

天文用近红外焦平面阵列

曹文达

叶彬浔

(中国科学院云南天文台 昆明 650011) (中国科学院北京天文台 北京 100012)

摘 要

总结了天文用红外焦平面阵列 (IRFPA) 的发展历程, 阐述了 IRFPA 的结构, 重点介绍了 InSb、HgCdTe 和 PtSi 三种近红外探测器阵列, 结合目前正在筹建的红外太阳塔计划, 对其各项性能指标作了详细比较。

关键词 仪器: 红外探测器 — 太阳: 红外 — 红外天文学

分类号: 141.91

1 红外探测器的发展过程

1800年, Herschel 在重复牛顿著名的棱镜实验时, 在紧邻可见光的红端区域中发现了红外辐射, 从此揭开了人类进行红外天文观测的序幕。但在此后的近一个半世纪里, 红外探测技术发展缓慢。二次世界大战期间, 由于军事的目的, 红外探测技术受到重视, 并研制出了单元致冷的铅盐类探测器用于红外热成像。五十年代和六十年代, 半导体技术的飞速发展给红外探测器技术注入了新的活力, 出现了许多窄禁带的新型半导体材料, 这些材料后来被证明在扩展探测波长和提高灵敏度方面具有很高的价值。1970年, 发明了电荷耦合器件 CCD, 它一问世就受到了广泛重视并得到了极大的发展, 目前用于天文可见光波段的硅 CCD 的制作水平已达 4096×4096 像素^[1], 而 8192×8192 像素的 CCD 也在积极筹备之中^[2]。与此同时, 在红外探测器领域也取得了相当的进展, 采用与 CCD 类似的技术制成了红外焦平面阵列。进入八十年代以后, 随着超大规模集成电路、材料科学和致冷技术的发展, 红外探测器阵列致力于向高图像分辨率和高系统灵敏度迈进。其具体表现有: 覆盖的波段范围逐渐向长波方向延伸, 长波限已伸至 $26\mu\text{m}$ ^[3]; 阵列不断增大, 目前 1040×1040 像素的 PtSi 阵列已用于天文观测^[4-7], 512×512 像素的 InSb 和 HgCdTe 阵列已研制完成^[3], 其 1024×1024 的阵列也在紧锣密鼓地实施^[8,9]; 阵列尺寸不断增大, 但整个系统的噪声却大大减小。

2 红外探测器阵列的结构

硅 CCD 在长波限的截止波长为 $1.1\mu\text{m}$ 。要观测更长的波长, 就必须使用禁带更窄的材

料。根据光子与红外敏感器件中电子相互作用产生不同类型的光电效应,可划分为光伏探测器件(PV)、光导探测器件(PC)、金属-绝缘体-半导体(MIS)和杂质能带导电器件(IBC)等。表1给出了几种目前天文上常用的红外探测器件。

表1 天文上常用的红外探测器阵列主要性能参数^[10,11]

| 器件材料 | InSb | HgCdTe | PtSi | Si:Ga | Si:Bi | Si:As |
|------------------------|------|--------|------|-------|-------|-------|
| 工作红限 (μm) | 5.5 | 2.5 | 5.5 | 17.8 | 18.7 | 24 |
| 类型 | PV | PV | MIS | PC | PC | IBC |
| 峰值量子效率 | 0.7 | 0.7 | 0.09 | 0.5 | 0.3 | 0.7 |

多个红外探测器件可拼成一个二维阵列,当其受到红外光照射时就会产生电荷。要读出这些像元内的电荷,则需要用一个与像元数相同的多路传输器,并将多路传输器的像元与红外探测器件的像元一一对应相连。多路传输器像元用来收集红外探测器件像元内的电荷,按一定时序读出像元中的信息。这种多路传输器常采用 CCD、电荷注入器件(CID)和电荷成像矩阵(CIM)。目前 CCD 的读出噪声最小而用得较多。由于硅材料和红外材料具有不同的膨胀系数,当被深度冷却时会发生收缩不一致而损坏器件。为解决这一问题,采用了将两者之间用钢柱连接的办法。钢是一种软金属,故能调整硅和红外材料膨胀不同所引起的剪切效应。这种结构称为混合式焦平面阵列^[10]。探测器阵列可采用前照式(光子穿过透明的硅多路传输器)和背照式(光子穿过透明的探测器阵列衬底)。一般来讲,背照式由于具有更多的优越性而被广泛采用。

