

红外图像处理技术之红外焦平面阵列探测

航空航天学院
陆哲明/郑阳明

内容

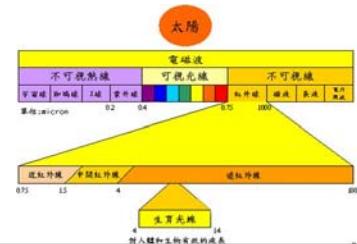
- 7.1 红外焦平面阵列器件
- 7.2 非制冷焦平面阵列探测
- 7.3 微测辐射热计的偏置效应和噪声
- 7.4 典型的非制冷红外焦平面阵列

7.1 红外焦平面阵列器件

- 7.1.1 红外辐射
- 7.1.2 红外探测器的发展历程和技术分类
- 7.1.3 红外焦平面阵列（IRFPA）器件

7.1.1 红外辐射

- 红外辐射是指波长在 **0.75um 至 1000um**，介于可见光波段与微波波段之间的电磁辐射。红外辐射的存在是由天文学家 **赫胥尔** 在 **1800年** 进行棱镜试验时首次发现。



- 红外辐射具有以下特点及应用：
- 所有温度在 **热力学绝对零度以上的物体** 都自身发射电磁辐射，而一般自然界物体的温度所对应的 **辐射峰值都在红外波段**。因此，利用红外热像观察物体 **无需外界光源**，相比可见光具有 **更好的穿透烟雾** 的能力。红外热像是对可见光图像的重要补充手段，广泛用于红外制导、红外夜视、安防监控和视觉增强等领域。
- 根据 **普朗克定律**，物体的 **红外辐射强度与其热力学温度** 直接相关。通过检测物体的红外辐射可以进行 **非接触测温**，具有 **响应快、距离远、测温范围宽、对被测目标无干扰等** 优势。因此，红外测温特别是红外热像测温在预防性检测、制程控制和品质检测等方面具有 **广泛应用**。

在单位时间内，从温度为 T 的物体单位面积上，频率为 $\nu - \nu + d\nu$ 范围内所辐射的能量为：

$$M_0(\nu, T)d\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

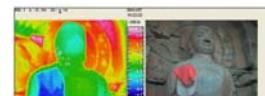
也可以表示为：

$$M_0(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda$$

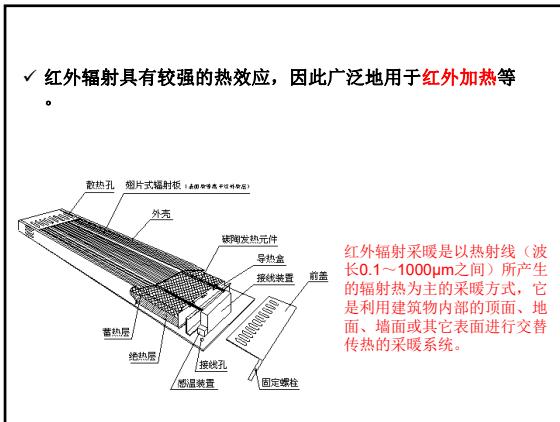
- 热是物体中分子、原子运动的宏观表现，温度是度量其运动剧烈程度的基本物理量之一。各种物理、化学现象中，往往都伴随热交换及温度变化。分子化学键的振动、转动能级对应红外辐射波段。因此，**通过检测物体对红外辐射的发射与吸收，可用于分析物质的状态、结构、状态和组分等**。

毛细水的迁移一直是危害文物保存的罪魁祸首，金川湾石窟为三阶教的刻经石窟，刻经的珍稀程度、数量之大应为现存的中国刻经石窟中最重要的石窟之一。由于年代久远，毛细水的侵蚀，经文风化脱落现象越来越严重，局部已经出现坍塌，探索毛细水的来源及分布情况对保护石窟意义重大。

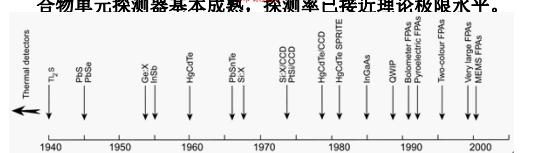
如果石窟不存在毛细水侵蚀，整个热图颜色是单一均匀的。图所示为金川湾石窟背部毛细水分布热图，图中红色区域为毛细水密集区，因照相时间为冬季，窟内温度在 **0°C** 以下，若体内部毛细水趋向凝结的过程，在凝结过程中释放一定的热量使其周围环境温度明显升高，显示在热图为温度高的红色区域。根据热图不同颜色区域可以区分毛细水活动频繁的区域。



金川湾石窟毛细水分布热像图(左侧为热图，右侧为可见光图)



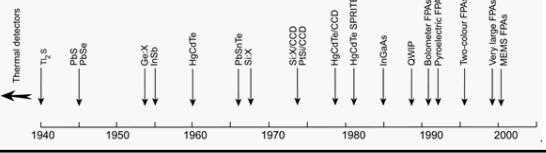
- ✓ 红外辐射具有较强的热效应，因此广泛地用于红外加热等



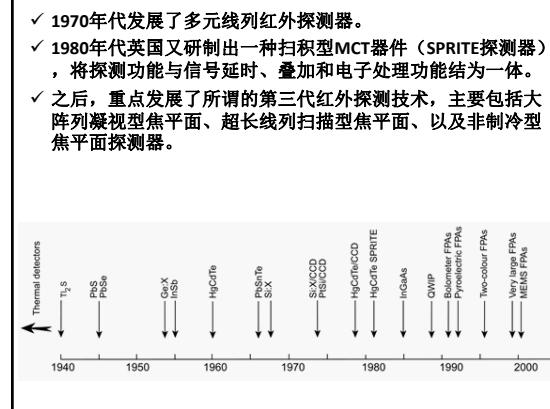
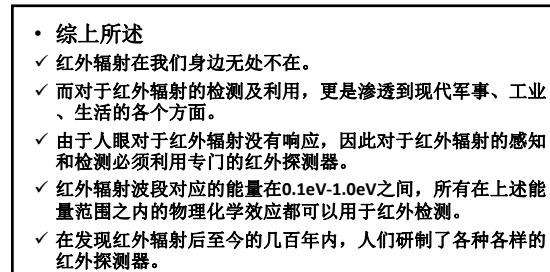
7.1.2 红外探测器的发展历程和技 术分类

• 发展历程 术分类

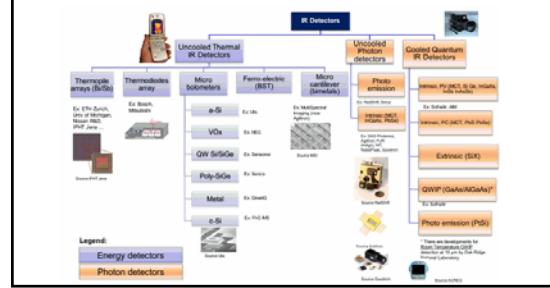
- ✓ 现代红外技术的发展，是从1940年代光子型红外探测器的出现开始。第一个实用的现代红外探测器是二战中德国研制的PbS探测器，后续又出现了PbSe、PbTe等铅盐探测器。
硫化铅
 - ✓ 在1950年代后期研制出InSb探测器，这些本征型探测器的响应波段局限于 $8\mu\text{m}$ 之内。为扩大波段范围，发展了多种掺杂非本征型器件，如Ge:Au、Ge:Hg等，响应波长拓展到 $150\mu\text{m}$ 以上。年代末，由HgCdTe（MCT）为代表的三元化合物单元探测器基本成熟，探测率已接近理论极限水平。
硒化镉



