

讲座

天文用红外探测器

钱忠钰

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文首先回顾天文用红外探测器的发展过程,然后依次叙述它们的分类、主要特点,以及天文应用时的主要参数。目前天文上常用的红外探测器以及当前的发展趋势亦将作简单介绍,最后将介绍一些与红外探测器用于天文观测有关的内容以及国内这方面的工作。

一、历史的回顾

第一个天文用红外探测器是玻璃温度计。1800年, W. Herschel 在它研究太阳光谱时,首次发现了肉眼看不见的红外辐射,这个重要的发现给天文观测以及给电磁辐射的研究开拓了新的领域^[1]。

在其后的年代里,人们发明了不少种类的红外探测器,如蒿莱探测器(Golay cell)、热电阻和热电偶探测器等,它们都是热探测器,即利用红外辐射的热效应来探测它们。这些探测器曾被广泛地应用于实验室,但是对红外天文观测来讲,它们的灵敏度就显得太低了。所以在很长的时间内,红外天文观测的目标仅限于太阳、月亮和一些比较亮的行星。

直到两次世界大战后的1947年,发现了半导体,其后又发明了晶体管,提出了半导体的能带理论,这些发现和发明为研制高性能的红外探测器提供了理论指导和开辟了广阔的前景。再测,与红外探测有关的真空、低温和自动控制技术也有了巨大的进展,为红外天文研究提供了极为有利的条件。

国防和军事上的需要也是促进红外技术和红外天文观测发展的巨大动力,如夜视、红外跟踪和制导、资源卫星和预警卫星等绝大多数工作在红外波段,而红外天文观测则为分析卫星数据提供了必不可少的背景资料。

目前天文用红外探测器几乎完全是半导体探测器的天下。它的发展过程大体可分成两个阶段:五十年代到六十年代为第一阶段,研究的重点为根据半导体能带理论,寻找和制备适用于不同探测要求的新材料;从七十年代开始,研究重点转向改进工艺水平,提高红外探测器的性能,使之尽可能接近所能达到的理论极限。

近年来,红外列阵探测器引起了人们广泛的重视,主要集中于各种类型的红外电荷耦合

1983年10月9日收到。

1984年4月14日收到修改稿。

器件(IRCCD)和电荷注入器件(IRCID),并且已取得了初步的天文观测结果。尽管这些工作还处于开创阶段,但已展示出光明的前景,人们期望,它将给红外天文学的发展带来新的飞跃。

二、天文用红外探测器的分类和特点^{[2], [5]}

按作用机制来分,红外探测器可以分成两大类:热探测器和光子探测器。前者是利用红外辐射的热效应,即入射的红外辐射加热探测器材料,从而改变其物理特性。半导体材料的电导率有很高的温度系数,是制作这种探测器的理想材料。

这类探测器的主要特点是其归一化探测率 D^* 无明显的波长依赖性(归一化探测率 D^* 定义为单位入射功率、单位带宽所获得的信噪比除以探测器面积的平方根),人们可以用它来探测可见光、近红外以至远红外辐射,如图1所示。这类探测器的另一个特点是大多工作在4.2K以下的超低温,以获得高的探测率。目前广泛使用的Ge-Bolometer就是这种探测器的典型代表,工作波长从 $1\mu\text{m}$ 到 1mm ,典型工作温度1.6K。

光子探测器是另一类红外探测器,它的基本原理是入射光子激发半导体材料中的电子,从而改变半导体材料的电气特性。这类探测器以入射光子和材料中电子相互作用为基础,所以探测率具有明显的波长依赖性。

根据半导体的能带理论,半导体材料中的电子绝大多数处于价带,即被晶格原子牢牢地束缚住,当这些电子和入射光子相互作用而获得附加能量时,就可能越过禁带而进入导带,于是我们就“看”到在半导体材料中产生了一个电子-空穴对,它们的出现将改变材料的电气特性。这种变化就可作为入射光子的量度。

探测率的波长依赖性有两个方面的含义,其一是指存在一个阈值波长 λ_0 ,只有入射辐射的波长短于 λ_0 时才能被探测, λ_0 对于不同的材料有不同的值。 $\lambda_0=hc/E_g$, h 为普朗克常数, c 为光速, E_g 则是探测器材料的禁带宽度。显然波长短于 λ_0 的入射光子携带的能量大于 E_g ,就可能把价带中的电子激发到导带,产生电子-空穴对,而波长大于 λ_0 的入射光子能量小于 E_g ,不能产生电子-空穴对,也就不能被探测。

探测率波长依赖性的另一个含义是指在可探测波长范围之内,探测率常随波长增大而提高,直到阈值波长而迅速下降到零。这是由于这类探测器的量子效率——每个入射光子产生电子-空穴对的几率——在可探测波长范围内变化不大,而波长长的光子携带的能量较少,所以显示出较高的探测率,见图1。

