



哈尔滨工程大学

HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

现代传感器原理及应用

智能科学与工程学院



红外传感器

红外温度传感器

基本理论

红外测温原理

基本结构和组成

红外气体传感器

基本工作原理

基本结构和组成

性能特点

红外传感器 基本理论

威廉·赫谢尔爵士于1800
年发现红外线。绝对零
度(-273.15°C)
以上的物体都辐射红外
能量



William Herschel
1738 -1822



红外辐射

- 红外辐射俗称红外线：它是一种人眼看不见的光线。任何物体，只要它的温度高于绝对零度，就有红外线向周围空间辐射。
- 红外线是位于可见光中红光以外的光线，故称为红外线。它的波长范围大致在0.76 μm 到1000 μm 的频谱范围之内。相对应的频率大致在 $4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11} \text{Hz}$ 之间。

波 长 公 式

$$C=299792458\text{m/s}$$

$$c=\lambda f$$



可见光光谱线



红外线主要特征

- 红外线是不可见光，与所有电磁波一样，具有反射、折射、散射、干涉、吸收等性质；
- 具有光热效应，辐射热量，它是光谱中最大光热效应区；红外光的光热效应对不同的物体是各不相同的，热能强度也不一样。
- 红外光在介质中传播会产生衰减，在金属中传播衰减很大，但红外辐射能透过大部分半导体和一些塑料，大部分液体对红外辐射吸收非常大。不同的气体对其吸收程度各不相同；
- 自然界中任何物体，只要其温度在绝对零度之上，都能产生红外光辐射。

红外分区：

在红外技术中，一般将红外辐射分为4个区域

波长公式 $c = \lambda f$

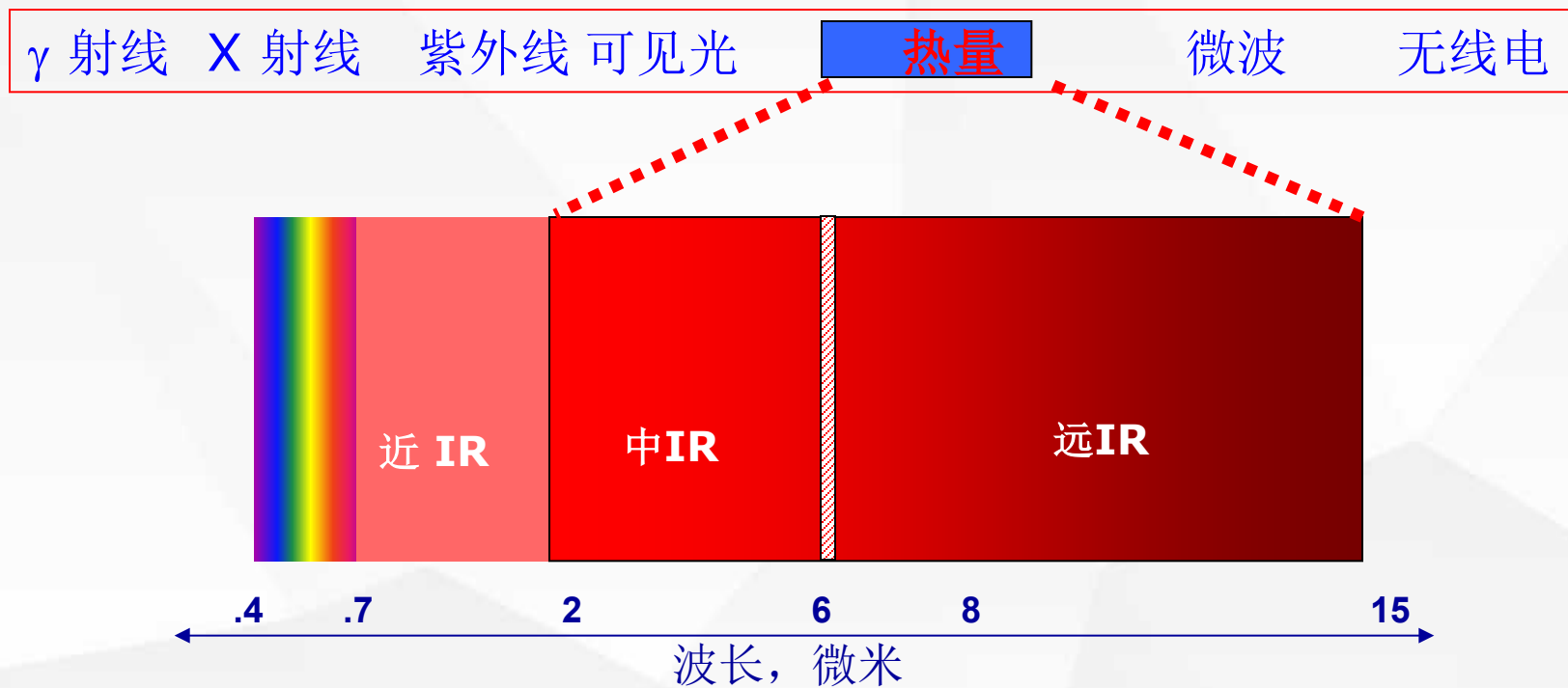
$$C = 299792458 \text{ m/s}$$

近红外区：	$0.76 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3 \text{ nm}$
中红外区：	$1.50 \times 10^3 \sim 6.0 \times 10^3 \text{ nm}$
远红外区：	$6.0 \times 10^3 \sim 40 \times 10^3 \text{ nm}$
极远红外区：	$40 \times 10^3 \sim 1000 \times 10^3 \text{ nm}$

注意：这里所说的远近是指红外辐射在电磁波谱中与可见光的距离。

电磁波谱

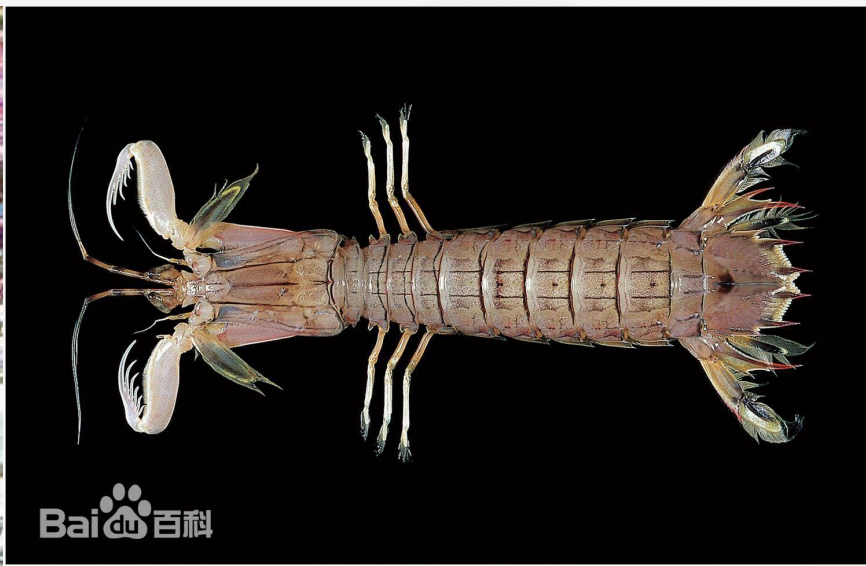
工业用红外测温仪的工作波长在0.76至14微米范围内



身边的视觉大神



雀尾螳螂虾

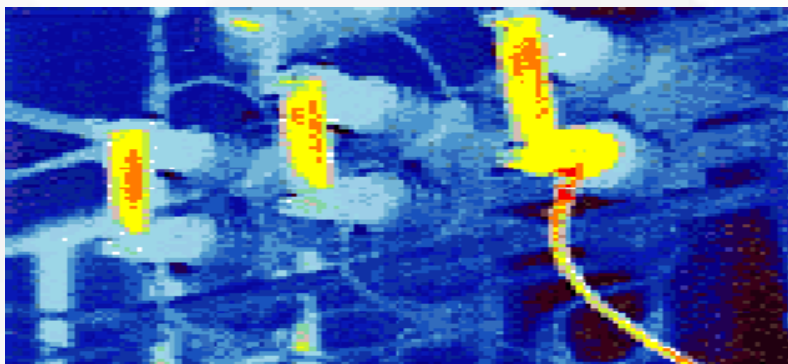
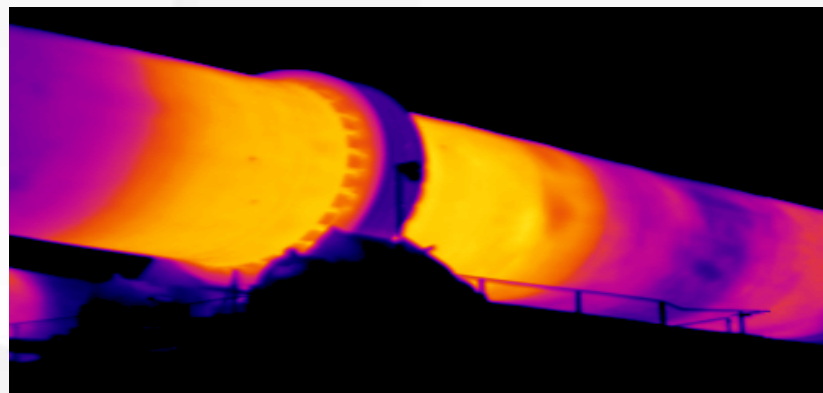
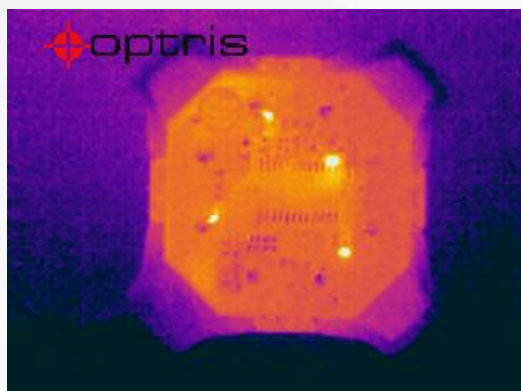


螳螂虾

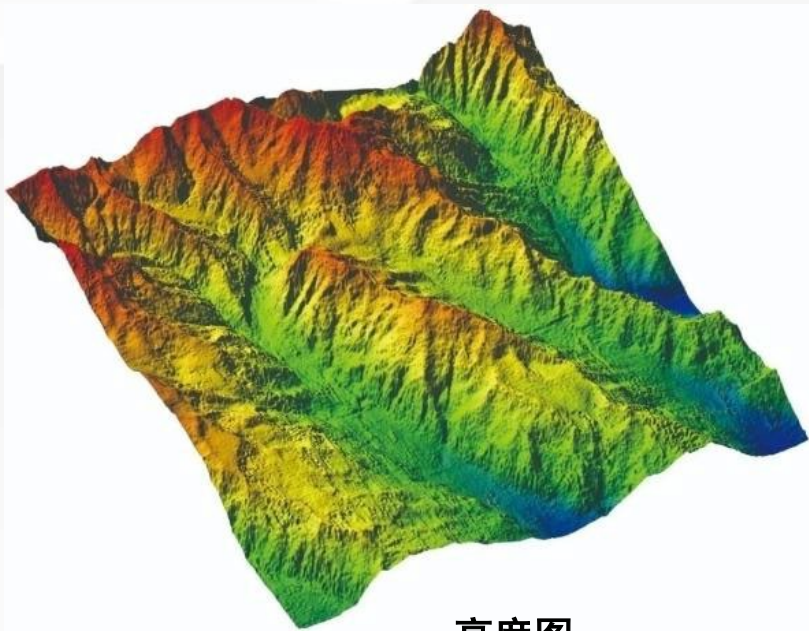
色彩分辨能力甚至能达到16种,其中色彩9种, 非可见光3种, 偏振4种。

人眼4种（视锥细胞色彩3种, 视杆细胞1种）

绝对零度(-273.15°C) 以上的物体都辐射红外能量



彩色的定义和伪彩色



高度图

颜色图名称	色阶
parula	
turbo	
hsv	
hot	
cool	
spring	
summer	
autumn	
winter	
gray	
bone	
copper	
pink	
jet	

红外辐射的物理本质

- ❑ 红外辐射的物理本质是热辐射。物体的温度越高，辐射出来的红外线越多，红外辐射的能量就越强。
- ❑ 研究发现，太阳光谱各种单色光的热效应从紫色光到红色光是逐渐增大的，而且最大的热效应出现在红外辐射的频率范围内，因此人们又将红外辐射称为热辐射或热射线。
- ❑ 实验表明：波长在 $0.76-1000\mu\text{m}$ 之间的电磁波被物体吸收时，可以显著地转变为热能。

红外吸收及红外窗口

- ❑ 红外辐射在大气中传播时，由于大气中的气体分子、水蒸汽以及固体微粒、尘埃等物质的吸收和散射作用，使辐射能在传输过程中逐渐衰减。
- ❑ 红外辐射在通过大气层时被分割成三个波段，即2-2.6 μm , 3-5 μm 和8-14 μm ，统称为“大气窗口”（通常把太阳光透过大气层时透过率较高的光谱段称为大气窗口）。这三个大气窗口对红外技术应用特别重要，因为一般红外仪器都工作在这三个窗口之内。

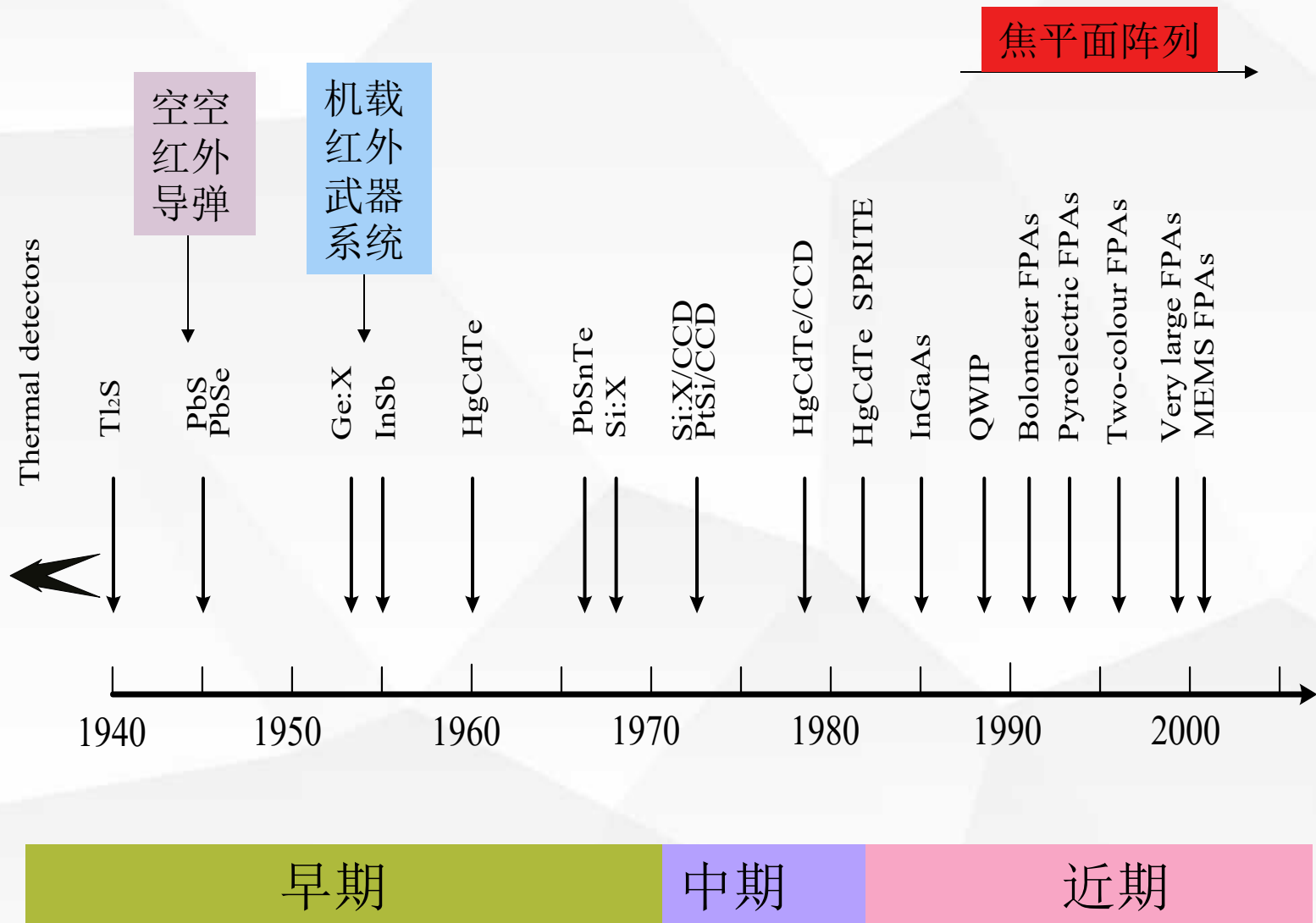
红外辐射源

- 当物体温度高于绝对零度时，都有红外线向周围空间辐射出来。
- 辐射源几何尺寸的大小和距探测器的远近，又分为点源和面源。

红外探测器

能将红外辐射能转换成电能的光敏器件，它是红外探测系统的关键部件，其性能好坏，将直接影响系统性能的优劣。

选择合适的、性能良好的红外传感器，对于红外探测系统是十分重要的。



热电偶型红外 探测器-热电堆

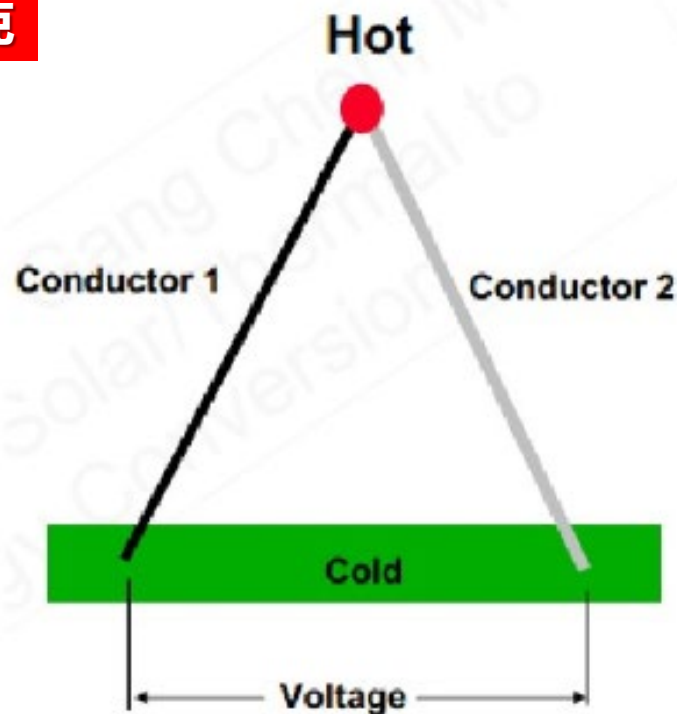
- 原理：当红外辐射入射到热电偶回路的测温接点上时，该接点温度升高，而另一个没有被红外辐射辐照的接点处于较低的温度，此时，在闭合回路中将产生温差电流，同时回路中产生温差电势。温差电势的大小，反映了接点吸收红外辐射的强弱。
- 利用温差电势现象制成的红外传感器称为热电偶型红外传感器，时间常数较大，响应时间较长，动态特性较差。