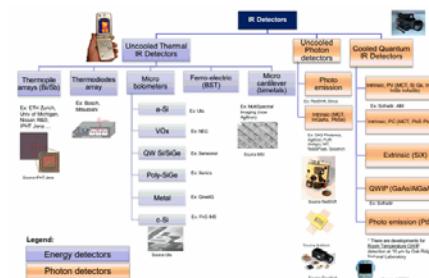
- ✓ 最近20年，3-5um波段的InSb和MCT焦平面探测器，8-12um波段的MCT焦平面探测器，以及8-14um波段的非制冷焦平面探测器成为主流技术。
 - ✓ 同时，也先后出现了量子阱探测器（QWIP），第二型超晶格探测器（T2SL），以及多色探测器，高工作温度（HOT）MCT探测器等新技术并逐渐走向实用化。
 - ✓ 特别是非制冷焦平面探测器技术，在体积、成本方面大幅改善，使得红外热像仪真正大规模走进工业和民用领域。



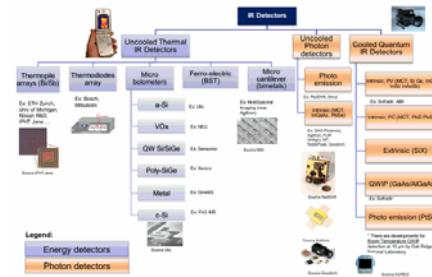
- **红外探测器的技术分类：**红外辐射波段对应的能量在 $0.1\text{eV}-1.0\text{eV}$ 之间，所有在上述能量范围之内的物理化学效应都可以用红外检测，因此人们研制和发展了多种不同类型的探测器。从不同的角度出发，红外探测器有多种不同的分类方法。下图总结了目前主要的红外探测器种类。



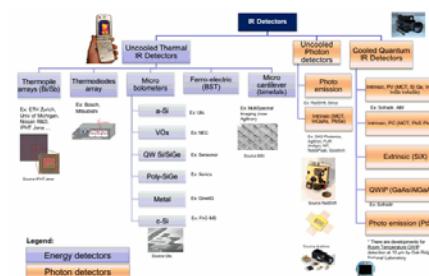
- ✓ (1) 按红外辐射与探测器的作用方式，主要分为光子型探测器和热探测器。光子型探测器包括光导型、光伏型、量子阱、超晶格等不同光子效应的探测器。热探测器包括热释电、热电堆、微测辐射热计等探测器。



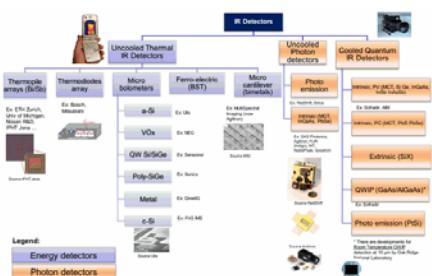
- ✓ (2) 按照工作温度，可以分为制冷型探测器和非制冷型探测器。一般的光子型探测器都需要工作在低温，因此都是制冷型。即使如1-3um波段的PBS探测器可以工作在室温，但降低其工作温度能够显著改善其性能。而热探测器一般工作在室温范围，降低工作温度对其性能改进不明显。



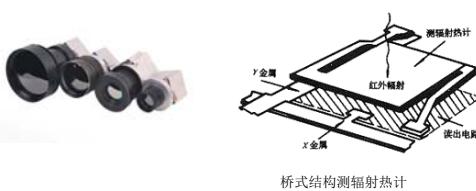
- ✓ (3) 按照敏感元的数量，可以分为单元探测器、线列探测器、以及焦平面探测器。单元探测器、线列探测器如果用于成像则必须配备光机扫描机制，而焦平面探测器可以实现凝视成像。



- ✓ (4) 按照响应波长，可以分为短波红外探测器（1-2.5um）、中波红外探测器（3-5um）、以及长波红外探测器（8-14um），主要是针对三个大气窗口而形成的体制。



- ✓ 以上的分类都是根据具体需求和应用，强调了探测器某一方面的特性，在实际中，一种探测器往往兼具上述的几个特征。例如，微测辐射热计（Microbolometer）红外探测器，可以同时归类为非制冷型探测器、长波探测器、焦平面阵列探测器和热探测器。在7.2中将重点介绍非制冷焦平面阵列红外探测器。



产品图片	产品名称/型号	产品简介及应用
SiGe	硅锗探测器 (SiGe) 探测器	硅锗探测器 (SiGeDetector) 探测器，分为光型式和光导型。光导型波长范围在 0.3um~5.5um 之间，不同类型的截止波长分别为 2.8um、3.5um 和 5.5um。光导型波长范围在 2um~26um 之间，不同类型的截止波长分别为 5um、12um、24um。
InGaAs	锑化铟 (InGaAs) 探测器	锑化铟 (InGaAs) 探测器为光型式，光谱范围 1um~3.5um，标准产品均采用液氮冷却。
PbSe	碲化铅 (PbSe) 探测器	碲化铅 (PbSe) 探测器为光型式，光谱探测范围为 2um~6um，主要应用于：气体检测、光化学测量、火焰光度计、湿度分析仪、医疗气体分析等。
PbS	碲化镉 (PbS) 探测器	碲化镉 (PbS) 探测器为光型式，光谱探测范围为 1um~3.5um，主要应用于：气体检测、光化学测量、火焰光度计、湿度分析仪、医疗气体分析等。
InAs	锑化砷 (InAs) 探测器	锑化砷 (InAs) 探测器提供不同级别的半导体制冷，覆盖波长范围为 1um~3.8um。锑化砷探测器还可提供优秀的光谱响应，适合在温度探测快速响应需求。
InGaAs	锑镓砷 (InGaAs) 探测器	锑镓砷 (InGaAs) 探测器 工作在 0.8um~2.6um 的波长范围内，提供快速响应时间、一致性好、很好的灵敏度及长时间工作的稳定性。
Ge	锑红外探测器	锑红外探测器，覆盖光谱范围 800nm~1800nm，不同探测面积及制冷温度可选，包括非制冷、半导体制冷及液氮制冷。

7.1.3 红外焦平面阵列 (IRFPA)

• 概述 器件

- ✓ 将CCD技术引入红外波段所形成的新一代红外探测器，它是现代红外成像系统的关键器件。
- ✓ 广泛应用于红外成像、红外搜索与跟踪系统、导弹巡航器、空中监视和红外对抗等领域
- ✓ IRFPA建立在材料、探测器阵列、微电子、互连、封装等多项技术基础之上。



HAWAII-2RG 红外焦平面阵列



位于夏威夷的3.6米Canada-France-Hawaii望远镜利用WIRCam（宽场红外摄像机）对猎户座星云进行成像。WIRCam使用四个H2RG 短波（1~2.5μm）传感器组合，形成4096×4096像素的阵列（插图）。该图显示的大多数红色恒星都是直到红外摄像机出现后，才首次被人们观察到的。

• IRFPA器件的工作条件

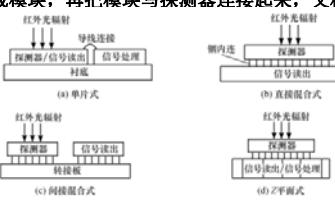
- ✓ IRFPA器件通常工作于1~3 μm、3~5 μm和8~12 μm的红外波段
- ✓ 多数探测300K背景中目标。
- ✓ 典型的红外成像条件是300K背景中温度变化为0.1K的目标。