光子探测器还可被分成光导(pc)和光伏(pv)两种类型。光导探测器是一个光敏电阻,入射辐射产生电子-空穴对后将改变其电阻值,如果让恒定电流流过探测器,就可得到与入射光子流量变化相应的电压信号,见图2。硫化铅(PbS)就是这种光导探测器,它的禁带宽度为 0.38eV ,相应阈值波长为 $3.3\mu\text{m}$,工作温度通常为193K。

硫化铅为本征半导体器件,在光导探测器中,用得更多的还是掺杂半导体材料,尤其在中远红外区域用得普遍。所谓掺杂,就是在半导体材料中有意识地掺入一些三价或五价的“杂质”原子,这些原子就在半导体材料中形成了一些附加的能级,这样就改变了材料禁带的

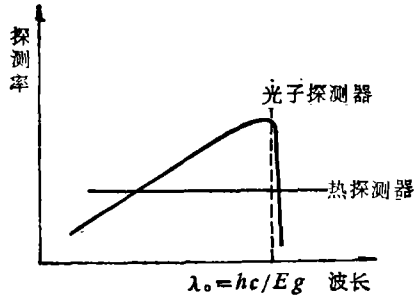


图 1 热探测器和光子探测器的波长响应特征。

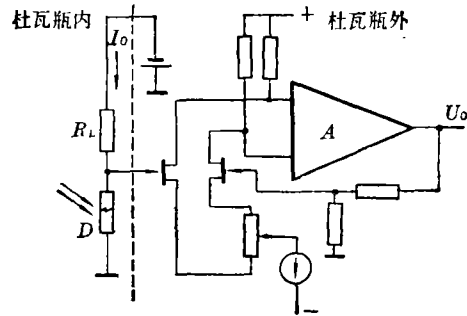


图 2 光导探测器电原理图。

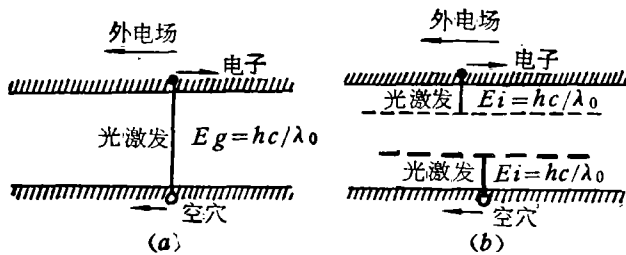


图 3 本征半导体(a)和掺杂半导体(b)的能带图。

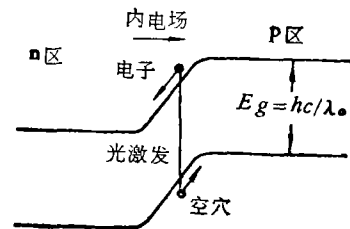


图 4 光伏探测器能带图。

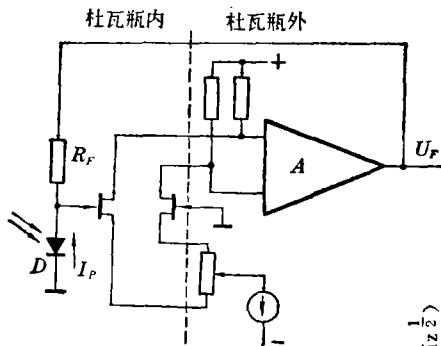


图 5 光伏探测器和 TIA 放大器原理图。

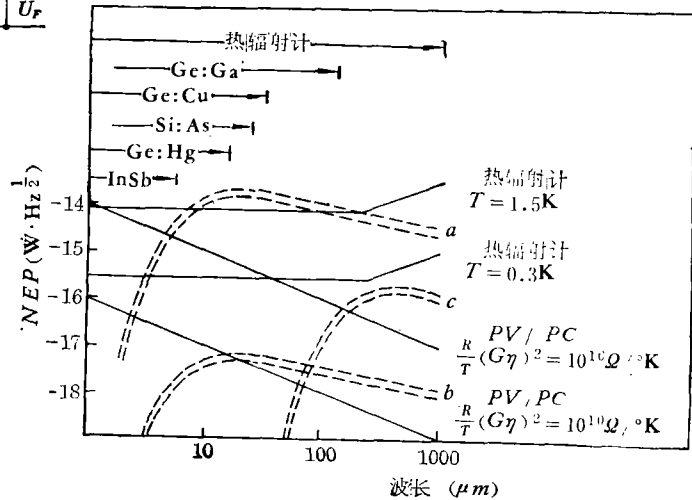


图 6 各类探测器在不同条件下的 NEP 理论极限。实线为探测器噪声限；虚线为背景噪声限，上线为光导，下线为光伏。

a组: $T_b = 300\text{K}$ $\epsilon t \Delta \lambda / \lambda \eta = 0.1$

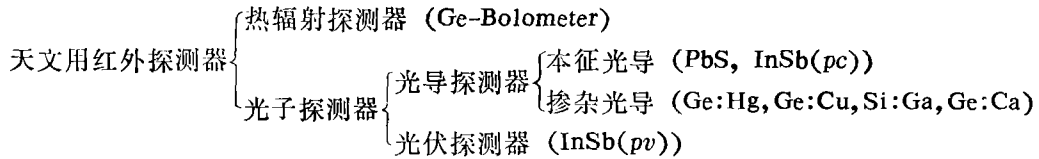
b组: $T_b = 300\text{K}$ $\epsilon t \Delta \lambda / \lambda \eta = 1 \times 10^{-8}$

