

实现高精度红外探测的冷光学技术

殷丽梅, 刘莹奇, 李洪文

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 高灵敏度、低噪声是红外探测技术的必然要求, 实现这一目标的有效手段之一就是冷光学技术。冷光学技术的成熟又进一步促进了红外探测的快速发展。通过查阅相关文献资料, 对国外典型地基大口径望远镜制冷红外设备的冷光学部分作了简要介绍, 从工程应用的角度阐述了红外光学技术的各要素, 如低温恒温器制作、光学和机械结构设计、探测器安装等在冷光学处理中的设计要点和注意事项。

关键词: 冷光学; 低温恒温器; 红外; 制冷; 杜瓦

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)09-0535-006

Cold Optics Technology to Achieve High-accuracy Infrared Detection

YIN Li-mei, LIU Ying-qi, LI Hong-wen

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: High sensitivity and low noise are necessary requirements for infrared detection technology, and one of effective means to achieve this goal is the cold optics technology. Correspondingly, cold optics technical maturity further promotes the rapid development of infrared detection. This article reviews relevant literature on typical foreign refrigeration equipment of ground-based large aperture telescope, and briefly describes their cooled infrared instrument. From the perspective of the engineering applications, several elements of the infrared optics were described, such as cryostat production, optical and mechanical design, the detector installation's key design points and considerations in cold optics processing.

Key words: cold optics, cryostat, infrared, refrigeration, dewar

0 引言

进入 20 世纪 80 年代, 天文学家已经比较成熟地利用红外技术去探测各类不同天体的红外辐射, 并从中获取天体的物理性质。红外探测受到广泛关注的原因主要有以下 3 个方面: 首先, 与可见光和无线电波探测相比, 红外探测可以观测目标自身辐射, 通过对目标 2 个以上波段红外辐射特性的测量还可以获得目标表面的温度分布; 其次, 红外波段即使在白天和地影也可以工作, 是可见光成像探测的重要补充, 是全天时地基观测网的重要组成部分; 再次, 地基大口径望远镜的前端光学系统均为反射式, 成像特性不依赖于波长, 红外探测可在现有地基大口径望远镜系统的基础上发展形成新的观测能力。可以说, 无论对于天文观测还是空间目标探测, 红外波段都提供了一种有效的探测途径。

当然, 红外探测也有其自身的困难。首先, 大气

对红外辐射不透明, 地基设备对大气层外目标的观测必须限制在大气窗口内进行; 其次, 所有温度高于绝对零度的物体均会发出红外辐射, 望远镜自身及环境在约 300 K 的背景辐射内, 形成了强大的噪声。因而要想实现背景限的高灵敏度、低噪声观测, 红外设备必须制冷。主要包括以下 2 个方面: 探测器的热生暗电流必须降低到与天空背景相比较可以被忽略的水平^[1]; 探测器感知到的热背景辐射必须降低到与天空背景或探测器暗电流二者中较大者相比较可以被忽略的水平^[1]。前者通过制冷红外焦平面即可实现, 后者的实现途径即所谓的冷光学技术。像面处能够被探测器看到的表面称为“关键面”, 这些表面会直接向像面辐射或散射能量。冷光学就是将这些“关键面”所属的光学元件(一般不包括尺寸较大的主、次镜)同探测器一起放置于低温恒温器中, 通过降温的方式抑制望远镜自身热辐射。目前, 国外的冷光学技术已十分成熟, 几乎应用于所有望远镜的红外探测设备

收稿日期: 2013-05-28; 修订日期: 2013-06-21.