各红外波段300K背景辐射的光子密度及其对比度

波长/μm	1-3	3-5	8-12
300K背景辐射光子通量密度/光子/cm ² ·s	$\approx 10^{12}$	$\approx 10^{16}$	$\approx 10^{17}$
光积分时间（饱和时间）/μs	10^6	10^{21}	
对比度（300K背景） (%)	≈10	≈3	≈1

• IRFPA器件的分类

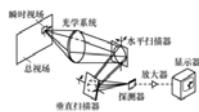
- ✓ 根据其结构、光学系统的扫描方式、焦平面上的制冷方式、读出电路方式或不同响应波段及所用材料进行分类。
- ✓ 按结构分：单片式和混合式
 - 单片式：整个IRFPA在同一块芯片上，又称整体式。
 - 混合式：把探测器与信号读出（用普通的Si-CCD）分开。
 - Z平面式：将信号读出与信号处理部分采用叠层的方法组装成模块，再把模块与探测器连接起来，又称立体式。



- ✓ 随波长增加，背景辐射的光子密度增加。通常光子密度高于 $10^{13}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 的背景称为高背景条件。因此3~5μm或8~12μm波段的室温背景为高背景条件。
- ✓ 随波长增加，辐射对比度减小。辐射对比度定义为：背景温度变化1K所引起光子通量变化与整个光子通量的比值。
- ✓ IRFPA器件要在高背景、低对比度条件下工作，给设计、制造带来了许多问题并提出了很高的要求，增加了研制的难度。

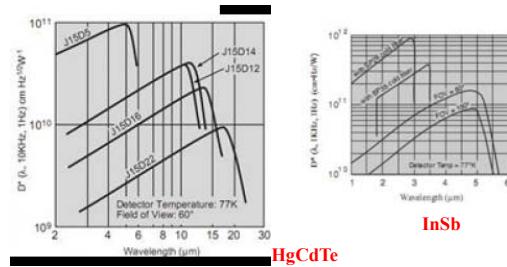
✓ 按扫描方式分：扫描型和凝视型；

- 光机扫描型：采用红外光学系统和机械扫描器依次对被测目标作二维空间的扫描，利用PbS、InSb或Ge、Hg等单元或多元素探测器接收瞬时视场内的目标光辐射信号，转换成一维时序电信号。电信号经过隔直流通路消除背景辐射、放大处理后，在显示器上输出对比度良好的目标热图，如图所示。
- 光机扫描型的特点及应用：结构复杂、要求高（如要求探测器的响应速度快）、体积较大、可靠性低、成本较高。应用在红外遥感、新一代坦克瞄准具等方面。
- 凝视型：利用红外焦平面阵列器件，把二维被测目标的红外辐射图像转换为电荷图像，再借助CCD自扫描技术，输出一维时序电信号，最后经电路处理，输出景物热图。



✓ 按读出电路分：CCD、MOSFET和CID等；

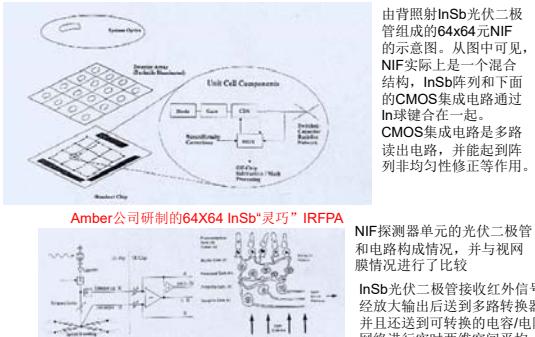
- ✓ 按制冷方式分：制冷型和非制冷型；
- ✓ 按响应波段与材料分：1~3 μm（材料为HgCdTe）、3~5 μm（材料为HgCdTe、InSb、PtSi）和8~12 μm（材料为HgCdTe）的波段。



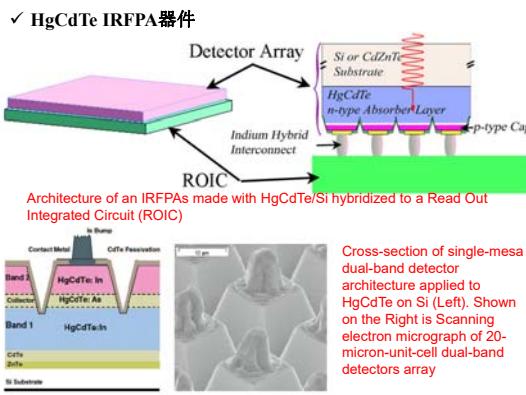
- IRFPA器件的结构
 - ✓ IRFPA器件由红外光敏部分和信号处理部分组成。
 - 红外光敏部分主要着眼于材料的红外光谱响应；
 - 信号处理部分是从有利于电荷的存储和转移的角度考虑。
 - ✓ 单片式IRFPA器件
 - 非本征硅单片式IRFPA器件；
 - 本征硅单片式IRFPA器件；
 - 肖特基势垒单片式IRFPA器件：
 - ✓ 混合式IRFPA器件；
 - 直接注入式；
 - 间接注入式；
 - 间接混合式
-

• 4. 典型的IRFPA器件

✓ InSb IRFPA器件



NIF探测器单元的光伏二极管和电路构成情况，并与视网膜情况进行了比较
InSb光伏二极管接收红外信号，经放大输出后送到多路转换器，并且还送到可转换的电容/电阻网络进行实时二维空间平均。



✓ 肖特基势垒IRFPA器件

- ✓ 非制冷IRFPA器件
- ✓ 多量子阱(MQW)IRFPA器件

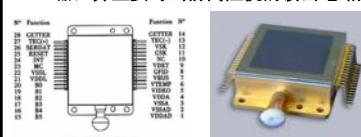


7.2 非制冷焦平面阵列探测

- 7.2.1 非制冷焦平面阵列探测原理与分类
- 7.2.2 主要热探测机制
- 7.2.3 重要限制

7.2.1 非制冷焦平面阵列探测原理与分类

- 非制冷红外探测器又称为热探测器，它是将热辐射转变为温度变化并加以检测的装置；
- 根据不同的转化机制，热探测器基本上分为两类：一类是铁电-热电型探测器，另一类是电阻型微测辐射热计，敏感元是热敏电阻。
- 这两种类型的探测器都不需要制冷，但是都需要温度稳定器，并且要与当前高阻抗的读出电路兼容。



- 红外焦平面阵列是一个二维的热探测像素阵列，每个像素包括一个连接在衬底的敏感区。红外辐射光照在一个探测像素上，被敏感区域吸收，引起其温度升高，热量从敏感区流向周围的环境。有三种热传递方式：热传导、热对流、热辐射。
- 热传导可以在阵列中以三种方式进行：
 - ✓ 像素敏感区的热量沿支撑物流向衬底；
 - ✓ 如果像素之间相邻，热量从一个像素直接流向另一个像素，称为横向热流通，必须加以避免，因为它会影响图像的分辨率；
 - ✓ 如果阵列没有固定在一个抽真空的封装盒内，热量会流向周围的大气。