c组: $T_b = 12\text{K}$ $\epsilon t \Delta \lambda / \lambda \eta = 0.1$

宽度,也就改变了阈值波长,如图3所示。掺杂是一种极有用的手段,可以用来开发具有所希望的波长响应特性的探测器新材料。目前天文上常用的掺杂光导探测器有 Ge:Hg($\lambda_0=10.5\mu\text{m}$), Ge:Cu($\lambda_0=23\mu\text{m}$), Si:Ga($\lambda_0=15\mu\text{m}$)和 Ge:Ga($\lambda_0=100\mu\text{m}$)等。

光伏探测器实际上就是一个光敏二极管,入射光子在结区产生电子-空穴对,它们在内电场的作用下向两极运动,形成光电流,光电流的大小就反映了入射光子的流量。其能级和电气原理见图4和图5。

综上所述,各类天文用红外探测器可以用下表来说明:



三、天文用红外探测器的主要参数^{[6]-[11]}

红外探测器有很多重要的参数,如光谱响应,归一化探测率 D^* ,噪声等效功率 NEP ,量子效率 η 和噪声频谱等,其中噪声等效功率和量子效率对天文应用特别重要。

NEP 是指噪声带宽为1Hz,从探测器获得1:1的信噪比所必须的入射功率,其单位为 $\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。 NEP 和 D^* 之间有如下的关系: $NEP=(A_D)^{1/2}/D^*$,式中 A_D 是探测器光敏面积。由于从 NEP 可以方便地估计出可观测的极限星等,所以在天文界 NEP 比 D^* 使用得更多。

从 NEP 的定义可以看出, NEP 与噪声有直接的关系,一般讲红外探测器在使用中有两大类噪声源,一类来自于红外背景辐射的统计涨落,另一类则是与探测器有关的电气噪声,如探测器热噪声,1/f噪声,电子-空穴对的产生和复合噪声等。

如果探测器工作在背景光子涨落为主要噪声源的条件下,我们就说探测器工作在背景限。背景辐射和背景涨落与下列因素有关:

背景温度 T_b ,对地面常规观测 $T_b\sim 300\text{K}$;

背景材料发射系数 ϵ ,一般取值0.1—0.15;

$A\cdot\Omega$,即主镜面积和视场立体角的乘积;

光谱带宽 $\Delta\lambda$,通常 $\Delta\lambda/\lambda\lesssim 0.2$ (宽带测光);

如果 $\Omega\ll 1$, $A\Omega$ 安排合理(如取 $4\lambda^2$),而且 $\Delta\lambda\ll\lambda$,则背景限的 NEP 有如下的表达式:

$$NEP \approx 7 \times 10^{-12} \lambda \left[F_\lambda(T_b) \frac{\epsilon t}{\eta} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad \text{对光伏和热探测器}$$

$$NEP \approx 1.0 \times 10^{-11} \lambda \left[F_\lambda(T_b) \frac{\epsilon t}{\eta} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right]^{1/2} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad \text{对光导探测器}$$

式中 $F_\lambda(T_b)$ 是黑体辐射的普朗克函数, t 是冷却光学系统的透过率, η 为探测器量子效率。

T_b 和 $\frac{\epsilon t}{\eta} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 取不同值时,背景限 NEP 的变化见图6。

探测器工作在低背景条件下,则背景涨落噪声可以忽略,这时电气噪声成为主要的噪声源,我们称为工作在探测器限。

对于天文上应用的 Ge-Bolometer 这类热探测器, 考虑其热噪声和“phonon”—麦克风噪声, NEP 可表示为:

$$NEP \approx 4T_0(kG)^{\frac{1}{2}}$$

式中 k 是波尔兹曼常数, T_0 为探测器工作温度, G 为灵敏元件和恒温浴之间的热导。

光子探测器电气噪声源较多, 但在理想的工作条件下, 光伏探测器可以只考虑探测器和反馈电阻的热噪声, 光导探测器则除了考虑探测器和负载电阻的热噪声之外, 还应考虑电子-空穴对的产生和复合噪声, 它们在低背景条件下的 NEP 表达式分别为:

$$NEP_{\text{光导}} = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{1}{\eta e} [4kT/R]^{1/2} \approx \frac{9.2 \times 10^{-15}}{\lambda_{(\mu\text{m})} \eta} [T/R_{(M\Omega)}]^{1/2} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$$

$$NEP_{\text{光伏}} = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{1}{\eta e G} [4kT/R]^{1/2} \approx \frac{9.2 \times 10^{-15}}{\lambda_{(\mu\text{m})} \eta G} [T/R_{(M\Omega)}]^{1/2} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$$

