

用于天文观测的先进红外焦平面技术

左雷¹, 周琪²

(1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450005; 2. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 红外谱段的天文观测, 对知悉太阳构成、探索隐藏宇宙、获取丰富的谱特征以及追溯宇宙早期生命等天文问题的研究具有非常重要的意义^[1]。但对于覆盖 $1\ \mu\text{m} \sim x\ \text{mm}$ 非常宽泛谱段的探测, 需要运用不同类型的红外探测阵列技术。目前, 满足 $1\ \mu\text{m}$ 至毫米波段探测要求的多种红外探测阵列的制作技术均已臻于成熟, 包括: 响应谱段 $1 \sim 5\ \mu\text{m}$ 的混合式结构的 InSb 和 HgCdTe 光伏阵列; 响应谱段为 $5 \sim 28\ \mu\text{m}$ 的 Si:As 杂质能带电导器件; 响应远红外谱段的光导器件; 响应亚毫米波及毫米波段的测辐射热计或者超导器件。20 世纪 80 年代, 人类第一次将红外焦平面阵列应用于天文探测以来, 红外谱段的天文探测能力平均每 7 个月就增强 1 倍。本文通过阐述了国际上用于天文观测探测器阵列技术, 探讨了其中的基本原则。希望能够提供更多的信息供研究人员参考。

关键词: 红外; 焦平面技术; 天文观测; IBC

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.001

High performance infrared focal plane arrays for astronomy

ZUO Lei¹, ZHOU Qi²

(1. The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450005, China;

2. Harbin Institute of Technology, School of Electronics Information Engineering, Harbin 150006, China)

Abstract: Observations at infrared, submillimeter wavelengths will be essential for addressing many of the key questions in astrophysics. Because of the very wide wavelength coverage, a variety of detector types will be required to satisfy these needs. They include direct hybrid arrays of InSb and HgCdTe photodiodes from 1 to $5\ \mu\text{m}$, and of Si:As Impurity Band Conduction detectors from 5 to $28\ \mu\text{m}$; a number of approaches to photoconductive detector arrays in the far infrared; and bolometer arrays or superconducting devices in the far infrared through mm-wave spectral range. The underlying principles behind these approaches and the application of these principles are discussed.

Key words: infrared; focal plane arrays; space application; IBC

1 引言

温度低于 4000 K 的天体的辐射主要集中在红外区, 因此是空间红外天文观测的主要对象。其意义体现在以下几个方面^[2]: ①揭示冷状态的物质, 空间红外观测对研究低温环境非常重要, 例如恒星周围形成的多尘恒星云和被冰覆盖的卫星表面; ②探索隐藏的宇宙, 红外谱段的光线具有极强的穿透性, 可以穿透宇宙中的云团和尘埃。借助红外望远镜, 我们可以观测到银河系的中心和新形

成的星系; ③获得丰富的谱特征; ④追溯宇宙早期的生命。

现代天文学领域的红外探测开始于 1965 ~ 1985 年, 最初只是基于单元探测器或者是单元探测器的线列叠加。1984 年红外探测阵列第一次被应用于天文探测, 早期的红外阵列规模很小, 但具有

作者简介: 左雷 (1968 -), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事科研管理, 红外技术等方面的研究工作。E-mail: zuolei126@126.com
收稿日期: 2011-07-28

接近单元探测性能和多元阵列的优势,比较典型的应用阵列为 32×32 ^[3]。短波红外和中波红外波段探测阵列性能的提高,主要归功于军事上的迫切需求:军事应用对红外探测性能的苛刻要求,推动了短波、中波红外焦平面技术的迅猛发展;而红外焦平面阵列技术应用的成熟更离不开各国军方资金方面的大量投入。当然,世界上主要红外探测器件的供应商对红外焦平面阵列卓越性能的不懈追求和探索,也为近30年红外探测技术的发展提供着源源不竭的动力。这其中包括^[4-6]:美国的雷声视觉系统(Raytheon Vision System), DRS Technologies, 和泰勒达因影像传感(Teledyne Imaging Sensors);法国的索芙拉蒂(SOFRADIR), ULIS;以色列的 Semiconductor Devices(SCD);加拿大的INO等。而在远红外波段(30~200 μm)和亚毫米(200~1000 μm)的红外焦平面阵列,天文观测则是主要的需求者,天文学研究需求推动这两个波段焦平面阵列基本技术的发展。