- 热对流是第二种热传递方式，它需要周围大气的存在。通常热对流不是一种很重要的热传递方式。如果热探测器阵列封装并未抽真空，则从热敏元件流经大气的热损失往往是热传导而不是热对流。
- 第三种热传递方式是热辐射。敏感元件向周围辐射热量，周围环境也向其辐射热量。对于热成像阵列，这是理想情况。如果主要热损失是辐射性的，则阵列受背景限制。
- 为了获得高性能，阵列应该置于抽真空的能透过红外传播窗口的密闭容器之中。探测器的相邻像素应保持足够的间距以避免图像分辨率损失。假设阵列不受背景限制，则主要的热损失方式是由支撑结构向衬底传递的传导热。

- 支撑结构是取得高性能热成像阵列的关键，它一般具有三项功能：**热机械支撑、热传导路径**以及一个**电子传导路径**（假设读出装置是电子性的而不是光学性的）。
 - 在实际应用中，有两种类型的支撑结构：
 - ✓ 倒装焊结构
 - ✓ 隔板结构
 - 当红外辐射照在像素上，像素表面温度增加的简单分析不需要知道探测机制。设探测像素有一个热容 C ，主要的热传导为支撑的热导 G ，入射辐射调制光功率幅度为 P_0 ，入射光吸收率为 η ，设调制光的角频率为 ω ，敏感区上像素温度增加为 ΔT 。则热流量公式为：
- $$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G(\Delta T) = \eta P = \eta P_0 \exp(j\omega t)$$
- 式中， $j = \sqrt{-1}$ ； t 为时间。

- 为了简化公式计算，假设在电阻型或铁电辐射计工作模式下，由于外加电压偏执，在敏感区域的功率耗散可以忽略，则电子测辐射热计的热流量公式的解为：
$$\Delta T = \left| \frac{\eta P_0 \exp(j\omega t)}{G + j\omega C} \right| = \frac{\eta P_0}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}$$
- 式中， τ 为热响应时间常数，定义为：
$$\tau = C / G$$
- ΔT 表达式是红外热成像阵列的基础，它描述了以 P_0 入射到探测像素上时温度的增加量，入射光以角频率 ω 被调制入射。随着入射光以一种振荡的方式上升或者下降，探测像素的温度增加或减少。
- 当频率很低，即 $\omega\tau \ll 1$ ，温度增加为：
$$\Delta T = \eta P_0 / G (\omega\tau \ll 1)$$

- 高频时 $\omega\tau \gg 1$ ，温度增加为

$$\Delta T = \eta P_0 / \omega C (\omega\tau \gg 1)$$
- 高频与低频之间的转换是用时间常数 τ 来标志的。
- ΔT 表达式适用于所有的热探测器。为了测定辐射计的响应率，用信号参量温度系数来表示信号幅值。对于一个辐射计，就是电阻的温度变化量，用上述等式中的 ΔT 来表示信号幅值。
- 响应率是等式两边除以入射辐射功率 P_0 。
- ΔT 与 G 成反比，因此设计热探测最重要的就是需要将热导 G 最小化，以提高红外探测器的热隔离性，其次才是探测器机构以及材料的选择。而 G 的大小由支撑结构的设计来决定。

- 探测器恰当设计要求：
 - ✓ 首先，一个支撑结构的隔热性应该很好，即有一个很小的 G 值；
 - ✓ 其次，在选择与支撑结构相结合的探测器材料时，必须有较好的响应率；
 - ✓ 第三，敏感元件的热容必须足够低，以满足响应时间 τ 的需求。

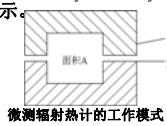
7.2.2 主要热探测机制

• 电阻型微测辐射热计

✓ 微测辐射热计通常是阻抗性装置，当吸收入射辐射后温度增加，引起电阻值的变化的一种装置。为了与场增强热电装置即铁电辐射计区别开来，这里使用“电阻型微测辐射热计”。

✓ 微测辐射热计的工作模式：

□ 微测辐射热计阵列假定由一个矩形的阵列构成。每个测辐射热计由一个厚度 T 的薄层构成，前表面的面积为 A ，占整个单位元面积 A_C 的 $1/F_f$ ，这里 F_f 称为填充因子， $A=F_f A_C$ 。如图所示。

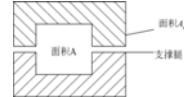


微测辐射热计的工作模式

□ 每个辐射计的整个表面积为 $2A$ ，前表面接受光辐射。假设微测辐射热计表面的发射率为 ε ，热容为 C ，在绝对温度 T 下，每个测辐射热计是悬置于由两个导电的支撑腿的温度为 T_s 的热存储器上。假设在测辐射热计与支撑结构之间有一个热导为：

$$G = dW / dT$$

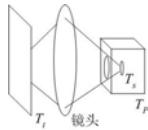
□ 在微测辐射热计和其支撑腿之间， W 为微测辐射热计在温度 T 时内部耗散的能量，热导 G 由支撑腿及其周围的空气的热导率和辐射转化决定。假设现在唯一的电阻抗存在于每个辐射计内部，两个支撑腿之间与温度有关的电阻为 $R(T)$ 。



微测辐射热计的工作模式

□ 如图所示，微测辐射热计安装在盒内，带有黑体壁，其温度为 T_s 。从远处温度为 T_p 目标辐射的红外光经透镜成像在微测辐射热计上。这个装置包括一个透明度很好的环型光学窗口，具有一个固定的立体角 Ω 与微测辐射热计的半锥角 θ 相对应。因此，微测辐射热计的前表面通过立体角 Ω 接收来自盒外的辐射：

$$\Omega = \int_0^\theta \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta d\varphi = 2\pi(1 - \cos \theta)$$



光学系统

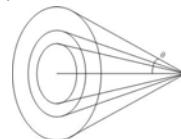
□ 如图，在距离 L 处以 $1/2$ 锥角 θ 的目标入射到传感器前表面 A 上，单位面积每立体角红外辐射能量为：

$$P_i = \pi L A \sin^2 \theta$$

□ 因此，微测辐射热计前表面面积 A 吸收的红外能量 Q 和发射率 ε 由黑体目标距离 L 决定，即：

$$Q = \frac{A \varepsilon \pi}{4 F_{no}^2} L$$

□ 其中， $F_{no} = 1/(2 \sin \theta)$ 。

光线几何锥角形状 (θ 为半锥角)

□ 上式中，目标辐射距离 L 有普朗克定律给出，即

$$L = 2hc^2 \varepsilon_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^5 (\exp(hc/KT_i\lambda) - 1)}$$

□ 式中，传播的红外波长在 λ_1 和 λ_2 之间； T_i 为目标温度； ε_i 为目标发射率。

□ 一般，假设电阻型微测辐射热计吸收红外辐射温度增加 ΔT 足小，以保证电阻变化 Δr 与 ΔT 线性，即：

$$\Delta r = r \Delta T$$

□ 也用 α 表示电阻变化， α 是电阻温度系数，因此有

$$\Delta r = \alpha r \Delta T$$

式中：

$$\alpha = (1/r) \cdot (dr/dT)$$

□ 电阻的温度系数可以是正值，也可以是负值。

□ 对于金属而言，其温度系数在室温下是正值，即电、阻值随着温度的增加而增加，在室温下半导体通常是负值。超导体在其临界温度下（对于高温超导体是远低于300K）则是正值。典型参数：