式中 c 为光速, h 为普朗克常数, e 为电子电荷, G 为光导增益, T 为探测器和负载电阻或反馈电阻的工作温度, 它们通常都是被一起冷却的, R 对光伏探测器来讲就是探测器和反馈电阻相并联的等效电阻, 对光导探测器来讲就是探测器和负载电阻的并联等效电阻, 通常由于对光导探测器的 $R_L \ll R_D$, 所以第二式中 $R_{(M\Omega)}$ 常可用 $R_{L(M\Omega)}$ 来代替。各种探测器在低背景条件下 NEP 的理论极限值见图 6。

在地面的红外天文观测中, $\lambda < 3\mu\text{m}$ 时, 常工作在探测器噪声限, $3\mu\text{m}$ 以上的宽带测光通常工作在背景限, 在窄带测光和光谱观测时, 情况要视光谱分辨率而定。但是在使用冷却光学系统的大气外观测中, 即使在相当长的工作波长, 仍可工作在探测器噪声限。

天文用红外探测器的另一个重要参数为量子效率 η , 它的含义前面已经谈到。对于 InSb (pv), $\eta \geq 0.50$, 而光导探测器的 η 总和 G 一起出现, G 也难以精确测量, 所以就定义 $\eta_{\text{eff}} = \eta \cdot G$, 称为等效量子效率, 用它来代替 η 。Ge:Cu, Ge:Ga 和 Si:SA 等光导红外探测器的 η_{eff} 可达 0.40—0.50。

热探测器常使用探测量子效率 η_D 的概念, η_D 定义为: $(NEP_{\text{理论值}})^2 / (NEP_{\text{实测值}})^2$, 它表示了实际探测器和理想探测器之间的差距。Ge-Bolometer 的 η_D 可接近于 1。

四、天文上常用的几种红外探测器^{[12]—[19]}

1. 硫化铅 (PbS) 光导探测器是一种优良的近红外探测器, 它在五十年代和六十年代曾广泛地应用于天文观测。它可以工作在室温, 但用于天文观测时, 常被冷却到 193K 的干冰温度, 这时 $\lambda_0 = 3.3\mu\text{m}$, $0.5 \times 0.5\text{mm}^2$ 的探测器电阻约 $10^7\Omega$, $NEP \sim 1 \times 10^{-14} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ (美国 SBRC⁺ 的产品)。为延长其阈值波长, 有时也工作在 77K 的液氮温度, 这时 $\lambda_0 \sim 3.8\mu\text{m}$, 但 NEP 升高。PbS 的电气原理可参看图 2。

2. 碲化铟光伏探测器 (InSb(pv)), 这是七十年代发展起来的优良探测器, 工作波长 1— $5.5\mu\text{m}$, 正好包括了 J、H、K、L 和 M 五个大气窗口, $\eta \geq 0.50$, 它一般工作在 77K 的液氮温度, NEP 通常为 $3 \times 10^{-15} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 左右, 进一步降低工作温度可降低 NEP , 所以不少天文台站

+ Santa Barbara Research Center.

让它工作在 50K 的低温, 这个温度可从对液氮抽气减压到 1—5 托来获得。人们还曾试验让它工作在 4.2K 的液氮温度, 获得了良好的结果, 据报道 NEP 达 $1.5 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 左右, 但工作波长范围将有些缩小。在它通常工作的 50—77K 温度下, 其等效电阻值为 10^8 — $10^{11} \Omega$ (上述参数系美国 SBRC 产品, 天文用低背景 InSb(*pv*) 探测器, $\phi = 0.5 \text{mm}$)。闪光处理 (Flashing), 即用波长 $1.2 \mu\text{m}$ 左右较强的光照射工作状态的探测器, 可以大大提高其电阻, 从而降低其热噪声电流。与 InSb(*pv*) 相匹配的前置放大器就是所谓的 TIA (Transimpedance Amplifier), 即阻抗变换放大器, 它带有安装在探测器附近的冷却的 JFET 高阻抗输入级, 放大器输出为电压信号, 基本结构见图 5。

3. Ge-Bolometer 锗测辐射热探测器, 由天文学家 Low 首先发明。其工作波长可从 $1 \mu\text{m}$ 到 1mm , 工作温度 1.6K 左右, 这可从对液氮抽气减压到 5 托左右来达到。地面红外观测中常被应用于 5— $30 \mu\text{m}$ 的波长范围。天文用 Ge-Bolometer 大多由 Low 的红外实验室公司所生产, 敏感元件直径 $\sim 0.3 \text{mm}$, 厚 0.2mm , 等效电阻约 $10^7 \Omega$, $NEP \sim 7 \times 10^{-15} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。有人用 ^3He 把它冷却到 1.2K 甚至更低的温度, 获得了好的结果。其前放和光导探测器的是相同的。

4. 其它常用的探测器, 在 5— $10 \mu\text{m}$ 范围内, 常使用光导探测器 Si:As 和 Si:Ga; 在 10— $30 \mu\text{m}$, 常使用光导探测器 Ge:Hg 和 Ge:Cu; 在 30— $100 \mu\text{m}$ 范围内, 最常用的是 Ge:Ga, 这通常是应用于高空和大气外的红外观测中。下表列出了天文用的主要光子探测器的概况。