Seebeck Effect (1821) —— 热电第一效应



德国科学家 Seebeck
(1770-1831)

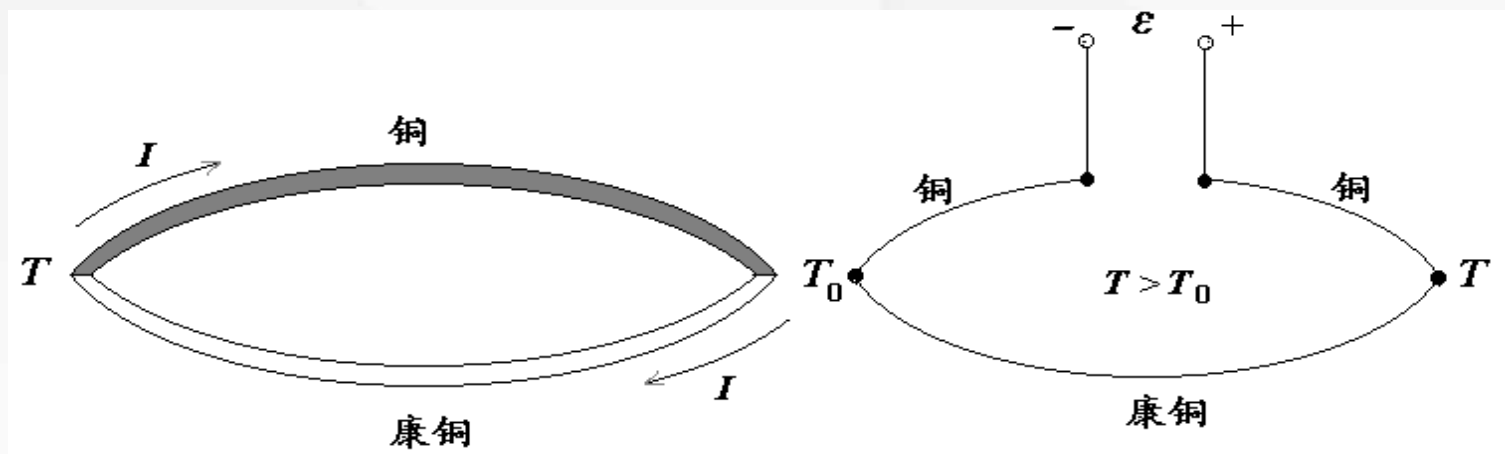
塞贝克



两种不同材料AB组成的回路，且两端接触点温度不同时，则在回路中存在电动势的效应。

塞贝克效应

塞贝克效应：热电第一效应。两种不同金属组成回路，且两端接触点温度不同时，则在回路中存在电动势的效应。



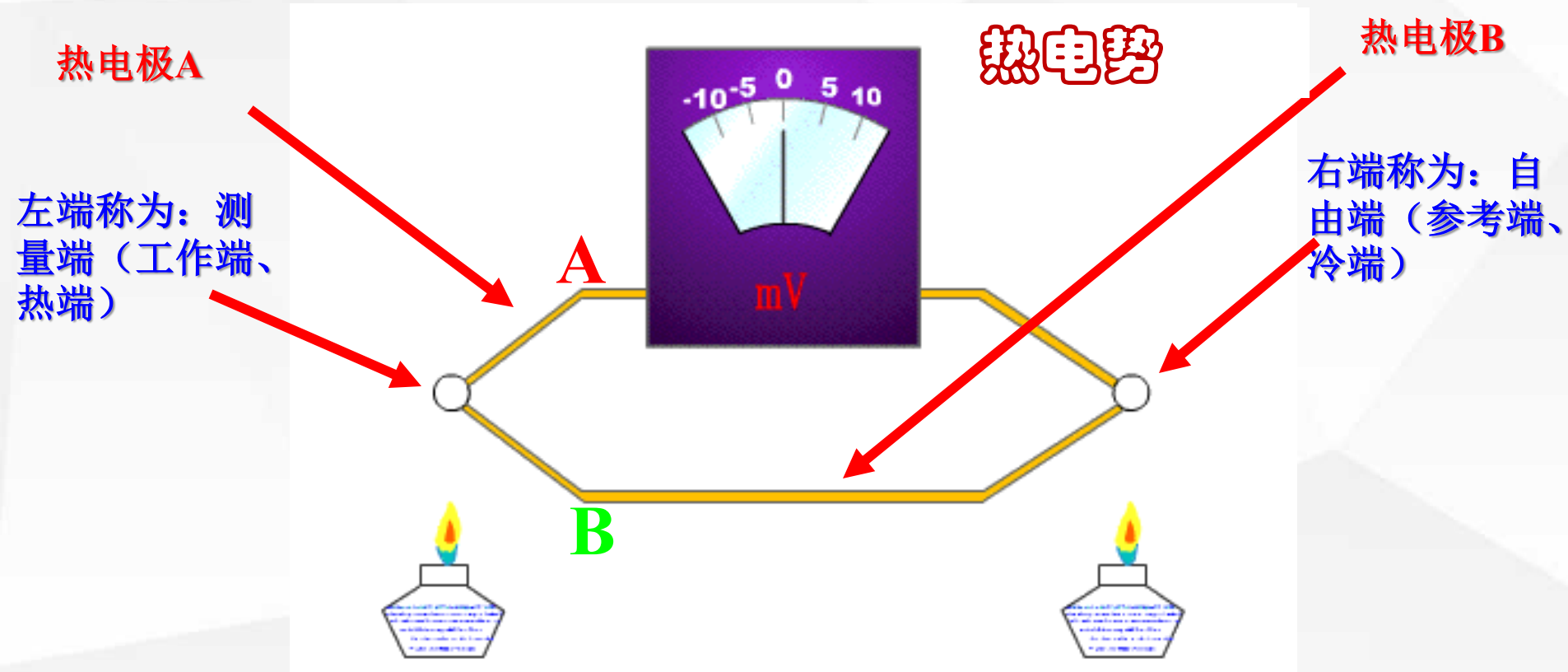
热电偶接收辐射一端称为热端，另一端称为冷端。
为了提高吸收系数，在热端都装有涂黑的材料（金箔）

1.塞贝克效应：当两种不同导体连接成闭合回路，且两个接点的温度不同时，回路中会产生电流。这种现象是由塞贝克首先发现的，因此得名。

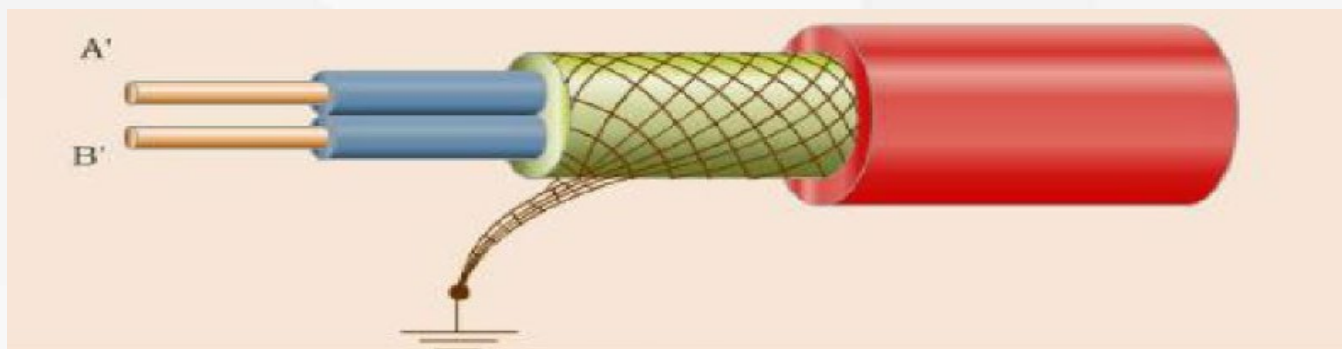
2.珀耳帖效应：反过来，当电流流过上述闭合回路时，接点处将分别放出或吸收热量。这种现象是由法国科学家珀耳帖发现的。（塞贝克效应的逆）

3.汤姆逊效应：单一导体两端由于温度不同而在其两端产生的电势称为温差电势，又称汤姆逊电势。这是因为高温端自由电子的动能大于低温端自由电子的动能，高温端自由电子扩散速率高于低温端自由电子的扩散速率，从而在导体两端形成电位差。

热电偶工作示意图



热电偶是由热电功率差别较大的两种金属材料（如铜/康铜、铂/铂铑、镍铬/镍硅合金等）构成。



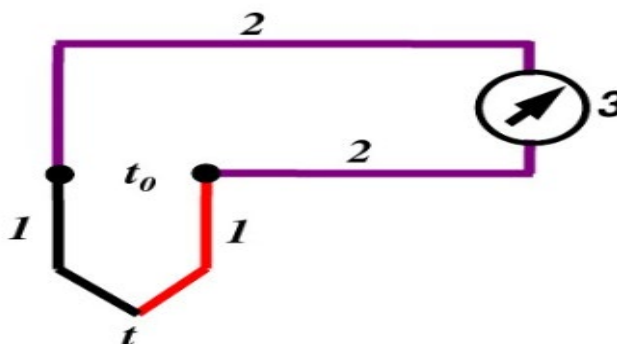
·**热电效应**原理

➤ 组成

热电偶 1

连接导线 2

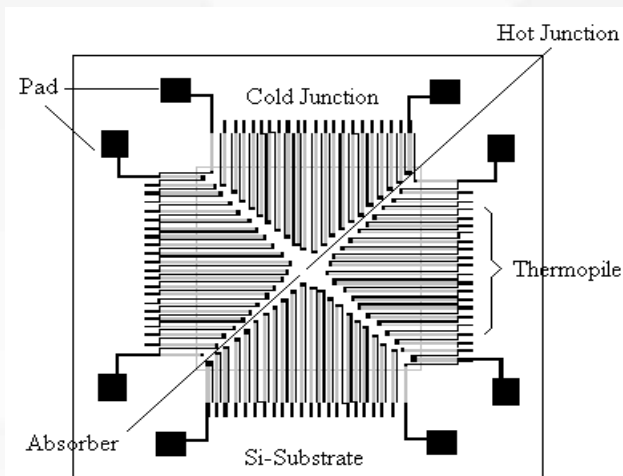
显示仪表 3



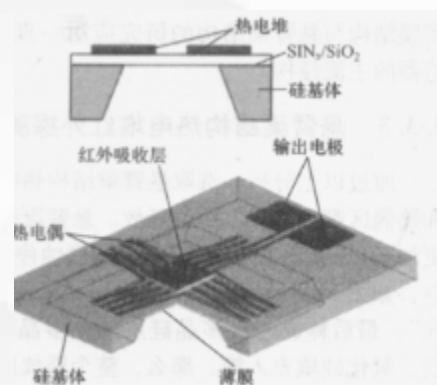
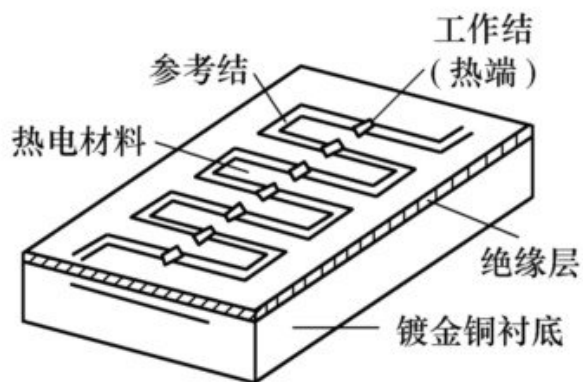
热电堆

- 原理：当红外辐射入射到热电偶回路的测温接点上时，该接点温度升高，而另一个没有被红外辐射辐照的接点处于较低的温度，此时，在闭合回路中将产生温差电流，同时回路中产生温差电势。温差电势的大小，反映了接点吸收红外辐射的强弱。
- 利用温差电势现象制成的红外传感器称为热电偶型红外传感器，时间常数较大，响应时间较长，动态特性较差。

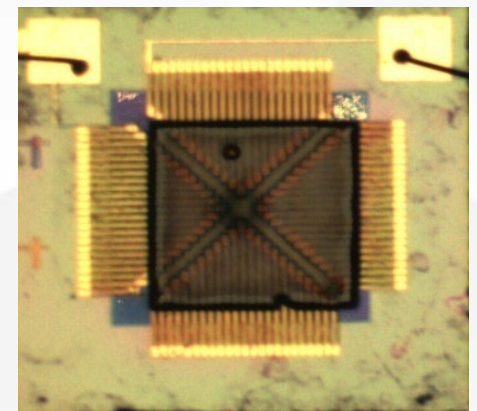
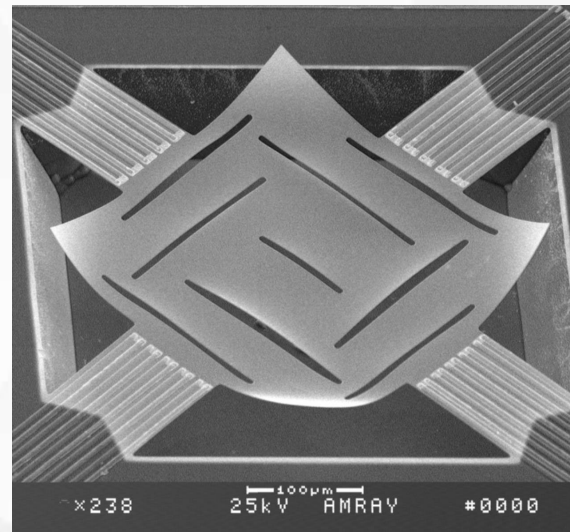
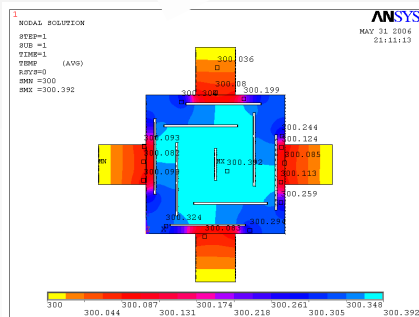
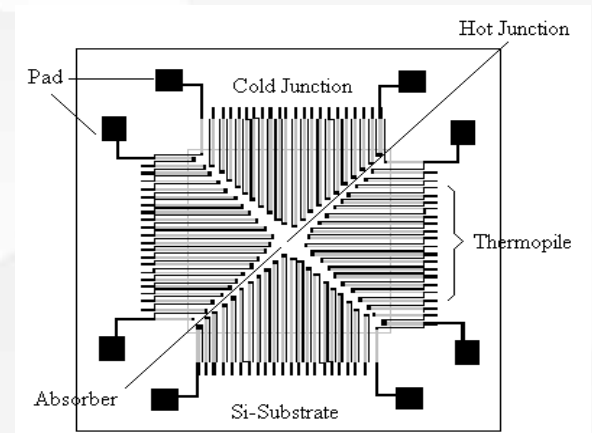
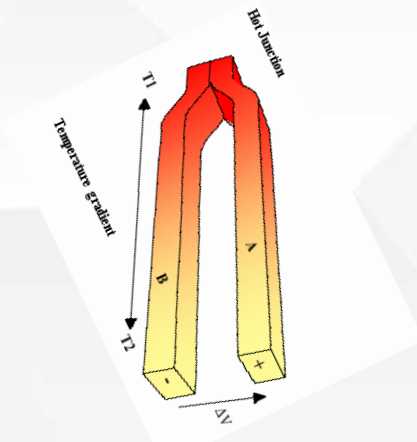
几个-几十个热电偶
串联起来组成热电
堆来检测红外辐射
的强弱



- 多晶硅-金
- P型硅-铝
- n 型硅-P型硅
- 10-44ms



热电堆红外探测芯片



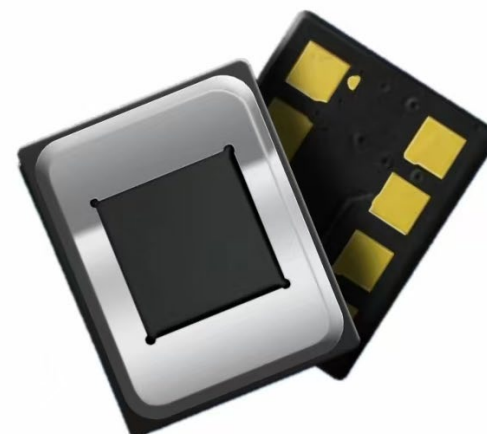
市场上常见的热电堆

产品参数

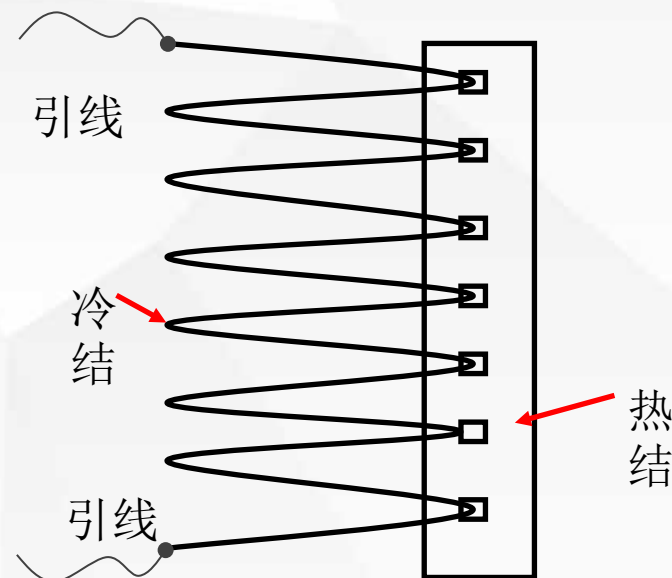
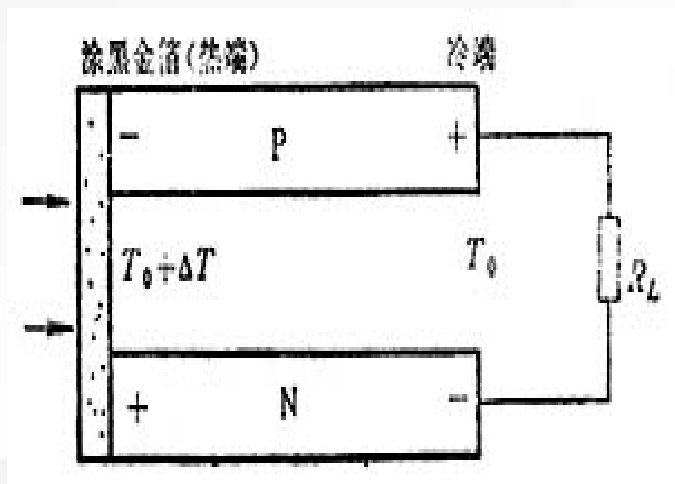
型号	MTP10-B7F55	MTP10-B7F55 TSR
图片		
芯片面积	1.1*1.1 mm ²	1.1*1.1 mm ²
感应区域	0.75*0.75mm ²	0.75*0.75mm ²
视场 (50% 最大信号)	83 °	76 °
热电堆阻值 (环温 25°C)	54±10%kΩ	54±10%kΩ
噪声电压 (环温 25°C)	30±2nV/Hz ^{1/2}	30±2nV/Hz ^{1/2}
噪声等效功率 (500K,1Hz)	0.62 nW/Hz ^{1/2}	0.37 nW/Hz ^{1/2}
响应率 [500K,5.5um(长波通)]	81 V/W	81 V/W
电阻温度系数 (25°C /50°C)	0.1 %/°C	0.1 %/°C
时间常数	20 ms	20 ms
探测率 (500K,1Hz)	5.9E+07 cmHz ^{1/2} /W	5.9E+07 cmHz ^{1/2} /W
NTC 阻值 (25°C)	100±3% kΩ	100±3% kΩ
NTC β 值 (25°C /50°C)	3950±1% K	3950±1% K