➢ 金属： $\alpha=0.002/^\circ C$

➢ 半导体： $\alpha=-0.02/^\circ C$

➢ 超导体： $\alpha=2.0/^\circ C$

✓ 响应率

$$R = \frac{V_s}{P_0} = \frac{i_b \alpha R \eta}{G(1 + \alpha^2 \tau^2)^{1/2}}$$

- i_b 为表明响应率正比于电阻温度系数，反比于主要热损失机构的热导。这两个参量都是重要的。但是对于非制冷红外微测辐射热计， G 的值可以在几个数量级范围内变化， α 的变化范围很小。
- 因此，探测器性能的提高重点应该放在隔热装置的设计上。当然，电阻材料的选择也十分重要，给定一个很好的隔热装置，应选择一个具有较高 α 的电阻材料才可以满足需要。

✓ 噪声等效温差(NETD)

- 工程中NETD定义为：引起阵列输出的信噪比以及读出电路信号最小单位的变化时的黑体温度变化量，即

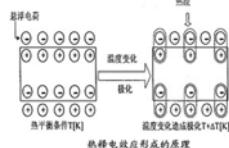
$$NETD = \frac{4F^2 V_N}{\tau_0 A R (\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}}$$

- 式中， F 为光学系统的焦面比； V_N 为整个系统带宽里的电子噪声； τ_0 为光路的投射率； A 为探测器像素的面积； R 为像素的响应率； $(\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}$ 为在温度 T 下，从 λ_1 到 λ_2 的范围内，每单位面积上的入射功率变化量。

• 热释电探测器

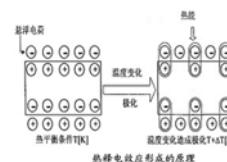
✓ 热释电效应

- 电介质内部虽然没有自由载流子，没有导电能力，但它是由带电粒子构成的。在外加电场作用下，带电粒子受到电场力的作用，沿电力线方向运动，电荷的运动形成电流，由此产生极化现象。
- 一般的电介质材料在电场去除后极化状态随即消失，带电粒子又恢复到原状态。而“铁电体”电介质，在外加电场去除后仍保持极化状态，称为自发极化。无外加电场作用而具有电距，且温度变幻时电距的极性发生变化的介质称为热电体。



- 在外加电场作用下，可改变自发极化的矢量方向，去除电场后，仍能保持极化特性的热电介质，称为热电-铁电体材料。热释电探测器就是利用热电-铁电体材料制成的。

- 当红外辐射照射到已经极化的铁电体材料上时，引起铁电体材料温度升高，表面电荷减少，相当于“释放了”部分电荷。释放的电荷可用放大器转变为电压输出。因此，热释电探测器不同于其他探测器，在恒定辐射作用下，其输出信号电压为零，只有在交变辐射的作用下才有信号输出。



✓ 场增强型热电效应

- 另外一个热电效应是场增强型热电效应，即铁电热辐射效应。不外加电压即发生热电效应，加了电压后，存在电场，热电材料显示出极化特性并且延伸到超出正常的居里温度以上的区域。加入一个电场后，可以获得一个来自于受温度影响的电介质常数的额外信号分量。

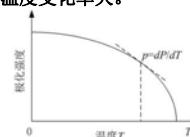
✓ 热释电探测器工作原理

□ 铁电体的自发极化强度 P_s （单位面积上的电荷量）随温度变化的曲线如图所示。随着温度的升高，极化强度降低。当温度升高到一定值，自发极化突然消失，这个温度称为“居里温度”。

□ 在居里温度以下，极化强度 P_s 为温度 T 的函数，温度变化 ΔT ，引起表面电荷的变化，电荷变化表现为电流的流动，因此，相当与有一个电流流入到外部电路中，电流 I_s 的大小为：

$$I_s = pA \frac{d(P_s)}{dt}$$

式中， A 为像素探测面积， p 为热电系数。 $d(P_s)/dt$ 为工作温度区域内温度随时间的变化率，它与材料吸收率和热容有关，吸收率大，热容小，则温度变化率大。



✓ 响应率

□ 因为热电探测器是容性的，其性质显示出电容 C_e 和损失电阻 r ，损失电阻可以用损失正切角 $\tan \delta$ 来表示。因此，热电信号电压 V_s 可以标示为：

$$V_s = \frac{I_s r}{G(1 + \omega^2 r^2 C_e^2)^{1/2}}$$

□ 热电探测器的响应率为：

$$I_s = \frac{\eta p \omega A P_0}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}$$

$$R = \frac{V_s}{P_0} = \frac{\eta \omega p A r}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}$$

□ 式中， $\tau_e = r C_e = 1 / (\omega \tan \delta)$

$$R = \frac{\eta \omega p A r}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}$$

$$\tau_e = r C_e = 1 / (\omega \tan \delta)$$

□ 因此，热电探测器既有热响应时间又有电响应时间。当材料具有小的损失正切角时，其低频调制下的电响应要比热响应时间长。例如，在30Hz下，一个损失正切角为0.01的材料，电响应时间为0.53s，热响应时间为10ms。

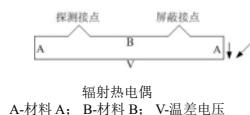
□ 当损失电阻的主要噪声为Johnson噪声，表征热电材料性质的品质因数FOM定义为：

$$FOM = \frac{P}{c(\epsilon_r \tan \delta)^{1/2}}$$

□ 式中， c 为热电探测器的比容； ϵ_r 为相对介电常数。

✓ 热电偶探测器

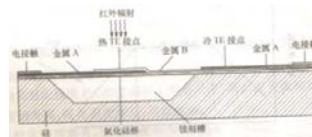
□ 热电效应发生的电路由两个不同的电导率的材料组成，两端连接起来。如果接点的温度不同，就会产生一个热电电压。当电路开时可以检测到电压值。电压的大小依赖于材料的类型和接点之间的温度差。通过链接一系列的接点可以增加电压值，这就是热电堆装置。



□ 为了在红外热探测器上应用热电效应，热电偶或者温差电池的热结点被沉积在像素的隔热部分上。另一个冷的结点被沉积在周围的基底上，即冷的结点对于基底是散热的，如图所示。热电信号电压为：

$$V_s = N(s_1 - s_2) \Delta T$$

□ 式中， N 为热电偶的个数； ΔT 为热点和冷点之间的温度差， s_1 、 s_2 为热电系数。



Honeywell温差 (TE) 探测器

□ 可得热电像素的响应率为： $\tau = C / G$

□ 式中， η 为光吸收率， τ 为热响应时间常数，即：

$$R = \frac{\eta N (s_1 - s_2)}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}$$

□ 与电阻辐射计、热电探测器以及铁电探测器相比，温差电探测器有较低的响应率。但是它们不需要外加偏置，而且没有多余的噪声，制作相对简单。下表比较了这些探测器的相对的优点和缺点。

性能	电阻辐射计	热释电探测器	铁电辐射计	温差电探测器
响应率	高	高	高	低
需要偏置	是	否	是	否
直流响应	是	否	否	是
需要斩波器	否	是	是	否
响应时间	C/G	$C/G, rC_e$	$C/G, rC_e$	C/G

注： C/G 像素热容/热导； rC_e ，像素的电阻以及电容总的电损失。

7.2.3 重要限制

• 温度波动噪声限制

✓ 任何热动力系统，包括与周围环境相接触的热红外探测器都显示出温度的波动性，称为温度波动噪声，来自于与它周围的热交换统计特性。在所有的频率下，温度波动平方均值为：