作者简介: 殷丽梅(1986-), 女, 研究实习员, 工学硕士, 主要从事目标红外辐射特性测量等技术的研究。

上,包括辐射计、成像终端和光谱仪等。红外焦平面的读出噪声和暗电流越来越低,对红外冷光学不断提出更高要求,所以低温恒温器,亦称之为杜瓦,依然是红外设备的关键组成部分。

1 几个典型的制冷红外设备

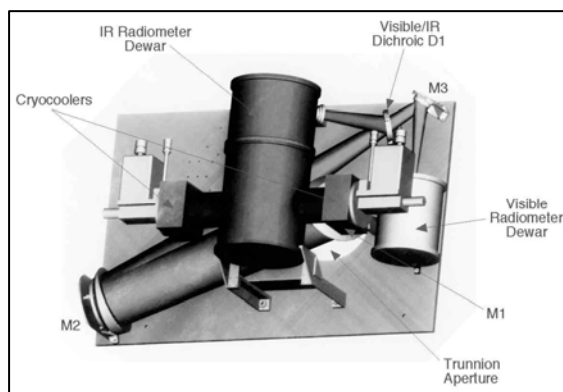
1.1 AEOS 辐射计系统

AEOS 辐射计系统^[2-3](ARS)是一个四通道同时成像的辐射计,提供优质的覆盖 $0.39\sim 23\ \mu\text{m}$ 的测光和辐射测量数据。如图 1(a)所示,ARS 安装于 3.67m 望远镜的四通上,其光学布局如图 1(b)所示,从望远镜出来的宽带辐射经平面反射镜 M_1 和装有辅助动力系统的球面反射镜 M_2 成像于一次像面。ARS 有 3 个分色片,第 1 个为可见/红外分色片 D_1 ,恰好位于 M_2 焦点的前方,使波长大于 $2\ \mu\text{m}$ 的红外辐射经 D_1 前表面反射后进入红外辐射计杜瓦,而可见光沿原光路穿过 D_1 经 M_3 反射后进入可见光杜瓦。

为减少光学背景、控制 IR 通道的杂散光,红外杜瓦内所有反射和折射光学元件均工作于 60 K。两个制冷的分色片 D2 和 D3 负责使 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $7.9\sim 13\ \mu\text{m}$ 和 $17\sim 23\ \mu\text{m}$ 的红外辐射分别进入 3 个红外通道,各通道的成像透镜组负责将目标成像于各焦平面。每个通道有 2 个制冷高速滤光轮,分别控制入射到焦平面的光学密度和光谱通带。MWIR 使用天文 InSb 焦平面,工作频率为 80 Hz,观测视场为 $196\ \mu\text{rad}$, LWIR 和 VLWIR 通道使用波音 HF-16 Si:As 焦平面,工作频率为 200 Hz,视场为 $256\times 256\ \mu\text{rad}$ 。该低温杜瓦为定制型产品,在设计时仔细权衡了加热质量和热负载的导热性,使 Si:As 焦平面工作于 10 K, InSb 焦平面工作于 45 K 的同时光学元件工作于 60 K。低温制冷由莱宝公司提供的同步闭环氦系统 G-M 制冷机实现,杜瓦内安装多个二极管,用于分系统关键部位的温度控制。



(a) ARS 安装于 3.67 m 望远镜的四通上



(b) ARS 的光学布局

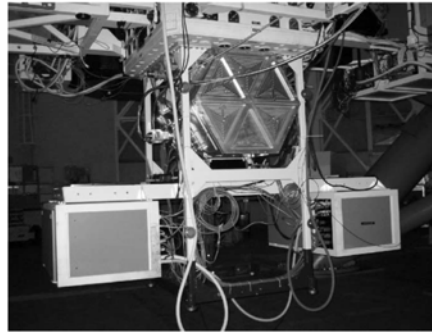
图 1 ARS 在望远镜上的安装位置和光学布局

Fig.1 Location of radiometer on telescope trunnion and radiometer optical design

1.2 Gemini 近红外成像相机

Gemini-N 望远镜的近红外相机 NIRI($1\sim 5.5\ \mu\text{m}$)由夏威夷大学设计制造,充分利用站址优质的观测条件和大口径望远镜的高性能,主镜口径为 8 m。NIRI 拥有 3 个不同的像素分辨率,分别用于大视场、倾斜校正和衍射受限成像,其焦比分别为 $f/6$ 、 $f/14$ 、 $f/32$ ^[4]。NIRI 的低温恒温器为六边形,对角线直径为 1062 mm^[5],安装于望远镜的设备支撑架(ISS)上,热隔离且由乙二醇制冷的支撑电子学封装则分别位于低温恒温器的两侧,如图 2(a)所示。低温恒温器以冷板为界可以划分为 2 个模块^[6]——科学模块和波前传感器(OIWFS)模块,2 个模块的组件直接安装在冷板的两侧。中心冷板与制冷机相连接,携带单独的科学探测器单元。这一独特的结构形式使得因维修或光机装调而移动任一模块时,不必断开探测器与制冷机、加热器的热连接和电子学连接。图 2(b)所示为 NIRI 的科学模块,光线经右侧的折叠式反射镜和转向镜后向左传输,看得见的是 3 个滤光/光瞳轮和准直透镜组件。

