

## 集成双热电致冷器超长线列 InGaAs 组件封装技术

徐勤飞<sup>1,2,3</sup>, 刘大福<sup>1,2</sup>, 徐琳<sup>1,2</sup>, 张晶琳<sup>1,2</sup>, 曾智江<sup>1,2,3</sup>, 范崔<sup>1,2,3</sup>, 李雪<sup>1,2</sup>, 龚海梅<sup>1,2\*</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了实现大视场、高空间分辨率、高光谱分辨率的指标要求, 通常采用多模块拼接的技术方案, 实现超长线列的组件。通过两个热电致冷器的拼接实现 120 mm 长度的大冷面, 通过多个模块拼接实现 4 000 元长线列 InGaAs 短波红外探测器组件的封装。同时针对超长线列温度均匀性实现、拼接焦平面的共面性、拼接的工程可靠性开展研究, 通过热电致冷器的拼接、热分析、冷板材料的选择、零件公差控制及微调节等技术手段, 在工程上实现了超大冷面的温度均匀性控制在 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 以内; 焦平面的共面性控制在 $\pm 0.020\text{ mm}$ 以内。封装的超长线列 InGaAs 短波红外组件通过了冲击和随机振动实验, 实验前后焦平面的共面性无明显变化, 实现了清晰的地面成像。

**关键词:** 超长线列; InGaAs 探测器组件; 热电致冷器; 拼接; 共面

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1104005

## Packaging for Long Linear InGaAs FPA with two thermoelectric coolings

Xu Qinfei<sup>1,2,3</sup>, Liu Dafu<sup>1,2</sup>, Xu Lin<sup>1,2</sup>, Zhang Jinglin<sup>1,2</sup>, Zeng Zhijiang<sup>1,2,3</sup>, Fan Cui<sup>1,2,3</sup>,  
Li Xue<sup>1,2</sup>, Gong Haimei<sup>1,2\*</sup>

- (1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to realize large scale, high spatial resolution and high spectral resolution, mechanical assembly technology was usually adopted to realize Long Linear assembly. The large cold plate of 120 mm was achieved through the mechanical assembly technology of two thermoelectric coolings. Packaging of

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61376052)

作者简介: 徐勤飞(1983-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事红外探测器封装技术方面的研究。Email: xu5178@163.com

导师简介: 龚海梅(1954-), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事空间应用红外、紫外探测器等方面的研究。Email: hmgong@mail.sitp.ac.cn

Long Linear InGaAs focal plane array assembly with 4 000 pixels was adopted through the mechanical assembly technology. Temperature uniformity distribution of the Long Linear, the coplanar error of FPAs, and the engineering reliability of the assembly were studied. The temperature uniformity was controlled at  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ , the focal plane array coplanar error was controlled inside  $\pm 0.020$  mm by mechanical assembly of thermoelectronic coolings, thermal analysis, selection of coolings material, tolerance control of component and micro regulation etc. The Long Linear InGaAs focal plane array shortwave infrared assembly had passed the impact and random vibration test, the focal plane array coplanar error was nearly unchanged. At last, a clear ground-imaging in the camera was obtained.

**Key words:** Long Linear; InGaAs detector assembly; thermoelectric cooling; mechanical assembly; coplanar

## 0 引言

1~2  $\mu\text{m}$  的短波红外谱段可以提供多样的图像和光谱信息,在航空航天、医学成像、产业测温、安全防范等领域有广泛的应用<sup>[1]</sup>。铟镓砷(InGaAs)是制备该波段红外探测器的主要材料之一,已经成功研制出高性能的 512×1,800×2 线列焦平面探测器组件<sup>[2-4]</sup>、512×128,320×240,640×512<sup>[5]</sup>等面阵焦平面探测器组件,其相应波段 0.9~1.7  $\mu\text{m}$ ,探测率  $2\text{E}+12$   $\text{cm}^2/\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。受制于材料、器件工艺、成品率等因素,规模无法无限做大,而航天遥感对线列焦平面规模的要求在不断提高,为了实现大规模、高空间分辨率、高光谱分辨率的指标要求,通常采用多模块拼接的技术方案。