目前,可用于近红外波段(1—3 μm)的红外焦平面阵列主要有三种: InSb 阵列、HgCdTe 阵列和 PtSi 阵列,下面我们对它们的性能逐一介绍。

3 InSb 探测器阵列

InSb 是七十年代发展起来的红外探测器,属于 III-V 族化合物。其工作波段在 1—5 μm ,正好覆盖了 J、H、K、L 和 M 五个大气窗口。量子效率 $\eta > 0.60$,在 77—90K 的典型工作温度下,噪声等效功率 $NEP \sim 3 \times 10^{-15} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,是最灵敏的近红外探测器之一^[11]。

1984 年,在 Ames 由 NASA 组织的“红外探测器技术讨论会”上,Forrest 给出了第一张用 InSb 阵列拍摄到的红外天文图像,当时他们使用的阵列仅有 32×32 像素。随后不久,圣巴巴拉研究中心(SBRC)发展了 58×62 的 InSb 阵列,可用于 1—5 μm 的天文观测。1987 年在 Hilo 召开的第二届阵列会议上,英国天文学家给出了第一张用 58×62 的 InSb 阵列得到的天文结果。此后,Rochester 大学针对 58×62 的 InSb 阵列进行了大量研究工作,他们发现:低掺杂($\sim 1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$)InSb 在低温($T < 12\text{K}$)时,可获得较小暗流,与高掺杂的 SBRC 阵列相比量子效率较高,阵列在 30—35K 能保持较高的量子效率^[12]。至此,InSb 的制作工艺开始向更高纯度、更薄方向发展。1990 年在 Tucson 召开的第三次阵列大会上展示了大量科研成果,新一代的 256×256 近红外阵列尤为引人注目。其中,SBRC 提供的 256×256 阵列十分稳定,平场特性好,满阱可达 400000 电子电荷(e^-),各项性能见表 2。近几年来,钝化处理、SFD 读出、多重采样等技术的发展大大改善了探测器的性能。InSb 阵列的生产继续向更大阵列的方向发展,SBRC 已制作出了 512×512 阵列,经过最后测试将用于天文观测。在美国国立光学天文台和海军天文台的支持下,SBRC 开始实施一项被称为 Aladdin 的

计划, 生产 1024×1024 的 InSb 天文用阵列^[3,8]。

表 2 256 × 256 像素 InSb 阵列的主要性能参数^[8,13]

| | | |
|------|--------------------------------------|-------------------------|
| 像元数 | 256(横向)×256(纵向); 65536 像元 | |
| 像元尺寸 | $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ | |
| 填充因子 | 100% | |
| 读出模式 | PMOS-SFD 输出 | |
| 致冷温度 | 35K | |
| 波长范围 | 0.9— $5\mu\text{m}$ | |
| 暗流 | $0.1\text{e}^- \cdot \text{s}^{-1}$ | |
| 读出噪声 | 26e^- | |
| 量子效率 | 90% | 在 $1.00\mu\text{m}$ 波长处 |
| | 92% | 在 $1.25\mu\text{m}$ 波长处 |
| | 90% | 在 $1.65\mu\text{m}$ 波长处 |
| | 85% | 在 $2.20\mu\text{m}$ 波长处 |
| 坏像元 | 80% | 在 $3.30\mu\text{m}$ 波长处 |
| | < 1% | |