探测器材料	种类	工作温度	阈值波长 $\lambda_0 (\mu\text{m})$	归一化 探测率 D^* $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$	噪声等效功率 NEP $\text{W} / \text{Hz}^{1/2}$
PbS	<i>pc</i>	193K	3.3	$6-8 \times 10^{11}$	$\sim 1 \times 10^{-14}$
	<i>pc</i>	77K	3.8	$1.5-2.5 \times 10^{11}$	
InSb	<i>pv</i>	77K	5.5	$0.8-2.0 \times 10^{11}$	$\sim 3 \times 10^{-15}$
Ge: Au	<i>pc</i>	77K	6	$0.3-0.7 \times 10^{10}$	
Ge: Hg	<i>pc</i>	27K	10.5	$1-2 \times 10^{10}$	
Si: Ga	<i>pc</i>	4.2K	15		9×10^{-17}
Si: As	<i>pc</i>	4.2K	23		1×10^{-16}
Si: P	<i>pc</i>	4.2K	26		6×10^{-17}
Ge: Be	<i>pc</i>	4.2K	40		1×10^{-16}
Ge: Cu	<i>pc</i>	4.2K	23	$1.5-3.0 \times 10^{10}$	
Ge: Ga	<i>pc</i>	4.2K	95		1×10^{-16}

说明: 数据取自不同的资料, 可能有出入, 尤其是 D^* 和 NEP 的值可能不一致, 因表中 D^* 表示的是通用红外探测器的数据, NEP 表示的是天文用探测器的数据。

五、前景展望^{[20]-[29]}

1. 一些性能优良的近红外探测器, 其 NEP 已接近于所能达到的理论极限, 但对中远红外区域的探测器来讲, 情况并不是这样好。这种缺陷原来被掩盖在中远红外区域强烈的背景涨落之中, 随着大气外观测的发展和冷却光学系统的采用, 背景辐射及其涨落大大降低, 使得提高中远红外探测器性能变得更为迫切。硅掺杂的中远红外探测器看来有较好的前景, 因为它

们比锗掺杂的探测器有更低的电气噪声。上节表中所列的 Si:Ga, Si:As 和 Si:P 等就是为空间红外计划研制的。

2. 改变红外探测器的工作条件也常能提高探测器的性能, 如降低工作温度, 使 InSb(*pv*) 在 4.2K 下工作, 使 Ge-Bolometer 在 1.2K 以下工作, 都明显地降低了 NEP。前面也提到, InSb(*pv*) 的 Flashing 处理也能降低 NEP。另外, 美国 Cornell 大学的 Harwitt 教授曾谈到, 给 Ge:Ga(*pc*) 探测器加机械压力, 可使其阈值波长从 $95\mu\text{m}$ 扩展到 $160\mu\text{m}$ 。这类方法简单, 又有相当明显的效果, 天文学家乐于采用。

3. 红外列阵器件的开发是当前红外探测器最重要的研究发展方向。高性能的硅 CCD 列阵器件的出现是微电子技术的杰出成就, 它被应用于光学天文观测, 取得了激动人心的结果。如美国基特峰天文台的 4 米望远镜配上 CCD 照相机后, 5 分钟积分时间就获得了 26 星等的照片。它成为研究河外星系和类星体的强有力工具。

人们很自然地希望把这个技术成就推广到红外领域。目前的红外探测器大多是单个元件, 在作一维光谱观测和二维的天区描图时效率很低, 显然多元的红外列阵器件可以大大提高效率, 尤其是 IRCCD 器件, 灵敏度高, 噪声低, 量子效率也高, 还可进行长时间积分, 计算机联接也比较方便, 优点很多。

人们正通过多种途径来开发红外列阵器件, 但天文用红外列阵器件的研究, 主要集中在两个方面, 即红外电荷注入器件(IRCID)和红外电荷耦合器件(IRCCD)。前者是一种单片的金属-绝缘体-半导体(MIS)元件, 绝缘层覆盖在半导体材料上面。在绝缘层上是很多确定象素位置的电极。入射光子产生的电荷被收集在电极下面的电势阱内, 形成电荷包, 通过读出线对电极行和列的地址进行选择, 就可读出某个坐标的电势阱内的电荷量。这类列阵探测器工艺比较简单, 较易实现, 但读出噪声相对较大。IRCCD 的读出噪声则要小得多, IRCCD 有单片型的, 也有混合型的。单片 IRCCD 的每个象素既是电荷转移单元, 又直接是红外敏感元件, 入射红外辐射在相应象素的电势阱内产生电荷包, 在钟脉冲的作用下, 这些电荷包可以被逐次转移, 直至读出。由于读出线分布电容很小, 所以读出噪声也很小。这和工作在可见区的硅 CCD 是相同的。问题在于人们在硅材料的 CCD 中已获得了 99.999% 以上的转移效率, 每片的象素可达 10^6 以上, 但对于硅以外的半导体材料, 最高的转移效率只是 99.8% 左右, 看来大幅度地提高转移效率还有相当长的路要走, 这就限制了象素的数目。混合型 CCD 就是试图解决这个问题而出现的, 它把光敏器件和电荷转移器件分开, 例如它可以用本征 InSb 光敏二极管阵列作红外光敏器件, 然后在电气上把每个二极管和硅 CCD 的相应单元联接起来, CCD 在这里只起信号读出多路器的作用。这种电气上的联接在技术上当然不容易, 但它确实综合了各方的优点。混合型的 IRCCD 也可通过让非本征硅光导材料外延生长在红外探测器材料上而实现。