在近室温工作的 InGaAs 探测器组件中,通常采用半导体致冷器精确控制温度,稳定工作温度点,为探测器工作提供良好的环境氛围,从而保证良好的探测精度和成像效果。

由于热电致冷器的两片陶瓷基板总是分别作为冷面和热面,在热面热胀的同时,冷面在收缩,面积越大,工作时所受的应力越大,因此热电致冷器不可能无限做大。当冷面很大时,单只热电致冷器不能有效保证温度均匀性,需要通过多个 TEC 进行拼接,形成一个大冷面。

探测器拼接可分为“有缝”拼接和“无缝”拼接,具体拼接方式的选用,需要综合考虑探测器拼接布局的需求以及成像光学系统的工作模式。

“有缝”拼接方式又称为“马赛克”拼接,是指按照

平面度要求将探测器放在同一个焦平面上进行成像,由于一次曝光成像中,焦平面上的探测器之间存在非感光面,图像不完整,存在“盲区”的拼接方式。

“无缝”拼接方式又称为“品字形”拼接,是指按照平面度要求将探测器放在对应的位置上,且所得图像在光学系统视场内的连续区域,且通常在一个方向上存在像素错位重叠。

考虑应用需求,将通过两只热电致冷器拼接和大的导冷基板区实现大冷面,实现不同冷源下温度的均匀性、冷板的材料选型是文中研究重点。同时通过多个铟镓砷子模块“无缝”拼接方式,实现长线列,文中研究了多个模块的焦平面的共面性,开展了力学分析和环境适应性实验,实现 4 000 元长线列组件。文中报告了一种采用铟镓砷子模块拼接的超长线列焦平面的组件。

## 1 组件封装

### 1.1 组件结构设计

探测器组件主要包括外壳、热电致冷器、焦平面子模块、导热基板和多层引线等部分组成。组件内集成两只热电致冷器,热电致冷器的热面与外壳内腔的底面固定,两个冷面与一个导热基板连接,通过设计合适的基板使得基板的温度均匀性小于  $1^{\circ}\text{C}$ ,然后将焦平面子模块安装在导热基板上,导热基板通过固定块与外壳固定,减少热电致冷器的机械受力。图 1 是组件的结构示意图,该组件结构可以满足长度 120 mm 的线列焦平面封装。

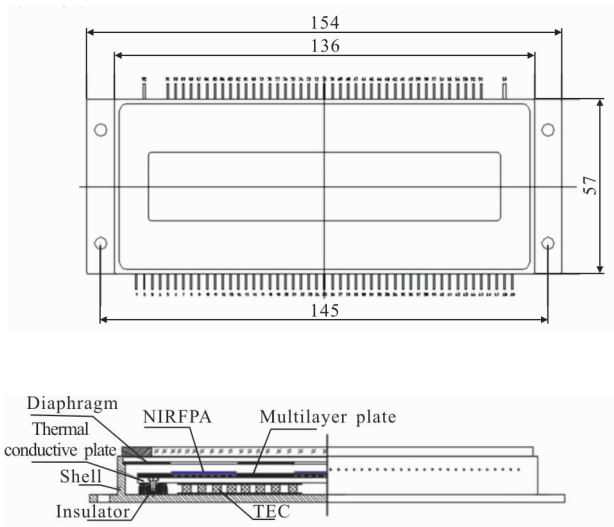


图 1 组件结构设计图

Fig.1 Structure of assembly

## 1.2 超长线列焦平面组件封装设计需要考虑的几个问题

### 1.2.1 温度均匀性

温度变化对  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  探测器性能影响很大<sup>[6]</sup>。探测器零偏压下的电阻与光敏面积的乘积  $R_0A$  是探测器的一个重要参数，与探测器的峰值探测率密切相关， $R_0A$  的大小决定着探测器峰值探测率  $D_{\lambda}^*$  的高低。对器件零偏压附近的 I-V 曲线微分即可得到  $R_0$ <sup>[7]</sup>。