GD60932

GooDeTek®



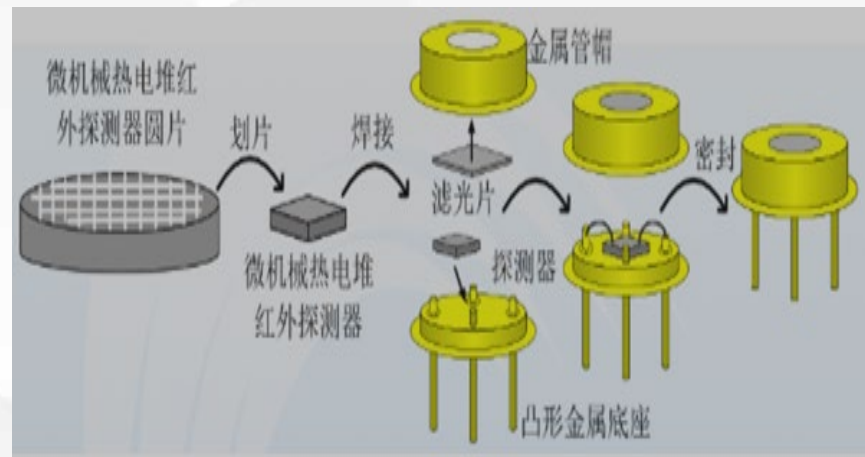
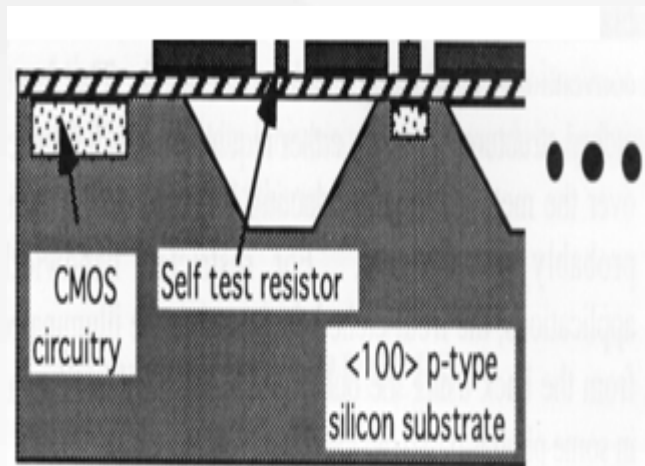
半导体材料具有较高的温差电位差，高的可达 $500\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。半导体热电偶结构：将两种半导体材料 n 型硅- P型硅 构成两个结，其中一个结涂以黑金箔，增加对辐射的吸收能力，作为热端。



热端接收辐射产生温升，半导体中载流子动能增加。多数载流子要从热端向冷端扩散，结果P型材料热端带负电，冷端带正电；而N型材料情况正好相反。当冷端开路时，开路电压为 $U_i = M \cdot \Delta T$

M为比例系数，称塞贝克常数，也称温差电势率，单位为 $\text{V}/^\circ\text{C}$ ； ΔT 为温度增量。

微型红外传感器主要由隔热空腔及其上的热电堆、pn结、热敏电阻等感温元件组成。



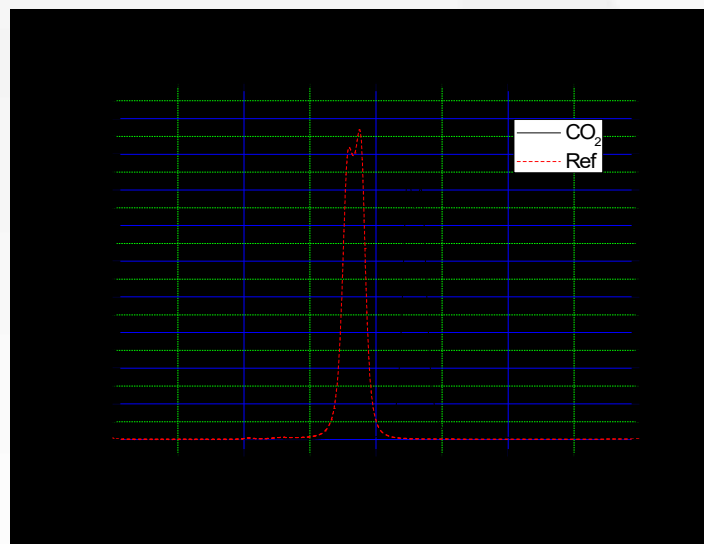
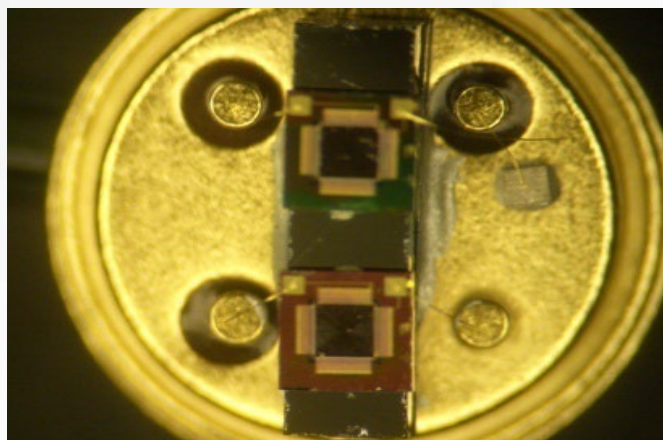
密西根大学研制的红外阵列传感器，敏感元件为 $375\mu\text{m} \times 375\mu\text{m}$ ，有32个n-p型多晶硅热电偶组成的热电堆，其灵敏度为 30V/W 。

探测器的原理及相应的探测器分类	
效应	相应的探测器
(1) 测辐射热计 负电阻温度系数 正电阻温度系数	热敏电阻测辐射热计 金属测辐射热计
(2) 温差电效应	热电偶、热电堆
(3) 热释电效应	热释电探测器
(4) 其它	高莱盒, 液晶等

双通道热电堆红外探测器

响应时间 < 20 ms

响应率 > 40 V/W



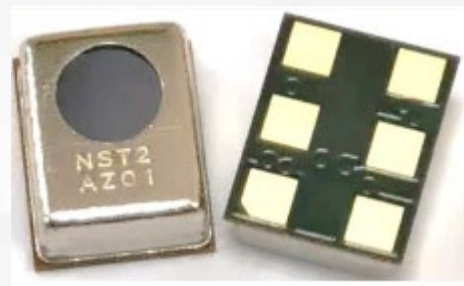
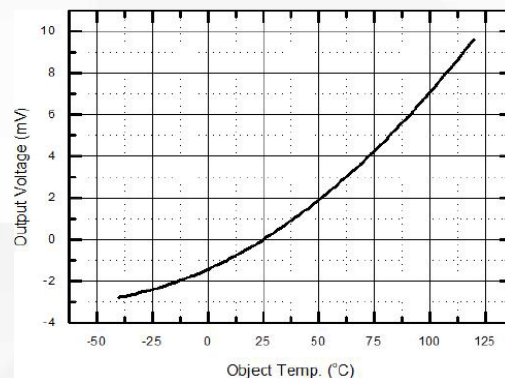
红外热电堆传感器特性:

- 红外技术, MEMS 工艺
- TO 通用管壳封装
- 敏感面积大, 感应灵敏, 数据可靠
- 非接触式测温, 助力疫情防控
- 应用广、可用于甲烷等气体检测
- 高一致性和稳定性
- 极小温漂
- 高性价比、可定制

应用:

- 医疗: 耳温、额温测量
- 工业: 非接触式温度测量
- 家电: 微波炉、吹风机、空调等

参数	特性	单位
芯片尺寸	1.10*1.10	mm ²
敏感面积	0.75*0.75	mm ²
响应时间	15	ms
视场角 (FOV)	94	°
工作温度	-20~120	°C
输出电压		



数字输出红外
热电堆传感器

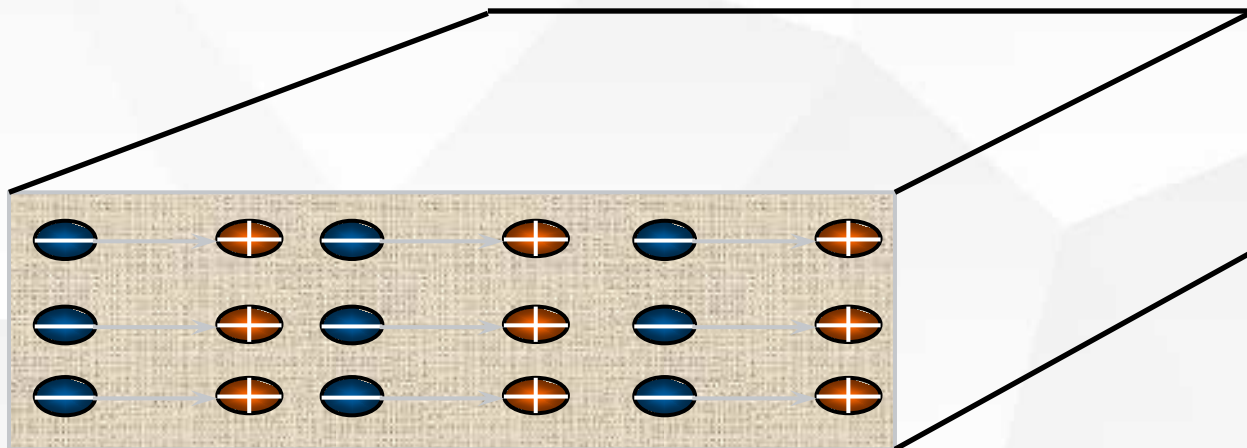
I2C通讯协议

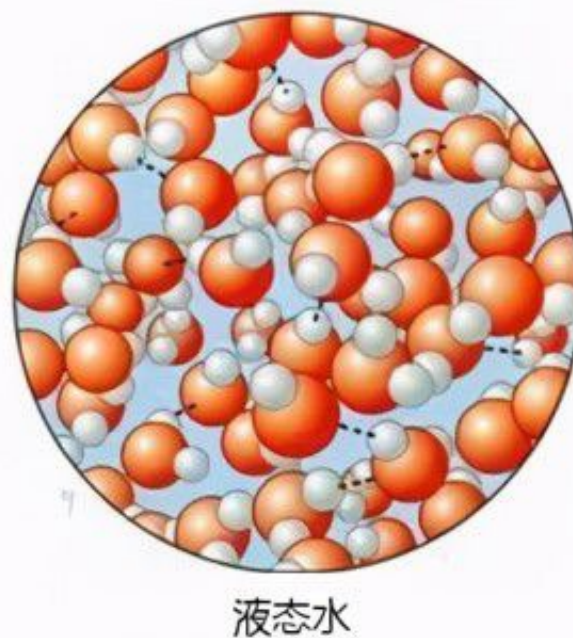
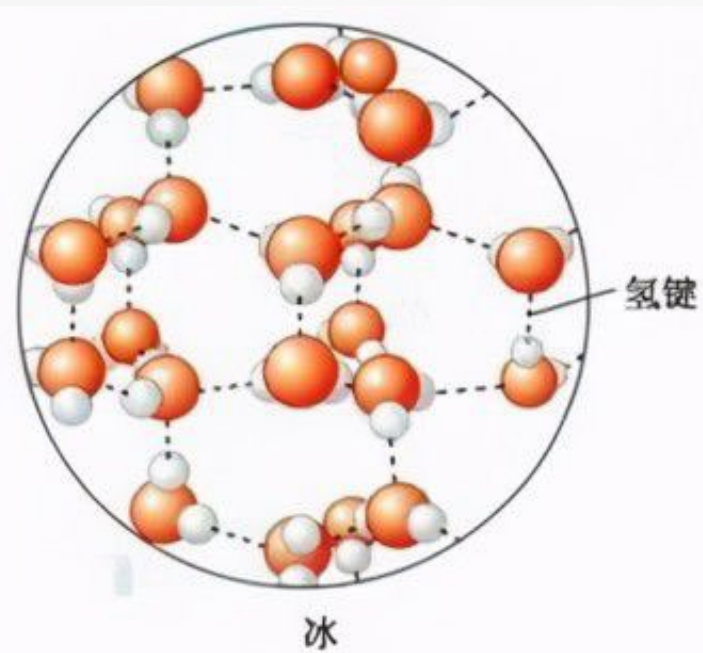
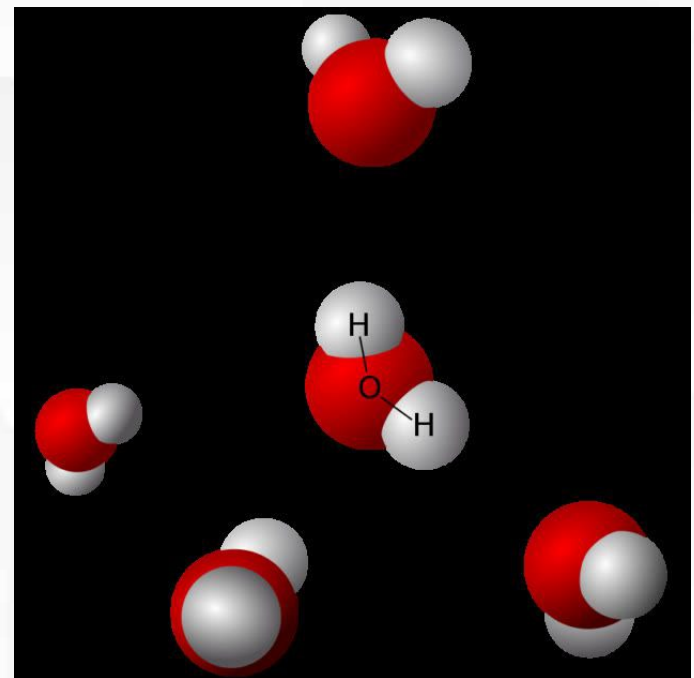
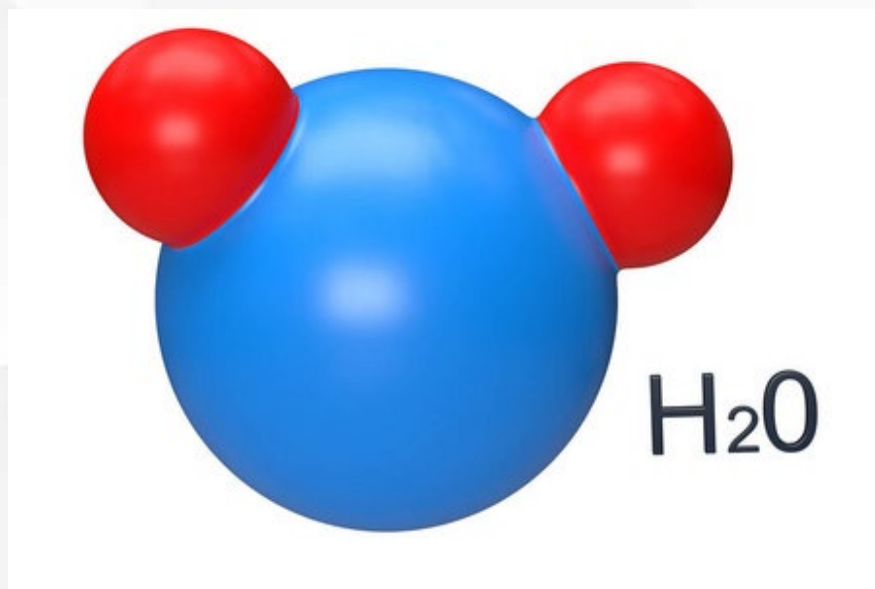
热释电红外探测器

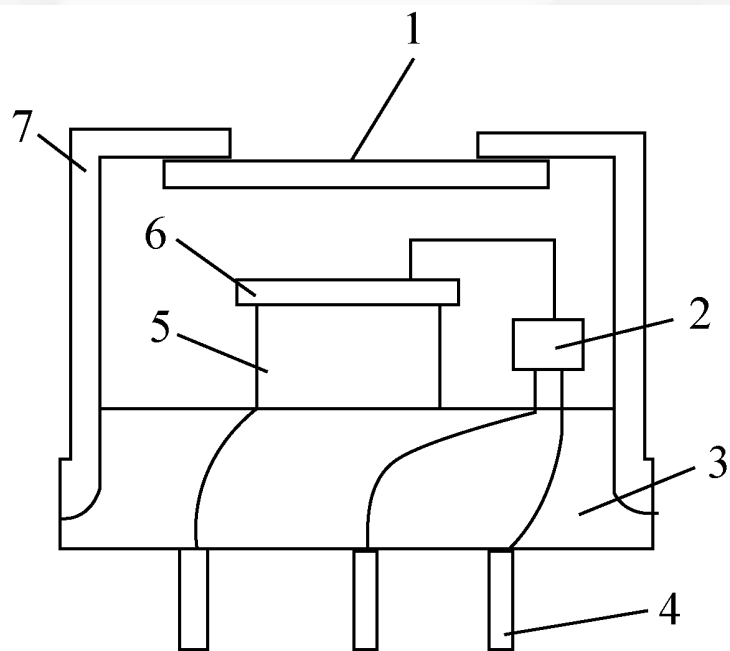
- 当红外辐射照射到已经极化的晶体薄片表面上时，引起薄片温度升高，使其极化强度降低（热运动加剧，破坏了极化）、表面电荷减少，这相当于释放一部分电荷，所以叫热释电型传感器。
- 将负载电阻与晶体薄片相连，则负载电阻上便产生一个电信号输出。输出信号的大小，取决于薄片温度变化的快慢，从而反映出入射的红外辐射的强弱

