

红外图像处理技术 之红外探测器

航空航天学院
陆哲明/郑阳明

内容

- 6.1 红外探测器的发展和分类
- 6.2 红外探测器的性能参数
- 6.3 红外探测器性能参数的测量
- 6.4 典型的红外光子探测器
- 6.5 新型红外探测器件与技术

6.1 红外探测器的发展和分类

- 6.1.1 历史
- 6.1.2 研究重点
- 6.1.3 分类

01

历史

- ✓ 1800年，**赫胥尔**(Herschel)利用水银温度计研究太阳光的能量分布发现了红外辐射；
- 在研究各种色光的热量时，有意地把暗室中唯一的窗户用木板堵住，并在板上开了一条矩形的孔，孔内装一个分光棱镜。当太阳光通过这个棱镜时，便被分解成彩色光带。
- 在试验中，他突然发现一个奇怪的现象：**放在光带红光外的温度计，比室内其它温度计的指示值都要高**。经过多次试验，这个所谓含热量最多的高温区，总是位于光带最边缘处红光的外面。
- 于是宣布，太阳发出的光线中除可见光外，还有一种人眼看不见的“热线”，这种看不见的“热线”位于红色光外侧，因而叫做**红外线**。

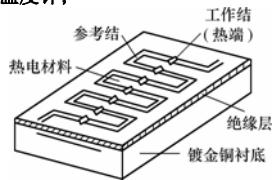


✓ 1821年，Seebeck发现了热电效应并制成第一支温差电偶；



塞贝克将两种不同的金属导线连接在一起，构成一个电流回路。他将两条导线首尾相连形成一个结点，他突然发现，如果把其中的一个结加热到很高的温度而另一个结保持低温的话，电路周围存在磁场。他实在不敢相信，热量施加于两种金属构成的一个结时会有电流产生，这只能用**热磁电流**或**热磁现象**来解释他的发现。

- ✓ 1829年, Nobili根据Seebeck发现的热电效应制造了第一个热电偶和改进的温度计;



这种传感器是由两个不同金属连接而成的电路,当两个金属连接处的温度不同时,就会产生电压差。根据热电偶产生的电压差的大小,可以测量温度的变化。

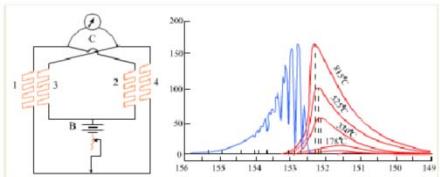
- ✓ 1833年, Melloni利用铋、镁两种金属设计了热电偶,提出了将多个铋铜热电偶串联连接的想法,从而产生更高的、可测量的输出,多个热电偶连接称为热电堆,这是世界上第一个热电堆温度传感器。



- ✓ 1880年, Langley将铂制成的两个薄板条连接在一起,形成了惠斯顿电桥的两臂,制成热辐射计。

□ 他用四个铂电阻丝组成电桥,从检流计测出电阻的温度变化。为了测量热辐射的能量分布,他设计了很精巧的实验装置,用岩盐作成棱镜和透镜,仿照分光计的原理,把不同波长的热辐射投射到热辐射计中,测出能量随波长变化的曲线,从曲线可以明显地看到最大能量值随温度增高向短波方向转移的趋势。

□ 1886年,他用罗兰凹面光栅作色散元件,测到了相当精确的热辐射能量分布曲线。



- ✓ 1947年, Golya发明了气动式红外探测器

□ 气动型红外传感器是利用气体吸收红外辐射后,温度升高,体积增大的特性,来反映红外辐射的强弱。当辐射通过红外窗口到吸收膜上时,膜吸收辐射并传给气室的气体,气体温度升高,压力增大,柔镜膨胀。为了测出它的移动量,用另一光源将光投射到柔镜背面的反射膜上。在没有辐照时,气室内气压稳定,柔镜处于正常状态,由柔镜背面反射的光因被光栅遮挡而照射不到光电管上;当有辐照时,辐射透过窗口照射到吸收膜上,吸收膜将吸收的能量传给气室,气室温度升高,气压增大,柔镜片变形,从而引起反射光线的移动,通过光栅到达光电管的光强发生变化,由此可检测红外辐射的强弱。

□ 这种传感器的特点是灵敏度高、性能稳定,但响应时间长、结构复杂、强度较差,只适合于实验室使用。

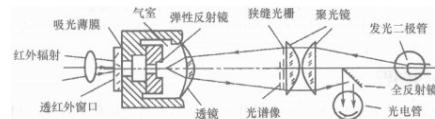
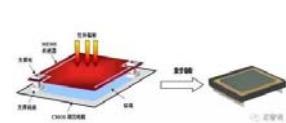


图 9-48 气动探测器结构

- ✓ 十九世纪50年代,用温差电动势率更大的半导体替代原来的金属,得到了灵敏度更高的温差电型红外探测器;
✓ 60年代,出现利用铁电体和自发极化与温度关系的热释电型红外探测器;
✓ 90年代,研制了热释电和热辐射计红外焦平面探测器阵列器件。



02

研究重点

- 红外探测器的研制过程中，致力于以下几个方面的研究：
 - ✓ 提高单元器件性能（高速宽带响应、低噪声）；
 - ✓ 增大红外焦平面探测器阵列面积，提高灵敏度；
 - ✓ 克服系统在光学设计、加工、信号处理和显示方面的困难，减小体积、减轻重量，简化结构，降低成本；
 - ✓ 拓展光谱频段；

- 红外探测器的研制过程中，致力于以下技术研究：
 - ✓ **低暗电流：**红外探测器的暗电流是指在没有光照的情况下，探测器产生的电流。暗电流越低，探测器的灵敏度越高。因此，研究人员致力于降低暗电流，以提高探测器的性能。
 - ✓ **多波段探测：**多波段红外探测系统可以在两个或多个波段上获取目标信息，从而更精确、更可靠地获取更多的目标信息，提高对目标的探测效果，降低预警系统的虚警概率，提高系统的搜索和跟踪性能。适用更多的应用需求，更好地满足各军兵种的需要。
 - ✓ **非致冷技术：**传统的红外探测器通常需要低温制冷技术来提高灵敏度和输出信号的信噪比。但这使得探测器体积大、成本高。因此，研究人员致力于开发非致冷红外探测器，以实现小型化和低成本。
 - ✓ **集成化和大面积：**利用材料电子计算机和微电子方面的最新技术，可使红外探测器与具有一定数据处理能力的数据处理设备相结合，使其向轻集成化、大面积、焦平面化方向发展，以提高其性能，实现对室温目标的探测。

02 分类

热红外探测器和光子红外探测器特点比较

性能	热红外探测器	光子红外探测器
灵敏度	较低	高
响应时间	长	短
光谱响应	理论上与波长分布无关	特定波长敏感
工作条件	室温	需制冷
成本	低	高

光子红外探测器一般由半导体材料制成。基于某些物质的光电效应，满足一定能量的光子直接激发光敏材料的束缚电子成导电电子，因此光敏材料的禁带宽度或杂质能级影响其响应波长，所以响应对波长有选择性。光子红外探测器吸收光子后，本身发生电子状态的改变，引起不同的电磁学现象。