4 HgCdTe 探测器阵列

HgCdTe 是近年才出现的新型红外探测材料, 属 II-VI 族化合物。Hg_{1-x}Cd_xTe 是一种 HgTe 和 CdTe 的伪二元晶体, 其中 X 代表 CdTe 的摩尔数。这种合金系统令人感兴趣的原因是其禁带宽度 E_g 随组分值 X 不同而改变。当将宽禁带的 CdTe ($E_g = 1.6\text{eV}$) 和零禁带宽度的 HgTe 结合时, 合成材料的禁带宽度可以通过控制组分值 X 从 0 到 1.0 的变化来调整^[14]。这种合金具有随组分不同而连续变化、轮廓分明的带宽结构, 而不象单质和正规化合物半导体那样被固定在某一带宽结构上。这就使其在红外探测器工艺中, 几乎成了一种万能的材料。

表 3 256 × 256 像素 HgCdTe 阵列的主要性能参数^[16,17]

| | | |
|------|--------------------------------------|--|
| 像元数 | 256(横向)×256(纵向); 65536 像元 | |
| 像元尺寸 | $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ | |
| 填充因子 | 100% | |
| 读出模式 | PMOS-SFD 输出 | |
| 致冷温度 | 77 K | |
| 波长范围 | 0.8— $2.5\mu\text{m}$ | |
| 暗流 | $0.1\text{e}^- \cdot \text{s}^{-1}$ | |
| 读出噪声 | < 25e^- | |
| 量子效率 | 55%—70% | |
| 坏像元 | < 1% | |

第一个用于天文观测的 HgCdTe 阵列仅有 32×32 像元, 但读出噪声有 1100e^- , 暗流有 $800\text{e}^- \cdot \text{s}^{-1}$ 。1985 年, NASA 选用哈勃望远镜二代红外探测器时, 由于与 InSb 相比, HgCdTe 致冷温度仅只要 80K 而被选中。同时, NICMOS(Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) 也将它选为红外探测器阵列。1988 年, 128×128 像元的 NICMOS2 研制成功, 其读出噪声为 30e^- , 暗流为 $5\text{e}^- \cdot \text{s}^{-1}$, 且量子效率较高^[15]。一年后, NICMOS3 出现了, 其性能较 NICMOS2 又有进一步的提高, 被 NASA 正式选为哈勃望远镜第二代红外

探测器。表 3 便是它的主要性能指标。目前, NASA 和 Hawaii 大学均资助美国 Rockwell 公司研制 1024×1024 的大尺寸 HgCdTe 阵列, 像元进一步减小, 而性能将进一步提高^[9,18]。

5 PtSi 探测器阵列

PtSi 属硅化物肖特基势垒探测器。这类探测器所能响应的下限截止波长为 $1.1\mu\text{m}$, 是由硅衬底的光吸收决定的, 上限截止波长在近中红外区。其量子效率 η 与波长 λ 的关系可用下面的经验公式描述^[4]:

$$\eta(\lambda) = \frac{C(h\nu - \Psi)^2}{h\nu} = \frac{C\lambda}{1.24} \left\{ \frac{1.24}{\lambda} - \Psi \right\}^2$$

式中的 C 为福勒发射系数, $h\nu$ 为光子的能量, Ψ 为肖特基势垒的高度。对于 PtSi, 目前可以做到 $C \approx 0.25\text{eV}^{-1}$ 。量子效率可以通过将探测器做成光腔结构加以改进, 即在硅衬底背面加上增透层, 在硅衬底的正面加上透明介质和铝膜。尽管如此, PbSi 的量子效率仍然很低, 在近红外波段仅有百分之几。

虽然这类探测器的量子效率很低, 但由于它的制作工艺相对简单且成品率高, 因而仍受到一定重视。日本的三菱电器公司研制的 1040×1040 像元 PtSi 阵列已在东京大学的施密特望远镜上投入使用。此外, 北京天文台与东京大学合作开发的 512×512 像素的 PtSi 阵列也即将进行观测。表 4 是 1040×1040 像素 PtSi 阵列的主要性能参数。