热释电效应

在自发极化晶体中，当晶体受热或者冷却后，由于温度变化导致自发极化强度变化，而在晶体某一个方向产生表面极化电荷的变化，**温度升高，极化强度降低、表面电荷减少**，这一现象称为热释电效应





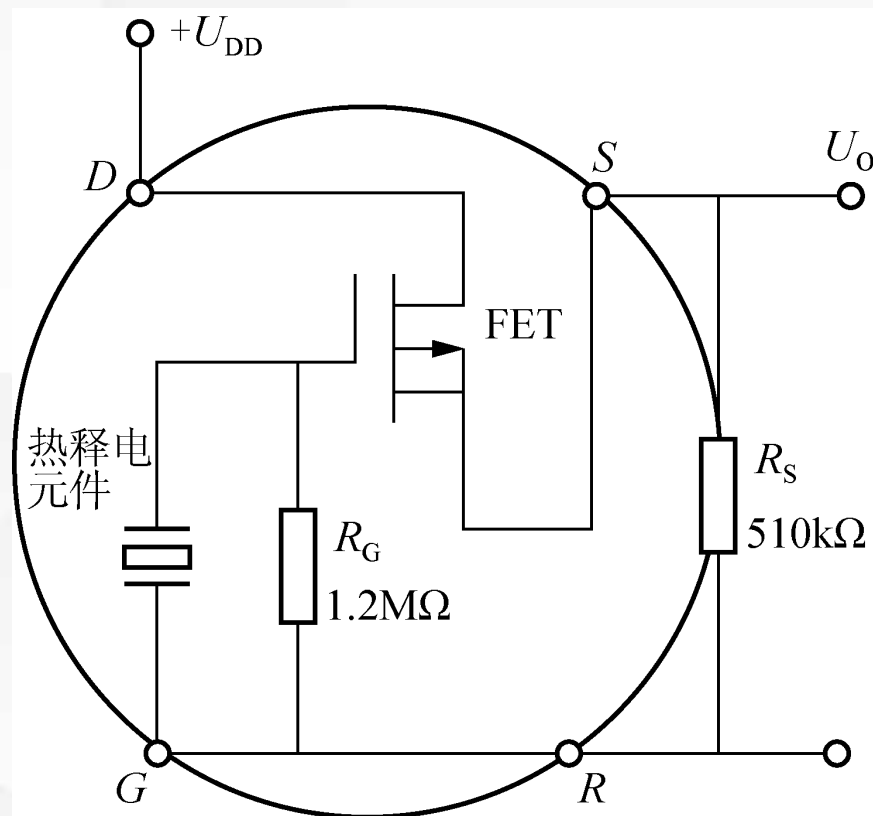


1—窗口；2—FET；3—绝缘基座；4—引脚；
5—导电性支撑台；6—热释电元件；7—外壳

热释电传感器结构示意图

FET是场效应管

热释电传感器内部电路结构



热释电材料

能产生热释电效应的晶体称之为热释电体或热释电元件，其常用的材料有：

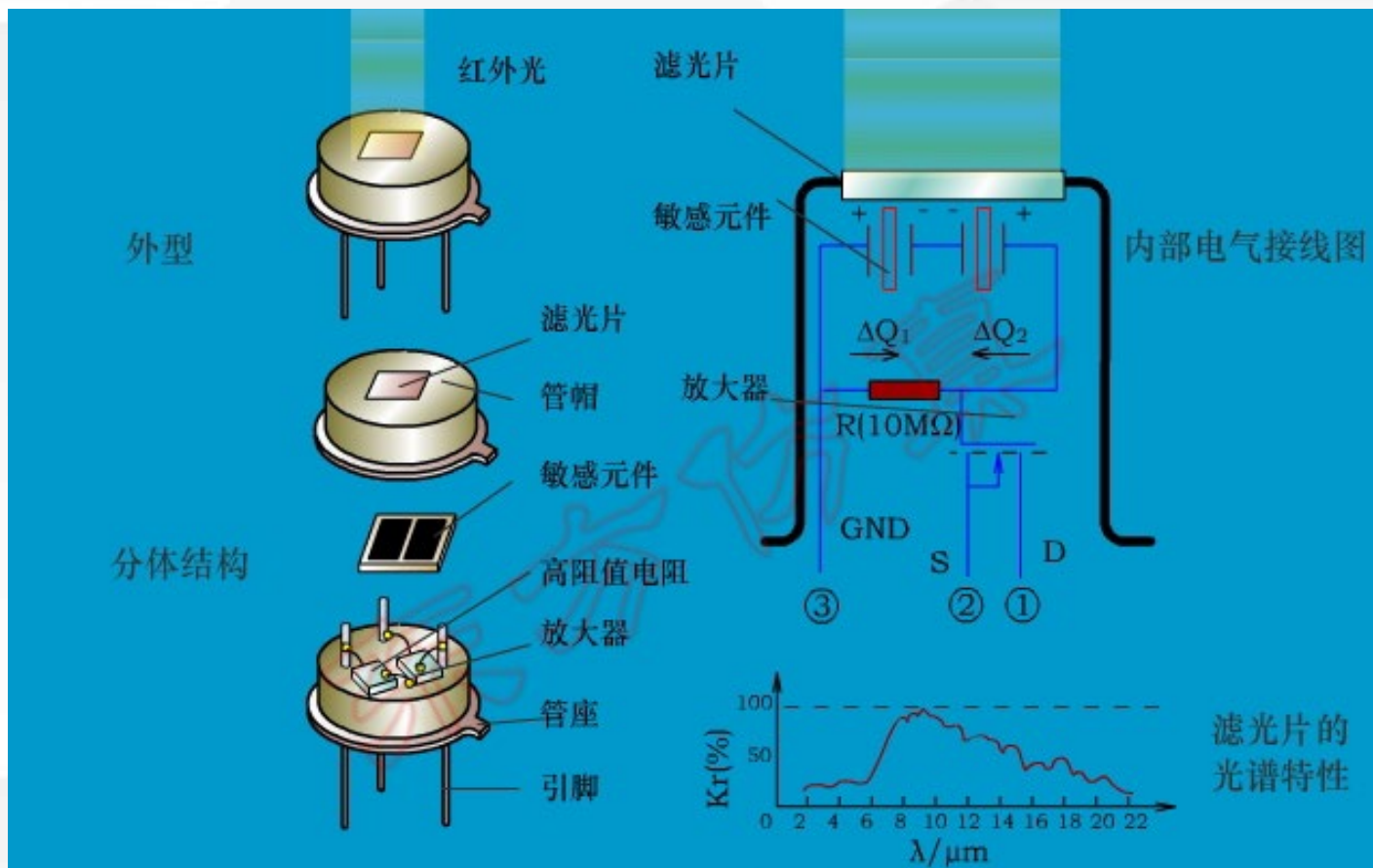
- 单晶 (LiNbO_3 (铌酸锂) LiTaO_3 (钽酸锂) 等)、
- 压电陶瓷 (PZT (锆钛酸铅压电陶瓷) 等)
- 高分子薄膜 (PVFZ等)

铌酸锂晶体材料的热释电效应探测辐射能量的器件。由于热释电信号正比于器件温升随时间的变化率，而不像通常热探测器那样需要有个热平衡过程，热释电探测器的响应速度比其他热探测器快得多。



红外温度传感器原理

组成结构



红外热释电传感器的结构

红外测温原理

- 红外全辐射测温，全辐射测温是测量物体所辐射出来的全波段辐射能量来决定物体的温度。
- 斯蒂芬-玻尔兹曼定律，定律表达式为：

即物体红外辐射的能量与它自身的绝对温度 T 的四次方成正比，并与 ε 成正比。物体温度越高，其表面所辐射的能量就越大。

式中：

$$W = \varepsilon \delta T^4$$

W - 物体全波辐射单位面积所发射的辐射功率；

ε - 物体表面的法向辐射率；

δ - 斯蒂芬-玻尔兹曼常数；

T - 物体的绝对温度 (K) 。

完全辐射体。入射的红外线全部被吸收，既无反射，又无透射。

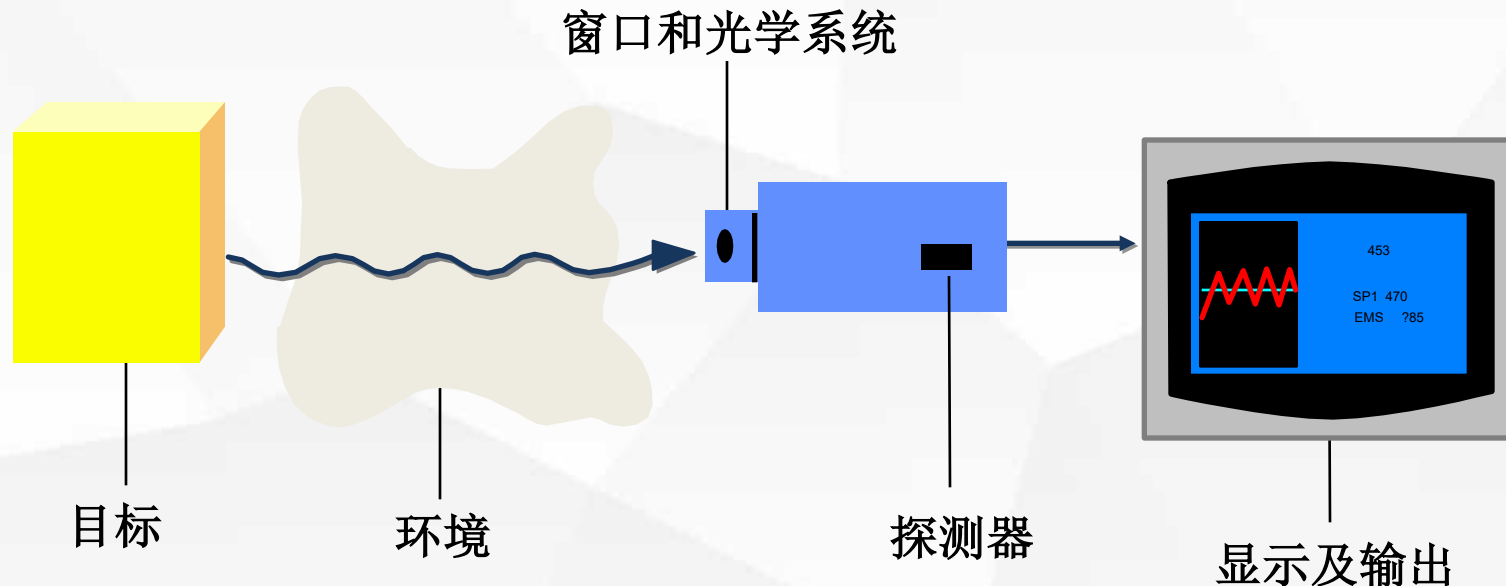
一般物体的 ε 总是在 0 与 1 之间， $\varepsilon=1$ 的物体叫做黑体。

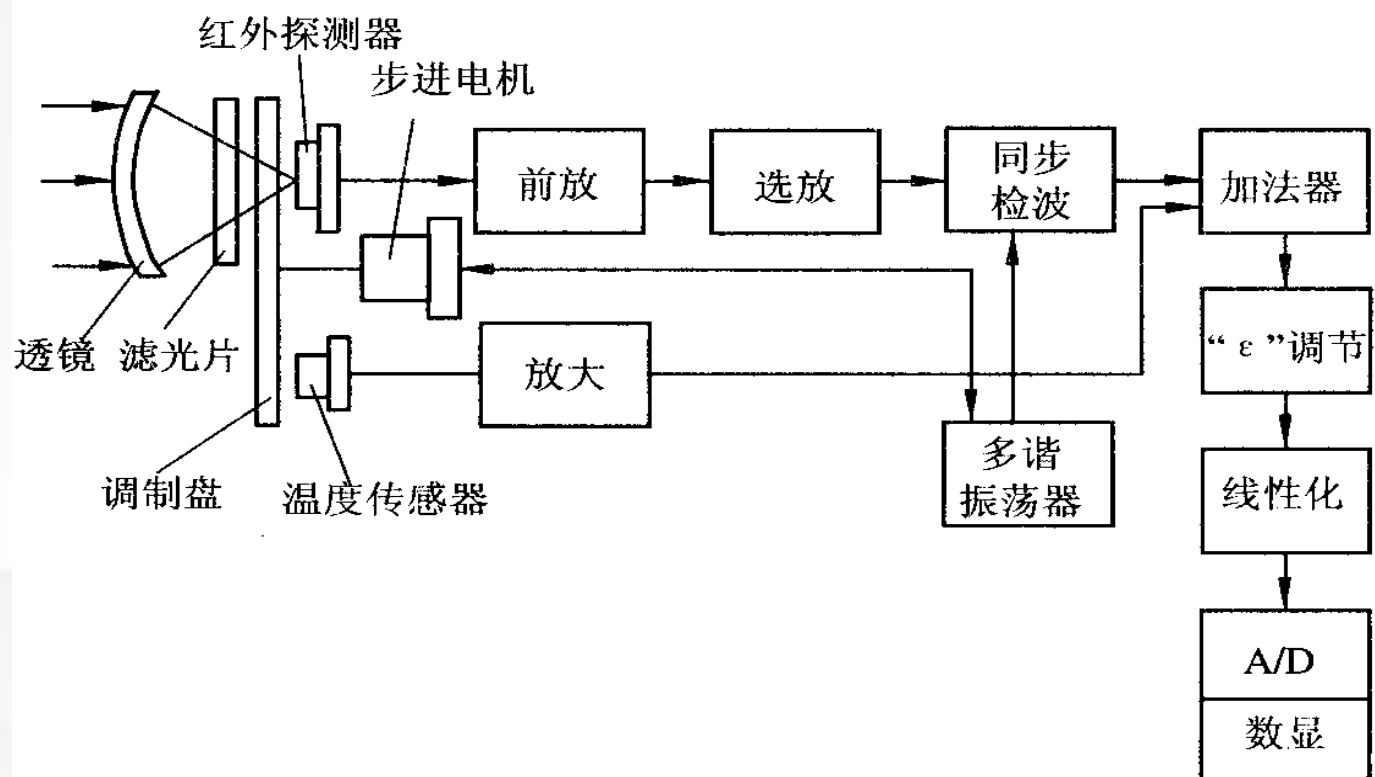
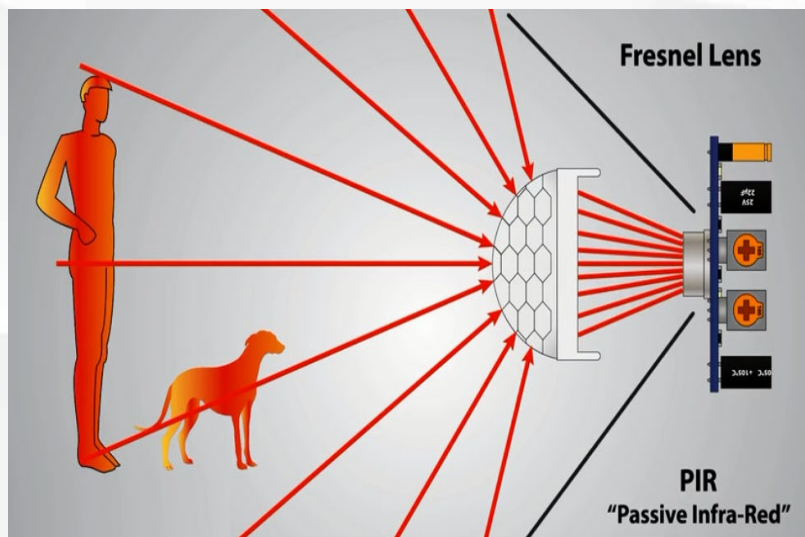
T 越大，物体的辐射功率就愈大。



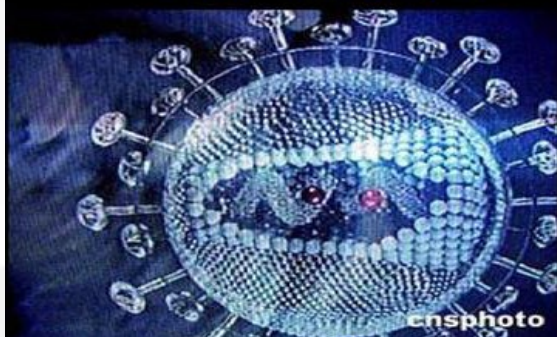
红外测温仪功能结构

红外测温仪由光学系统、光电探测器、信号放大器及信号处理、显示输出等部分组成。光学系统汇聚其视场内的目标红外辐射能量，红外能量聚集在光电探测器上，并转变为相应的电信号，该信号再经换算转变为被测目标的温度值。