NIRI 低温恒温器的总质量为 314.9 kg,采用 G-M 机械制冷方式制冷,为了消除振荡膨胀阀引起的振动,2 个大功率的双级闭环制冷机相对安装且电学同步。2 个制冷机的一级冷头都与冷板相连接,冷板工作温度为 65 K,波前探测器 HAWAII-I 的最佳工作温度为 80 K,无需单独制冷。ALADDIN 探测器由其中一个闭环制冷机的二级冷头进一步制冷到 33 K,另一个制冷机的二级冷头则与低温泵相连接。为了减小杜瓦窗口两表面之间的鬼像反射,窗口玻璃两侧均镀有宽带减反射膜。杜瓦工作过程中,内部低温组件将通过辐射传递使窗口材料被制冷,最终使得窗口中心部分的温度低于室温,为了不对工作环境的湿度提出特定限制,NIRI 工作过程中始终用室温的干燥洁净空气吹杜瓦窗口前表面。还可以电离空气流,使其中的灰尘粒子不带电,防止灰尘粒子粘附到窗口前表面^[6]。



(a) NIRI 安装于望远镜 ISS 的 uplooking 端



(b) NIRI 科学模块

图2 NIRI 在望远镜上的安装及其内部结构

Fig.2 NIRI mounted on the uplooking port of the Gemini north telescope ISS and the NIRI science module.

NIRI 的独特之处在于其低阶波前传感器位于机上且由 K 带近红外探测器组成, OIWFS 保证了波前传感器和科学探测器观测路径相同^[7]。近红外波前传感的最大优势是允许引导星位于黑暗的云层中, 使得 Gemini 可被用于观测邻近严重昏暗的恒星形成区域。即使在黄昏或太阳升起之后, 红外波前传感器依然可以工作, 对于 L 和 M 带的观测, 它可以观测时间延长到太阳升起后的几个小时^[6]。

1.3 AMICA: NIR/MIR 双臂相机

AMICA^[8]于 2011 年安装于南极洲的 Dome C 观测站, 配备的 NIR/MIR 双臂相机工作波段为 2~28 μm , 覆盖天文测光波段 K、L、M、N、Q。光学系统由 4 个镀金反射镜和 2 个交替使用的面阵探测器组成。由于入射波长范围宽, 除入射窗口和滤光片是折射元件外, 光学系统采用全反射结构。2 个离轴抛物面镜和 1 个固定的 45°平面镜用于 MIR 观测, 1 个可滑动的 45°平面镜插入光路中时实现 NIR 观测。光路中的反射镜及其基座、冷阑和滤波轮均由 Al 6061 T6 制成, 冷却时, 整个系统的收缩量相同, 保证了常温

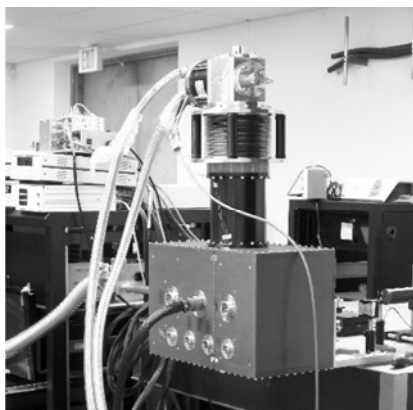
状态下各元件间的准直。包括探测器和低温滤光轮的整个光学系统被放置于在美国 IR Labs 定制的红外杜瓦内。杜瓦顶盖打开后的制冷光学平台如图 3(b)所示, 从图中可以直接看到杜瓦窗口、反射镜、滤波轮和两个探测器的安装基座。双级 G-M 制冷机的一级冷头保证了光学平台和 NIR 探测器的工作温度 $\leq 35\text{ K}$, MIR 探测器与光学平台热隔离, 探测器直接与制冷机二级冷头相连接, 工作温度 $\leq 7\text{ K}$ 。