实现光量子的探测技术多种多样,需要根据应用的需要进行选择。天文观测对红外焦平面探测技术具有独特的要求^[7-8]:焦平面阵列必须对微弱辐射及时有效的响应,需要焦平面阵列具有极低本底噪声、极小的暗电流、极高的灵敏度,将材料固有性能发挥到极致。用于天文观测的焦平面阵列技术基本代表着当时红外探测技术的最高水平。总体来看,天文观测最为关注焦平面阵列的如下指标:①噪声;②量子效率;③阵列规模。可以用如下的公式表示焦平面阵列的天文探测能力^[9]:

$$\text{探测能力} = \text{阵列规模} \times (\text{探测元的灵敏度})^2 \quad (1)$$

2 主要的焦平面阵列技术

2.1 光导型焦平面阵列

受到光量子激发,半导体中将产生光生载流子,在电场的作用下光生载流子流向电极,最终被高性能的放大器捕获,达到探测的目的。光导型探测器又分为:本征光电导器件,光量子的能量 \geq 禁带能量,将半导体价带中的电子激发到导带,产生电子和空穴参与导电;非本征光电导器件,光量子将价带中的电子激发到杂质能级上,产生空穴参与导电,或光量子将杂质能级上的电子激发到导带中,产生电子参与导电。通过上述原理,得出此类探测器响应长波限与材料电学特性的关系:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_i} = \frac{1.24 \mu\text{m}}{E_i(\text{eV})} \quad (2)$$

例如:本征 Si 的禁带宽度 $E_i = 1.12 \text{ eV}$, 则本征 Si 的探测的长波限 $\lambda_c = 1.1 \mu\text{m}$ 。对于非本征光电导,公式(2)中的 E_i 为杂质能级与价带顶能级或导带底能级的差值。因此,通过调整杂质能级的位置能够达到增加非本征光导器件响应波长的目的。假设能级差(杂质能级到价带顶或者到导带底)足够小,则可实现探测长波光量子的目的。同时应注意:本征光电导由于吸收的光量子能量高而具有较高的量子效率;而非本征光电导受制于杂质能级数量的限制,探测效率较低。

光量子激发能产生自由载流子,热效应同样能够激发载流子。要实现低背景噪声探测,自由载流子的产生机制必须以光量子激发为主,尽可能降低热激发对探测器的干扰。因此,红外探测器需要工作在极低的温度,且探测波长越长,所需的制冷温度越低。制冷温度 T_{max} 与探测长波限 λ_c 由式(3)近似表示:

$$T_{\text{max}} = \frac{200 \text{ K}}{\lambda_c(\mu\text{m})} \quad (3)$$

而光伏探测器,由于 P-N 结构中存在高阻抗的耗尽层,对热激发的载流子运动起到一定程度的阻碍作用,可在一定程度上降低对 T_{max} 的要求,但也需要很低的工作温度。

材料内部的载流子无规则的布朗运动会造成电流的起伏将给探测器带来一定的噪声,而温度决定着布朗运动的程度,影响着探测器的噪声水平。此类噪声被称为约翰逊噪声,也称热噪声:

$$I^2 = \frac{4KTdf}{R} \quad (4)$$

探测器的工作温度冷却为 T_{max} 时,由公式(4)可知:为了满足低背景噪声探测的要求,探测器的需要很高阻抗将自身热噪声的水平降低到背景噪声水平之下。本征半导体内的杂质水平过高,基于量子机制的隧道效应等增大了暗电流,探测器阻值降低。而这种量子机制导致的电阻变化与工作温度的无关,因此高的掺杂浓度,会增大探测器的噪声;而当掺杂浓度很低时,光量子进入材料后,要经过相对较长的路径才能被本征吸收,降低了光导型探测器对宇宙中粒子流冲击的缓冲能力,使得后端电路难于处理校正,容易受损。并且光导探测器存在着 RC 延迟,低本底噪声,高性能的红外焦平面阵列的延迟时间甚至高达数秒^[10]。且一些半导体材料,如 InSb,材料的探测长波限为 $5.5 \mu\text{m}$, 电子迁移率很