对于 InGaAs 探测器，在 0℃ 附近，温度变化 1℃， $R_0$  变化约 6%。器件  $R_0$  随温度的变化实测值如图 2

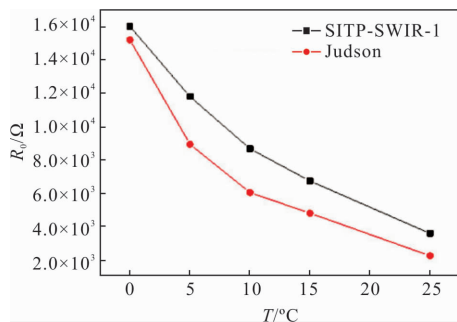


图 2  $R_0$  随温度的变化图

Fig.2 Curve of temperature dependent  $R_0$

所示，由此可见，温度的变化将引起组件性能的变化。因此，在组件设计中，需要考虑温度均匀性对组件非均匀性的影响，将温度均匀性控制在 ±1℃ 以内。

组件将采用热电致冷器实现精确控温。典型半导体致冷器的结构如图 3 所示<sup>[8-9]</sup>。

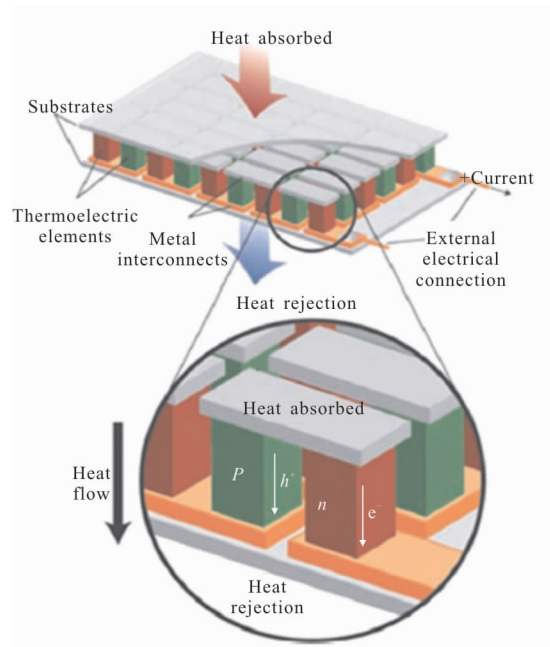


图 3 典型半导体致冷器的结构示意图

Fig.3 Structure schematic of the thermoelectric module

### 1.2.2 拼接精度要求

考虑应用，探测器采用“无缝”拼接方式，拼接成 4000 元的长线列，有效像元不重叠，拼接处无缝。拼接误差要求小于 <1/3 像元。

固定焦距的光学系统可对焦深范围内的物体可以清晰成像。而焦深范围之外则表现为模糊的离焦像<sup>[10]</sup>。因此，为了成像需要，需要保证拼接的各芯片间的平面度；焦深公式为<sup>[11]</sup>：