✓ 式中， k 为玻尔兹曼常数， T 为系统温度；假设与环境温度相同， C 为系统及环境的谐波均值。

✓ 当系统为一种热探测器，热容谐波均值即为探测器或者阵列中像素的热容。

- ✓ 为了确定温度波动与频率的关系可以应用热流公式:
$$\Delta T = \frac{\eta P_0 \exp(j\omega t)}{G + j\omega C} = \frac{\eta P_0}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}$$
- ✓ 只是, P 现在代表的是像素与周围环境交换的热功率。 ΔT 是 $\overline{\Delta T^2}$ 的平方根。假设 P 与频谱无关, 则:
$$\overline{P_f^2} = P_0 B$$
- ✓ 式中, $\overline{P_f^2}$ 为能量波动的平方均值; P_0 为与频率无关的常量; B 为测量的带宽, 则:
$$\overline{\Delta T_f^2} = \frac{\overline{P_f^2}}{G^2(1 + \omega^2 \tau^2)} = \frac{P_0 B}{G^2(1 + \omega^2 \tau^2)}$$
- ✓ 式中, $\overline{\Delta T^2}$ 为与频率有关的温度波动平方均值, τ 为热响应时间常数, 即:
$$\tau = C/G$$
- ✓ 对于所有的频率进行积分, 得
$$P_0 = 4GC\overline{\Delta T^2}$$

- ✓ 可以得到与频率有关的温度波动平方均值为:
$$\overline{\Delta T^2} = \frac{4GKT^2B}{G^2(1 + \omega^2 \tau^2)}$$
- ✓ 在像素和环境之间热功率交换的平均起伏为:
$$\overline{P_f^2} = 4GKT^2B$$
- ✓ 现在考虑温度波动噪声限制的比探测率 D^* 定义为:
$$D^* = (AB)^{1/2} / P_N$$
- ✓ 式中, P_N 为噪声等效功率, 其定义为:
$$P_N = \left(\frac{\overline{P_f^2}}{\eta^2} \right)^{1/2}$$
- ✓ 温度波动噪声限值下的比探测率 D^* 用 D_{TF}^* 表示, 即:
$$D_{TF}^* = \left(\frac{\eta^2 A}{4KT^2 G} \right)^{1/2}$$
- ✓ D^* 与 R 之间的关系可以表示为:
$$D^* = \frac{(AB)^{1/2} R}{V_N}$$

- ✓ 则温度波动噪声限值下的NETD值可表示为:
$$NETD_{TF} = \frac{8F^2 T(kBG)^{1/2}}{\eta \tau_0 A (\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1-\lambda_2}}$$
- ✓ 注意到 $NETD_{TF}$ 正比于 $G^{1/2}$, 因此, 隔热结构的设计在红外探测器的设计中非常重要。根据设计的需要, G 值可以在几个数量级之间变化。隔热装置设计不好的阵列NETD值会受到温度波动噪声的很大限制。

- 背景波动噪声限制
- ✓ 当热辐射为主要热交换方式时, 背景波动噪声是温度波动噪声的表现形式。如果探测器与周围环境温度相同时, 背景波动噪声限制的比探测率由 D_{BF}^* 表示, 热导 G 为热流率与温度增量之间的比例常数。
- ✓ 当辐射为主要的热交换是, G 即 G_{rad} , 对斯涅藩-玻尔兹曼表达式求导可得:
$$G_{rad} = 4\eta A c T^3$$
- ✓ 式中, σ 为斯涅藩-玻尔兹曼常数, 可得到背景波动噪声限制下的比探测率为:
$$D_{BF}^* = \left(\frac{\eta}{16k c T^3} \right)^{1/2}$$
- ✓ 上式是在探测器与背景温度相同且有相同分布时的背景波动噪声限制下的比探测率。当它们温度不同时, 有:
$$D_{BF}^* = \left(\frac{\eta}{8k \sigma (T_D^3 + T_B^3)} \right)^{1/2}$$

- ✓ T_p 为探测器的温度; T_B 为背景温度。下图显示上式得到的 D_{BF}^* , 假设 $\eta=1$ 。

探测器的背景波动噪声是探测器温度 T_p 和背景温度 T_B 的函数
(假设场角为 2π 立体角, 吸收率为1)

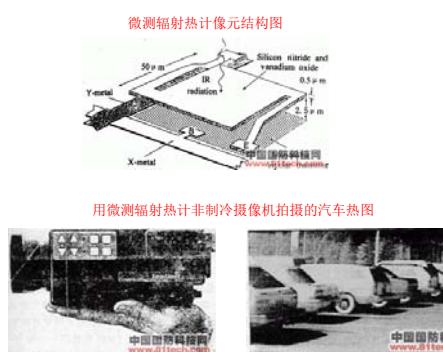
- 下图显示了在背景温度为300K, 探测器温度分别为300K和85K时的温度波动噪声以及背景波动噪声。其他限制参数由下图中给出。随着隔热性能的提高, NETD值以 $G^{1/2}$ 下降, 直到达到 $NETD_{BF}$ 。
-
- 假定:
· 探测尺寸 ~50μm x 50μm
· 接收比 ~2%
· F 数值 ~1.0
· 光学透镜效率 ~90%
· 像素数 ~11.0
· 带宽 ~30Hz
· 背景 ~300K, 2x 立体角
· $D_{BF}^* = 300K \times 300K / (16 \times 300 \times 300 \times 300)$
· $D_{TF}^* = 300K \times 300K / (16 \times 300 \times 300 \times 300)$
· $D_{TF}^* < D_{BF}^*$
- 在给出参数值下的温度波动噪声和背景波动噪声值 T_p -背景温度; T_B -探测器温度; NETD-噪声等效温差

7.3 微测辐射热计的偏置效应和噪声

- 7.3.1 微测辐射热计的偏置效应
- 7.3.2 微测辐射热计的噪声

7.3.1 微测辐射热计的偏置效应

- 偏置是微测辐射热计正常工作的必要条件。可采取**直流偏置**或**脉冲偏置**，当薄膜电阻较高时可以采用**直流偏置**，这是早期器件采用的偏置方式。
- 偏置带来的直接后果是在薄膜器件中产生**自热效应**，当器件工作时间较长时，器件很容易因为自热而损坏。
- 为了避免这种情况，微测辐射热计大多数采用**脉冲偏置**，以使焦耳热效应降至最低。



- 脉冲偏置下的热传导方程可重写为

$$C \frac{d(\Delta T)}{d(\Delta t)} + G_e(\Delta T) = \frac{d(i_b^2 R)}{dT} + \eta P_0 \exp(j\omega t)$$

- 式中，左边第一项为热容对温度变化率的影响；第二项为从探测器平局热导为G的介质向环境的热传导，在大多数情况下，热传向衬底；式中，右边第一项为偏执电流引起的焦耳热，第二项为像素吸收的辐射能。
- 在稳定条件下，即只有偏置引起的焦耳热效应，无入射辐射时，有

$$\frac{V_b^2 R}{(R_L + R)^2} = G_0(T_1 - T_0)$$

- 式中， $V_b = \frac{i_b R}{R_L + R}$ ； R_L 为负载电阻； R 为薄膜电阻； T_1 为焦耳热作用下探测器能达到的稳定温度； T_0 为环境温度； G_0 为 T_0 下的热导率。