美国基特峰天文台曾用 32×32 象素的 InSb CID 做过不少工作, 实验表明, 在低背景条件下, 读出噪声是主要噪声源, 而且推算出, 在 $\lambda = 5\mu\text{m}$ 和积分时间为 1 秒时, $NEP \sim 1.5 \times 10^{-15} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 工作温度为 20K。这套装置也曾在基特峰台的 2.1 米和 4 米望远镜上做过试验, 获得了一些致密红外源的空间强度分布图。McCreight 等曾报道, 用 Si:Bi 的 32×32 象素 CID, 工作波长为 2— $18\mu\text{m}$, 积分时间 1 秒时, 最小 NEP 曾达 $3 \times 10^{-17} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。另外在

1—5 μm 波长范围内工作的 32×32 象素 InSb CCD 和在波长 30 μm 以外工作的 Ge:Ga 红外阵列器件都已进行试验。除美国外,英国红外望远镜和法国、加拿大、夏威夷大学联合望远镜也已开始了这方面的工作。

获得用于天文观测的理想红外阵列器件,恐怕还要经历一个过程,因为技术上还有不少困难有待克服,不过前景始终是令人鼓舞的,随着它们性能的提高,将给红外天文研究提供宝贵的新资料。

国内也有不少单位从事红外阵列器件的研究工作,如上海技术物理所,北京华北光电所,四川永川光电技术研究所等都报道过在 InSb IRCCD 研究方面所取得的进展,我们期望他们早日提供能用于天文观测的器件。

六、红外探测器与红外天文观测^{[80]-[81]}

红外探测器是红外天文观测的关键器件,但还必须有望远镜头以及与研究课题相适应的其它设备,如分光和检偏振装置等,再加上数据收集系统,才能进行红外天文观测。

和可见光天文观测相比,红外观测有两大特点:即受大气吸收和强背景辐射的影响。对红外辐射的吸收,主要来自大气中的水蒸气、二氧化碳以及高层大气中的臭氧,所以地面的红外观测只能通过特定的“大气窗口”来进行。1965年,Johnsen 对它们作了定义,目前国际上通用的 J、H、K、L、M、N 和 Q 窗口的特性见下表:

波段	J	H	K	L	M	N	Q
中心波长(μm)	1.25	1.63	2.22	3.6	5.0	10.6	21
范围(μm)	1.15-1.35	1.45-1.8	1.9-2.5	3.05-4.1	4.5-5.5	7.9-13.2	17-28

背景辐射由普朗克黑体辐射定律确定,地面观测的背景温度约 300K,相应辐射峰值波长为 10 μm ,所以在中远红外区域,背景辐射的流量常比来自天体的红外辐射流量高出几个数量级,把这种观测比喻为大白天进行的天文观测是毫不夸张的。红外观测的这种特点对望远镜提出了特殊的要求,总的讲就是要尽可能减少望远镜自身辐射和天空背景辐射的影响。

早期的红外观测用的是普通的光学望远镜,但在中远红外区域,效果并不理想。后来出现了一批专用的红外望远镜,如英国的 3.8 米红外望远镜, NASA 3 米红外望远镜。还有一批 1—1.5 米口径的红外望远镜分布在美国本土、日本和意大利等国。这种红外望远镜的特点可归纳如下:

1. 不要镜筒,尽可能减少视场内的机械结构物,视场内不可避免的结构物不是涂黑,而是抛光镀亮,以减小发射系数;
2. 光学系统焦比较大,一般 $f/20$ — $f/50$,有的达 $f/100$,为的是减小副镜,便于调制,也可减小高发射的主镜中心孔,大的焦比也有利于降低天空背景噪声;
3. 主副镜匹配很好,副镜视场小,这样避免了主镜边缘非光学部件进入视场。副镜还有摆动调制功能;

4. 主副镜镀金, 提高了红外反射系数和降低了自身的热发射;
5. 有高的指向精度及宽和亮的导星视场, 很适于对暗的或不可见的对象进行红外观察;
6. 常选 $10,000 \text{ \AA}$ 作设计波长, 光学加工精度要求可相应放宽。

望远镜的口径显然是重要的参数, 口径大, 收集的能量多, 就可观测更暗的红外源。值得指出的是降低探测器系统的 NEP 同样可提高观测的极限星等, 这样相当于增大了望远镜口径。如果能把 NEP 降低到原来的 $1/4$, 就相当于望远镜口径增大了一倍, 所以尽可能采用优良的探测器以降低 NEP 是极其重要的。探测器在电气噪声限工作时, 观测极限星等与主镜口径平方成正比, 当探测器在背景限工作时, 则仅与主镜口径一次方成正比。