$$d = 4\lambda F^2 \quad (1)$$

拼接后，尽量所有的光敏元在同一平面内，即它们都应在光学系统的焦平面上。也就是所有的光敏面在光学系统的焦深范围之内。因此，要求共面误差小于 <±50 μm。

### 1.2.3 拼接模块的工程可靠性问题

组件作为遥感探测仪的探测器敏感组件，在工程应用上，可靠性非常重要。保证组件在存储、运输及发射过程中，性能稳定，共面的平面度无变化。

根据以上结构设计，开展了组件的组装和封装。完成封装后的样品形貌如图 4 所示，样品编号为 1#、2#。样品状态如表 1 所示。

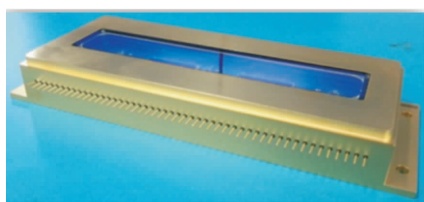


图 4 样品形貌

Fig.4 Appearance of sample

表 1 样品状态

Tab.1 State of sample

Number	Use
1#	Temperature uniformity and experiment
2#	Imaging

## 2 仿真与实验分析

### 2.1 力学分析

组件在封装过程中和使用中不可避免的受到力的作用,包括振动、加速度和压力等。模态分析是力学模拟中比较重要的一项,通过模态分析可以得到组件的固有频率,在使用中要尽量避免在固有频率附近,以免损伤组件。加速度分析可以分析出在重力加速度作用下,组件内各部件的受力变形情况。组件检漏中则不可避免的承受压力的作用。

组件的第一阶模态在 1.2 kHz 附近,表现为光阑的变形,这是由于光阑是一种板状结构,在组件内四周与外壳固定,在振动时光阑中心位置容易产生上下振动,在 1.2 kHz 存在固有频率。光阑必不可少,在合适的位置设置发黑的光阑可以对杂散光进行吸收和抑制<sup>[12]</sup>。

在 4 900 m/s<sup>2</sup> 的加速度作用下,最大的应力产生在光阑位置,为 89 MPa,最大形变小于 0.15 mm。

组件在 3 atm 的外界压力作用下,最大应力产生在窗口上,为 2 MPa,对应的窗口变形小于 0.03 mm。

1# 组件采用最小二乘法在 performance 443 影像仪上,用激光测量得到平面度,并在完成焦面精度检测后,进行了一系列的环境实验,包括随机振动实验、冲击实验等,实验后对焦面进行精度的复检。

随机振动按 GJB7247-2011 的 4.7.7 和表 2 规定进行:

表 2 随机振动实验条件

Tab.2 Test conditions of random vibration

Vibration orientation	Frequency/ Hz	Power spectrum density	Root-mean-square/ Grms	Duration/ min
	10-100	3 dB/oct		
X, Y, Z	100-600	6 g <sup>2</sup> /Hz	7.17	2
	600-2 000	-9 dB/oct		

冲击实验按 GJB 1788-1993 方法 2070 和以下规定进行:(1) 脉冲波形为半正弦脉冲;(2) 峰值加速度为 150 m/s<sup>2</sup>;(3) 持续时间:11 ms;(4) 方向为 6 个方向,每个方向 3 次。

实验后,采用影像仪测量平面度,表 3 为测量结果,组件的平面度及性能无明显变化。

表 3 样品 1 实验前后平面度和性能变化

Tab.3 Flatness and performance before and after experiment

Parameter	Before experiment	After experiment
Flatness/mm	±0.015	±0.014
Signal/V	0.546 322	0.591 077
Noise/V	0.004 935	0.005 221
Dead pixel ratio	0.15%	0.16%
Nonuniformity	3.52%	3.5%

表 3 表明实验前后,平面度变化率 6.6%,信号变化率为 8.24%,噪声变化率为 5.8%,盲元率变化率为 6.6%,非均匀性变化率约为 0.56%。从平面度的指标和性能参数指标上看,变化率在误差范围内,因此,可认为组件样品通过了力学摸底实验。

### 2.2 热学分析

#### 2.2.1 热电致冷器热负载

热电致冷器的冷面的热负载是选择热电致冷器型号的重要依据之一,热电致冷器冷面的热负载有两种:主动热负载和被动热负载,就文中来讲前者是指模块的本身发热,用模块的标准功耗近似;后者则是传热学中传导热、对流热和辐射热三种<sup>[13]</sup>。