- 此时的热传导方程简化为：
- $$C \frac{d(\Delta T)}{d(\Delta t)} + G_e(\Delta T) = \eta P_0 \exp(j\omega t)$$
- 式中， G_e 为有效热导率，即：
$$G_e = G - G_0(T_1 - T_0)\alpha \frac{R_L - R}{R_L + R}$$
 - 上式与无偏执时的形式相同，所以，解的形式为：
$$\Delta T = \Delta T_0 \exp(-\frac{G_e}{C}t) + \frac{\eta P_0 \exp(j\omega t)}{G_e + j\omega C}$$
 - 式中，解的第一项为瞬态项，第二项为周期函数项。当 G_e 为正时，第一项随时间的延长变为零，解的形式完全与无偏置时相同。但当 G_e 为负时，第一项随时间的延长趋于无穷大，即薄膜材料将会过热而损坏，称为“自焚”。
 - 自焚现象与选用的薄膜材料及偏置条件有关，需要在设计时避免。

- 当瞬态项为零时，有： $\Delta T = \frac{\eta P_0 \exp(j\omega t)}{(G_e + \omega^2 C^2)^{1/2}}$
- 根据 α 的定义，可以计算 R 随温度的变化，即： $\Delta R = \alpha R \Delta T = \frac{\alpha R \eta P_0}{(G_e^2 + \omega^2 C^2)^{1/2}}$
- 在偏置条件下，负载电阻两端的信号电压为： $V_{RL} = \frac{d(i_b R_L)}{dR} \Delta R = -\frac{V}{R + R_L} \frac{R_L \Delta R}{(R + R_L)}$
- 通常选取 $R_L \gg R$ ，这时 i_b 受 R 和 ΔR 影响可以忽略，即： $V_{RL} = i_b \Delta R$
- 而 V_{RL} 则为信号电压 V_s ，即： $V_s = \frac{\alpha \eta i_b R}{(G_e^2 + \omega^2 C^2)^{1/2}} = \frac{\alpha \eta i_b R}{G_e (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}$
- 响应率为： $\mathcal{R}_v = \frac{V_s}{P_0} = \frac{\alpha \eta i_b R}{(G_e^2 + \omega^2 C^2)^{1/2}}$
- 式中， τ_e 为有效时间常数，即 $\tau_e = C/G_e$

- 在适当的偏置条件和薄膜材料中， G_e 为正。此时， G_e 总是小于 a ，且随着 i_b 增大， G_e 减小，但 G_e 必须保持为正。由于 G_e 随 i_b 增大而减小，因此信号电压和响应率增大，但偏置的增加不会改变热容，所以 τ_e 增加，使响应速度变慢。 G 和 τ_e 对偏置引起的温度变化的依赖现象称为“电热效应”。适当的选择偏置，可以在高响应率和快的响应速度之间取得折中。
- 为了降低偏置引起的自热效应，微测辐射热计大多采用脉冲偏置，使焦耳热效应及功率降至最低。脉冲偏置的热电效应可以近似估计，若每个脉冲耗散的焦耳热能为 $P\Delta t$ ，则每个脉冲引起的温升为 $P\Delta t/C$ 。设脉冲施加频率为 f （与探测器的帧频相同），而探测器的热时间常数为 τ ，则平均功耗为 $P\Delta t f$ ，平均升温为：

$$\overline{\Delta T} = \frac{P\Delta t f}{G}$$

7.3.2 微测辐射热计的噪声

- 热探测器的基本噪声是温度起伏或背景起伏产生的热噪声，这两项噪声决定了热探测器的极限性能。
- 针对微测辐射热计，噪声源还包括Johnson噪声、 $1/f$ 噪声、电热效应引起的噪声及前放噪声。而主要噪声源为Johnson、 $1/f$ 噪声、热噪声。
- Johnson噪声
- 由于载流子热扰动引起的起伏电压，当 $f < kT/h$ 时（ k 为玻尔兹曼常数， h 为普朗克常数），噪声功率与频率无关，即Johnson噪声为白噪声，则：

$$\sqrt{V^2} = \sqrt{(V - \bar{V})^2} = (4kTRB)^{1/2}$$

- 对脉冲偏置的测辐射热计，噪声带宽 B 由积分常数决定，若积分常数与脉冲宽度相同， $B = \Delta t/2$ 。

• $1/f$ 噪声

- 电阻材料会表现出与偏置相关的噪声，具体表现为电阻的起伏 ΔR^2 。当有偏置时，即产生噪声电压： $i_b(\Delta R^2)^{1/2}$
- 这类噪声有两种形式： $1/f$ 噪声和电报噪声。其中后一种为随机噪声，与电阻材料、材料制备及电接触中的缺陷有关。
- $1/f$ 噪声在测辐射热计中起重要作用，特别是低频下，在单位噪声带宽内，有：

$$\sqrt{\Delta V_{1/f}^2} = \sqrt{V^2 n / f}$$

式中， $V = i_b R$ 。在带宽 B 内，有：

$$V_{1/f} = \sqrt{\Delta V_{1/f}^2} df = V^2 n \ln(f_2/f_1)$$

式中， $f_2=B$ ； f_1 为低频噪声源， $f_1 \approx 1/T_{stare}$ ， T_{stare} 为阵列凝视时间； n 为 $1/f$ 噪声参数，无明确表达式

✓ $1/f$ 噪声随频率增加而减小，故称 $1/f$ 噪声，但参数机理尚不明确。高频率下会低于Johnson噪声。两种噪声相等时的频率定义为转折频率或拐点频率，为：

$$4kTRB = V^2 \frac{n}{f_{knee}}$$

$$\checkmark \text{由此得到： } f_{knee} = \frac{V^2 n}{4kTRB}$$

✓ 因此，在测辐射热计中，两种主要噪声源Johnson噪声和 $1/f$ 噪声哪一种占优势，与信号带宽和偏置条件有关。

• 热噪声

- 背景辐射起伏或温度起伏产生的热噪声源自入射辐射功率的统计起伏，在低频时，每单位带宽下辐射噪声功率为：

$$P^2 = 2\Delta P^2 = 4kT^2 G_{rad}$$

式中由辐射噪声引起的辐射计温度波动为：

$$G_{rad} = 8A\eta\varepsilon\sigma T^3$$

整个热动态温度噪声 kT^2/C 与辐射噪声引起的温度噪声之间的差别由支撑臂热导 G_{leg} 的能量变化引起的热噪声带来的。

辐射计温度变化诱因为支撑臂热导 G_{leg} 发生变化，因此：

$$\overline{\Delta T^2} = \int_0^\infty \frac{\overline{P^2}}{G^2} \frac{1}{1 + (2\pi f\tau)^2} df = \frac{8A\eta\varepsilon\sigma kT^3}{CG} = \frac{kT^2}{C} \frac{G_{rad}}{G_{rad} + G_{leg}}$$