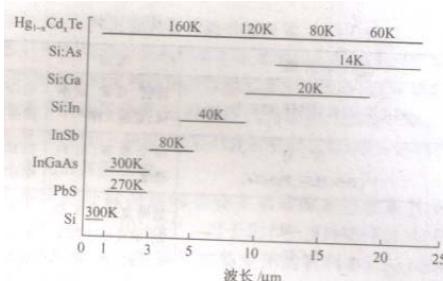
- ✓ 根据不同的工作模式，将光子探测器分类如下：
- **光电子发射探测器：**当光照射到某些金属、金属氧化物或半导体材料表面时，如果光子的能量 $h\nu$ 足够大，就能使其表面发射电子，利用这种效应制成的可见光探测器或红外光探测器即为光电子发射探测器。
- **光电导探测器：**半导体吸收能量足够大的光子后，半导体内的一些载流子从束缚状态转变为自由状态，从而使半导体电导率增大，利用半导体光电导效应制成的红外探测器称为光电导探测器。又称为光敏电阻。
- **光伏红外探测器：**在光照射下，半导体内部产生的电子-空穴对，在静电场作用下发生分离，产生电动势的现象。利用半导体光伏效应制成的红外探测器称为光伏探测器。

- **光磁电红外探测器：**半导体表面吸收光子后，在表面产生的电子-空穴对，要向体内扩散。在扩散过程中，因受到强磁场的作用，电子和空穴各偏向一侧，因而产生电位差。这种现象叫做光电磁效应。利用这种效应测量红外辐射的红外探测器叫做光磁电探测器。

- ✓ 根据红外辐射激发电子跃迁的不同将光子探测器分为：
- **本征型**红外探测器：就是利用本征光吸收材料做成的器件。本征半导体吸收能量的过程称为本征吸收，即处于低能态的粒子吸收外来光子能量后跃迁到高能态。本征光吸收对外来光子有频率选择性，即被吸收的光子能量必须等于或大于上下能级的吸收差。本征吸收只决定于半导体本身的性质，与它所含杂质和缺陷无关。本征光吸收的吸收系数高，特别是对直接能隙半导体更是这样。优点是工作温度比非本征型高。
- **非本征型**红外探测器：利用非本征光吸收材料做成的器件。掺有杂质的半导体在光照下，中性施主的束缚电子可以吸收光子跃迁到导带，中性受主的束缚空穴也可以吸收光子跃迁到价带，这种吸收称为非本征吸收。非本征吸收红外探测器的吸收系数低。

- **自由载流子型探测器**：其在吸收光子后并不引起载流子数目变化，而是引起载流子迁移率变化。这类探测器需要工作在极低的温度下，以降低能量向晶格的转移。
- **量子阱红外探测器**：将两种不同的半导体材料用人工方法薄层交替生长形成超晶格，在截面能带有突变，电子和空穴被限制在低势能阱内，能量量子化，称为量子阱。量子阱红外探测器利用量子阱导带内的子带间跃迁，并利用从基态激发到第一激发态的电子通过电场作用形成光电流这一物理过程，实现对红外辐射的探测。
- **量子点探测器**：类似于量子阱红外探测器，但由于有更长的载流子俘获和弛豫时间，故具有更低的暗电流和更高的光电响应。

- ✓ 主要探测器的工作波长分布



6.2 红外探测器的性能参数

- **6.2.1探测器主要工作条件**
- **6.2.2红外探测器的性能参数**

01

探测器主要工作条件

- ✓ 根据探测器的性能参数和整个红外系统其他组成部分的参数，可以确定整个红外系统的性能指标。
- ✓ 探测器主要工作条件
- **入射辐射的光谱分布**
 - 如果入射辐射是单色的，需要给出波长。
 - 如果入射辐射是黑体辐射，要给出黑体温度。
 - 如果入射辐射通过了相当距离的大气层和光学系统，则必须考虑大气和光学系统的吸收。
 - 如果入射辐射经过调制，一般要给出调制的频率分布，但当放大器的测量带宽较窄时，只需给出调制的基频与幅值。

□ 电路频率范围

- 因为器件的噪声电压与电路的通频带宽度 Δf 的平方根成正比，有些噪声还与频率 f 有关，所以在描述器件性能时，必须给出电路频率范围。

□ 工作温度

- 许多红外探测器，特别是半导体探测器，其输出信号、噪声、器件电阻等都与工作温度有极大关系，所以必须说明工作温度。

□ 光敏面和形状和尺寸

- 器件的信号和噪声都与光敏面的形状和大小有关，所以必须注明光敏面和形状和尺寸。

□ 偏置情况

- 光电红外探测器、热敏电阻探测器的直流偏置和光磁电探测器的器件特性与偏置大小有关。

□ 特殊工作条件

- 湿度、视场立体角、背景温度、辐射辐射功率等

02

红外探测器的性能参数

✓ 响应率（响应度 R ）：探测器的输出信号 S 与入射到探测器的辐射功率 P 之比。

$$R=S/P$$

- 它表示了探测器把红外辐射转换为信号电压或信号电流的能力。
- 入射的辐射是恒定的，这时响应度称为**直流响应度**。而常常把辐射调制成交变辐射，称为**交流响应度**。
- 常用辐射源为500K黑体，测得的响应度用 R_0 表示，如用单色光（波长为 λ ），则测得的响应度为 $R_{0\lambda}$ 。
- 给出响应度时，要说明**工作温度和光敏面面积**。此外，当辐射辐射的功率比较高时，有的器件表现出响应度是非线性的，此时要说明入射辐射功率。

✓ 噪声等效功率

- 由于探测器存在噪声，当辐射小到它在探测器上产生的信号完全被探测器的噪声所淹没时，探测器就无法肯定是否有辐射信号投射到探测器上。通常用噪声等效功率 $NEP(P_N)$ 来表征探测器可探测的最小功率。

- 当辐射在探测器上产生的信号方均根电压正好等于探测器本身的噪声方均根电压值（即信号噪声比为1），入射到探测器上的辐射功率称为探测器的噪声等效功率，即

$$NEP = EA / (V_S / V_N)$$

- E 为投射到探测器上的方均根辐照度(W/cm^2); A 为探测器灵敏元面积(cm^2); V_S 和 V_N 分别是在该照度下探测器输出的信号方均根电压和噪声方均根电压； NEP 的量纲为 W ，它表征探测器所能探测的最小功率。

- 根据响应度的定义，又将等效噪声写成：

$$NEP=N/R$$

- **NEP值与探测器的噪声值成正比；与探测器的响应率成反比。**

- **NEP是温度的函数，因此要注明黑体温度。**说明NEP时要说明具体测量条件。

✓ 探测率

$$D=1/NEP$$

- 大部分的探测器的噪声等效功率与探测器面积 A 的平方根和噪声等效带宽 Δf 的平方根成正比。因此，提出归一化探测率 D^*

$$D^* = D(A \cdot \Delta f)^{1/2}$$

✓ 光谱响应

- 指受到不同波长的光照射时，响应率 R 随入射辐射波长的变化而变化。
- 光电型探测器对辐射的波长有选择性，存在着长波限 λ_c 。
- 通常认为光热型探测器的探测率对于波长无选择性。