模块的总功耗为  $Q_{\text{Pow}}=200 \text{ mW}$ 。

模块到多层引线板的互联引线及多层引线板到外壳的引线是传导热的主要来源,将这两种引线简化,引线长度用两种引线的总长度近似,忽略多层引

线板, 得到模型参数如表 4 所示, 计算得到传导热  $Q_{con}$  为 220 mW。

表 4 传导热模型参数

Tab.4 Heat transfer coefficient of module

Parameter	Value
Length $L/mm$	5
Number $n$	78
Diameter $D/\mu m$	50
Thermal conductivity $k/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	205
Temperature difference $\Delta T/K$	35

考虑到热电致冷器安装到组件内部, 对流应该为密闭空间的自然对流。该问题是热耦合的经典, 很多学者都进行了相关研究<sup>[14-16]</sup>, 文中将直接借用研究结果<sup>[16]</sup>, 按照极端状态估算对流热。TEC 冷面基板与组件盖板间的水平平板之间的距离  $L$  为 2.4 mm, 查物理特性可以得到 40 °C 下氮气的密度  $\rho$  为 1.14 kg/m<sup>3</sup>, 体胀系数  $\beta$  取 0.003 2 K<sup>-1</sup>, 普朗特数  $Pr$  取 0.701, 运动黏度  $\nu$  取 1.63×10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s, 组件内气体导热系数  $\lambda$  取 0.024 2 W/(m·K), 温差  $\Delta T=35$  K, 可以计算得到瑞利数  $Ra$  为 40.2, 因此取当量导热系数  $\lambda e \approx \lambda$ 。最终得到内部的对流热  $Q_{Cov}$  为 19 mW。

辐射热可以用公式(2)表达, 其中  $k$  是 Stefan-Boltzmann 常数, 形状因子  $F$  和材料表面发射率  $\varepsilon$  均取 1, 计算可得辐射热。

$$Q_{Rad}=kF\varepsilon A(T_{Hot}^4 - T_{Cool}^4) \quad (2)$$

同时, 考虑到导热板表面覆盖有多层引线板, 稳态热分析表明多层引线板的温度要比导热板的温度高约 6 K, 由此需要对对流热和辐射热进行修正, 最终得到对流热和辐射热分别为 15 mW 和 322 mW。

热电致冷器的热负载

$$Q=Q_{Pow}+Q_{Con}+Q_{Cov}+Q_{Rad}=757 \text{ mW}$$

根据热负载大小和工作温度点确定热电致冷器的选型 RC12-8。

### 2.2.2 温度均匀性

温度对 InGaAs 的响应有一定的影响, 因此封装组件内模块的温度均匀性是影响组件响应均匀性的因素之一。组件内模块冷面的温度通过两个热电致冷器来实现, 两个热电致冷器在交流阻抗、制冷温差及厚度尺寸参数方面都进行了配对选择, 如表 5 所示。

表 5 零部件选材及参数

Tab.5 Materials of sample and its physical parameters

Name	Material	Thermal conductivity /W·(m·K) <sup>-1</sup>	Heat capacity/ J·(kg·K) <sup>-1</sup>	Density /kg·m <sup>-3</sup>
Cold plate of TEC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (96%)	25	800	3 800
Thermal conductive plate	W <sub>85</sub> Cu	190	400	16 300
FPA	Silicon	163	703	2 329
Multilayer plate	Epoxy	0.35	880	2 000
Shell	Kovar	17.3	439	8 250
Base plate	Sapphire	25.2	761	3 980

TEC 冷板上的位置分布如图 5 所示, 图 6 为柯伐冷板不同位置的温度随时间变化图, 图 7 为 W<sub>85</sub>Cu 冷板不同位置的温度随时间变化图, 不同冷板温度