根据不同的观测对象和研究目的, 有各种不同项目的红外观测。如各大气窗的宽带和窄带红外测光, 红外偏振测量, 不同分辨率的红外光谱观测以及扩展红外源的强度分布观测等。宽带窄带测光要求相应的红外干涉滤光片, 偏振测量要求红外偏振片和 $1/4$ 波片等检偏振器, 低分辨率的光谱观测可用圆形可变滤光片(circular variable filter), 这些观测一般用相应工作波长的单元探测器。中等分辨率的光谱观测常用红外光栅和棱镜分光, 使用一维阵列器件最合适。高分辨率的红外光谱可通过干涉、外差和傅里叶光谱仪获得, 这种观测只适用于强源, 常要求快速时间响应的探测器, 二维红外 CCD 等则最适合于测量展源的强度分布等目的。

红外观测受大气吸收的严重影响, 所以红外观测对台址选择有严格要求, 除了和光学观测的要求相同外, 还特别要求大气中水蒸气含量尽可能少。所以英国 3.8 米和美国 NASA 3 米红外望远镜被安装在夏威夷 4200 米高的山头上。温度也影响大气中水蒸气含量, 北台兴隆站并不高, 但冬季温度低, 水蒸气含量也相当低, 红外观测也可得到较好的结果。

摆脱大气限制的最好办法是进行大气外观测, 美国 NASA 机载红外观测台 Lear Jet 和 KAO 已工作了十多年, 取得了重要成果。高空气球特别适合于红外观测(在其飞行的 40km 高度, 剩余大气对红外辐射几乎完全透明), 费用低, 技术也较简单。目前世界各国有 20 多个小组从事高空气球红外观测, 望远镜口径已超过 1 米。

探空火箭的红外观测曾经很活跃, 但目前重点已转向卫星。卫星轨道完全摆脱了大气的影 响, 可以用液氮把整个望远镜冷却到 10K 左右, 这样大大地降低了背景辐射及背景涨落噪声。在中远红外区域, 冷却望远镜可把 NEP 降低 2—3 个数量级, 红外天文卫星将打开红外天文研究的新篇章。1983 年春美英荷联合发射的 IRAS 卫星在轨道上运行了近一年, 发现了大量新红外源, 还发现了织女星具有类似太阳系的结构等, 这些资料正在逐步发表。这以后的大型空间红外计划依次将有美国的 SL_2 -IRT 计划, 西德的 GIRL, 日本的 IRTS 和美国的 SIRTf 计划等。这些计划的实施将使红外天文研究产生飞跃, 也将大大地促进高性能中远红外探测器的研究和开发。

七、结 束 语^{[32]-[36]}

红外天文学是既历史悠久又很年轻的天文学分支学科。它开创于 1800 年, 其历史比射电、X 射线天文学长得多。说它年轻, 因为它是在二次世界大战后才发展起来的, 至今也只有三

十多年,但是已得到了不少重要的结果。例如它已大大改变了人们对于恒星演化过程中早期和晚期阶段的认识,为人们认识银河系和银核的发展和演化提供了重要资料,对建立 3K 的宇宙背景辐射模型和研究宇宙的发展和演化作出了贡献。但是已经取得的成就仅仅是冰山顶端露出水面的极小一部分,更多的宝藏尚待发掘。

红外天文学的重要性早就引起国内有识之士的重视,1977年北师大,云台,紫台和华北光电所等合作,开始了 PbS 近红外光度计的研制工作,他们使用了国产的元器件,于 1979 年和 1980 年分别在南京和昆明进行了试观测,达到了预期的目标。1980 年底,这个光度计在云台 1 米镜上投入了使用, J、H、K 波段的极限星等为 5.5 星等左右,为发展我国实测红外天文研究迈出了可贵的第一步。

北台从 1981 年底开始了碲化铟(InSb(*pv*))红外光度计的研制,并在 1982 年底在兴隆 60cm 望远镜上进行试观测,取得了成功。1983 年已投入常规观测。它可以在 J、H、K、L 和 M 五个波段中工作。在 60cm 望远镜上, J、H、K 的极限星等约 9.5 星等, L 波段约 5.0 星等(1 分钟的积分时间和取 $S/N=3$)。

高空气球的大气外红外天文观测已由上海台在高能所、大气物理所和空间中心等单位合作下迈出了成功的步伐,如果能不断提高有效载荷能力,改善吊篮的稳定性和望远镜的指向精度,增大望远镜口径和设法加以冷却,并改善遥控和遥测系统,那么在这方面是大有可为的。

建造 1.2 米口径的专用红外望远镜是发展我国红外天文研究的又一个重要步骤,在各有关单位的共同倡议下,正由北京天文台和南京天仪厂协作建造一个 1.2 米专用红外望远镜及有关的终端接收设备。望远镜的基本参数如下:主镜通光口径 1.26 米,副镜直径 11cm,焦比 $f/30$,副镜摆动调制,以 $10,000 \text{ \AA}$ 为设计波长,视场 $\sim 10'$,中心象斑 $1''.5$ 。预计在 1985 年将望远镜安装到北台的兴隆站。第一阶段所配接收设备将有碲化铟近红外光度计,低分辨率的圆形可变滤光片光谱计及以中等分辨率红外光栅光谱仪等,以后再逐步扩展观测波段和提高光谱分辨能力。