✓ 由辐射和支撑臂热导引起的整个温度噪声称为热噪声。

$$\overline{\Delta T^2} = \frac{kT^2}{C}$$

✓ 当给一个微辐射计加偏置时，电压变化 $\overline{\Delta V^2}$ 起因于整个热噪声功率

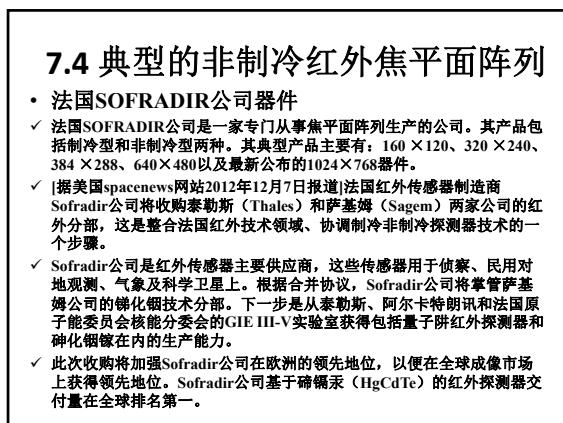
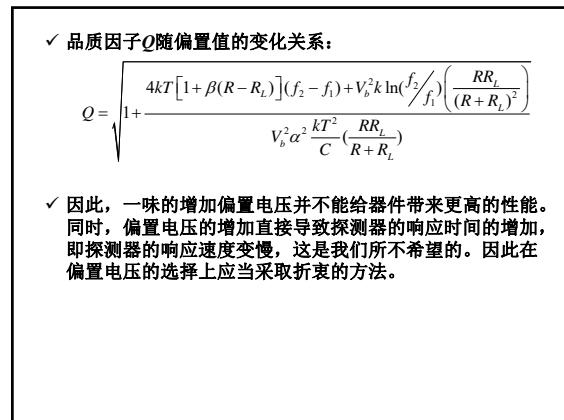
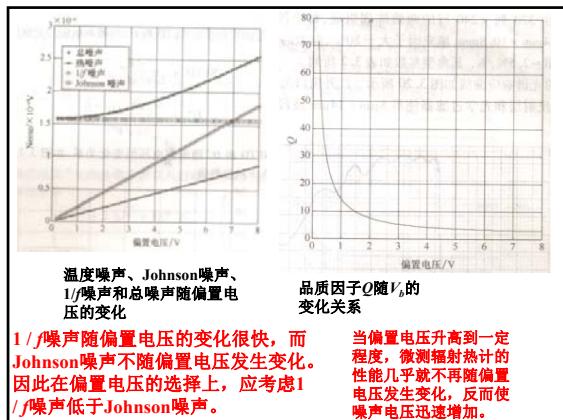
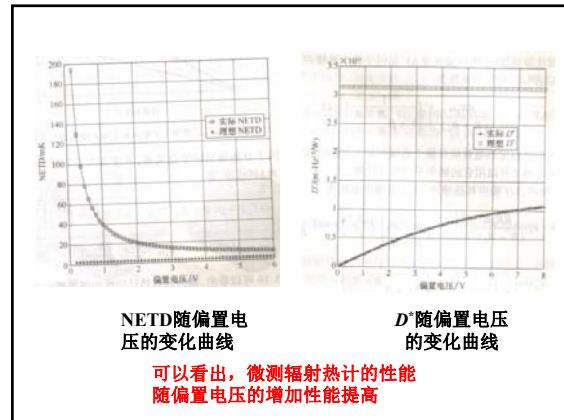
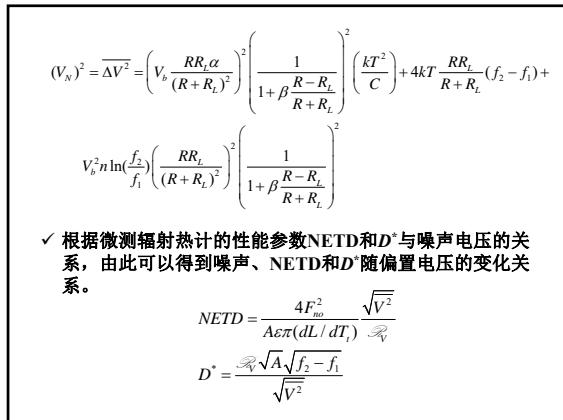
$$\overline{\Delta V^2} = (4kT^2 G)(1/4\tau) = (kT^2/C)G^2$$

✓ 因此，热噪声为：

$$\overline{\Delta T^2} = \frac{kT^2}{C} - \frac{kT^2}{C} \frac{G_{rad}}{G_{rad} + G_{leg}} = \frac{kT^2}{C} \left(\frac{G_{leg}}{G_{leg} + G_{rad}} \right)$$

✓ 以上讨论的噪声都是假定热电效应在整个热噪声频率范围内起作用，这仅仅对 $f < 1/2\pi\tau$ 时严格正确。热电因子可以用它的频率平均形式替代。仅考虑Johnson噪声、 $1/f$ 噪声和热噪声，总的噪声电压为：

$$\overline{\Delta V^2} = \left(V_b \frac{RR_s\alpha}{(R+R_s)^2} \right)^2 \left(\frac{1}{1 + \beta \frac{R-R_s}{R+R_s}} \right) \left(\frac{kT^2}{C} \right)$$

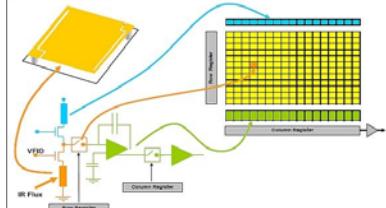


DL-720红外非制冷型焦平面红外热像仪组件

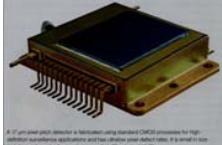


DL-720是浙江大立科技有限公司研制生产的非制冷型焦平面红外热像仪机芯组件，采用法国SOFRADIR公司生产的多晶硅非制冷焦平面探测器（UFPA）和大立公司自主开发的实时图像处理电路。使用该组件可以降低热成像系统的开发难度，缩短开发周期，可满足工业测温、医学、电子研发、安全缉私、边防等要求。

- 法国ULIS公司器件**
- ✓ ULIS公司研制的型号为UL03041的 384×288 二维阻抗式微测辐射热计焦平面。



ULIS公司2008年研制的分辨率率为 1024×768 的非制冷红外传感器，像素尺寸仅为 $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$, NETD平均 40mK , 平均响应率为 15.5mV/K 。



A $17 \mu\text{m}$ pixel pitch, 1024×768 pixel array detector for high-sensitivity surface applications and other devices that do not require thermoelectric cooling. (Courtesy of ULIS)

■ 法国Sofradir和GE Equity 的子公司——Ulis探测器制造公司在SPIE 2009会议上，发布了该公司研制成功第四代红外探测器的消息：这种第四代红外探测器具有高分辨率红外成像监视目标的能力，XGA格式（ 1024×768 ），像元间距为 $17 \mu\text{m}$ 。
 ■ 这种非制冷大规模红外探测器是采用标准的印制技术制成的，是一种非晶硅（Si）材料集成在Si CMOS衬底上，并含有读出电路的单片集成电路。
 ■ 由于非晶硅（Si）材料在 $-300 \sim +800$ 的温度范围内的激活能是均匀恒定的，即使在高于 1100 温度下其温度变化要小于 1% ，因此这类探测器无需热电制冷。
 ■ 经过典型的成像测试表明，其平均响应率为 15.5 mV/K ，有效的动态范围大于 100C 。典型的像元探测率不小于 0.5% 。
 （ 1024×768 ），类似于用于数字式静物摄像机的Si XMOS 摄像机，具有较好的均匀的响应率。

- 美国德克萨斯公司产品**
- ✓ UFPA热像仪的灵敏度在很大程度上取决于阵列中单元数目，而不是探测器的类型。
- ✓ 美国德克萨斯公司主要是发展热释电技术



UFPA非制冷焦平面红外热像仪

- 美国霍尼韦尔公司产品**
- ✓ 美国霍尼韦尔公司主要研制以氧化钒为热敏电阻材料制作的微热辐射计焦平面，每个探测器单元采用桥式结构，在读出电路上形成单片式结构。焦平面阵列不需要制冷，但需要用一个温差电放热器使其工作温度恒定。



北京恒泰利达有限公司
www.heteli.com

霍尼韦尔热像仪