高,无法实现很高的阻抗,不适于制作高性能的光导型红外焦平面阵列。因此,光导型探测器在高阻抗、高性能之间存在一定的矛盾,应用于低背景噪声的光导型探测器往往是在两者间找到一个最佳的平衡。但在天文红外观测卫星(IRAS),空间红外气象卫星(ISO)和 Spitzer 的远红外谱段均应用了光导型红外焦平面阵列^[11]。

2.2 光伏探测器

光伏型红外探测技术为解决光导型器件的矛盾提供了理想的选择。 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的高性能红外焦平面阵列都是基于光伏效应制作:通过掺杂受主、施主杂质制作 P-N 结,结区两端中的多子在扩散和漂移的共同作用下达到一种平衡,最终在结区附近形成高阻抗的耗尽层。结区附近由光量子激发产生的载流子扩散到结区后,在内建电动势的作用下通过耗尽区,形成光电流。光伏型探测器具有很高的量子效率,吸收层厚度小于载流子扩散距离的情况下,不考虑表面反射,光伏型红外探测器的理论量子效率可达到 100%。InSb 是最先被应用于近红外谱段探测的高性能光伏探测材料,其响应长波限可达 $5.5 \mu\text{m}$,覆盖了 J, H, K, L, M 空间窗口。作为简单的化合物半导体,通过单晶生长的方式得到的 InSb 材料具有很高的纯度及良好的一致型,使得其具备制作高性能光伏型焦平面阵列的良好条件。

$\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料也被广泛用于光伏型红外焦平面阵列的制作。与 InSb 等简单的 III, V 族化合物相比, $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ 最大的优势在于:通过调节 X 的值,材料的禁带宽度 E_g 可调,从而获得不同的长波限 λ_c 。并且 $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料制作的探测器在波长小于 $5.5 \mu\text{m}$ 时,可以降低探测器对制冷温度的要求。早期的 HgCdTe 材料很难达到 InSb 等简单化合物材料的一致性,但目前高性能的 HgCdTe 材料均采用分子束外延(Teledyne)或液相外延(Raytheon, Sofradir)的方式生长,取得了很好的一致性,并通过精确控制原子构成比例,改变 HgCdTe 材料结构和能带宽度,实现了高性能光伏红外焦平面阵列的制作。普遍采用 $\text{Hg}_{0.70}\text{Cd}_{0.30}\text{Te}$ 材料制造 $5 \mu\text{m}$ 内的红外焦平面阵列, $\text{Hg}_{0.55}\text{Cd}_{0.45}\text{Te}$ 制作响应长波限为 $2.5 \mu\text{m}$ 的焦平面阵列^[12]。

响应长波限可调的 HgCdTe 似乎成为波长 $> 5 \mu\text{m}$ 谱段红外焦平面阵列的理想选择,但必须注意窄禁

带半导体只允许低的接触电压来维持二极管的耗尽层,导致 HgCdTe 光伏型焦平面阵列应用于长波探测时,产生很大的暗电流:工作温度 $T = 30 \text{ K}$,探测长波限 $\lambda_c = 9.0 \mu\text{m}$ 的 HgCdTe 光伏型焦平面阵列 $1/2$ 像元的暗电流 $< 0.05 \text{ e/s}$; $1/6$ 像元的暗电流位于 $4 \sim 30 \text{ e/s}$ 。HgCdTe 光伏型焦平面阵列探测的长波限典型值为 $15 \mu\text{m}$,但此时其暗电流无法满足天文观测低噪声环境对探测器的苛刻要求。

2.3 IBC 器件

天文观测中对于 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ 谱段的探测采用了不同于光导、光伏型探测器的技术。通过重掺杂制作杂质能带电导器件(IBC),也称分簇杂质能带(BIB, Blocked Impurity Band)器件,如 Si:Ga(长波限 $\lambda_c = 18 \mu\text{m}$), Si:As(长波限 $\lambda_c = 28 \mu\text{m}$)。IBC 已广泛的应用于地基天文望远镜系统和 Spitzer 空间望远镜中,工作温度为 7K 时,其暗电流为 $0.01 \sim 0.1 \text{ e/s}$ 。而 Si:Sb(截止波长 $\lambda_c = 40 \mu\text{m}$), Si:P(长波限 $\lambda_c = 34 \mu\text{m}$) IBC 器件的研制也备受关注。