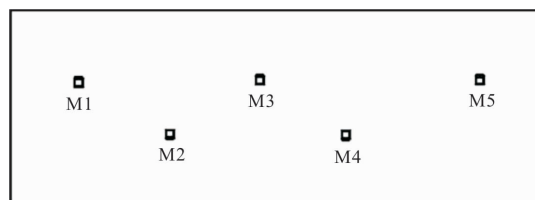


图 5 位置分布图

Fig.5 Position distribution

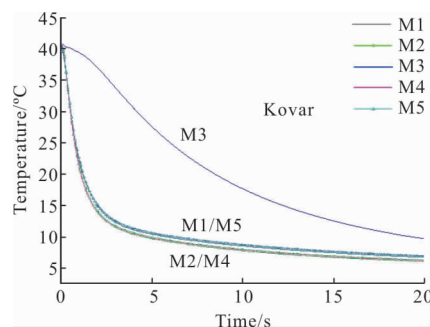


图 6 柯伐冷板不同位置的温度随时间变化图

Fig.6 Temperature-time of Kovar-plate at different positions

随时间变化不同, 与冷源 TEC 的位置分布有关。1# 组件完成焦面精度检测后, 开展了温度均匀性实验, 用测温电阻胶结于各芯片安装区, 测量不同安装位置处的电阻值, 并根据公式(3)算出各位置区域的温度值, 得出在不同输入功率下的温度均匀性在 ±0.4 °C 以内。不同功率对应温度分布如图 8 所示。

$$R_t = R_0 [1 + at - bt^2 - ct^3(t - 100)] \quad (3)$$

式中： $R_0$  为  $100 \Omega$ ； $a$  值为  $3.908 02 \times 10^{-3}$ ； $b$  值为  $5.801 95 \times 10^{-7}$ ；当温度  $t < 0$  时， $c$  值为  $4.273 51 \times 10^{-12}$ ，当温度  $t \geq 0$  时， $c$  值为 0。

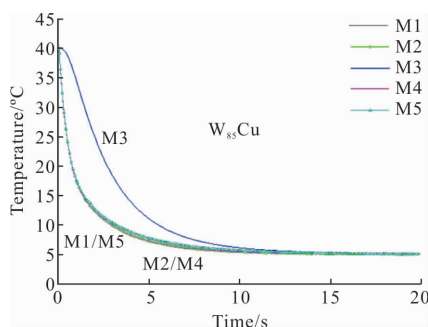


图 7  $W_{85}Cu$  冷板不同位置的温度随时间变化图

Fig.7 Temperature-time of  $W_{85}Cu$ -plate at different positions

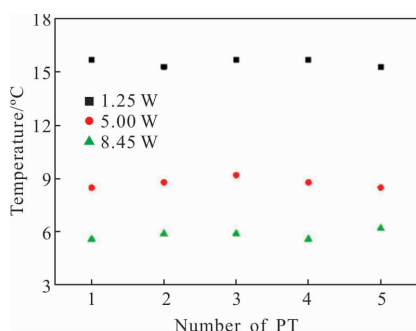


图 8 不同功率下的温度分布

Fig.8 Temperature distribution of different powers

封装结构可以实现大面积冷面，且冷面均匀性一致性很好。

### 2.3 组件性能测试

组件 2# 安装到调好的相机光学镜头上进行地面成像实验，得到了依据检测数据所期望的图像，成像实验照片如图 9 所示。



图 9 4000 元 InGaAs 组件 2# 成像实验照片

Fig.9 An image from 4000 InGaAs assembly numbered 2#

## 3 结论

设计了集成双热电致冷器超长线列碲镉汞的封装结构，并研制了样品组件。组件中采用两个热电致冷器拼接，并通过导热率较高的  $WuCu$  材料作为导冷面，大冷面可实现  $120 \text{ mm}$  尺度范围内的温度均匀性控制在  $\pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$  以内，为  $InGaAs$  探测器工作精确控制温度，提供稳定工作温度点，从而为探测器工作提供良好的环境氛围，保证了探测器性能参数的一致性，保证了良好的探测精度和成像效果。采用多模块“无缝”式品字形拼接，实现了焦平面组件的共面性在  $\pm 0.015 \mu\text{m}$ ，实现了所有光敏元面在光学系统的焦深范围以内，安装光学镜头，实现了地面演示成像，成像效果良好。研制的样品组件在随机振动和冲击实验前后的共面性、性能参数变化率均在  $10\%$  以内，无明显变化，通过了力学摸底实验考核，具有可靠的工程应用价值。