SARS病毒的电子图片



红外测温特点

可远距离和非接触测温，它特别适合于带电体、高压、高温物体的温度测量。

反应速度快，不需与物体达到热平衡，只要接收到目标的红外辐射即可测量目标的温度。测量时间一般为毫秒级至微妙级。

准确度高，非接触测量不会影响物体温度分布状况与运动状态，检测出的温度比较真实。测量准确度可达 0.1°C 以内，甚至更小。

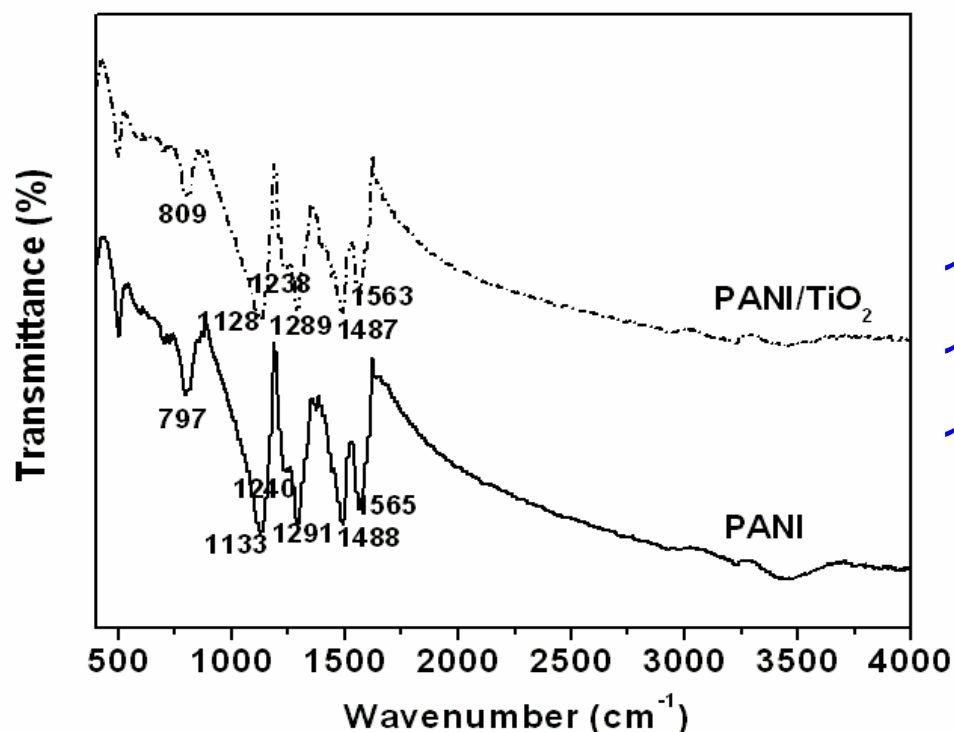
测温范围广，可测零下几千摄氏度到零上几千摄氏度的温度范围。



- ❑ 红外气体传感器是根据物质的吸收特性来进行工作的。
- ❑ 许多化合物的分子在红外波段都有吸收带，而且因物质的分子不同，吸收带所在的波长和吸收的强弱也不相同。
- ❑ 根据吸收带分布的情况与吸收的强弱，可以识别物质分子的类型，从而得出物质的组成及百分比。

用红外光照射化合物时，分子吸收红外光的能量。化合物中的**官能团**可以吸收特定波长的红外光，即使这些官能团所处的化学环境略有不同。

红外吸收光谱可以用来鉴别化合物中存在的官能团。

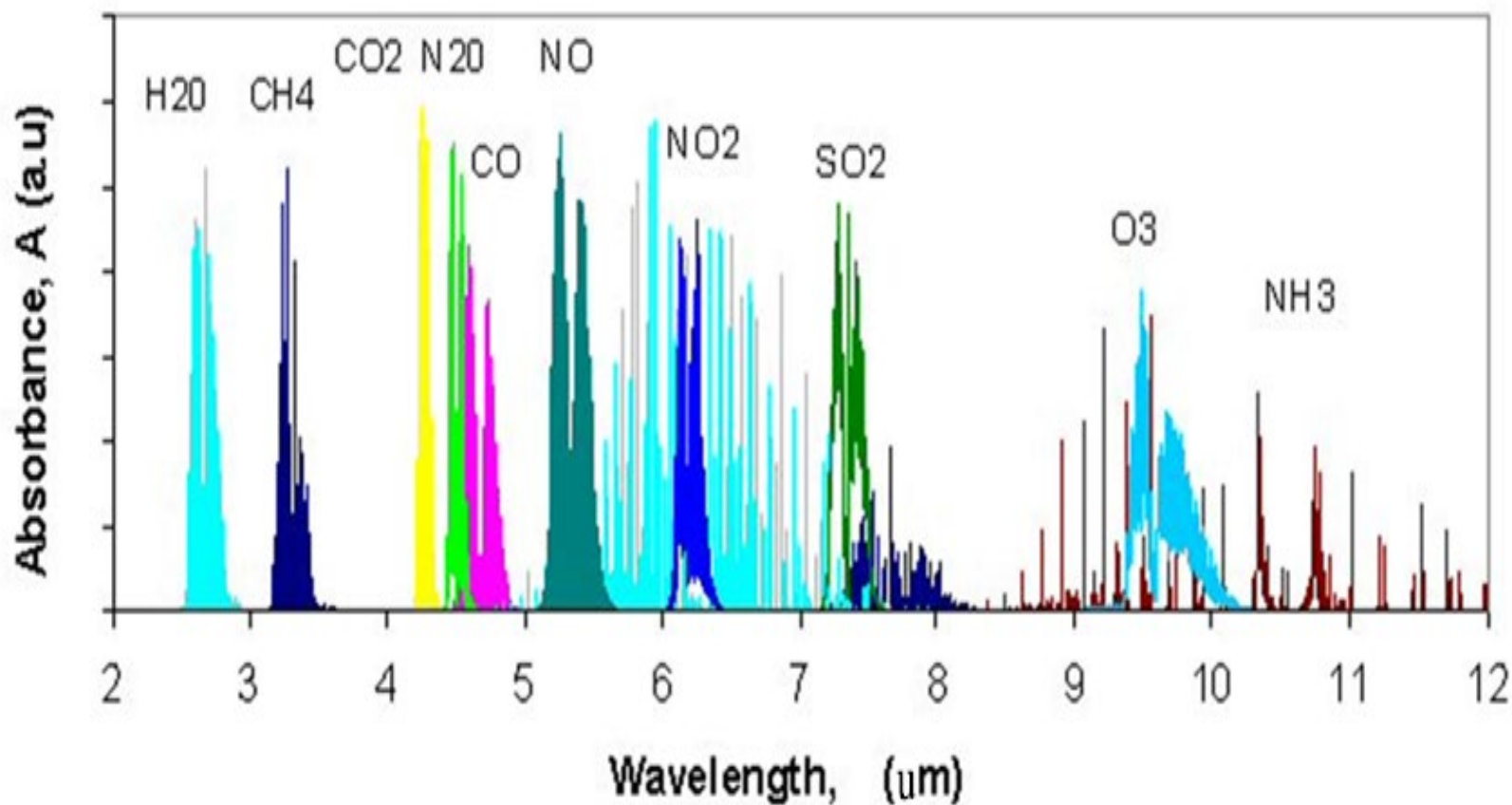
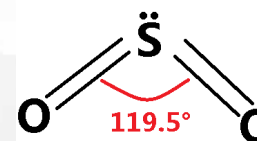
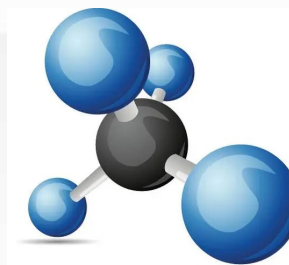


1488 : 苯环C=C伸缩振动峰

1291 : PANI链中二级胺的C-N键

1240 : 双极子结构中的C-N键伸缩峰

小分子气体红外吸收峰



红外吸收原理

当某物质受到红外光束照射时，该物质的分子就要吸收一部分光能量并将其转换为另一种能量。在吸收过程中，分子的振动频率与分子的特性有关，辐射只是在这些频率**对应的波长**处被吸收。利用这一点可以测量物质对红外辐射的吸收。

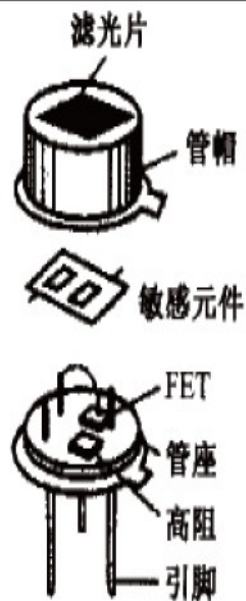
当红外辐射通过被测气体时，其分子吸收光能量：吸收关系遵循**朗伯-比尔**(Lamber-Beer)定律，如果气体吸收谱线在入射光谱范围内，那么光通过气体以后，在相应谱线处会发生光强的衰减。

朗伯-比尔定律描述物质对某一波长光吸收的强弱与吸光物质的浓度及其层厚间的关系。

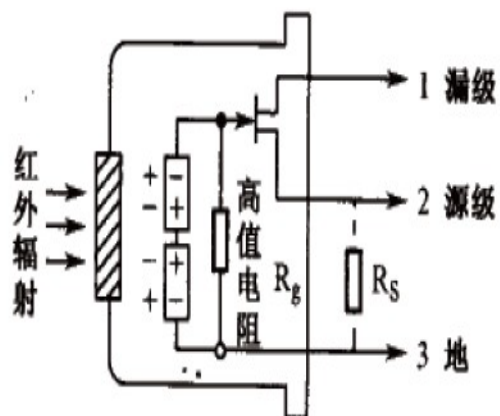
$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-k(\lambda)LC}$$

I_0 为光源发出的初始光强， I 经过 L 距离传输后的光强， k 为气体的吸系数， c 为气体的浓度。由上式可得：

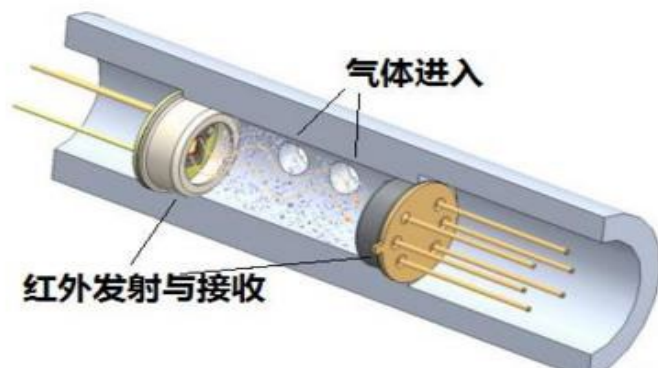
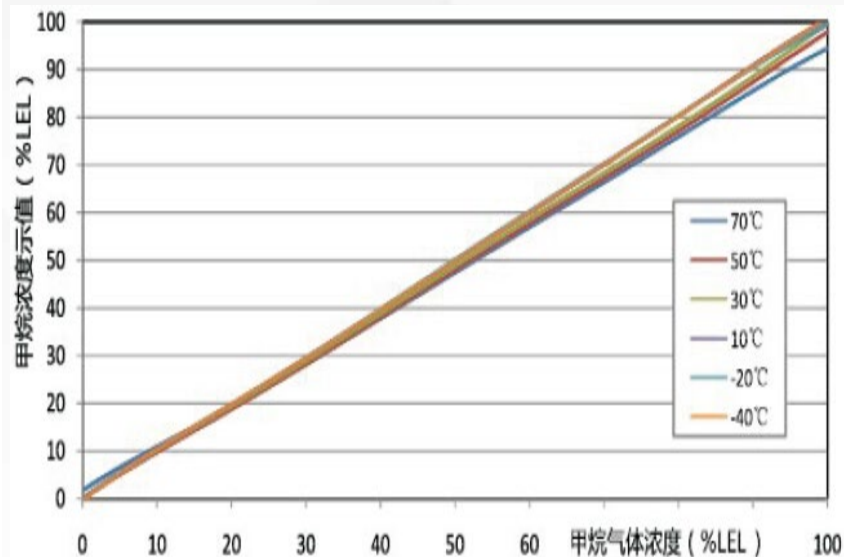
$$C = \frac{\ln[I_0 / I]}{LK}$$



(a) 结构图



(b) 电路图

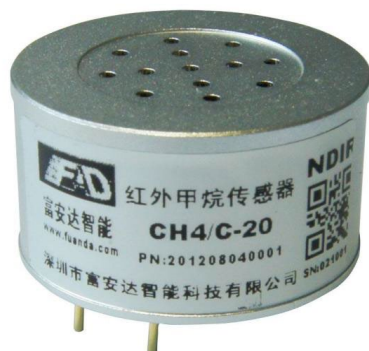




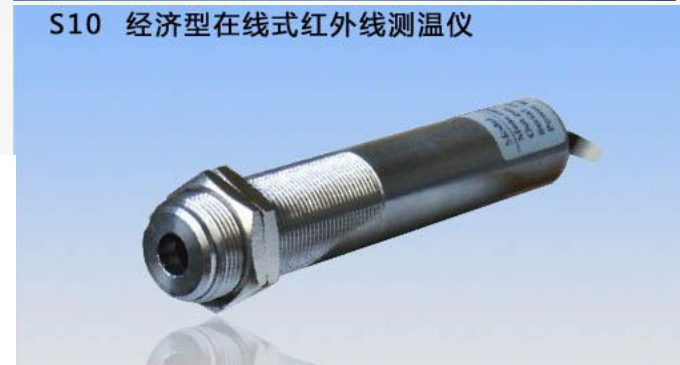
香港商运达科技有限公司



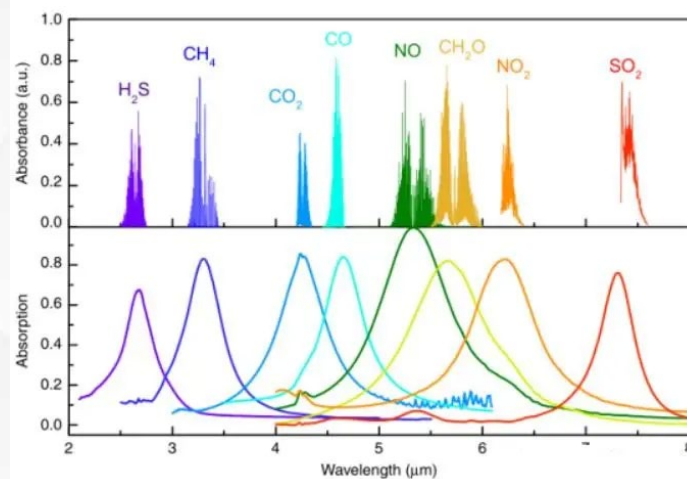
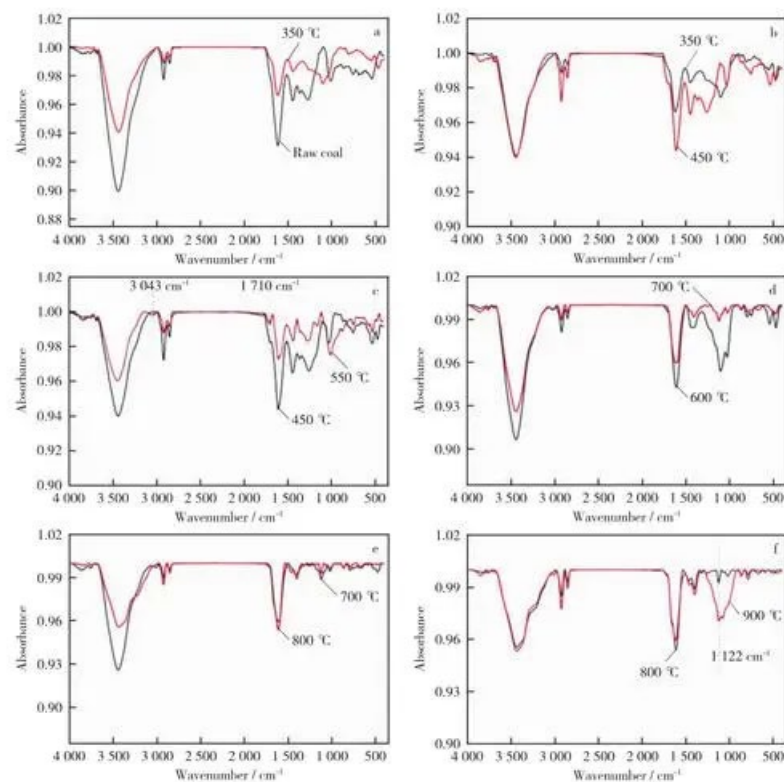
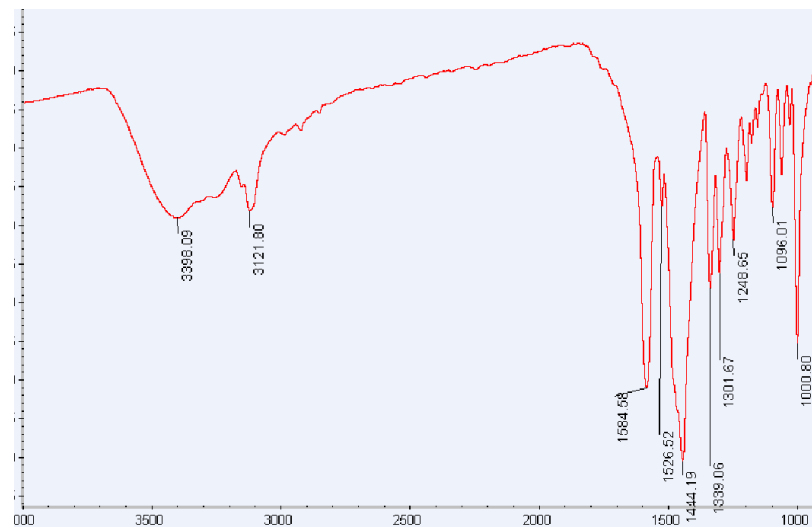
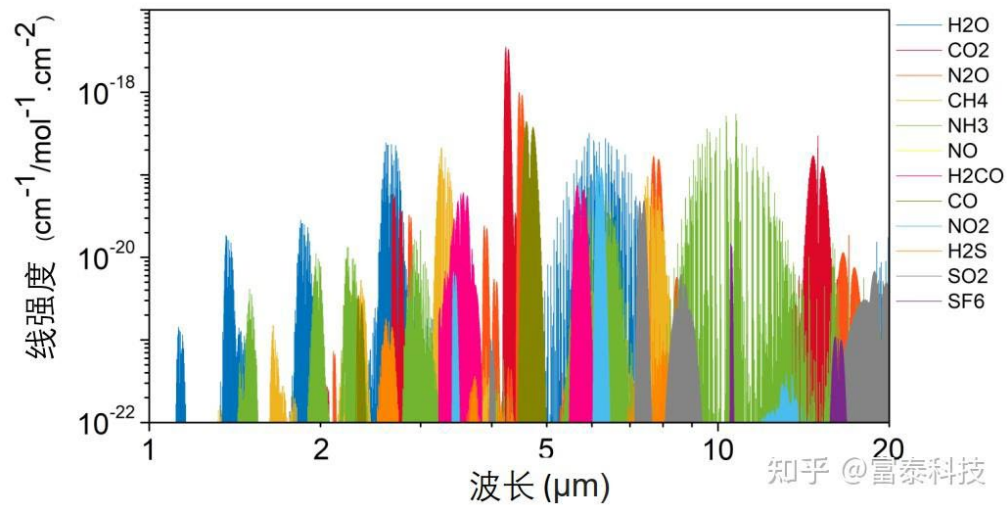
S10 经济型在线式红外线测温仪