✓ 响应时间

□ 当一定功率的辐射突然照射到探测器上时，探测器的输出电压要经过一定时间才能上升到与这一辐射功率相对应的稳定值。

□ 当辐射突然除去后，输出电压也要经过一定时间才能降到辐照之间的值。这种上升或下降所需要的时间叫做探测器的响应时间。

✓ 频率响应

□ 由于探测器的响应速度有限，探测器对辐射的响应就不是瞬时的。其响应度随调制频率的变化叫做探测器的频率响应。

$$R_f = \frac{R_0}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}}$$

□ 式中， R_f 为调制频率等于 f 时的响应率； R_0 是频率接近零或恒定辐射时的响应率； τ 为响应时间。

6.3 红外探测器性能参数的测量

• 6.3.1 探测率 D^* 的测量

• 6.3.2 不同探测器对测量电路的要求

• 6.3.3 光谱响应的测量方法

• 6.3.4 测试程序

• 6.3.5 响应时间的测量方法

01

探测率 D^* 的测量

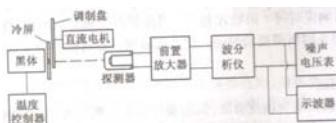
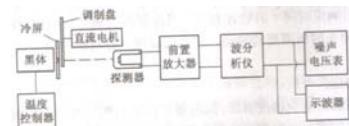
✓ 测量装置

□ 如图所示，温度控制器控制黑体的温度，使得黑体在测试过程中保持稳定的温度。

□ 在黑体和探测器之间放置有冷屏和调制盘，冷屏的作用是使探测器只探测到从冷屏小孔透过的红外辐射，抑制黑体表面红外辐射对探测器的影响。

□ 无级调速的直流电机带动调制盘转动，将黑体辐射调制到所需的频率。

□ 在测量探测率 D^* 的实验装置中，要求采用低噪声放大器，使前置放大器的噪声远低于探测器的噪声。



□ 波分仪用以选择合适的通带带宽和中心波长。之所以采用噪声电压表，因为噪声电压表具有很宽的带宽和很大动态范围。

✓ 测量程序

$$D^* = \frac{V_s / V_N}{P} (A \cdot \Delta f)^{1/2} = \frac{(V_s / V_N) \cdot (\Delta f)^{1/2}}{\sqrt{2\Delta E \cdot A^{1/2}}}$$

□ 探测率 D^* 进一步表示为：

□ 式中， V_s 、 V_N 为信号电压和噪声电压； Δf 为等效噪声带宽； A 为探测器面积； ΔE 为黑体引起的照度增加量，可表示为

$$\Delta E = \frac{\sigma(T^4 - T_0^4)A_1}{2\pi d^2}$$

□ 式中， A_1 为黑体辐射射孔的面积； d 为黑体辐射射孔到探测器光敏面的距离； T 为黑体温度； T_0 为环境温度。

02

不同探测器对测量电路的要求

✓ 不同类型的探测器，往往需要不同的测量电路和偏置电路。

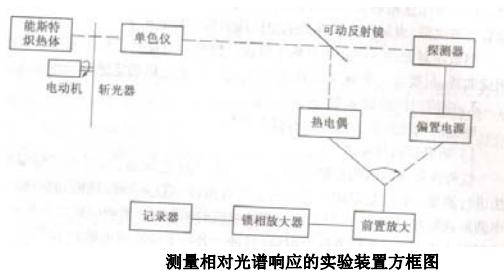
- 光电导探测器
- 光伏探测器
- 热敏电阻
- 热电偶

探测器类型	偏置/供电需求	核心电路	典型应用场景
光电导探测器	恒流/恒压源	分压电路 + 滤波	光强监测、红外报警
光伏探测器	零偏置或反偏压	跨阻放大器 + 差分滤波	精密光度计、光谱仪
热敏电阻 (NTC)	低压直流供电 (<5V)	惠斯通电桥 + ADC	温度计、恒温控制系统
热电偶	无需供电，需冷端补偿	差分放大 + 补偿电路	工业炉温、高温过程监控

03

光谱响应的测量方法

✓ 测量装置。如图所示。



✓ 补充

- 能斯脱灯(Nernst)是一种由氧化锆和氧化钆及少量其他物质混合制成的棒状或管状固体红外辐射源。它体积小、结构简单，长度为3cm，直径为3mm，两端缠铂丝并与电路相连接，用直流或交流供电，工作温度可达2000K。
- 能斯脱灯在室温下是绝缘体，在点燃之前需加230V左右的电压。用电热丝等将能斯脱灯预热到800 °C左右时，棒（或管）开始导电，它具有负阻效应，故电路中需加入限流器。
- 优点是它可以在空气中点燃；缺点是机械强度低、工作寿命短，表面部分的辐射状况受空气扰动变化不定，起燃麻烦。

由某些器件的负阻现象所引起的效应。负阻现象指某些器件(如某些电子管、晶体管、二极管等)在某种条件下,当电流(或电压)增加时电压(或电流)反而减少的现象。这种现象对电路所起效应,相当于一个负电阻所引起的,故称“负阻效应”。

有些器件可利用负阻效应以放大电信号或产生振荡。

比较有名的是固体微波源中产生微波的耿氏二极管，它具有负阻效应。

- 由于能托斯灯本身辐射的能量与波长有关，所以实际测量时需要测定光源辐射光谱和探测器输出信号强度随波长变化的两条曲线，才能得到探测器的相对光谱响应曲线。
- 单色仪的作用是将入射光分离成不同波长的单色光，由于单色仪输出的光信号非常微弱，所以需要利用锁相放大器（位于前置放大器之后）以保证输出信号有足够高的信噪比。
- 由于热电偶对一切波长的响应几乎是相等的，性能比较稳定，适用于校准辐射光源各波长间隔内的相对辐射功率。

04

测量程序

- 辐射谱的测定：从待测起始波长（例如 $2\mu\text{m}$ ）开始，每隔一定波长间隔（例如 $0.1\mu\text{m}$ ）取一测试点，将可动反射镜调到热电偶通道，用热电偶通道得出各波长间隔的输出信号 V_i ，以表征相应波长间隔内的相对强度， V_i 随波长的变化则表征能斯脱灯的辐射谱。
- 探测器输出信号强度随波长变化的测量：旋转可动反射镜到待测探测器通道，使从单色仪出射的光经待测探测器后，探测器输出信号进入前置放大器等后续光电信号处理部分。利用与测量辐射谱类似的程序和方法，测出待测探测器各波长间隔内的输出信号 V_{si} ，从而得到探测器输出信号强度随波长的变化曲线。