表 4 1040×1040 像素 PtSi 阵列的主要性能参数^[4,5]

| | | |
|------|--------------------------------------|-------------------------|
| 像元数 | 1040(横向)×1040(纵向); 1081600 像元 | |
| 像元尺寸 | $17\mu\text{m} \times 17\mu\text{m}$ | |
| 填充因子 | 53% | |
| 读出模式 | CSD(电荷扫描器件) | |
| 致冷温度 | 57.5K | |
| 增益 | $6\text{e}^-/\text{ADU}$ | |
| 暗流 | $8\text{e}^- \cdot \text{s}^{-1}$ | |
| 读出噪声 | 30e^- | |
| 量子效率 | $8.0\% \pm 0.9\%$ | 在 $1.25\mu\text{m}$ 波长处 |
| | $4.5\% \pm 0.4\%$ | 在 $1.65\mu\text{m}$ 波长处 |
| | $2.0\% \pm 0.3\%$ | 在 $2.15\mu\text{m}$ 波长处 |
| 坏像元 | 无 | |

6 天文用近红外焦平面阵列的性能比较

新技术开启了天文观测的新窗口, 也开辟了天文发现的新纪元。人们在将红外焦平面阵列投入恒星和星系观测的同时, 也开始注意到它在太阳观测和研究中的广阔应用前景。1992年, 国际天文学联合会在美国 Tucson 召开第 154 次大会, 会议主题即“红外太阳物理”^[19]。1994 年在美国又召开了一次国际会议, 讨论主旨为“太阳物理研究的红外手段展望”^[20]。可见, 红外太阳的观测与研究在国际上已成为一热门课题。目前在国内, 作为空间太阳望远镜的地面大型配套基础设施——红外太阳塔, 也正处于紧锣密鼓的积极筹备当中, 初步设想:

望远镜口径为 1m; 根据不同的观测目的, 光谱仪系统分为两部分: 一部分为垂直的大色散光谱仪, 另一部分为水平的多波段中色散光谱仪; 探测系统的响应范围主要集中在 1—5 μm 的近红外波段。建成后, 可进行近红外波段的高精度太阳磁场和矢量场的测量。为此, 我们对以上三种天文用近红外焦平面阵列的性能指标作一详细比较以供选用。

6.1 探测波长

InSb 探测器典型的波长响应范围约在 1.5 ~ 5.5 μm , SBRC 采用其独特的可见光至中红外镀膜 (VISMIR-COATING) 技术将探测器的响应向可见光方向扩展, 可达到 0.35—5.5 μm ^[3]。在近红外波段的量子效率高达 80% 以上。

Hg_{1-x}Cd_xTe 合金材料的禁带宽度随组分值 X 不同而改变, 调整 X 值就可以满足观测波长的要求。在近红外, 其典型的波长响应范围约在 0.8—2.5 μm , 相应的量子效率约为 55%—70%。

PtSi 在 1.1—5.5 μm 也有响应, 但量子效率很低, 仅有百分之几。

由于大气中 O₃、CO₂ 和 H₂O 对红外有强烈的吸收, 所以地面观测仅有几个红外大气窗口可以利用: J(1.25 μm)、H(1.65 μm)、K(2.2 μm)、L(3.5 μm)、M(5 μm)、N(10 μm)、Q(25 μm) 和 Z(35 μm)。可见, 三种探测器对近红外波段的 J、H、K 窗口均有响应。如果同时想兼顾 L 和 M 中红外波段, 可考虑 InSb, 但需要调制, 会带来很多麻烦。

6.2 致冷温度

致冷温度的高低将直接影响到阵列的噪声、暗流和转移效率等多项探测器指标。在这方面, HgCdTe 阵列性能最为优秀, 在 77K 时即能达到较为理想的指标。而 InSb 和 PtSi 要达到同样的指标需降低到更低的温度 (~35K 和 ~57K)。