IBC 器件的结构^[13]如图 1 所示:由透光 Si 衬底层,通过掺杂的方式在衬底层制作下电极;衬底层上为重掺杂层,此层也作为探测响应层,厚度为 $25 \sim 35 \mu\text{m}$;重掺杂层上接着制作 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 的本征层;本征层上部制作上电极。本征层阻挡了重掺杂层内的暗电流,也叫阻挡层。IBC 器件阻挡层的结构设计大大降低了器件的暗电流,正是因为阻挡层的存在,重掺杂层的杂质浓度可比一般光导探测器高 2 个量级,量子效率得到提升的同时,增强了器件对宇宙离子流的调节能力。IBC 器件工作时,为了高效的将光生载流子扫入电极,必须在重掺杂区存在电场,因此器件的工作电压需要将重掺杂区几乎完全耗尽,以提高探测效率。高性能的 IBC 器件对材料的纯度有很高的要求,特别是对于重掺杂区内 P 型杂质的控制,要求 P 型杂质的水平小于 $12 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$,这是制作 IBC 器件的关键。

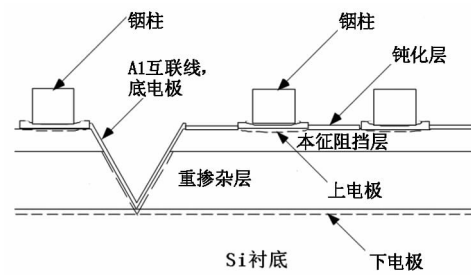


图 1 IBC 器件剖面图

通过本节的阐述,用于实现 $1 \sim 40 \mu\text{m}$ 红外波段探测的高性能红外探测材料如图 2 所示,依次为 Si 光敏二极管,短波 HgCdTe,中波 HgCdTe, InSb 以及 Si:As IBC 器件。天文红外观测获取的光流信号极其微弱,要求焦平面探测器阵列具有极低的噪声和暗电流,因此探测器的工作温度随探测波长的增长而降低,各个波段探测阵列需要的工作温度也显示在图 2 中。

3 焦平面探测器应用的实例

美国为天文观测提供的高性能红外焦平面阵列主要性能指标如表 1 所示。

表 1 高性能红外焦平面阵列主要性能指标

Parameter	Raytheon VIRGO/VISTA	Teledyne 112RG JWST	Raytheon Orion	DRS Technologies WISE	Raytheon JWST
Detector Type	HgCdTe	HgCdTe	InSb	Si:As IBC	Si:As IBC
Wavelength Range/ μm	0.85 ~ 2.5	0.6 ~ 5.3	0.6 ~ 5.5	5 ~ 28	5 ~ 28
Format	2048 × 2048	2048 × 2048	2048 × 2048	1024 × 1024	1024 × 1024
Pixel Pitch/ μm	20	18	25	18	25
Operating Temperature/K	78	37	32	7.8	6.7
Read Noise/erms	6 (slow readout)	6 (slow readout) 30 ~ 40 (faster readout)	6	42 (Fowler-1; lower noise expected with more reads)	10
Dark Current/(e/s)	< 0.1	< 0.01	0.01	< 5	0.1
Well Capacity/e	> 1.4×10^5	8×10^4	1.5×10^5	> 10^5	2×10^5
Quantum Efficiency/%	> 70	> 80	> 80	> 70	> 70
Outputs	4, 16	1, 4, 32	64	4	4
Frames/sec	0.4, 1.5	0.1 to 30	10	1	0.3
References	Love et al. (2004) Bezawada & Ives (2006)	Rauscher et al. (2004) Gamett et al. (2004)	McMurtry et al. (2003) Fowler et al. (2004)	Mainzer et al. (2005a)	Love et al. (2005)