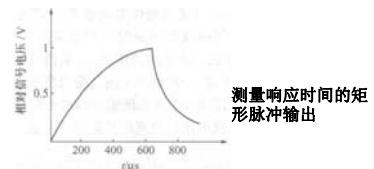
□ 光谱响应曲线：将待测探测器各波长间隔的输出信号 V_{si} 除以相应波长间隔的辐射信号 V_i ，就得到了各波长的相对响应，将实验测得的一系列相对响应值 (V_{si}/V_i) 进行归一化，就得到了能量归一化的相对响应 R_i 。测量绝对光谱响应必须对热电偶进行校准。但如果已知探测器的相对光谱响应曲线，只要有一个测定的 $D^*(T_f, \Delta f)$ 值，就可以确定绝对光谱响应。

05

响应时间的测量方法

✓ 矩形辐射脉冲法

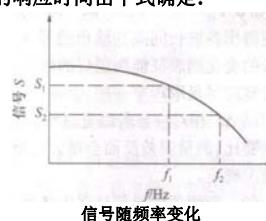
- 红外探测器的时间常数约在 $50\text{ms} \sim 10^{-2}\mu\text{s}$ 之间时，都可用矩形辐射脉冲法进行测量。获得矩形辐射脉冲的方法有两种：对应于较慢的探测器，可用半圆形
- 调制盘，脉冲上升时间比探测器响应时间短。二是对应于较快的探测器（响应时间 $<10\mu\text{s}$ ），常用旋转反射镜（脉冲上升与下降时间可低到 10^{-8}s ）。
- 用宽带放大器与示波器可以观察到器件输出信号随时间的变化，如图所示。它通常近似按指数率 $\exp(-t/\tau)$ 下降，由此可以求出时间常数 τ 。



✓ 改变频率调制法

- 适用于测量大于 $10\mu\text{s}$ 的时间常数，其测量装置与探测率的实际装置图相同，但需用一个变速发动机来改变调制频率，并用高精度伏特表来测量输出电压。结果得到信号随频率的变化曲线，这就是探测器的频率响应，如图所示。
- 在横坐标上取两个适当的频率 f_1 、 f_2 ，并从曲线上总坐标上得出对应的信号值 S_1 、 S_2 ，则器件的响应时间由下式确定：

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{S_1^2 - S_2^2}{f_2^2 S_2^2 - f_1^2 S_1^2} \right)^{1/2}$$



6.4 典型的红外光子探测器

- 6.4.1 InGaAs探测器
- 6.4.2 InGaAs探测器性能参数
- 6.4.3 InSb探测器
- 6.4.4 InSb探测器性能水平
- 6.4.5 InSb探测器的应用和发展
- 6.4.6 HgCdTe探测器

01

InGaAs探测器

✓ InGaAs材料的物理特性

- 用于制作光电探测器的 $In_xGa_{1-x}As$ 材料为**薄膜材料**，可利用如**液相外延、分子束外延、金属有机物化学气相沉积**等多种先进的材料制备技术进行制备。
- 由于 InGaAs材料系列可采用多样化的先进生长技术，是一种比HgCdTe更容易生长的合金材料；具有高的灵敏度和探测率；在室温下工作，降低甚至取消了制冷器的要求，减少了探测器的尺寸、制作成本、提高了探测器的可靠性，InGaAs是制备光电探测器的良好材料。
- 器件的性能主要是由器件的**量子效率、暗电流**和**噪声**决定的。InGaAs PIN光电探测器具有极高的响应速度和很小的暗电流，因而广泛应用于光纤通信、红外遥感、光学检测等领域中。



- **液相外延**：由溶液中析出固相物质并沉积在衬底上生成单晶薄层的方法。
- **分子束外延（MBE）**是新发展起来的外延制膜方法，也是一种特殊的真空镀膜工艺。外延是一种制备单晶薄膜的新技术，它是在适当的衬底与合适的条件下，沿衬底材料晶轴方向逐层生长薄膜的方法。该技术的优点是：使用的衬底温度低，膜层生长速率慢，束流强度易于精确控制，膜层组分和掺杂浓度可随源的变化而迅速调整。用这种技术已能制备薄到几十个原子层的单晶薄膜，以及交替生长不同组分、不同掺杂的薄膜而形成的超薄层量子显微结构材料。

- **金属有机物化学气相沉积(metal organic chemical vapour deposition)**：又称有机金属化合物气相沉积法。一种利用有机金属热分解反应进行气相外延生长薄膜的化学气相沉积技术。该方法现在主要用于化合物半导体的气相生长上。用该法制备薄膜时，作为含有化合物半导体元素的原料化合物，必须满足常温稳定且易处理，在室温附近有适当的蒸气压，反应的副产物不应妨碍晶体生长，不应污染生长层等条件。因此常选用金属的烷基或芳基衍生物、羟基衍生物、羟基衍生物等为原料。它最主要的特点是沉积温度低。另外由于不采用卤化物原料，因此在沉积中不存在刻蚀反应；适用范围广，几乎可生长所有化合物和合金半导体；生长温度范围宽，适宜大批量生产。但该方法也存在一些缺点：难以进行原位监测生长过程，许多有机金属化合物蒸气有毒、易燃；反应温度低，因此有时在气相中就发生反应。

- **量子效率**：是器件对光敏感性的精确测量。如底片、感光耦合元件（英语：charge-coupled device, CCD）将其受光表面接收到的光子转换为电子-空穴对的百分比例，即量子效率 = 光生电子-空穴对数 / 入射光子数。由于光子的能量与波长的倒数成比例，量子效率的测量通常是在一段波长范围内进行。底片的量子效率通常少于10%，而感光耦合元件在某些波长位置具有超过90%的效率。
- **暗电流**：是指器件在反偏压条件下，没有入射光时产生的反向直流电流。光电倍增管在无辐射作用下的阳极输出电流，或光伏电池在无光照时，由外电压作用下P-N结内流过的单向电流。光电耦合器的输出特性是指在一定的发光电流IF下，光敏管所加偏置电压VCE与输出电流IC之间的关系，当IF=0时，发光二极管不发光，此时的光敏晶体管集电极输出电流称为暗电流，一般很小。暗电流包括晶体材料表面缺陷形成的泄漏电流和载流子热扩散形成的本征暗电流。

02

InGaAs探测器性能参数

✓ 响应度

□ 若入射光功率为 P_{in} , h 为普朗克常数, ν 为电磁波频率, α 为吸收系数, W 为耗尽层宽度, L_n 为 P 区少子扩散长度, q 为电子电荷, n_{p0} 为 P 区平衡态少子浓度, D_n 为 P 区少子扩散系数, 则入射光功率为 P_{in} 时, 产生的光生电流为:

$$I = \frac{q(\frac{P_{in}}{h\nu})[1 - \exp(-\alpha W)]}{1 + \alpha L_n} + \frac{qn_{p0}D_n}{L_n} \approx \frac{q(\frac{P_{in}}{h\nu})[1 - \exp(-\alpha W)]}{1 + \alpha L_n}$$

□ 从上式中可以看出, 耗尽层宽度 W 越大, 光电流越大。为了提高量子效率, 在 P型半导体和 N型半导体之间插入不掺杂的本征 i 层, 形成 PIN 型结构来增加耗尽层宽度。