77K 利用普通的液氮致冷即可达到。57K 则须使用固液氮混合物致冷, 需增加附加的抽气设备。而 35K 必须使用昂贵的液氦或危险的液氢致冷才能实现。

6.3 像元指标

在制作大阵列方面, PtSi 较有优势, 目前已有 1040 × 1040 的产品用于天文上, 像元大小 17 μm 。而 InSb 和 HgCdTe 的发展进度差不多, 它们的 256 × 256 阵列都已在天文上得到应用, 并且都在计划制造 1024 × 1024 的大尺寸红外阵列, 像元大小在 25—40 μm 之间。

6.4 噪声与满阱

噪声与满阱在红外阵列指标中是一对矛盾。探测器的电容越大, 其满阱能力越强, 噪声也越大, 而减小探测器电容, 噪声得以减小, 同时满阱也随之减小。所以要在二者之间寻找到一个平衡点。目前, 这几种探测器的噪声与满阱指标相差不多: 读出噪声 < 30e⁻, 满阱在 10⁵—10⁶ 之间。

6.5 暗流

在上面提到的温度条件下, 几种探测器的暗流都可达到极低的水平, InSb 和 HgCdTe 的暗流 ~ 0.1e⁻ · s⁻¹, PtSi 稍高, 也仅有 8e⁻ · s⁻¹。

6.6 填充因子

填充因子又称占空比, 它是器件的有效探测面积与衬底总面积的比, 因而在一定程度上影响着探测器的空间分辨率。在这方面, InSb 和 HgCdTe 非常优秀, 都能达到 100%; 而 PtSi 由于制作工艺的原因仅能达到 50% 左右。

6.7 稳定性

红外探测器光敏材料的使用寿命一般不超过 7 年。HgCdTe 由于使用三元系半导体合金材料, 最易产生探测波带的漂移, 寿命约 5—6 年。InSb 相对来讲稍稳定, 寿命约 6—7 年。

6.8 安全性

半导体的体击穿电压 V_{bd} 在实验上与半导体的禁带宽度 E_g 有关^[14], 其关系式为:

$$V_{bd} \propto E_g^{3/2}$$

硅的禁带宽度是 1.1eV, InSb(截止波长 5.5 μ m) 的禁带宽度是 0.23eV, 而 HgCdTe(截止波长 2.5 μ m) 的禁带宽度是 0.49eV。因此, InSb 的额定击穿电压约为硅的 1/10, 为 HgCdTe 的 1/3, 所以 HgCdTe 材料的安全性比 InSb 高。

6.9 生产厂家

由于红外阵列的生产工艺要求很高, 所以能制造这几种红外阵列的厂家不多, 主要集中在美国、日本和欧洲的少数国家。由于与军事应用有关, 某些型号如大的 InSb 探测器阵列目前仍处于禁止出口之列。

生产 InSb 阵列的厂家当首推美国的 Hughes Aircraft Company, 其 SBRC 一直致力于生产天文 InSb 阵列。十几年来, 它们的产品从 32 \times 32 到 256 \times 256 在世界各地的天文台得到广泛应用。在美国国立光学天文台和海军天文台的支持下, 目前该公司正着手生产 1024 \times 1024 的 InSb 天文用阵列。另外, 还有两个美国著名生产厂商: Amber Engineering 和 Cincinnati Electronics, 它们的产品在大势阱($\sim 10^7$) 方面有独特的优势。

天文用 HgCdTe 阵列的生产主要由美国的 Rockwell 公司承担, 其 32 \times 32 到 256 \times 256 HgCdTe 阵列不同型号的产品大大推动了 NICMOS 的发展, 某些产品已被选作在哈勃望远镜上使用。目前, NASA、Arizona 大学和 Hawaii 大学正资助该公司研制 1024 \times 1024 的 HgCdTe 阵列。