Dome C 的极端环境 ($T=90^{\circ}\text{C}$, $p=640\text{ mbar}$, $\text{RH}=10\%$) 极大削弱了包括大气和望远镜自身热辐射在内的热背景。南极高原的高纬度使得大部分天空始终保持在地平线之上, 再加上当地卓越的大气状况和红外全天时成像特性, 有可能实现 $\lambda>4\text{ }\mu\text{m}$ 的全自动模式的多个目标连续同时观测^[9]。

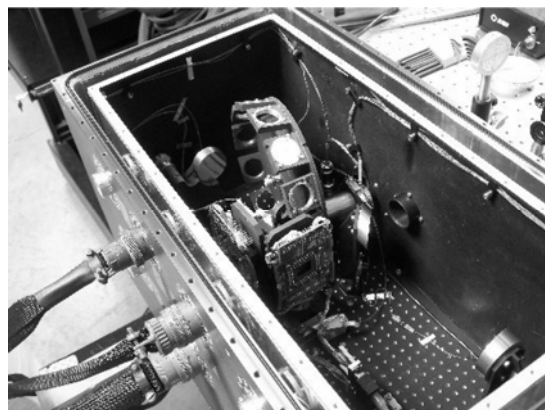
2 低温恒温器制作要素及注意事项

2.1 杜瓦的一般性描述

杜瓦内部抽真空并低温制冷, 真空度高达 $10^{-7}\sim 10^{-6}\text{ Torr}$ 。常见的低温杜瓦结构包括套在一起的 3 层



(a) 处于工作状态的杜瓦



(b) 杜瓦内部光学平台

图3 AMICA 低温恒温器

Fig.3 The AMICA cryostat

结构,外壳称作真空罩(vacuum jacket),最常见的是圆柱形,也可做成多边形,工作温度为环境温度,内表面抛光为低发射率的镜面,以减小热真空罩与内部制冷组件之间的热传递。杜瓦最内层为直接与光学冷平台相连接的防辐射屏(radiation shield),防辐射屏外表面抛光甚至镀金,内表面涂黑,抑制杂散光。在真空罩和防辐射屏之间还有一层不固定的热辐射屏蔽层(floating shield),厚度极薄,像“墙纸”一样贴在真空罩内表面,制作时可以采用双侧表面抛光为镜面并镀金的金属薄片或多层隔热材料,工作温度介于真空罩和防辐射屏温度之间。3个隔热层之间通过硬度强但导热性差的材料相连接,如玻璃钢、钛合金^[10]等。杜瓦内可加设抑制杂散辐射的挡光元件,制冷的旋转式滤光轮可进行波段选择与细分。密封的冷光学设备还有助于保持红外探测设备内部的清洁。低温杜瓦制作关键是做好内部制冷组件和热的真空罩之间的热隔离,真空罩的密封一般采用丁晴橡胶或氟橡胶O型圈。红外设备工作时,杜瓦窗口不能结露/霜,所以窗口外表面温度应与室温相同,探测器附近温度最低,一般将其置于远离杜瓦窗口的地方,由此杜瓦内部温度分布存在梯度。

2.2 冷光学系统设计、加工和装调

冷光学系统的光机结构设计和公差分配以工作温度为准,如77 K,但其加工和装调在室温下进行,工作温度和室温之间约200℃的温差将造成杜瓦内所有制冷组件发生不同程度的形变和移位。所以冷光学系统的设计、加工和装调建立在对材料热学特性充分了解的基础上,利用光学设计软件的热分析、公差分析,有限元分析软件和手动计算等方式,将冷光学系统各规格参数换算到室温水平。冷光学设计时,可以选择全反射式和折射式2种结构。全反射式冷光学系统的优势是在很宽的波段范围内消色差,且所有元件的材料相同,低温制冷之后可以保持常温下的光学装调,但一般只能采用离轴形式,设备尺寸大。折射式冷光学系统的结构简单,尺寸小,但光学镜片和镜框的材料不同,冷却时二者热膨胀系数不同,传统的透镜安装方法在此处已不再适用,需采用柔性支撑,为技术难点。冷光学装调的原则是保证光学系统冷却后依然可用的同时满足光学设计公差。