耗尽层, 是指 PN 结中在漂移运动和扩散作用的双重影响下载流子数量非常少的一个高电阻区域。耗尽层的宽度与材料本身性质、温度以及偏置电压的大小有关。

□ 得到在一定入射光功率下的响应度表达式:

$$R_i = \frac{\frac{q}{h\nu}[1 - \exp(-\alpha W)]}{1 + \alpha L_n}$$

□ 而响应度又可以表述为: $R_i = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{q\eta}{h\nu}$

□ 如果不考虑在入射面的反射, 可以得到器件的量子效率:

$$\eta = \frac{1 - \exp(-\alpha W)}{1 + \alpha L_n}$$

□ 考虑入射到探测器表面会损失一部分能力, 反射率 R , 则

$$\eta = (1 - R) \frac{1 - \exp(-\alpha W)}{1 + \alpha L_n}$$

□ 由于在一定波长范围内, InP/InGaAs PIN 探测器的响应度为量子效率的增函数, 二者都与波长相关; 但探测器的响应度和响应频率相互制约, 并且都与耗尽层宽度有关。所以, 可以通过优化设计耗尽层的厚度, 选择合适的量子效率和响应频率。

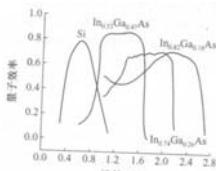
✓ 探测率

□ 光伏型探测器的探测率可以表示为:

$$D^* = \frac{\eta q}{E_g} \sqrt{\frac{R_0 A}{4kT}}$$

□ E_g 为禁带宽度, $R_0 A$ 为零偏压下电阻与探测器光敏面积的乘积, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度。

□ 当温度和材料的组成成分确定后, 禁带宽度就是常数, 探测率仅由探测器的量子效率和器件的 $R_0 A$ 决定。

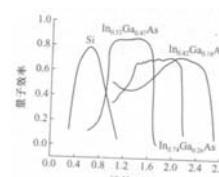


不同组分 InGaAs 的量子效率

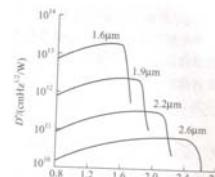
InGaAs 探测器在不同截止波长的探测率 D^*

□ 由左图可以看出, 随着 In 含量的增加, 探测波段向长波方向移动。

□ 由右图可以看出, 随着 InGaAs 探测器截止波长的增加, 探测器量子效率与探测率逐渐降低。主要因为随着 InGaAs 探测器截止波长的增加, InGaAs 吸收层与衬底 InP 的晶格失配增大, 也会使暗电流增大, 这些原因使 InGaAs 探测器量子效率与探测率随截止波长的增加而降低。



不同组分 InGaAs 的量子效率

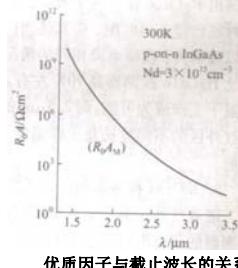


InGaAs 探测器在不同截止波长的探测率 D^*

✓ 优质因子

□ 零偏压下电阻与探测器光敏面积的乘积 $R_0 A$ 称为 **优质因子**。它与器件面积无关, 只与器件内在的性能有关。它由探测器的零偏压下暗电流噪声决定。

□ 图给出了室温下 InGaAs 探测器的优质因子与截止波长的关系, 随着截止波长的增加, InGaAs 探测器的优质因子相应减小。



优质因子与截止波长的关系

✓ InGaAs 探测器的应用与发展

□ 军事: 夜视、侦察、红外制导、红外成像、红外遥感、雷达与测距等;

□ 民用: 光纤通信、污染监控、光电传感、工业过程控制, 以及汽车尾气监控

✓ 目前, InGaAs 探测器的研究主要集中在:

□ 优化单元器件的性能, 提高响应速度和探测率;

□ 增大 InGaAs 红外焦平面探测器阵列的面积, 增大焦平面阵列探测器的像素数量;

□ 扩展探测波长并提高扩展波长探测器的性能。

➢ 探测器波长向长波方向发展

➢ 探测器波长向短波方向发展

03

InSb探测器

✓ InSb探测器的物理特性及性能参数

□ InSb材料的禁带宽度在室温下为0.17eV，它具有大于7μm的光谱响应长波限。响应时间比HgCdTe还小一个数量级，达到10⁻⁸s。由于InSb的迁移率高，在中红外波段具有较高的灵敏度，并且可以通过熔融法和外延法将半导体制成单晶体，是理想的中波红外材料。InSb还具有工艺成熟、均匀性好等优点。

□ 常用的有光电导型和光伏型两种

✓ 光电导型InSb探测器的物理特性及性能参数

□ 将符合要求的光电导InSb单晶材料，按要求切成薄片，进行磨、抛和化学腐蚀，粘贴在衬底上，经精细加工后制备成电极，焊接引线，封装杜瓦瓶，就可制成低温工作的单元光电导InSb探测器。

□ 在目前生产的光电导InSb探测器中，性能最好的还是工作于77K的低温探测器。室温InSb探测器的噪声主要由热噪声限制，但在77K工作的低温InSb探测器却有明显的1/f噪声。

□ 依据热电子光电导率的物理机制，可以推导出光电导型InSb探测器电压响应率和响应时间的表达式。电导率σ可以写成：

$$\sigma = \sigma_0(1 + \beta E^2)$$

□ 式中，E为探测器上的电场。当电场足够小（对于InSb探测器，4K时，电场小于0.1V/cm）时，θ是常数。当电场E和θ只有较小的改变时，可以近似地表示为：

$$\beta = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dE^2}$$

□ 此时， $\sigma = \sigma_0(1 + \beta E^2)$

仍可表示较大电场的电导率σ特性。从而，可以得到光电导型InSb探测器的响应率：

$$R_{0v} = \beta V / v\sigma$$

□ 响应时间 $\tau = \frac{3}{2} \left(\frac{k}{e} \right) \beta / \frac{d\mu}{dT}$

式中：V为探测器采用的电压；v为探测器的体积；k为玻尔兹曼常数；μ为电子迁移率。直接测量电流-特性可以计算上两公式中出现的参量。

□ 得到： $R = \frac{2}{3} \left(\frac{\tau}{nk} \right) \left(\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT} \right) \frac{V}{v}$

其中，温度低于100K时，载流子浓度n是独立于温度的，而因子 $(1/\mu)(d\mu/dT)$ 随温度T缓慢变化。因此，实际上探测率R正比于响应时间τ。

□ 如果光谱响应限制波长λ满足以下条件：

$$\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$$

式中，λ₁、λ₂分别是光谱响应和短波限和长波限。

□ 则噪声等效功率NEP(即P_N)可以由下式给出：

$$P_N = [2(kT)^{5/2} / ch^{3/2}] [BA\alpha \cos \theta]^{1/2} [J_4(x_1) - J_4(x_2)]^{1/2}$$