3.1 泰勒达因 (Teledyne) 的 HgCdTe 焦平面阵列

泰勒达因参与制作了多个系列的高性能 HgCdTe 红外焦平面阵列^[14],如:①为近红外相机和多波段光谱仪 (NICMOS),地基天文望远镜制造的系列红外探测器,探测长波限为 $2.5 \mu\text{m}$;②用于地基 HAWAII 系列的,长波限为 $1.72 \mu\text{m}$ 宽视场红外相机;③用于詹姆斯韦伯空间望远镜系统 (James Webb Space Telescope) 的焦平面阵列,探测长波限为 $2.5 \mu\text{m}$ 及 $5.3 \mu\text{m}$ 。这些高性能的红外焦平面器件均采用分子束外延技术制作,以 HAWAII-2RG 系统中采用的 2048×2048 HgCdTe 焦平面阵列为例,简要介绍其工艺过程 (如图 3 所示):在 CdZnTe 的衬底上外延生长 HgCdTe 材料。选择 CdZnTe 做衬底,是因为其与 HgCdTe 材料很好的晶格匹配避免了材料生长过程中产生过多晶格缺陷。早期的

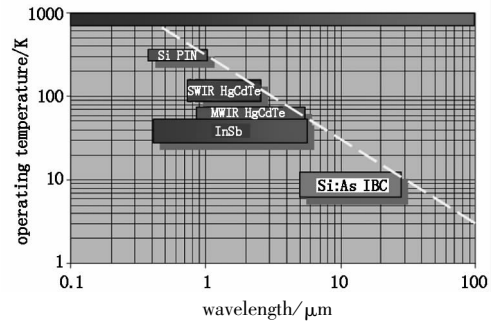


图 2 $1 \sim 40 \mu\text{m}$ 的红外探测材料

HgCdTe 材料是在蓝宝石衬底上进行生长的,由于晶格匹配不好造成 HgCdTe 材料中晶格缺陷较多,而晶格缺陷成为自由载流子的陷阱显著降低了器件的性能。最先沉积的 HgCdTe 最终会作为探测阵列的吸收层,根据探测波长调整 Hg 和 Cd 的比例,获取所需的禁带宽度;通过掺杂 In 形成阵列的 N 层,最后生长大于掺杂区禁带宽度的 HgCdTe 作为阵列的保护层,其主要作用是限制载流子的运动,使得载流子高效的流向结区,提高量子效率的同时,减少了器件的串扰及潜像。

完成材料生长后,开始器件工艺。光刻确定像元区,采用注入的方式形成 P 区,掺杂杂质为砷,构造结区;CdTe 钝化,并制作电极;电极上制作互联钢柱;去除衬底层,完成焦平面阵列的制作。读出电路由联华电子 (UMC) 代工,采用标准的 $0.25 \mu\text{m}$ 工

艺,1,4,32 路逻辑输出可供选择。

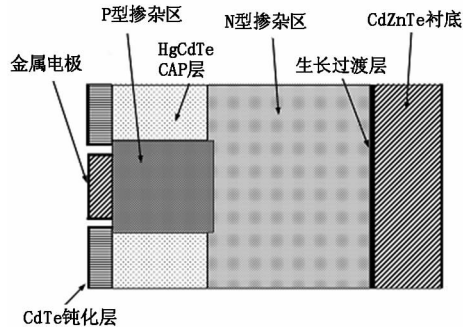


图3 HgCdTe 光伏阵列

短波 HgCdTe 工作波长范围一般为 1.7 ~ 3.2 μm ; 镀有增透膜条件下, 焦平面探测阵列的量子效率在 80% ~ 95% 之间, 响应曲线如图 4^[15] 所示。雷声公司的用于天文观测的短波 HgCdTe 有 1024² 和 2048² 两种规格。图 5 为用于英国 VISTA 天文望远镜的 2048² Virgo SCA, 4 路或 16 路输出可选, 本底噪声为 18e/s。而雷声公司还为欧洲航天局的罗塞塔太空船任务中的 VIRTIS 提供器件, 其在没有增透膜的情况下量子效率也高达 80%。