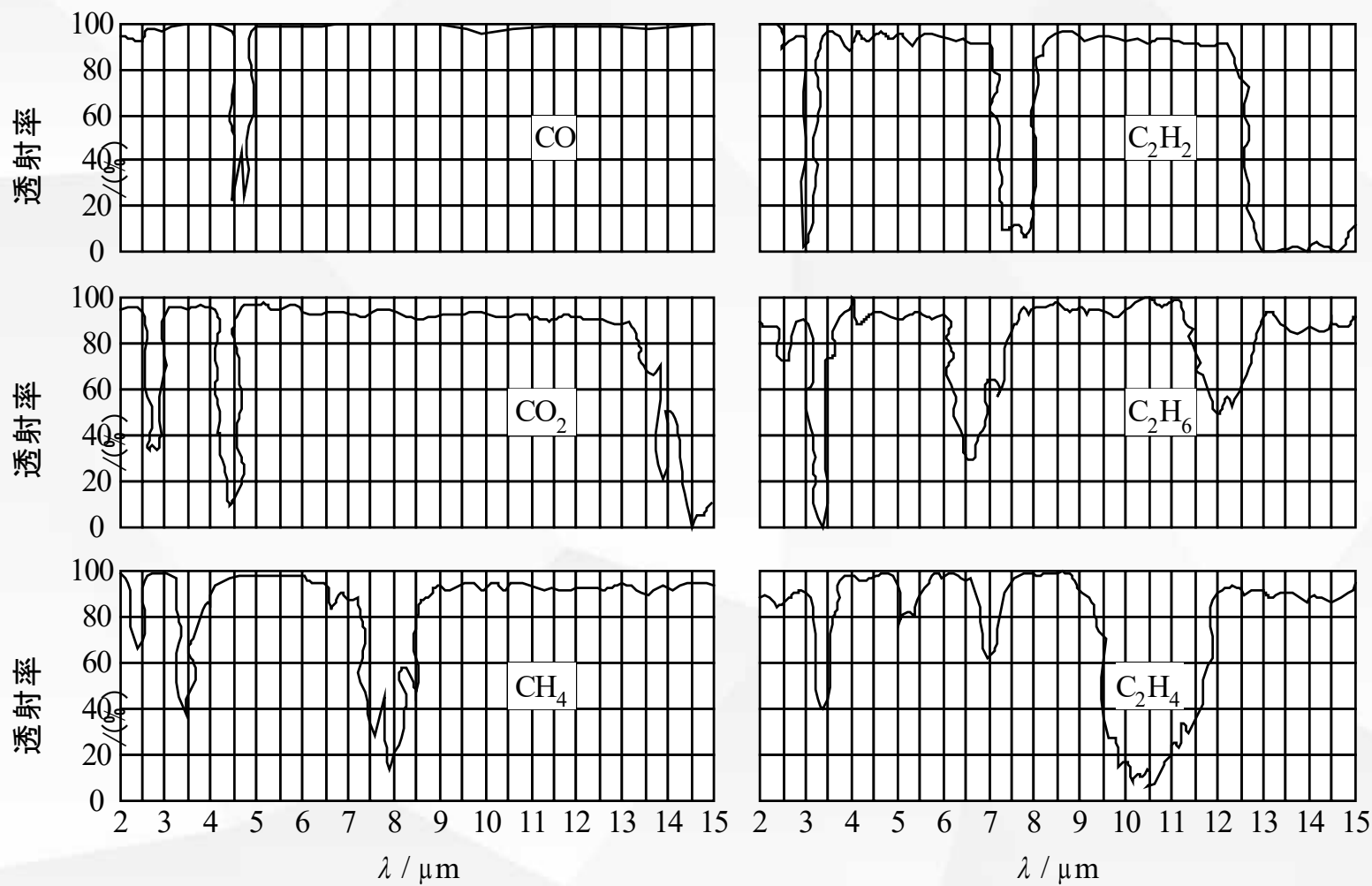


北京科思理仪器有限公司



CH_4 、 CO 、 H_2 、 SO_2 、 NO 、 CO_2 , 在红外波段均有特征吸收峰, 所以具有红外活性的分子可以通过其吸收光谱来辨别, 即所谓的指纹区。在**2~14.5um**的红外吸收光谱范围内。物质对红外辐射的吸收是有选择性的。





几种气体对红外线的吸收光谱

几种气体分子的特征吸收波长

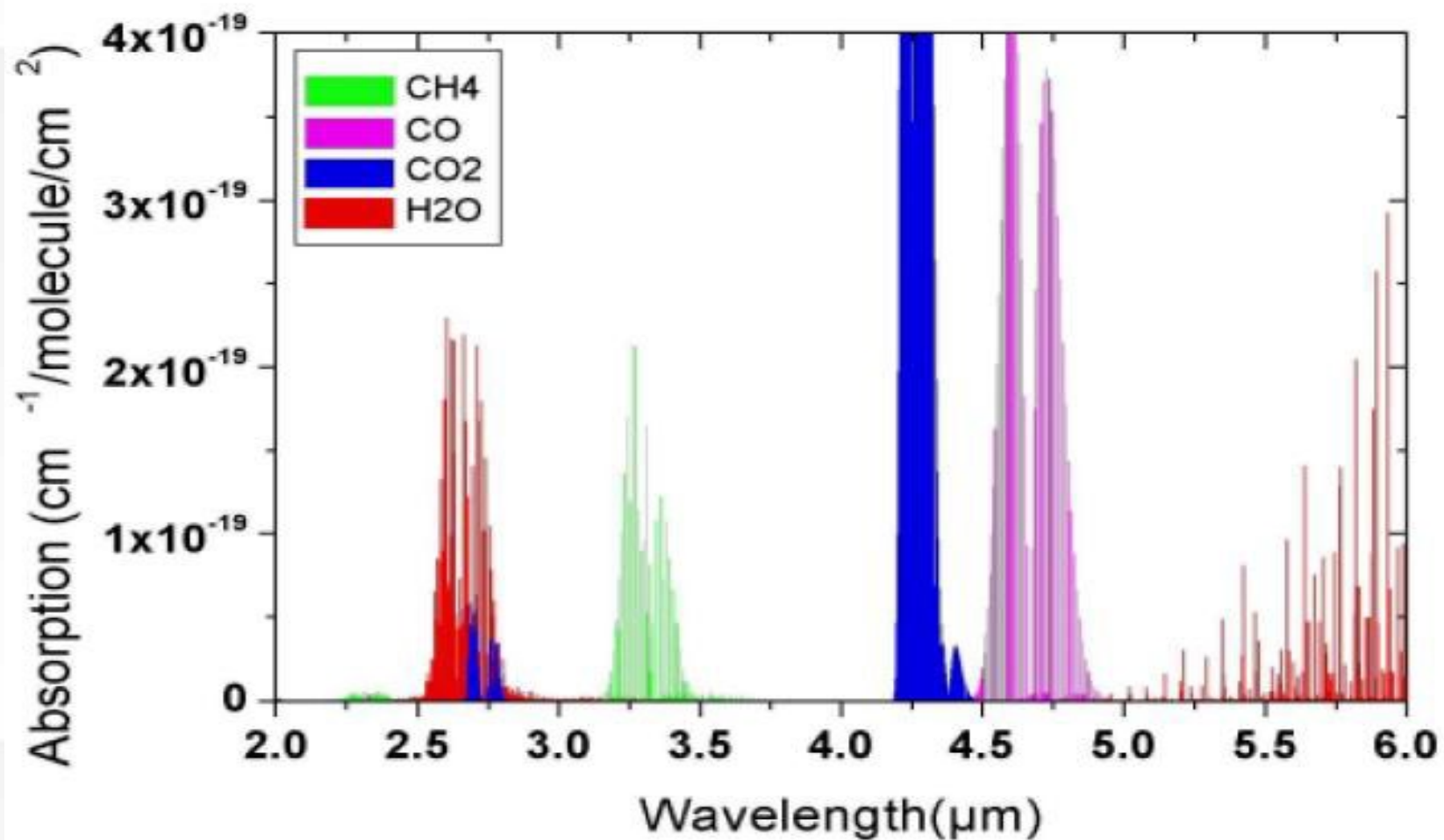
• 分子式	吸收峰波长 μm			
• CO	2.37	4.65		
• CO ₂	2.7	4.26	14.5	
• CH ₄	3.3	7.65		
• C ₂ H ₄	3.45	5.3	7	10.5
• NH ₃	10.4			
• NO	5.2			
• SO ₂	7.3			
• H ₂ O	2.0	2.8		

红外吸收光谱

CH₄: 3.3 μ m

CO₂:

4.26 μ m

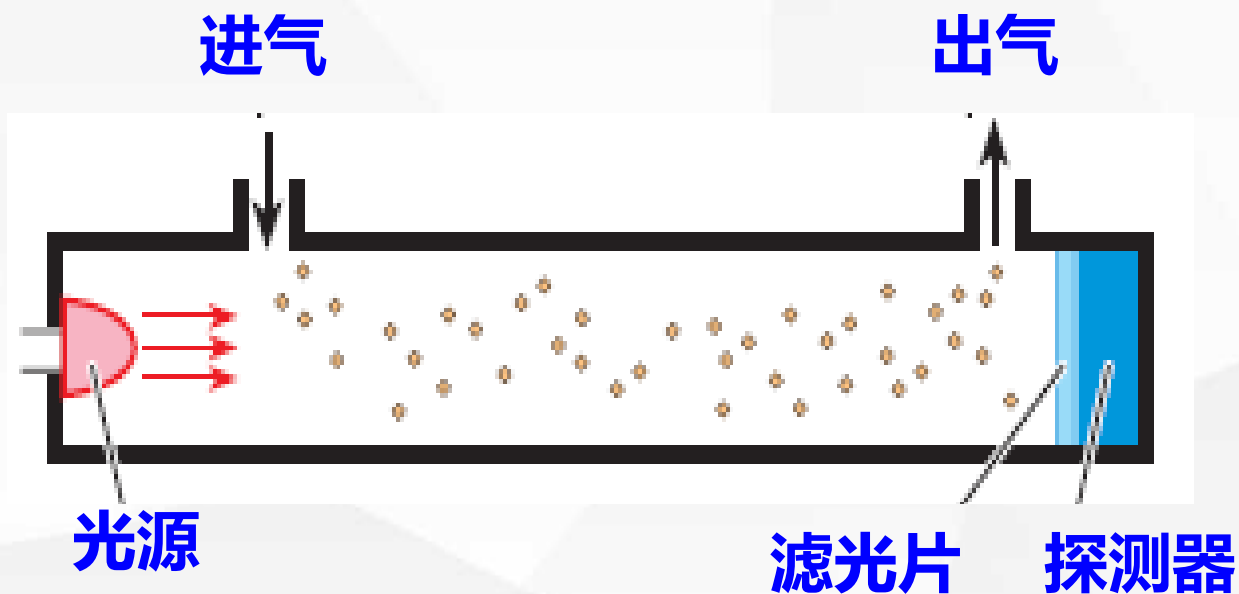


二氧化碳气体分析仪，是利用二氧化碳气体对波长为 $4.26\mu\text{m}$ 的红外辐射有强烈的吸收特性而进行测量分析的，主要用来测量、分析二氧化碳气体的浓度。

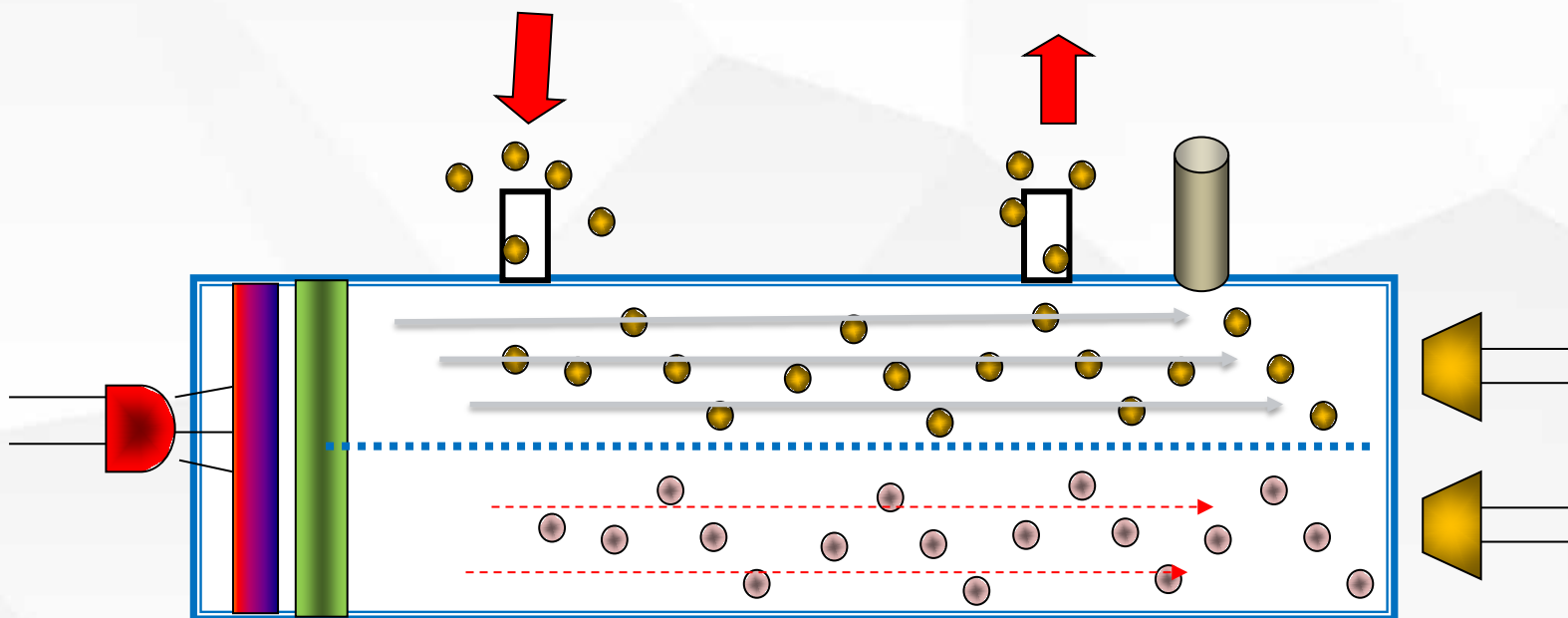
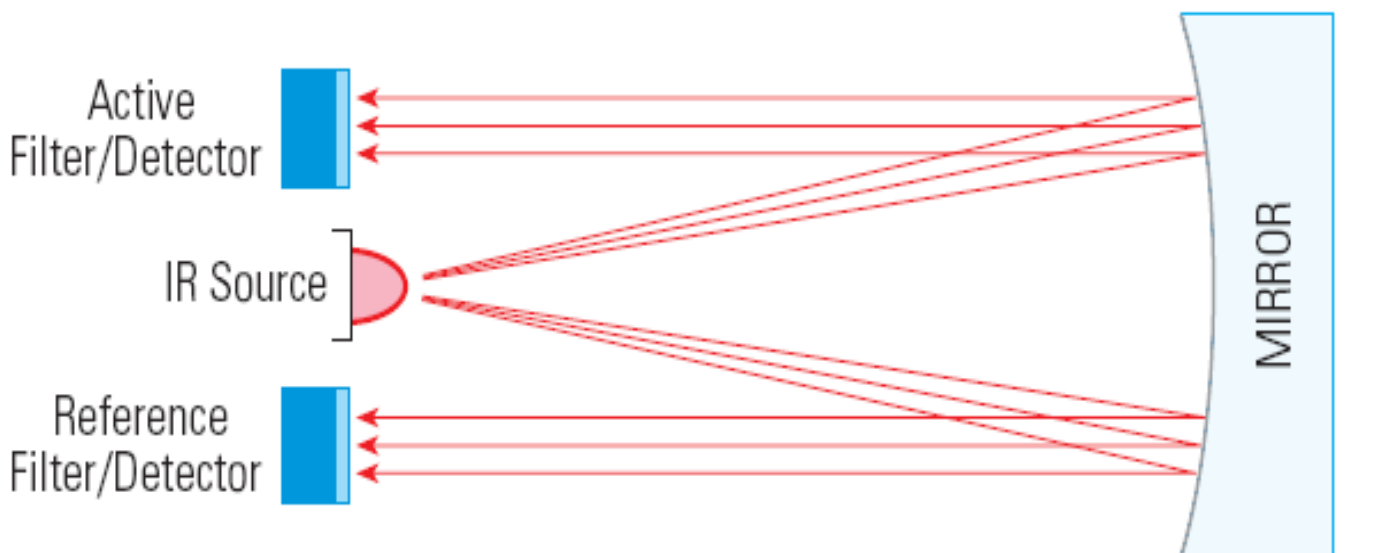
甲烷气体分析仪，是利用甲烷气体对波长为 $3.3\mu\text{m}$ 的红外辐射有强烈的吸收特性而进行测量分析的，主要用来测量、分析甲烷气体的浓度。