式中，h为普朗克常数，c为光速，T为探测器背景的绝对温度（而不是探测器自身的温度），α光学吸收系数，A为探测器的有效接收面积，B为探测器输出电路的带宽。

□ 假定光学元件限制了探测器的视场，较小的立体角α在探测器接收面A的法线方向的投影角为θ，则

$$J_4(x) = \int_0^x \frac{x^4 \exp(x)}{(\exp(x)-1)^2} dx$$

其中， $x = hc/kT\lambda$ 。波长较长时，x值很小，可以采用近似的表达式进行计算。

□ 因此，当x→0，利用Rayleigh-Jeans近似，P_N式可以简化为

$$P_N = [2(kT)^{5/2} / ch^{3/2}] [BA\alpha \cos \theta]^{1/2} \left[\frac{1}{3} (x_1 - x_2)(x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2) \right]^{1/2} \\ = 1.60 \times 10^{-18} T^{5/2} [(AB\alpha \cos \theta)(x_1 - x_2)(x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2)]^{1/2}$$

□ 因子Aα cos θ表示探测器可以被视为一个遵循朗伯定律的漫反射镜。由于进入探测器入射窗口的辐射经过多次反射后将被探测器单元吸收，该系统的光学特性类似于微波天线情况，根据微波天线理论，可以采用以下近似：

$$A\alpha \cos \theta \sim \lambda^2$$

□ 假定(v₁-v₂)响应带宽内探测器与背景的频率相匹配，噪声等效功率的表达式可以简化为：

$$P_N = \sqrt{2kT[B(v_1 - v_2)]}^{1/2}$$

□ P_N独立于探测器面积。

✓ 光伏型InSb探测器的物理特性及性能参数

- 光伏型InSb探测器的制备工艺，与光电导型InSb探测器的制备工艺类似，但还需要重要的成结工艺与P-N结台面工艺。InSb的禁带宽度较窄，室温下难以产生光伏效应，所以InSb光伏型探测器总是在低温条件下工作，常用的工作温度77K。
- 光伏型InSb探测器器件的量子效率与扩散结深、光敏面反射系数、工作温度、扩散层杂质浓度、衬底杂质浓度和衬底厚度等参数有关。

04

InSb探测器性能水平

- ✓ 为了提高红外系统的作用距离、响应速度及扩大视场和简化光机扫描结构，红外探测器由单元向多元和焦平面阵列方向发展。
- ✓ 随着材料和加工工艺的成熟，InSb焦平面阵列成为研究热点。
- ✓ InSb焦平面阵列的最终性能和**InSb探测器阵列芯片性能、读出电路性能、钢柱生长互连质量和芯片背减薄水平密切相关。**
- ✓ InSb体晶体生长加工技术和芯片背减薄技术的成熟和完善使得InSb焦平面阵列的规模和产量迅速发展。

✓ 工作于制冷条件下的InSb探测器性能水平

- Phoenix InSb探测器阵列采用了多种关键技术：工作温度为30K，使得暗电流在允许范围内；采用**相关双采样技术**去除了信号的长期飘逸；在积分过程中增加了对输出信号的采样，进一步降低了白噪声的影响；在积分的始末测量参考像素并从数据中减去偏移量进一步抑制漂移；限制等效噪声带宽也降低了读出电路和分析处理电路的白噪声；采用阻抗与地基参考相匹配的不同放大器来降低共模噪声。

✓ 工作于室温条件下的InSb探测器性能水平

- InSb光伏探测器的响应率**不依赖于斩波频率**，当信号从直流到500Hz变化时其响应率保持不变，这确保了InSb光伏探测器的**准静态和高速率**工作。对于热释电元件，当没有热量变化时，产生的电压将消失；并且由于输出依赖于元件吸收红外辐射后的温度变化，在高斩波频率时热释电元件的响应率很低。而封装后的InSb光伏探测器的噪声电压和探测率都不随斩波频率而变化，意味着系统不受外界热波动和噪声源的影响。在没有制冷和热绝缘的条件，室温工作时，InSb光伏探测器仍能输出满意的信号。

05

InSb探测器的应用和发展

- ✓ InSb探测器的光谱响应范围为1~5.5μm，为了使其仅在近红外波段工作，可以配备带通滤光片，是InSb探测器工作于3~5.5μm波段。
- ✓ 在3~5.5μm中红外探测中，常用的红外焦平面阵列主要有InSb和HgCdTe探测器，由于InSb焦平面阵列的**空间均匀性好，图像扭曲少，稳定性高**等优点，使得InSb焦平面阵列更具优势。
- ✓ 现在InSb红外焦平面阵列的发展以**凝视型为主**，凝视型InSb红外焦平面阵列按照用途形成了不同的技术特点。在低背景战略和空间应用中的InSb阵列，其特点为规模大、噪声低、工作温度低、帧频低；在中、高背景战术应用中的InSb阵列主要用于导弹制导和成像，其阵列具有规模适度、电荷处理能力强、帧频高等特点。
- ✓ 随着对中波红外焦平面阵列需求的增长，InSb探测器阵列主要发展方向为：更大规模化的InSb，每个阵列包含更多的像素；每个像素的读出噪声更低；阵列的小型化。

06

HgCdTe探测器

- ✓ HgCdTe可以制成**光伏型探测器**和**光导型探测器**。
- ✓ 光电导型器件结构较为简单、易于制作，但功耗大、响应速度较慢。光伏型器件具有功耗小、响应快的特点。
- ✓ HgCdTe红外探测器经历了**单元探测器、线阵探测器、面阵探测器的发展历程**，并向双色多色探测波段发展。
- ✓ 第三代红外探测器通常是指具有**更多的像元、更高的帧频、更好的热分辨率、多色功能**以及其他片上功能的探测器。
- ✓ 这些器件包括：具有双色和多色波段和高性能、高分辨率制冷成像器；中到高性能的非制冷成像器；低成本的一次性非制冷成像器。

- ✓ 第三代红外系统的发展对HgCdTe红外焦平面（IRFPA）技术提出了新的挑战，需要具备更大的焦平面规模（大于百万像素）以及红外多光谱同时集成的探测能力。
- ✓ 由于HgCdTe技术具有超高真空生长环境、低温生长条件等特点，在实现多层次复杂结构的生长和控制上有较大的优势，满足第三代红外探测器要求的HgCdTe IRFPA材料制备技术成为研究热点。

- ✓ 近年来的研究：
- 利用**镀增透膜的方法**改善HgCdTe光伏探测器的性能，使得黑体探测率、响应率和量子效率均有明显提高；
- 对**三色**HgCdTe探测器进行优化设计；
- 利用**新的材料生长技术**已满足探测器和读出电路的集成化。
- **大规模、小型化**，像元数目高达 10^6 以上，像元尺寸及间距越来越小，使得空间分辨率更高；
- **多色化**，HgCdTe探测器的探测波段从单色发展到多色，以便能获得更多的目标信息；
- **响应波段的扩展**，向极长波方向发展；
- **室温化**，非制冷HgCdTe红外焦平面阵列具有体积小、重量轻、低成本的特点，具有广阔的应用前景；放大型红外探测器。