PtSi 的生产厂家主要有三菱电器公司、柯达公司和 David Sarnoff Research Center, 国内的电子部第四十四所也有一定生产能力。

6.10 价格

目前单片 InSb 与 HgCdTe 的价格差不多, 而 PtSi 的价格优势很大, 相同尺寸的 PtSi 价格仅为前两种的 1/3 左右。

致谢 感谢陈培生先生提供的大量资料并给予有益的指导。

参 考 文 献

- 1 Janesick J, Elliot T, Dingizian A et al. In: Jacoby C H ed. CCDs in astronomy, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 8, Tuscon, 1989, California: Book Crafters Inc, 1990: 18
- 2 Boroson T, Reed R, Wang W-Y et al. Proc. SPIE — Int. Soc. Opt. Eng., 1994, 2198: 868
- 3 Hoffman A W, Woolaway J T. In: Mclean I S ed. Infrared Astronomy with Arrays, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 369
- 4 Itoh N, Yanagisawa K, Ichikawa T et al. Proc. SPIE — Int. Soc. Opt. Eng., 1995, 2552: 430
- 5 Kimata M, Yutani N, Tubouchi N et al. Proc. SPIE — Int. Soc. Opt. Eng., 1992, 1762: 350
- 6 Glass I S, Carter D B, Sekiguchi K et al. In: Mclean I S ed. Infrared Astronomy with Arrays, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 285
- 7 Yanagisawa K, Itoh N, Ichikawa T. Proc. SPIE — Int. Soc. Opt. Eng., 1996, 2744: 92

8 Fowler A M, Gatley I, Vrba F J *et al.* In: Mclean I S ed. *Infrared Astronomy with Arrays*, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 399

9 Hodapp K W. In: Mclean I S ed. *Infrared Astronomy with Arrays*, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 406

10 王传晋. 紫金山天文台台刊, 1989, 8(2): 121

11 郝允祥, 陈培生, 周克平. 红外天文学导论, 北京: 北京大学出版社, 1993

12 Pipher J L. In: Mclean I S ed. *Infrared Astronomy with Arrays*, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 1

13 Biggs J D, Blessinger M A, Louderback M L. In: Mclean I S ed. *Infrared astronomy with arrays*, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 277

14 Scribner D A, Krver M R, Killiany J M. *Proc. IEEE*, 1991, 79(1): 66

15 Rieke M J. In: Mclean I S ed. *Infrared Astronomy with Arrays*, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 21

16 Vural K. In: Mclean I S ed. *Infrared Astronomy with Arrays*, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 355

17 Thompson R I. In: Mclean I S ed. *Infrared Astronomy with Arrays*, Tucson, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1994. 253

18 Hodapp K W, Hora J L, Hall D N *et al.* *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, 1995, 2475: 8

19 Rabin D M, Jefferies J T, Lindsey C eds. *Infrared Solar Physics*, *Proc. of IAU Symp. No.154*, Tucson, 1992, Dordrecht: Kluwer, 1994

20 Kuhn J R, Penn M J eds. *Infrared Tools for Solar Astrophysics: What's Next?*, *Proc. of 15th National Solar Observatory/Sacramento Peak Summer Workshop, Sunspot*, 1994, Singapore: World Scientific, 1995

Near Infrared Focal Plane Arrays for Astronomy

Cao Wenda

(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

Ye Binxun

(Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

The development course and structure of infrared focal plane arrays are summarized in this paper. InSb, HgCdTe, and PtSi near-infrared focal plane arrays are introduced emphatically, and combined with the plan of the infrared solar tower in China, their features are compared in detail.

Key words instrumentation: infrared detectors—Sun: infrared—infrared astronomy

2.2 太阳系天然卫星的稳定性

太阳系中,除了水星和金星外,大行星均有不同数量的天然卫星。随着空间探测的深入,不断有新的卫星被发现,如旅行者2号发现了木卫十一(12)。

如果把太阳,各行星及其卫星系统的化成分子累加,那么太阳系天然卫星的总质量约占太阳系总质量的0.0001%。除木卫十一(Carme)、木卫八(Pasiphae)和木卫九(Sinope)外,太阳系所有已发现的、较大的天然卫星(未考虑新发现的小卫星)的运动在Hill意义下均是稳定的(1981年11月14日)。