对于含有折射元件的冷光学系统,光学设计给出的光学镜片的曲率半径,镜片中心厚度和元件间隔等参数在加工装调时需换算到室温水平。由ZEMAX光学设计软件的多重结构功能选项即可直接得到换算后的曲率半径和镜片中心厚度值。至于元件间隔,由

于镜片的移动不是按顺序依次进行的,所以光学设计软件给出的结果往往不准确,更为重要的是,系统热致伸缩的基点或基面应视杜瓦结构和制冷方案等具体情况而定,故元件间隔只能手动计算^[11]。制冷过程中,金属材料镜框因热膨胀系数大而收缩得快,光学镜片受到来自透镜边缘由镜框快速收缩带来的径向压力。传统的透镜安装工艺在此处已不再适用,文献[12-15]介绍了几种适用于冷光学透镜安装的方法。透镜的热传递十分缓慢,大尺寸镜片基本上仅依赖于辐射传递来降温^[12],冷却过快将直接导致透镜因热应力而炸裂,所以制冷过程中应小心控制制冷速率。全反射式光学系统在冷光学处理中相对容易一些,关键是找准系统热致伸缩的基点/基面。为保证反射镜镜面冷却后的面型精度,机械设计人员需着重设计反射镜与冷板的连接部分。但是全反射式光学系统一般只能采取离轴形式,装调困难,故仅适用于结构简单的冷光学系统。

2.3 探测器安装

传统制冷探测器的安装工艺是:探测器芯片陶瓷基座的背面有网格状的插针,用于与零插入力(ZIF)的插座连接,之后将ZIF插座焊接到fanout板上。如此,中心部分的插针用于探测器的制冷,而周围的插针则用于探测器与fanout板的电子学连接。探测器附近安装有温度传感器和加热器,实现探测器工作温度的实时监测和控制^[16]。Bezawada^[17]等人曾利用具有温控平台的测试杜瓦对雷神公司提供给VISTA的短波红外HgCdTe 2 k×2 k探测器性能做了详细研究。实验结果表明,直流输出平均值随探测器工作温度的变化而变化,漂移量为3 mV/K,相当于838 e⁻/K。所以为了消除偏压漂移的影响,HgCdTe探测器的温控精度一般要求达到±1 mK^[18]。

红外探测器的控制和读出电子学可以被划分为独立的3个部分。第1部分为低温杜瓦内的电子学,包括数字信号(时钟和控制)输入、探测器模拟视频信号输出和接地,它们被限制在位于探测器后方的fanout板上,工作于低温环境,如图4左侧虚线框内所示。fanout板通过杜瓦壁上的真空连接器直接与位于杜瓦外壁的,由时钟和预放板组成的第2部分电子学相连接,工作在室温环境。随后,放大的模拟信号传输到第3部分电子学,该部分包括探测器控制单元、温度控制单元和视频信号处理等,如图4右侧虚线框内所示。