国内各种方式的红外天文研究已经有了一个良好的开端,只要大家密切合作,共同努力,必然能开创我国红外天文研究的新局面。

参 考 文 献

- [1] Herschel, W., *Phil. Trans. R. Soc.* **90** (1800), 284.
- [2] Keyes, R. T., *Optical and Infrared Detector*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York (1977).
- [3] Low, F. J. et al., part 9 in *Methods of Experimental Physics*, Vol. 12, part A, ed. by Carleton, N., Academic Press, New York (1974).
- [4] Stahl, K. et al., *Infrarottechnik*, Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg (1980).
- [5] Zissis, G. et al., *The Infrared Handbook*, (1978); 中译本,红外与激光技术编辑部出版,(1980).
- [6] Gillett, F. C. et al., *Optical Eng.* **16** (1977), No.6, 544.
- [7] Gillett, F. C., in *Optical and Infrared Telescope for 1990s*, ed. by A. Hewitt, (1980), pp.293—303.
- [8] Jones, R. C., *Proc. Instru. Radio Engrs.*, **47** (1959), 1459.
- [9] Kimmit, M. F., *Infrared Phys.* **17** (1977), No.6, 459.
- [10] Кузьков, В. П., *Астрометрия и Астрофизика*, **39** (1979), 98.
- [11] Young, E. T., *Nature*, **298** (1982), No.5876, p.796.

- [12] Bratt, P. R., in *Utilization of Infrared Detectors*, Vol.132, (1978), pp.97—108.
- [13] Kitt Peak Facilities Book, July 1982.
- [14] Kruse, P. W., in *Semiconductors and Semimetals*, ed. by R. K. Willardson, Vol.5, (1970), 15.
- [15] Low, F. J., *Opt. Soc. Am.* 51 (1961), 1300.
- [16] McCarthy, S. G. et al., in *Utilization of Infrared Detectors*, ed. by I. J. Spiro, Vol.132, (1978), pp.81—88.
- [17] Wade, R., in *Proc. of the Second ESO Infrared Workshop*, ed. by Moorwood and K. Kjær, (1982), pp.131—136.
- [18] Zhang, Y.-X. and Williamson, F. O., *Applied Optics*, 21 (1982), 2036—2040.
- [19] 钱忠钰, 红外研究, 2 (1983), 285~288.
- [20] Broudy, R. et al., in *Utilization of Infrared Detectors*, ed. by I. J. Spiro, Vol. 132, (1978), pp.10—26.
- [21] Brunsmann, U., in *Proc. of the Second ESO Infrared Workshop*, ed. by Moorwood and K. Kjær, (1982), pp.183—188.
- [22] Krikorian, E. ed., *Infrared Image Sensor Technology*, Vol. 225, (1980).
- [23] Lemke, D., in *Proc. of the Second ESO Infrared Workshop*, (1982), pp.373—382.
- [24] Lemke, D., GIRL. Sonderdruck aus Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Nr. 54, (1981).
- [25] Lynds, R., in *Optical and Infrared Telescopes for 1990s*, ed. by A. Hewitt, (1980), pp.279—292.
- [26] McCreight, C. R., in *Modern Utilization of Infrared Technology*, ed. by I. J. Spiro, Vol.304, (1981) pp.187—195.
- [27] Sibille, F., et al., in *Proc. of the Second ESO Infrared Workshop*, (1982), pp.207—213.
- [28] Stefanovitch, D. et al., *Rev. Phys. Appl.*, 17 (1982), 365.
- [29] Werner, M. W. et al., in *Proc. of the Second ESO Infrared Workshop*, (1982), pp.205—206.
- [30] Fazio, G. G., *Infrared Astronomy*, 见 E. H. 阿费雷特主编, 李致森等译, 天体物理学前沿, 第6章, 科学出版社, 1982年.
- [31] 钱忠钰, 北京天文台台刊一副刊, 1982年, 第2期, 第9页.
- [32] 龚树模, 红外物理与技术, 1978年, 第3期, 第10页.
- [33] 郝允祥等, 云南天文台台刊, 1980年, 第1期.
- [34] 龚树模, 云南天文台台刊, 1981年, 第2期.
- [35] 钱忠钰, 北京天文台台刊一副刊, 1983年, 第5期, 第103页.
- [36] 陈培生等, 云南天文台台刊, 1981年, 第2期, 第24页.

The Infrared Detectors for Astronomical Purpose

Qian Zhongyu

(Beijing Observatory, Academia Sinica)

Abstract

This paper summarizes the developments of astronomical infrared detectors, the classification, characteristics and major parameters of which are well elucidated. IR detectors in current use are illustrated and the perspective of IR devices provided. The paper concludes when retrospects on aspects of astronomical IR observations and relative work at home are reviewed.