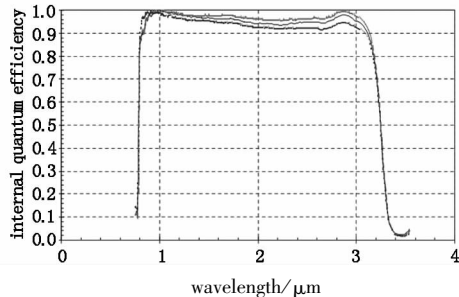


图4 短波 HgCdTe 内量子效率



图5 2048² Virgo SCA

3.2 InSb 焦平面阵列

InSb 光伏型红外焦平面阵列技术是一种十分成熟的技术, InSb 材料的响应波段为 0.4 ~ 5.5 μm , 用于超光谱分析实验, 如 HYDICE。其在 0.6 ~ 5 μm 之间的量子效率在 80% ~ 98% 之间, 而大规模阵列的 InSb 焦平面具有非常小的暗电流, 2048² 的 InSb 焦平面阵列工作在 30 K 时, 暗电流仅为 0.01 e/s^[16]。InSb 优良的性能使得其在天基、地基天文望远镜中都得到普遍的应用^[17], 如美国的空间

红外望远镜 (Space Infrared Telescope Facility) 和日本的 Astro-F 计划。雷声公司研制的 2048² InSb 红外焦平面阵列 Orion, 具有 64 路平行输出, 帧频为 10 Hz^[18], 拼接后 (如图 6 所示) 用于 NOAO 4 K \times 4 K 1 ~ 2.5 μm 的红外相机 NEWFIRM。

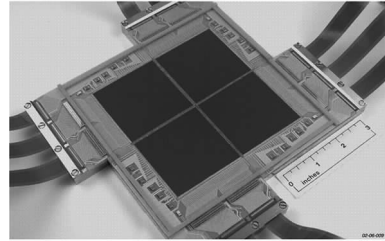


图6 NOAO 4 K \times 4 K

3.3 Si:As IBC 焦平面阵列

杂质能带电导器件在 5 ~ 25 μm 谱段的空间探测有着重要的应用, Raytheon 在 IBC 器件方面做了大量的工作, NASA 的弹头空间望远镜 (Spitzer Space Telescope), 以及 ASTRO - F/IRAC 均应用了 256 \times 256, 像元尺寸 30 μm 的 Si:As 焦平面阵列。詹姆斯韦伯空间望远镜 (JWST) 中的用于探测中波红外的仪器 (jet propulsion laboratory, JPL) 所采用的红外焦平面阵列也是由 Raytheon Vision System 提供的 1024 \times 1024, 像元间距为 25 μm 的 Si:As IBC 阵列 (如图 7 所示)。其中重掺杂层 As 的掺杂浓度为 10¹⁷ cm⁻³, 而重掺杂层得厚度为 35 μm , 耗尽电压为 2 V, 响应谱段为 5 ~ 28 μm , 响应曲线如图 8 所示。

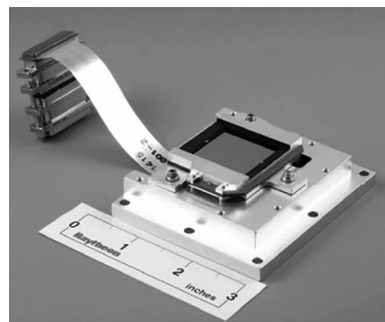


图7 JPL 采用的 IBC 阵列

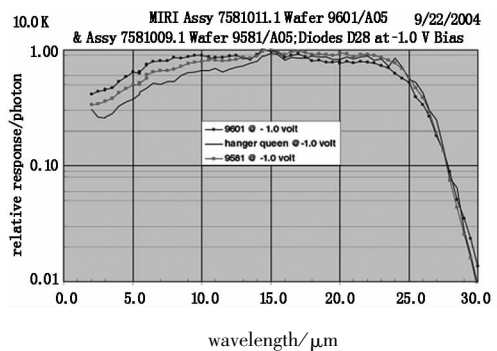


图8 Si:As 阵列响应曲线

4 结束语

由于篇幅的限制,本文主要对 1~40 μm 谱段先进的焦平面阵列技术进行了简略的阐述。对于 40 μm 至毫米波谱段及甚远红外的探测,主要应用 Ge:Ga 光导器件,工作温度约为 1.5 K;测辐射热计阵列也可用于探测甚远红外,但需要制冷到 0.1 K 附近才能达到 Ge 光导探测阵列的探测水平;基于跃迁边缘传感器(TES)制作的测辐射热计被用于毫米、亚毫米波段的探测。而基于 MEMS 技术的非制冷红外探测阵列,近年来也被应用于空间探测。无需制冷、轻便、成本低廉等优点,使得非制冷焦平面阵列被用作微卫星的红外探测负载,但其自身性能的局限必然限制它在天文观测方面的进一步应用。