6.5新型红外探测器件与技术

- 6.5.1量子阱红外探测器
- 6.5.2红外单光子探测器
- 6.5.3双/多光子红外探测
- 6.5.4多/超光谱探测
- 6.5.5探测红限的Franz-Keldysh偏移

01

量子阱红外探测器

- ✓ 将两种不同禁带宽度的半导体材料用人工方法薄层交替生长形成超晶格，在其界面有能带突变，使得电子和空穴被限制在低势能阱内，从而能量量子化形成量子阱。
- ✓ 量子阱红外探测器（Quantum well infrared phot-conductor, QWIP）是利用参杂量子阱的导带中形成的子带间跃迁，并将从基态激发到第一激发态的电子通过电场作用形成光电流这一物理过程，实现对红外辐射的探测。
- ✓ 量子阱红外探测器的核心原理是子带间跃迁。当红外光子照射到量子阱结构上时，能量足够的光子会激发阱中的电子从基态跃迁到连续态，从而产生光电流。这种机制使得QWIP 对长波红外光（如8–12 μm）特别敏感。
- ✓ 目前主流的量子阱红外探测器采用GaAs/AlGaAs材料体系，具有良好的晶格匹配性和可调带隙特性。此外，也有研究采用非均匀量子阱结构，通过调节势垒宽度和掺杂浓度来优化器件性能

- ✓ 与其他红外技术相比，QWIP具有响应速度快、探测率与HgCdTe红外探测器相近、探测波长可通过量子阱参数的调整加以控制等优点，而且利用MOCVD等先进工艺可生长出高品质、大面积和均匀的多量子阱材料，容易做出大面积的探测器阵列，近20年来，量子阱红外探测器已经从单元器件发展到焦平面器件，成为红外焦平面研究的热点之一。
- ✓ 量子阱红外焦平面探测器由于自身特有的优越性，加之近十年来的加速发展，在红外技术领域具有广阔的应用前景，可用于军事应用中的现代化高科技武器装备、民用中的生物医疗成像等。

应用领域	典型用途	市场规模趋势
军事	红外成像、目标识别	持续增长
航空航天	卫星遥感、气象监测	快速发展
汽车	自动驾驶激光雷达、夜视系统	新兴市场
医疗与科研	热成像、生物检测	稳步提升

- ✓ 作为双色或多色焦平面器件，用于地球资源特别是矿物资源探测、导弹狙击等。
- ✓ 长波或超长波焦平面器件，用于空间资源包括大气分布、温度分布等检测。
- ✓ 由于具有抗辐射能力，特别适于天基红外探测及其应用。
- ✓ 量子阱焦平面器件的发展趋势：
 - N型量子阱红外焦平面器件的大面积化及性能的进一步提高；
 - 高温化，进一步提高工作温度，以降低器件对制冷的要求，降低成本、功耗及系统体积；
 - 双色及多色焦平面；
 - 基长波红外探测器及其他低维结构（量子点或量子线）的量子器件；
 - 正入射红外光响应的P型量子阱红外焦平面。

02

红外单光子探测器

- ✓ 单光子探测技术是一种微光检测的前沿技术。红外单光子探测面对的是能量更小的红外光子，因而较可见光范围的单光子有更大的难度和更高的技术要求。
- ✓ 单光子探测所探测的光产生的光电流强度比光电检测器本身在室温下的热噪声还要低，通常的直流检测方法不能把这种淹没在噪声中的信号提取出来。由于在单光子检测中，光子信号和噪声信号都是以技术脉冲的形式出现，可利用弱光照射下光子探测器输出电信号自然离散的特点，采用脉冲甄别技术和数字计数技术实现对单光子的探测。

- ✓ 红外单光子探测器是能精确探测单个红外光子的高端器件，核心技术涉及降低暗计数和提升稳定性，已广泛应用于量子通信、生物医学成像等领域，国产技术正逐步突破国际封锁。

□ 超低噪声与制冷技术

- 国产全球首款四通道超低噪声半导体单光子探测器实现量产，最低工作温度达 $**-120^{\circ}\text{C}$ （较此前 -50°C 大幅降低），暗噪声在20%探测效率下降低约90%，暗计数率约100Hz**，达国际超低水平。
- 关键技术：攻克热声制冷机小型化、制冷器密封可靠性及通道间串扰抑制，突破体积与功耗限制。

□ 高集成度与探测效率

- 首创四通道集成架构，体积仅为国际同类单通道产品的1/9，单台设备可替代多台协同工作。
- 最大探测效率从25%提升至35%，灵敏度接近物理极限，支持极弱光环境探测。

□ 国产化自主可控

- 由国盾量子主导研发，基于中国科大、中科院量子创新院专利技术，具备批量生产与交付能力。
- 打破欧美在高端探测器芯片（如InP/InGaAs）的禁运限制，云南大学已实现室温高性能SPAD芯片（暗计数率6.82kHz，优于国际60kHz）。

产品型号	技术类型	波长范围 (nm)	探测效率	暗计数率	应用场景
KLH3-VT	SiPM	可见光-近红外	>20%	低	量子通信、生物成像
云南大学 InP/InGaAs	半导体芯片	短波红外	20%	6.82kHz	激光雷达、量子雷达
DL-SPD系列	APD (盖革模式)	400-1700	30%	100Hz	科研实验、工业缺陷检测

指标	国产水平	国际标杆 (如瑞士ID Quantique)
探测效率	35% (四通道)	30%@1550nm (ID230)
暗计数率	$\approx 100\text{Hz}$	100cps (ID230)
工作温度	-120°C (制冷)	-80°C (ID230)
集成度	四通道单机集成	单通道为主

- ✓ 超导单光子探测器相对晶体管探测器具有如下优点：由于工作于液氮温度，具有很低的噪声、很高的探测率、几乎可以忽略的暗计数、超快的响应时间、低的时间抖动、宽的探测范围（从紫外到中红外）。
- ✓ 长波红外和远红外单光子的聚集载流子增强传感器可以应用与生物光子学、医学断层摄影、非破坏性材料检测、国家安全检测、军事观察、量子成像和量子密码系统。
- ✓ 单光子探测器是量子保密通信中的核心器件，在量子通信领域对于红外单光子探测器的要求：
- 在比较宽的光谱范围内保持较高的量子效率；
- 探测器的噪声，即没有光子时产生信号的几率应该足够小；
- 从探测器接收光子到输出电信号的时间应该尽量保持为常数，保证较好的时间同步，利于长时间通信；
- 回复时间应该足够短、利于高码率传输。

03

双/多光子红外探测

- ✓ 所谓双(多)光子吸收，是指强光作用下，介质分子同时吸收两个(多)光子，通过一个虚中间态跃迁到高能态的过程。
- ✓ 双/多光子红外探测基于非线性光学效应，核心是利用材料对红外光子的双光子或多光子吸收，将红外信号转换为可见光或电信号。例如，非简并双光子吸收技术通过强泵浦光辅助，使红外光子在硅探测器中激发载流子，实现高灵敏度探测。与传统单光子探测相比，其无需相位匹配，光路调节更简便，且可覆盖宽带光谱。
- ✓ 双/多光子红外探测的关键优势包括：
- 高灵敏度：如华东师范大学团队采用 $3\mu\text{m}$ 中波红外泵浦光，将探测灵敏度提升1-2个量级，信噪比显著改善；
- 深穿透能力：双光子显微镜可穿透烟草叶 $120\mu\text{m}$ 全厚度，适用于厚组织样品；
- 抗干扰性：多光谱技术（如霍尼韦尔FS24X的IR/IR/IR/Visible四频探测）有效过滤环境噪声。