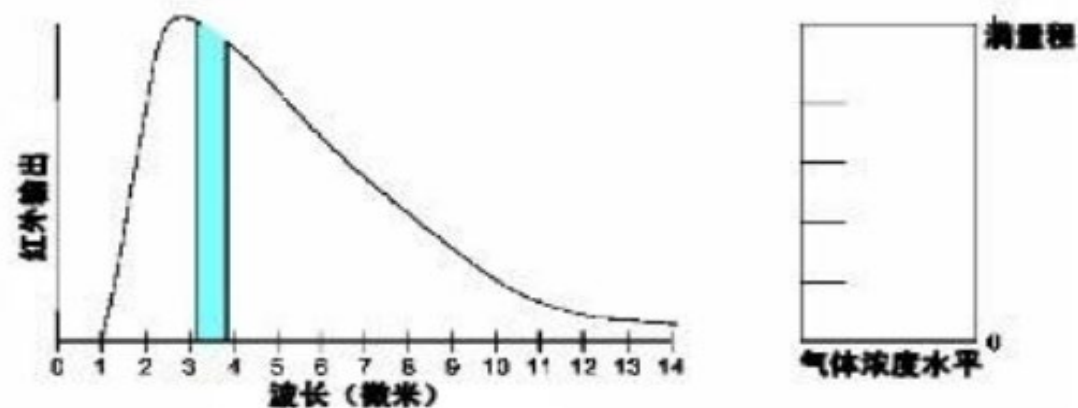
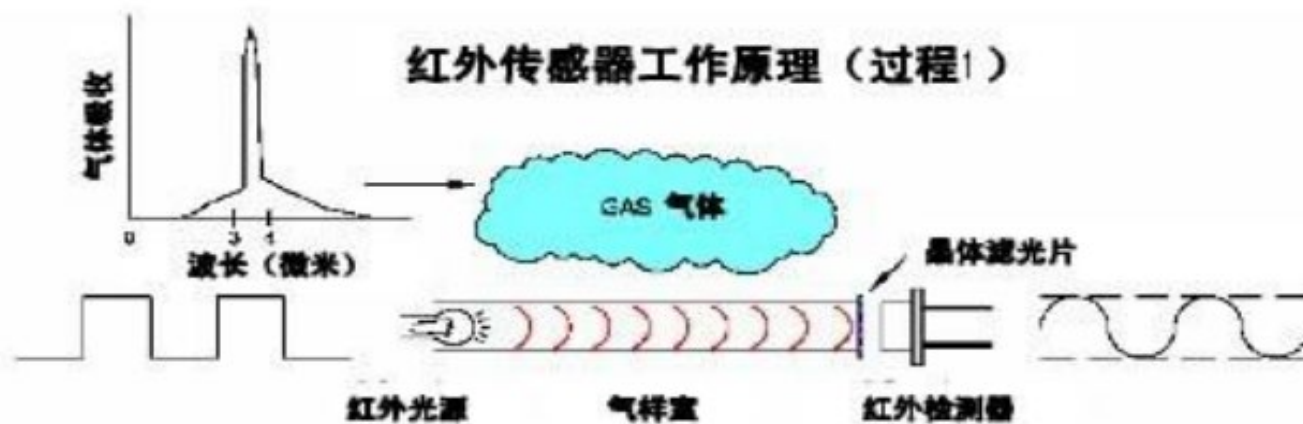
单光路测量原理

- ★ 气体分子对某一特定波长的红外辐射具有强吸收
- ★ 检测光强变化量，判定气体的浓度

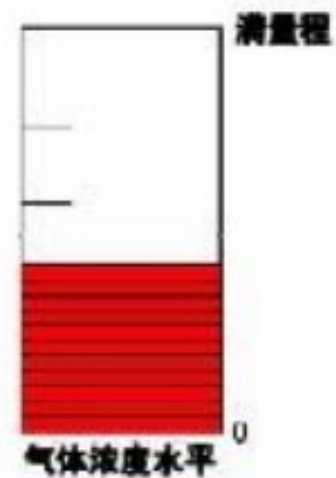
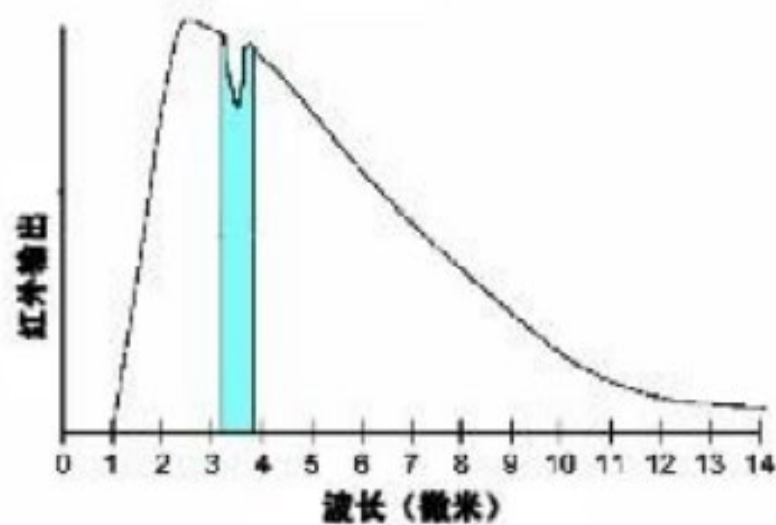
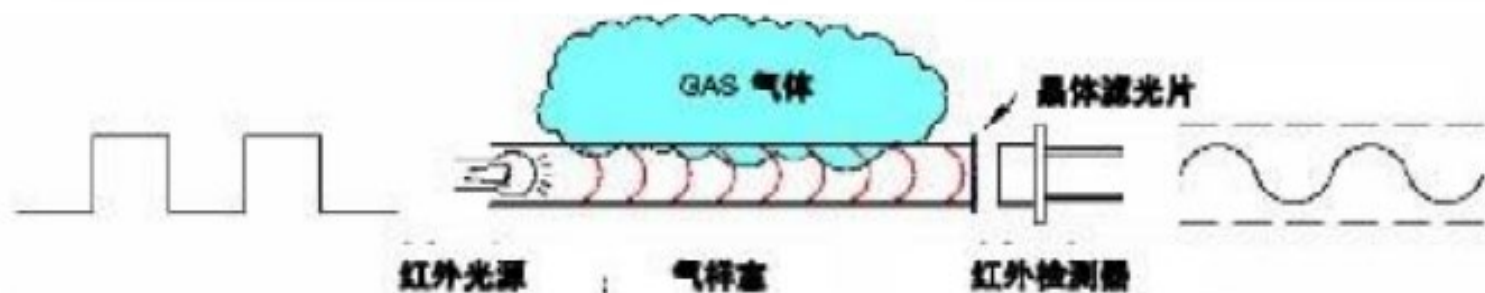


双光路测量原理

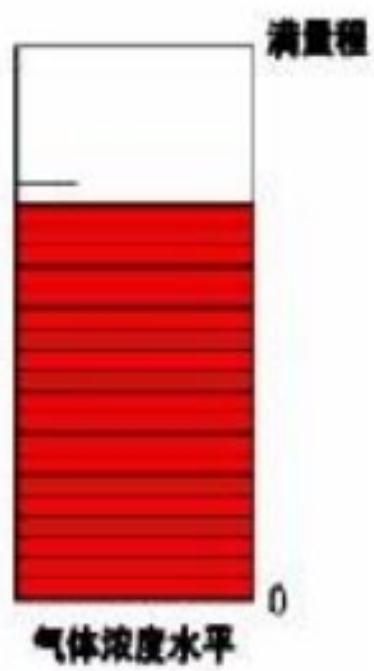
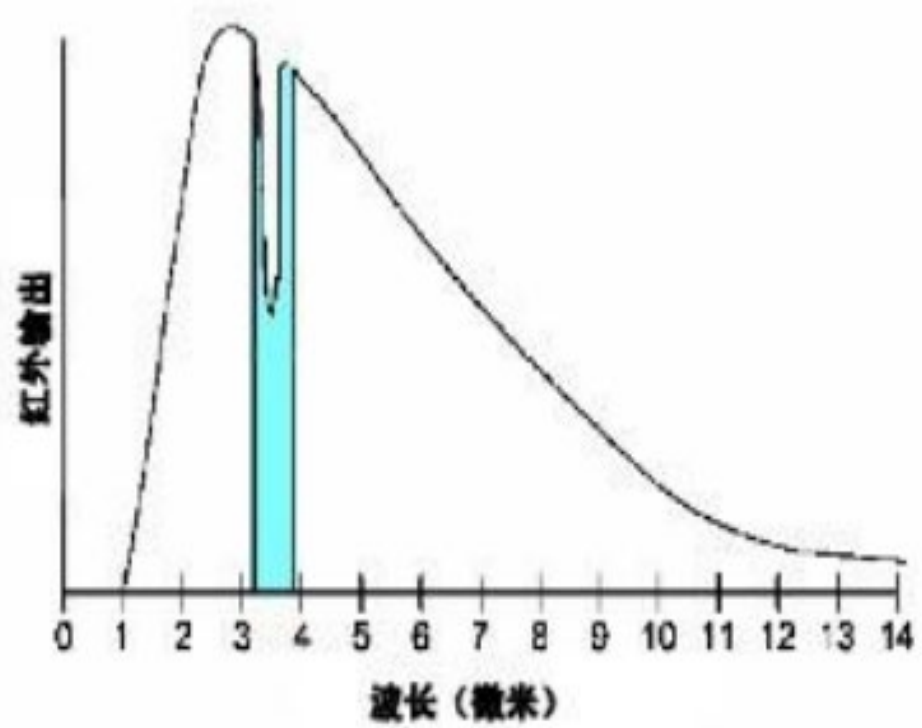




红外传感器工作原理（过程2）



红外传感器工作原理（过程3）



红外辐射光源

①辐射的光谱成分要稳定。

②辐射能量应大部分集中在待分析组分特征吸收波段范围内，以便增加待测组分能够吸收的能量，提高测量灵敏度。

③通过各气室的红外线，应平行于气室的中心轴，否则气室内红外线经过多次反射，容易造成测量误差。

反光镜

为了增强通过气室的光强，可用一反射镜，反射镜要求表面不易氧化，反射效率高。除单光源采用平面反射镜外，双光源用抛物面反射镜最好，容易得到平行光。

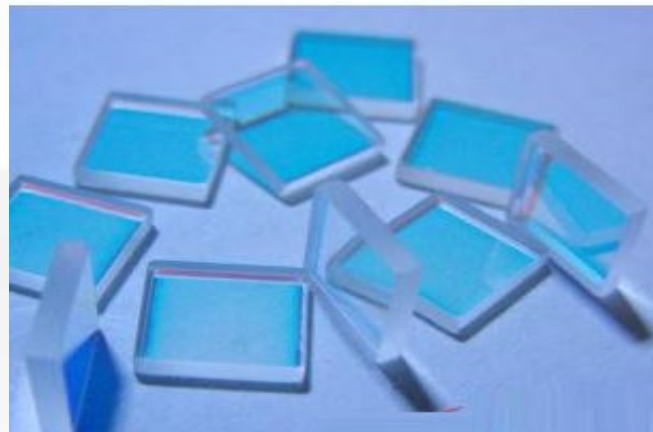
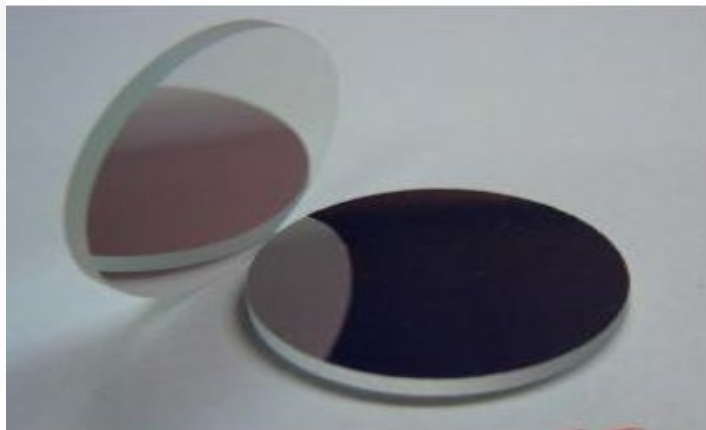
反射面常做成球形或圆柱形。反射镜一般采用黄铜镀金、铜或钢镀铬，或铝合金抛光制成。

滤光元件

滤光片是一种光学滤波元件。滤光片可以改变射到测量气室的辐射通量和光谱成分，可消除或减少散射辐射或干扰组分吸收辐射能的影响，可以具有特征吸收波长的红外辐射。

滤光片是基于各种光学现象-吸收、干涉、偏振、选择性反射等而工作的。

- 位置：光学滤光片位于气室和红外检测器之间。
- 功能：通过安装滤光片，去掉干扰部分的光谱。根据应用要求，滤光片只允许一定波长范围的光通过。



光学气室

气室的结构一般是圆桶形，两端都用晶片密封。结构特点是内壁光洁，不吸收红外线，不吸附气体，化学性能特别稳定。因此气室材料选用黄铜镀金、玻璃镀金或铝合金。气室内壁的表面粗糙度对仪器的灵敏度影响很大，为了减少反射，还要求气室的轴线与红外线平行。

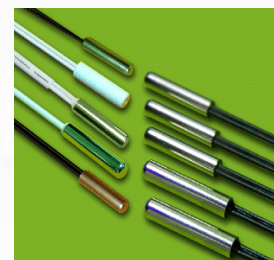
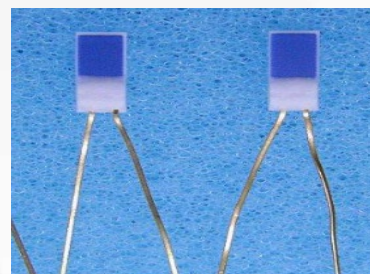
气 室



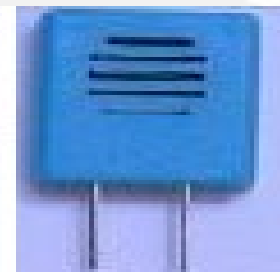
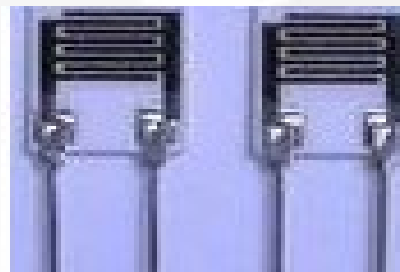
气压



温度



湿度

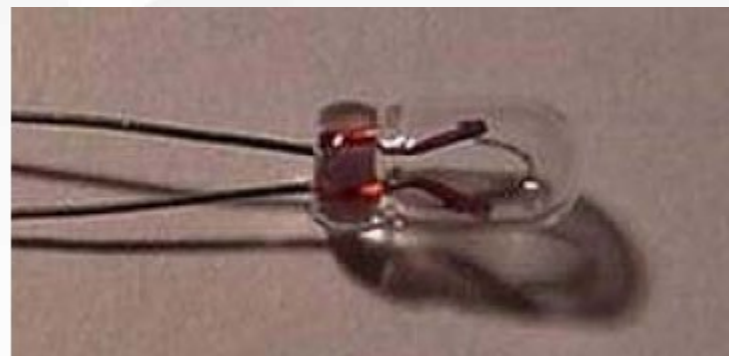
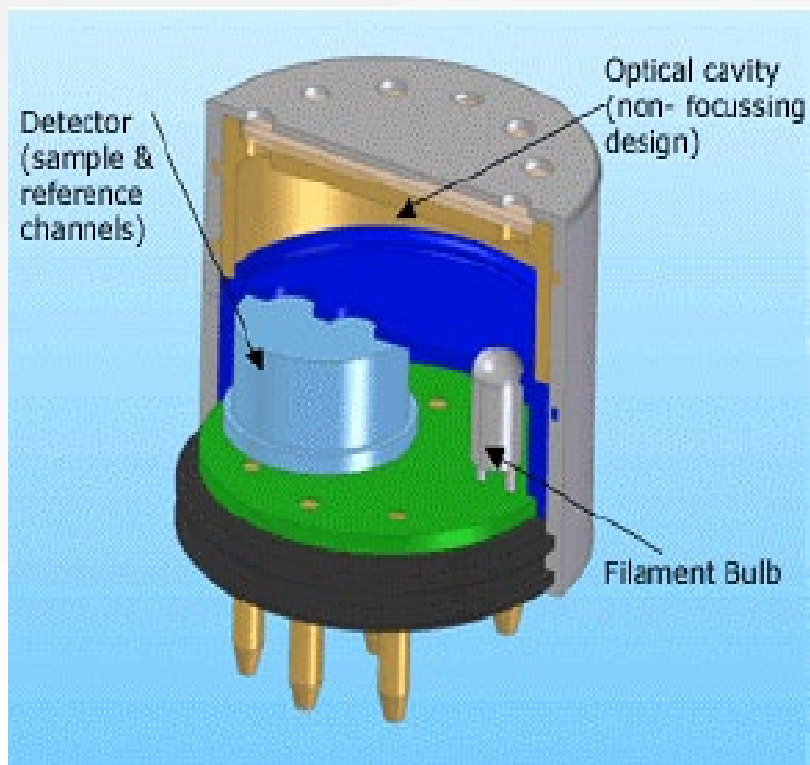


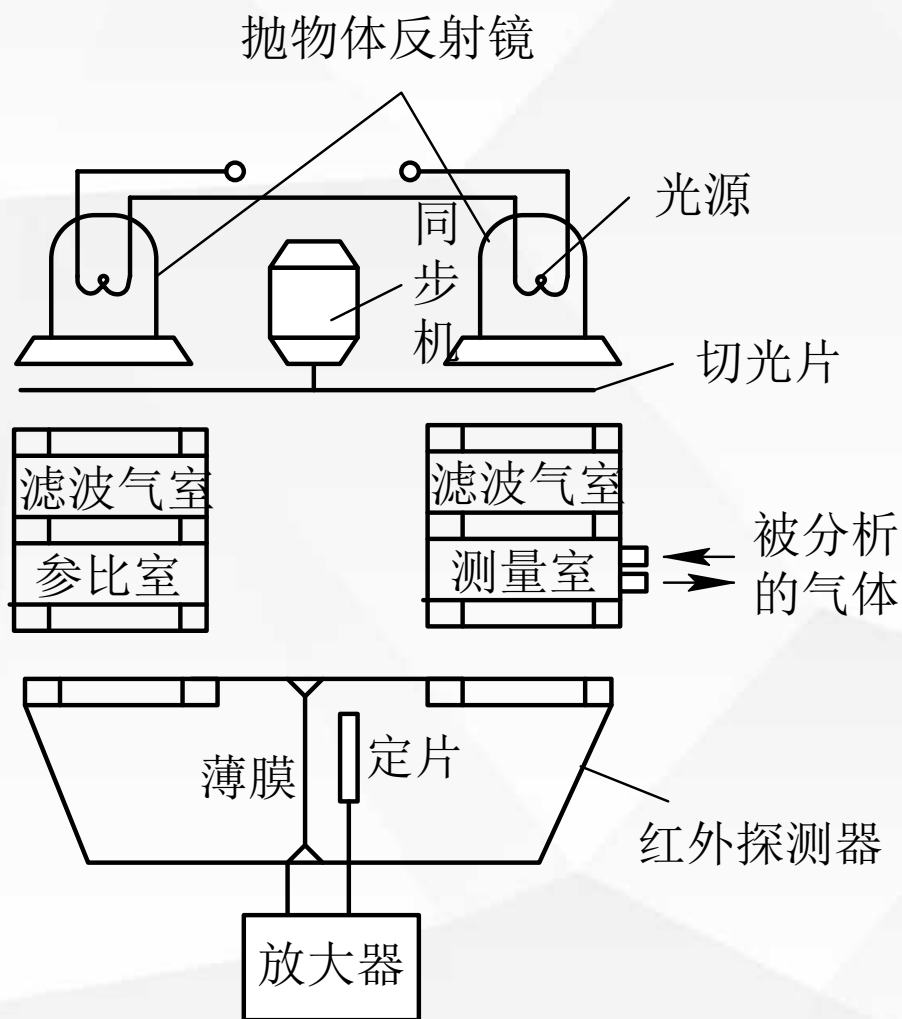
红外甲烷气体传感器性能指标

检测量程	0~5%vol, 0~100% vol
检测精度	(0.00~5.00)%vol ≤±0.06%vol
工作温度	-40℃~70℃
工作湿度	0~95%RH(非凝结)
防爆等级	Exia II C T4 Ga
产品尺寸	Φ20*19/Φ20*16.6(mm)(不含插针)