近几年,CMOS工艺的发展使得FPA片上控制器能够替代多个传统的PCB板^[19],这一举措不仅有效

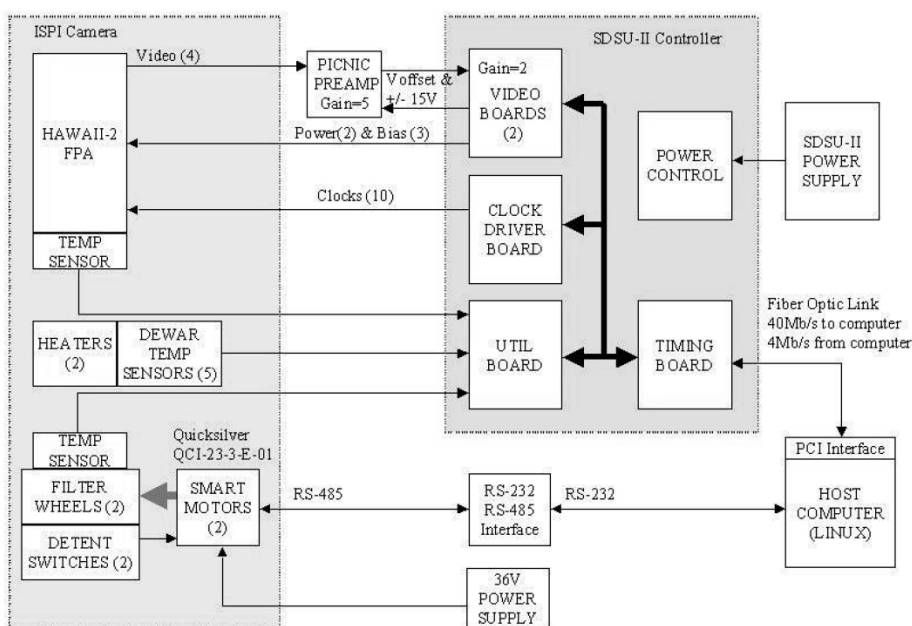
图 4 CTIO 4m 望远镜的 ISPI 阵列控制电子学原理框图^[12]

Fig.4 Array control electronics block diagram of the ISPI for the CTIO 4-m telescope^[12].

降低了支撑电子学的功耗、尺寸和重量，而且简化了成像分系统的设计和集成。罗克韦尔公司^[20]生产的 CMOS 工艺读出集成电路 SIDECAR ASIC 就包括了时钟、偏压生成电路，微控制器，内存和 ADC，由此，制冷探测器的安装和使用变的更加简单易行。

2.4 杜瓦操作过程中的几点注意事项

冷光学设备的一次制冷和再加热的过程称为一个冷循环。探测器制冷时，有 2 点注意事项。第一，探测器在工作过程中会有像素损失，尤其是经历冷循环时。在这一过程中，即使操作者再谨慎小心，红外阵列的像素不可避免的发生坏死，称之为致盲。致盲像素对入射辐射有响应但不会饱和，其读出数码值在 10 到满井数码值之间。ISPI 科学级探测器的损耗经实验测量为 180 像素/冷循环，因而冷光学设备应尽量减少冷循环次数，与此同时，为了尽量避免探测器像素致盲，冷循环过程中探测器温度变化速率不应超过 $1\text{ K/min}^{[21]}$ 。

根据英国国家物理实验室(NPL)的实验验证,几乎所有类型的红外探测器在低温环境下使用一段时间后,光谱响应均会在特定波段发生不同程度的下降^[22]。这一现象的产生机理至今未有定论,但普遍认为是水气吸附于冷光学元件表面,形成了具有一定厚度的“冰层”。空基和天基制冷设备每隔一段时间需将冷光学加热以除掉冰层,其工程经验表明,冰层产生速率随时间逐渐减缓^[23-24],故在设备使用初期,冰

层造成的污染应特别引起关注。针对地基冷光学设备,为避免冰层直接产生于探测器表面,在设备冷却和加热过程中,应保证探测器的温度在前期高于其他组件。

3 结束语

冷光学技术是实现高精度红外探测的关键技术之一。国外对冷光学技术的运用已驾轻就熟,在制冷设备的研制过程中不断引入新技术并取得成功。国内在地基大口径望远镜领域起步晚,在冷光学方面的研究尤其落后,随着国外优质探测器的引进和望远镜性能的改善,高灵敏度的红外探测必将逐渐被重视。

参考文献:

- [1] Rayner J, Shure M, Toomey W D, et al. Design of a new 1-5.5 μm infrared camera for the NASA Infrared Telescope Facility[J]. *SPIE*, 1993, **1946**: 490-501.
- [2] Pritchett G D, Hendrick W R, Moore K D. AEOS radiometer system: a multi-channel imaging radiometer[C]//*Proc. of SPIE*, 1999, **3701**: 206-213.
- [3] Vigil L M, Witte J D, LeVan D P, et al. Sensor suite for the Advanced Electro-Optical System (AEOS) 3.6-m telescope [C]//*Proc. of SPIE*, 1996, **2819**.
- [4] Hodapp W K, Hora J, Graves E, et al. The Gemini Near-Infrared Imager NIRI[C]//*Proc. of SPIE*, 2000, **4008**: 1334-1341.