- ✓ 与单光子吸收相比，双光子吸收具有以下特点：
- 双光子吸收跃迁概率比单光子吸收的跃迁概率要小得多，但激光的高亮度特性使得双光子吸收变得易于观察；
- 双光子吸收的截止波长远离单光子吸收区，例如禁带宽度 1.12eV 的Si的多光子吸收限可达到 $11\mu\text{m}$ ，进入中远红外；
- 由于双光子吸收与入射光强的平方成正比，双光子吸收过程被准确地定域在焦点附近的很小区域（体积数量级为 λ^3 ），使双光子过程具有极其优越的空间分辨率和空间选择性，且随后发生的诸如荧光或化学反应过程都被定域在这个极小的体积范围内。
- 因此，双光子吸收在光电对抗、探测器强激光保护、双光子激发荧光显示镜、频率上转换激光器、光限幅和光稳幅、三维微加工、光动力医疗、三维光信息存储等方面具有广阔的应用前景而成为近年来研究的热点。

应用领域	典型技术/产品	核心优势
生物医学成像	双红外2光子显微镜（1640nm激光）	实现脑切片300μm深层成像，消除背景自发荧光，分辨率接近阿贝极限
工业安全检测	霍尼韦尔FS24X多光谱三频红外火焰探测器（4.3μm宽频红外+可见光技术）	抗误报能力强，双微处理器确保高探测性能，适用于石油、化工等危险环境
量子光谱分析	混合双光子光谱仪（可见光+近红外光子联合探测）	时间分辨率达150ps，捕捉分子动力学过程，推动量子信息与通信技术发展
材料科学研究	STELLARIS 8 DIVE激光共聚焦显微镜（800-1300nm可调红外激光）	支持活体小动物成像、三维重构及FRAP/FRET分析，适用于神经生物学、类器官研究

04

多/超光谱探测

- ✓ 多光谱、超光谱成像技术不同于一般的单一波段成像技术，它将光学、光谱学、精密机械、电子技术及计算机技术相结合，能获得空间维和光谱维的丰富信息，形成所谓的“**数据立方**”，不但包括了物体的空间信息，而且每个像元都可以提取一条连续的光谱曲线，光谱范围可以从紫外到可见光，直至红外，**包含了丰富的光谱信息**。丰富的目标光谱信息结合目标空间映像极大地**提高了目标的探测准确性**，扩展了传统探测技术的功能。
- ✓ 多光谱与超光谱探测是**结合成像与光谱分析的技术**，通过不同波段数量和分辨率实现目标精准识别，广泛应用于军事、环境、农业等领域，两者各有优势且场景互补。

技术指标	多光谱探测	超光谱探测
工作波段数	10-20个	100-200个（超高光谱达约1000个）
光谱分辨率 ($\Delta\lambda/\lambda$)	0.1左右	0.01左右（超高光谱≤0.001）
适用特点	特定场景优化，经济简便	多场景适应，光谱分辨率高

- ✓ 多光谱、超光谱成像技术的发展趋势
 - 多光谱、超光谱成像技术除了优先应用于军事领域，在民用领域的应用也越来越广泛；
 - 各种目标/背景光谱特性的研究将越来越深入，建立大量标准光谱特性数据库；
 - 各种新材料、新技术的应用导致新的成像光谱仪体积更小、性能更高；
 - 大规模传感器阵列、读出电路、存储介质和信息处理技术的发展，推动该技术向更高的光谱分辨率、更高的空间分辨率方向发展；
 - 光谱、图像数据的处理算法将更高效、快捷，进一步满足实时处理的需要。

- ✓ 军事应用：
 - 多光谱：海湾战争中美军用于解决热背景干扰问题，通过优化波段区分目标与背景。
 - 超光谱：可穿透伪装，识别生化战剂（如长波红外波段探测化学物质特征吸收光谱）。
- ✓ 民用领域：环境监测（污染物分布）、农业（作物健康评估）、医疗（皮肤病变检测）等。

05

探测红限的Franz-Keldysh偏移

- ✓ 探测红限的Franz-Keldysh偏移是指在强电场作用下，半导体材料的光吸收峰值波长向长波长方向（即红光方向）偏移的现象。这种效应是由Franz-Keldysh效应引起的，该效应描述了在强电场中，半导体的能带结构发生变化，导致光吸收特性发生改变。
- ✓ 1958年，Franz和Keldysh在研究外加电场引起半导体吸收边变化时发现，在强电场作用下，半导体材料的禁带宽度 E_g 会变小，材料的吸收波长向光子能量小的方向移动，或者说半导体探测器的截止波长会向较长波方向移动，这种现象称为Franz-Keldysh效应（F-K效应）
- ✓ 实验研究背景
- 对(HgCd)Te探测器峰值响应波长的Franz-Keldysh偏移进行了实验研究。实验结果表明，在强电场中，(HgCd)Te具有很强的Franz-Keldysh效应，因而可能导致光吸收峰值波长向长波长方向的明显偏移。该效应的有效强度与(HgCd)Te探测器的外加偏压有关。

- ✓ 强场效应与载流子动力学
- 在强场激光与固态物质相互作用的研究中，动态Franz-Keldysh效应是调控电子动力学、探索非平衡态量子现象的核心手段之一。例如，在负时间延迟区域（泵浦光先于探测光到达），谐波能谱呈现红移，主要由**激子AC Stark效应**和**动态Franz-Keldysh效应**主导；而在正延迟区域（载流子已被激发至导带），则有**质动力效应**起主导作用，导致能谱发生蓝移。该实验首次在同一条件下观测到强场效应随载流子布居变化的动态交叉过渡行为，并实现了百meV量级的能量偏移的双向调控。
- ✓ 光电导中的Franz-Keldysh效应
- 光电导的Franz-Keldysh效应研究显示，该效应使得半导体的发光波长向长波方向偏移，也就是说能量低于禁带宽度的光子也可以将价带电子激发到导带，从而在半导体中产生电子和空穴载流子。对Franz-Keldysh效应的深入分析，可以为**光电导的波长效应**和**亚阈值激发技术**提供理论基础，对新型光电导器件的研究具有十分重要的意义。

- ✓ 典型应用：
- 光与红外探测器的强激光保护
- 高速光通信领域的EAM(电吸收调制器)
- 用于材料表面和界面特性分析
- ✓ 总结
- 探测红限的Franz-Keldysh偏移是强电场或强光场作用下半导体材料的一种重要光学效应，其**核心机制是能带结构在外部场作用下的调制**。该效应在光电探测器、光调制器、光电导器件等领域具有重要应用价值，通过调控外加电场或光场强度，可以实现对材料光吸收特性的精确控制。