应用于天文红外观测的红外焦平面阵列代表着红外探测技术的最高水平,除了研制先进的传感器技术外,读出电路技术、互联技术、制冷技术、光学增透技术等都具有很高的研究价值。作为一个崛起中的科技大国,在研制先进红外焦平面阵列技术方面,我们还有很多的工作要做,谨希望本文可为研究人员提供一些参考。

参考文献:

- [1] Jiao Weixin. The development of modern space infrared observation technology [J]. International Space, 2003, (8):1-3.
焦维新. 当代空间红外天文观测技术的发展[J]. 国际太空, 2003, (8):1-3.
- [2] Infrared, Submillimeter, Millimeter Detector Working Group. Detector needs for long wavelength astrophysics [C]. Areport by ISMD Work Group, June, 2002.
- [3] Liu Zhaojun. Demands analysis of IR detector for space remote sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, Feb, 2008, 37(1):25-29. (in Chinese)
刘兆军. 航天光学遥感器对红外探测器的需求分析 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1):25-29.
- [4] Wang Shujun. Progress on astronomy infrared observation [J]. Journal of Beijing Normal University: Nature Science Version, 2005, 41(3):280-285.
王术军. 红外天文观测技术进展 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2005, 41(3):280-285.
- [5] Lu Bo. An analysis and prospect for space exploration development [J]. Oct, 2000, 20(Supp):80-92.
卢波. 国外空间探测发展分析与展望 [J]. 空间科学学报, 2000, 20(增刊):80-92.
- [6] Liu Zhaojun. Space application of staring imaging technology with area FPA [J]. Infrared and Laser Engineering, Oct., 2006, 35(5):541-545. (in Chinese)
刘兆军. 面阵凝视型成像空间应用技术 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5):541-545.
- [7] Gong Haimei. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. Infrared and Laser Engineering, Feb, 2008, 37(1):18-24. (in Chinese)
龚海梅. 航天红外探测器的发展现状与进展 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1):18-24.
- [8] G H Rieke. Infrared detector arrays for astronomy [C]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, October, 2006, 7.
- [9] Alan W Hoffman. Mega-Pixel detector arrays: visible to 28 μm [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5167:194-202.
- [10] A Rogalski. Infrared detectors for the future [J]. Acta Physica Polonica, 2009, 116(3):389-406.
- [11] Gert Finger. Review of the state infrared detectors for astronomy in retrospect of the June 2002 workshop on scientific detectors for astronomy [C]. Areport by ISMD Work Group, June 2002.
- [12] Gert Finger. Infrared detector systems at ESO [C]. Areport by ISMD Work Group, June, 2002.
- [13] Michael E Ressler. Performance of the JWST/MIRI Si:As detector [J]. Proc. of SPIE Vol. 7021, 702100, (2008):702100-1~702100-12.
- [14] Bernard J Rauscher. The James webb space telescope and it's infrared detectors [J]. Experimental Astronomy, 2005, 19:149-162.
- [15] Philippe Tribolet. Large infrared focal plan arrays for space Applications [J]. ZSTS, 2002-n-40, 3-10.
- [16] Philip R christensen. The thermal emission imaging system (themis) for the mars 2001 odyssey mission [J]. Space Science Reviews December, 2004, 110:85-130.
- [17] Geng Lin. Foreign spaceborne laser application [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(9):919-925.
耿林. 国外空间激光应用技术研究发展 [J]. 激光与红外, 2010, 40(9):919-925.
- [18] Zhong Yi. Design of low noise circuitry using InGaAs detector for spatial remote sensing [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(5):514-517.
钟轶. 空间遥感用 InGaAs 探测器低噪声电路系统设计 [J]. 激光与红外, 2009, 39(5):514-517.