- [5] Young T T, Hodapp W K, Douglass J, et al. Cryostat Design and Fabrication for the Gemini NIRI Instrument[C]//*Proc. of SPIE*, 1998, **3354**: 1084-1091.
- [6] Hodapp W K, Jensen B J, Irwin M E, et al. The Gemini near-infrared imager(NIRI). *The Astronomical Society of the Pacific*, 2003, **115**: 1388-1406.
- [7] Mountain M C, Kurz R, Oschmann M J. The Gemini 8-m telescopes project[C]//*Proc. of SPIE*, 1997, **2871**: 15-23.
- [8] Dolci M, Straniero O, Di Rico G, et al. AMICA: the NIR/MIR camera for automatic astronomical observations from Dome C, Antarctica[C]//*Proc. of SPIE*, 2010, **7735**: 77353L.
- [9] Straniero O, Dolci M, Valentini A, et al. AMICA: The first camera for near- and mid-infrared astronomical imaging at DOME C[C]//*1st ARENA Conference on Astronomy at CONCORDIA*, 2007, **25**: 215-220.
- [10] 胡炳亭, 徐涛, 江世臣, 等. 多通道扫描成像辐射计热设计[J]. *红外技术*, 2011, **33**(3): 141-146.
- [11] Bizenberger P, Baumeister H, Büchler Costa J, et al. Optical design and cryogenic mounting of the optics for a pyramid wavefront sensor working in the near infrared wavelength range[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5962**: 596227.
- [12] Probst G R, Montane A, Warner M, et al. ISPI: the infrared side port imager for the CTIO 4-m telescope[C]//*Proc. of SPIE*, 2003, **4841**: 411-419.
- [13] Baumeister H, Bizenberger P, Bailer-Jones A-L C, et al. Cryogenic engineering for Omega 2000: design and performance[C]//*Proc. of SPIE*, 2003.
- [14] Autry R, Probst R, Starr B, et al. NEWFIRM: the widefield IR imager for NOAO 4-m telescopes//*Proc. of SPIE*, 2003, **4841**: 525-539.
- [15] SUZUKI R, TOKOKU C, ICHIKAWA T, et al. Multi-object infrared camera and spectrograph (MOIRCS) for the Subaru telescope I. imaging[J]. *Astron. Soc. Japan*, 2008, **60**: 1347-1362.
- [16] 黄新栋. 制冷型红外探测器高精度制冷控温系统[J]. *红外技术*, 2012, **34**(9): 547-550.
- [17] Bezawada N, Ives D, Woodhouse G. Characterisation of VISTA IR detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2004, **5499**: 23-34.
- [18] McGregor P, Hart J, Conroy P, et al. Gemini near-infrared integral field spectrograph (NIFS)[C]//*Proc. of SPIE*, 2003.
- [19] 王忆锋, 陆剑鸣. 向数字化发展的红外焦平面阵列[J]. *红外技术*, 2013, **35**(4): 195-201.
- [20] Chuh T, Loose M, Gulbransen J D, et al. Astronomy FPA advancements at Rockwell Scientific[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6265**: 62652K.
- [21] van der Blik S N, Norman D, Blum D R, et al. ISPI, a wide field NIR imager for the CTIO Blanco 4-meter telescope//*Proc. of SPIE*, 2004, **5492**: 1582-1589.
- [22] Theocharous E, Fox P N. Reversible and apparent ageing effects in infrared detectors[J]. *Metrologia*, 2003, **40**: S136-S140.
- [23] Buffet L, Pequignot E, Blumstein D, et al. IASI instrument onboard metop-A: lessons learned after almost two years in orbit[C]//*ICSO Conference*, 2008.
- [24] Hewison J T, Müller J. Ice contamination of meteosat/SEVIRI implied by inter-calibration against Metop/IASI[J]. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 2013, **51**(3): 1182-1186.