另外两种结构

卤素灯





如CO气体和CO₂在4~5 μm波段内红外吸收光谱有部分重叠，则CO₂的存在对分析CO气体带来影响，这种影响称为干扰。为此在测量边和参比边各设置了一个封有干扰气体的滤波气室，它能将与CO₂气体对应的红外线吸收波段的能量全部吸收，因此左右两边吸收气室的红外能量之差只与被测气体（如CO）的浓度有关。

红外传感器特点

- 选择性好(高度针对性)
- 不易受有害气体的影响而中毒、老化
- 响应速度快、稳定性好
- 防爆性好
- 信噪比高，使用寿命长、测量精度高

红外传感器应用

按功能分类：

辐射计：用于辐射和光谱测量；

搜索和跟踪系统：用于搜索和跟踪红外目标，确定其空间位置并对它的运动进行跟踪；

热成像系统：可产生整个目标的红外辐射的分布图像；

红外测距和通信系统；

混合系统：以各类系统中两个或多个的组合。

能源、资源已
成为当今世界
尤其是我国可
持续发展战略



煤矿瓦斯涌出爆炸



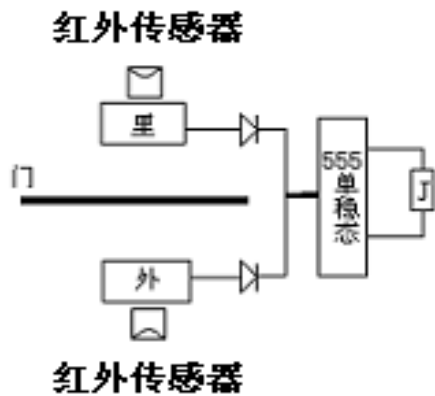
煤矿安全生
产是我国我
省面临的重大
问题





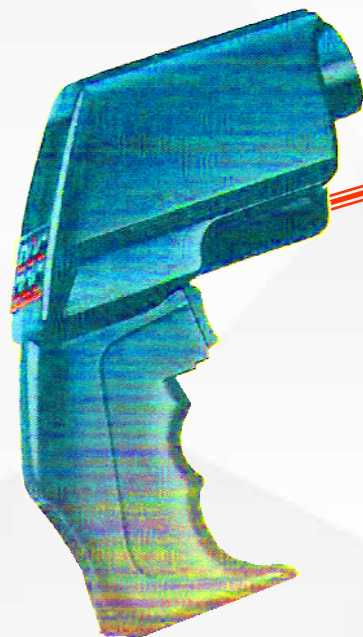
自动感应灯

(参考施特朗公司资料)



红外线辐射温度计外形

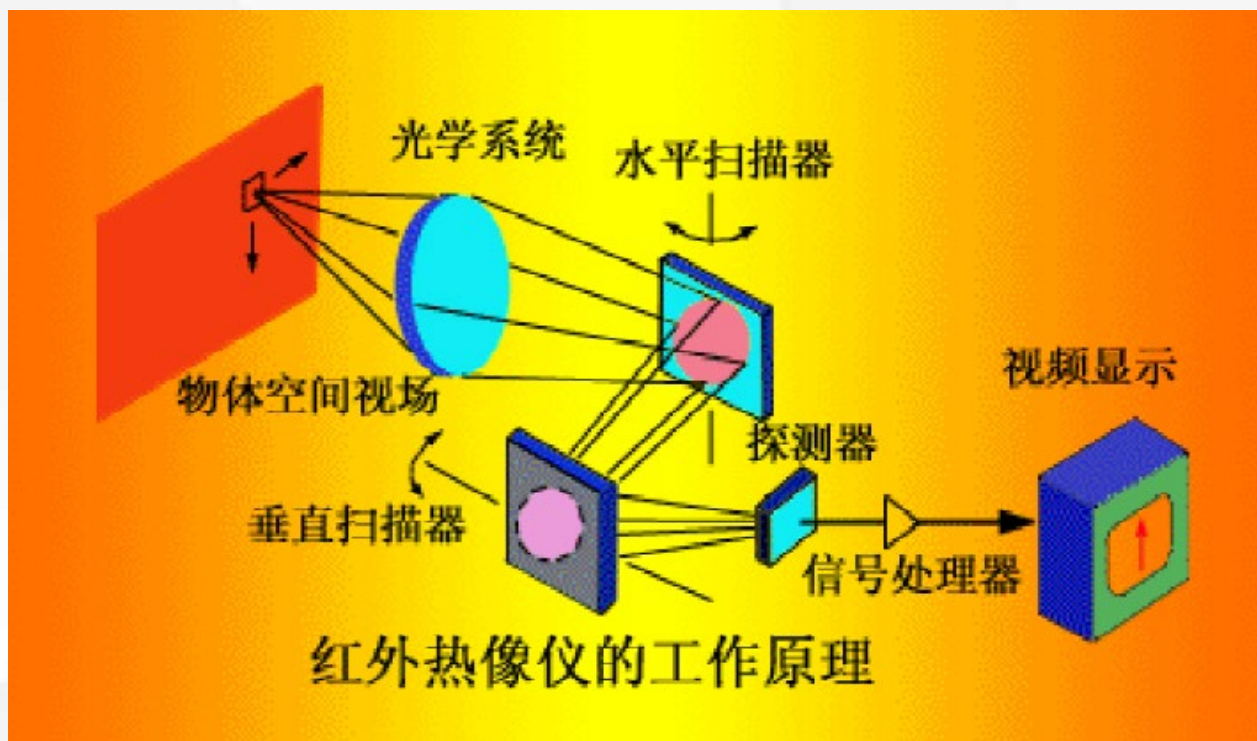
激光仅用于
瞄准

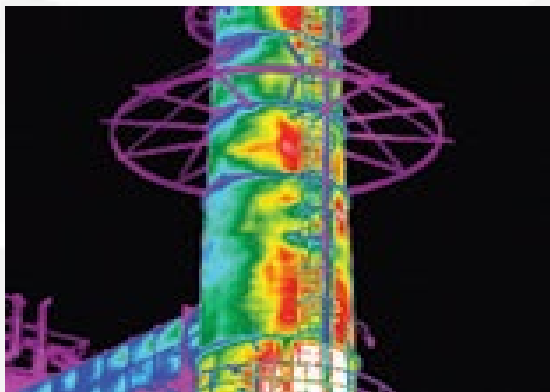


军事目标识别

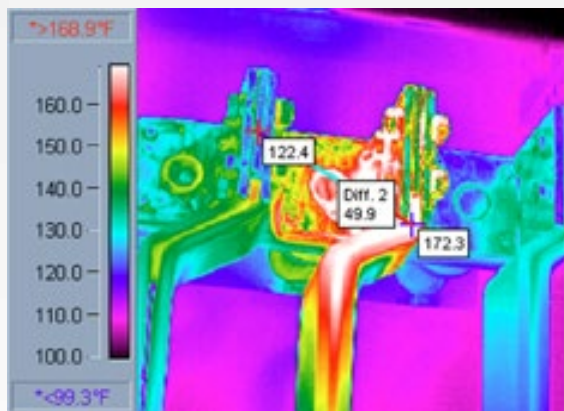


红外热像仪将红外辐射转换成可见光进行显示，利用物体自身的红外辐射来摄取物体热辐射图像。它能够通过快速扫描，精确的摄取反映被测物体温差信息的热图像。

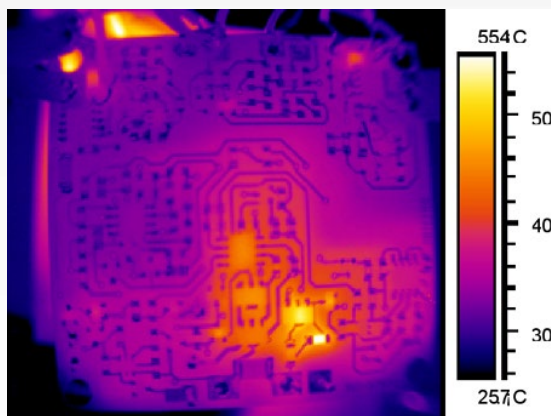




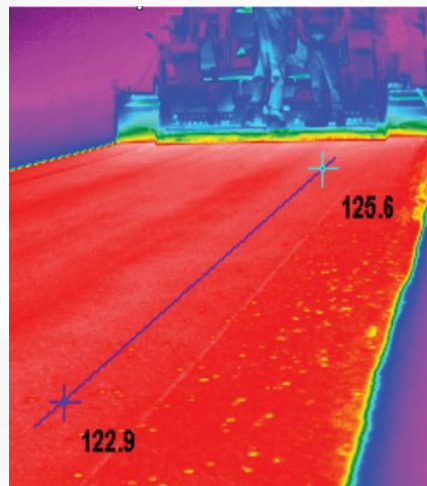
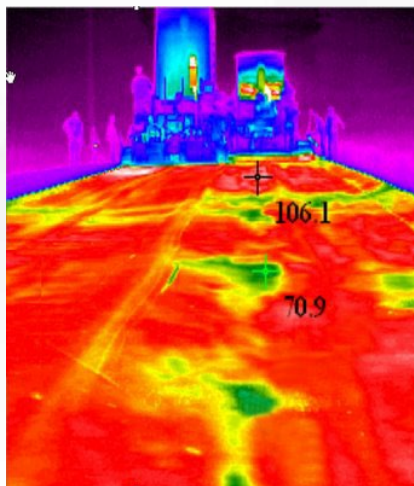
耐火材料设备检测



总线节点发热检测

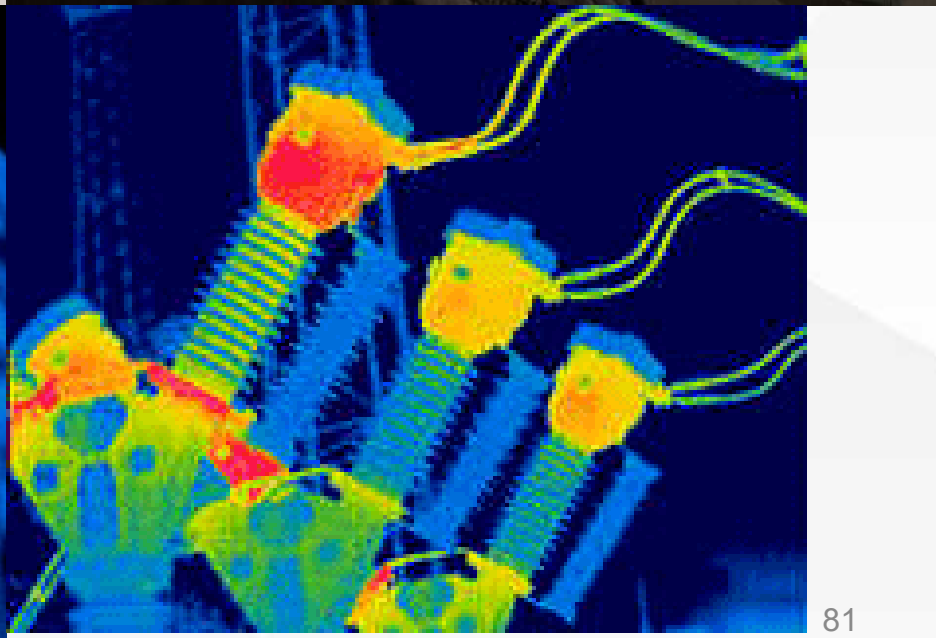
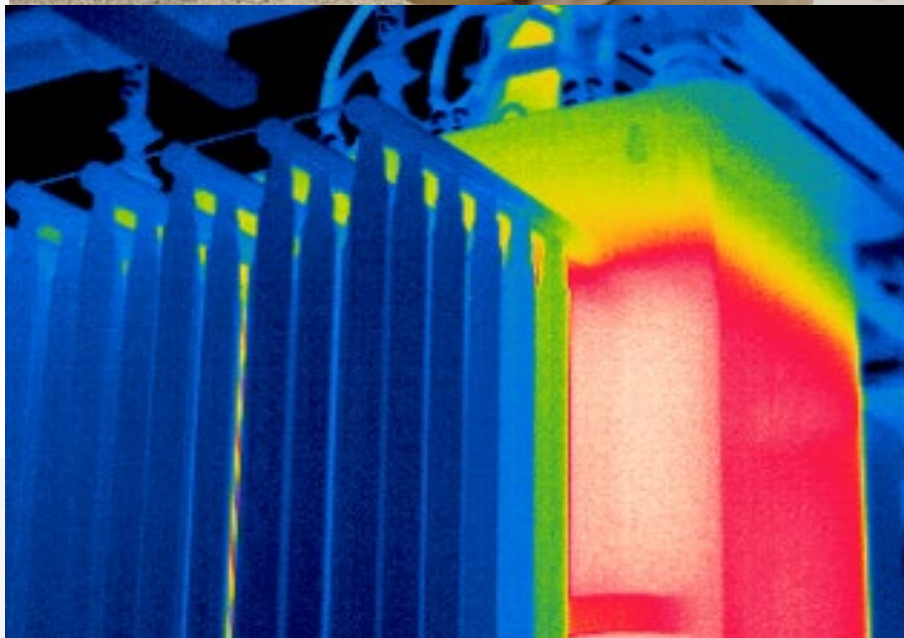


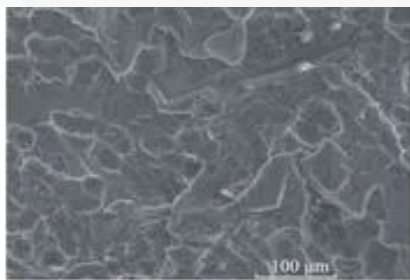
电脑主板发热量分布



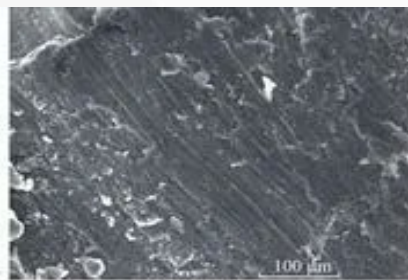
沥青铺路温度分布

热成像仪的使用

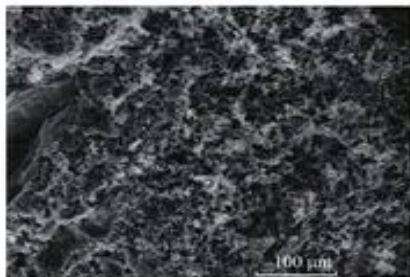




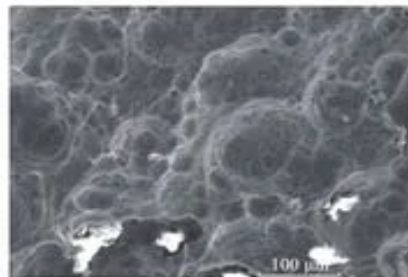
(a) 阳极板(0 h)



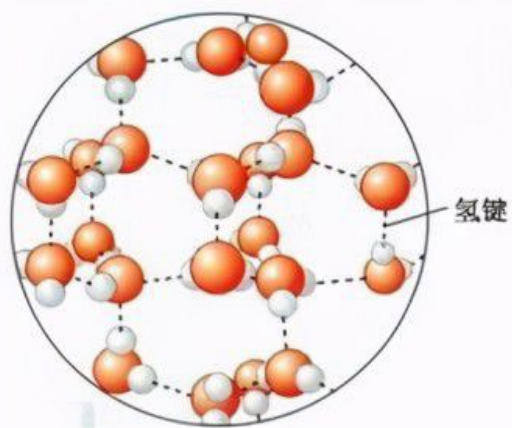
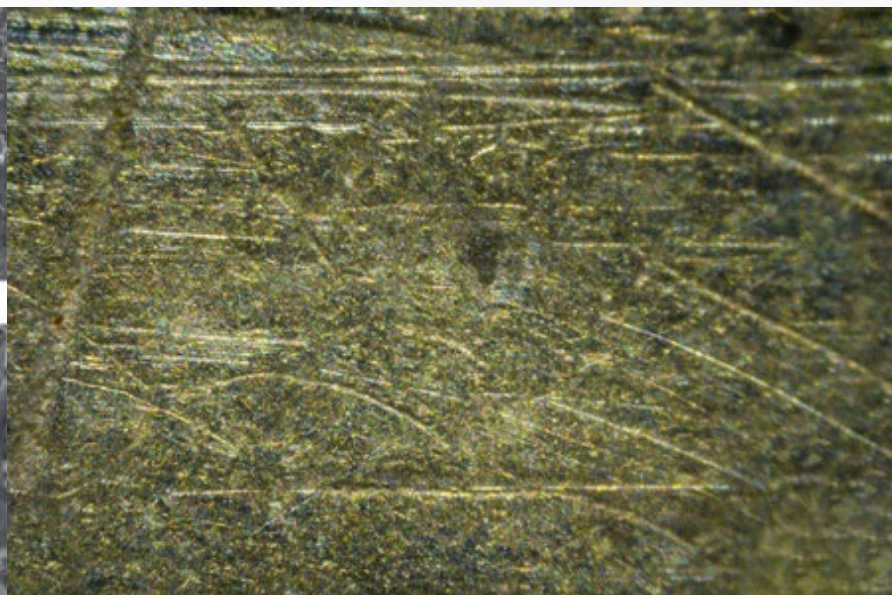
(b) 阳极板(4 h)



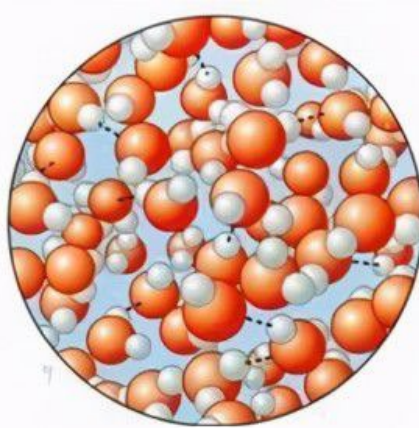
(c) 阳极板(20 h)



(d) 阳极倒极后(20 h)



冰



液态水

