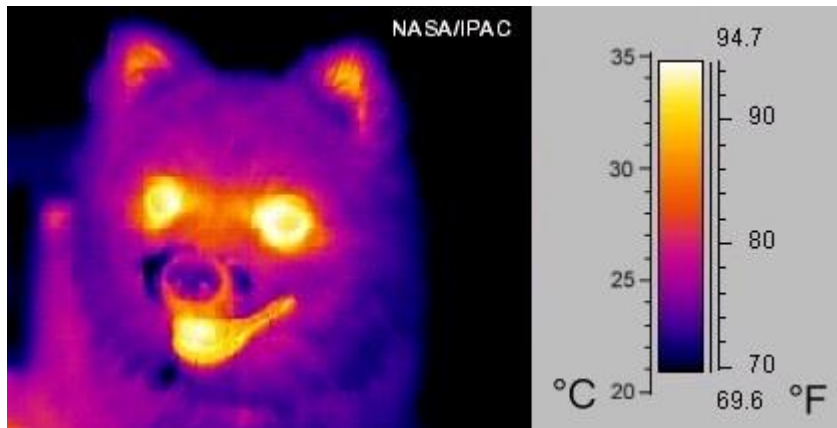


Матрица представляет собой микросхему с набором специальных диодов, отличающихся светочувствительностью, и свойством менять сопротивление в зависимости от интенсивности инфракрасных лучей. Благодаря современным технологиям матрица имеет компактные размеры и отличается низким энергопотреблением. Для получения качественной картинки необходимо минимизировать цифровой шум, поэтому конструктивно предусмотрены программные и аппаратные средства для ее охлаждения. В самых современных приборах матрица заменена на микроболометрическую, которая не требует охлаждения. Изменение сопротивления элементов такой микросхемы фиксируется с большой точностью практически во всем диапазоне ИК-излучения. Каждая точка (пиксель) в термограмме получается в результате преобразования соответствующим детектором матрицы ИК-излучения.

Д.К. Аксенова А.И. Довгялло, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов, А.А. Шиманов. Определение коэффициента излучения материалов ограждающих конструкций при проведении энергетического обследования. Методические указания к лабораторной работе

Инфракрасная термография

Инфракрасная термография, тепловое изображение или тепловое видео — это научный способ получения термограммы — изображения в инфракрасных лучах, показывающего картину распределения температурных полей. Термографические камеры обнаруживают излучение в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра (примерно 0,9-14 мкм) и на основе этого излучения создают изображения, позволяющие определить перегретые или переохлаждённые места.



Изображение небольшой собаки, сделанное в средних инфракрасных лучах

Термограмма, показывающая распределение тепловых полей у человека

<https://ru.wikipedia.org/wiki/>



Литература

1. Г. Рибо, Оптическая пирометрия, Гос. тех теоретич. изд-во, Москва, 1934
2. С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. Физическая Оптика, Наука, 2004
3. М.А. Брамсон, Инфракрасное излучение нагретых тел, Наука, Москва, 1964.
4. Ж. Госсорг, Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение. Мир, Москва, 1988.