### 参考文献：

- [1] Porod W, Ferry D K. Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds[J]. *Phys Rev B*, 1983, 27(4): 2587-2589.
- [2] Gong Haimei, Tang Hengjing, Li Xue, et al. Near infrared InGaAs FPAs for space applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4):574-582.
- [3] Tang Hengjing. Technical study on InGaAs linear SWIR focal plane arrays [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, 2008. (in Chinese)  
唐恒敬. 台面型 InGaAs 短波红外线列探测器技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2008.
- [4] Shao Xiumei, Li Tao, Deng Honghai, et al. Planar-type  $24 \times 1$  InGaAs short wave infrared detectors [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(9): 501-504. (in Chinese)  
邵秀梅, 李涛, 邓洪海, 等. 平面型  $24$  元 InGaAs 短波红外探测器[J]. 红外技术, 2011, 33(9): 501-504.
- [5] Shao Xiumei, Gong Haimei, Li Xue, et al. Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38 (8): 629-635. (in Chinese)  
邵秀梅, 龚海梅, 李雪, 等. 高性能短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. 红外技术, 2016, 38(8): 629-635.
- [6] Morio W, Haruo H. Wide wavelenght and low dark current

- lattice-mismatched InGaAs/InAsP photodiodes grown by metalorganic vapor-phase epitaxy [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 64(10): 1265–1267.
- [7] Hao Guoqiang, Zhang Yonggang, Gu Yi, et al. Temperature behavior of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  PIN photodetectors [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2005, 11 (2): 192–196. (in Chinese)  
郝国强, 张永刚, 顾溢, 等.  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  PIN 光电探测器的温度特性分析 [J]. 功能材料与器件学报, 2005, 11(2): 192–196.
- [8] Elsheikh M H, Shnawah D A, Sabri M F M, et al. A review on thermoelectric renewable energy: principle parameters that affect their performance [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30(2): 337–355.
- [9] Guo Chen, Pan Kailin, Cheng Hao. Research progress of the thermoelectric refrigeration technology[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2018, 55(12): 927–931. (in Chinese)  
郭琛, 潘开林, 程浩. 热电制冷技术的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(12): 927–931.
- [10] Zhou Hao, Gu Jihua, Chen Daqing. Multi-plane imaging in digital holography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 513–518. (in Chinese)  
周皓, 顾济华, 陈大庆. 数字全息多平面成像技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 513–518.
- [11] Zhou Shichun. Introduction to Advanced Infrared Optoelectronic Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)  
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [12] Xu Qinfei, Liu Dafu, Gong Haimei, et al. The quantificational spectrum control for low temperature integrated dual-band assembly [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10 (55): 744–751. (in Chinese)  
徐勤飞, 刘大福, 龚海梅, 等. 双波段芯片集成封装组件的低温光谱定量化[J]. 中国光学, 2017, 10(55): 744–751.
- [13] Pitts D, Sissom L. Heat Transfer [M]. 2nd ed. Translated by Ge Xinshi, Ye Hong, Chen Zeshao. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)  
D Pitts, L Sissom. 传热学 [M]. 第二版. 葛新石, 叶宏, 陈则韶, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] Li Guangzheng, Ma Honglin. The numerical simulation of natural convection in a closed cavity [J]. *Journal of HUST (Urban Science Edition)*, 2004, 21(3): 14–17. (in Chinese)  
李光正, 马洪林. 封闭腔内高瑞利数层流自然对流数值模拟 [J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 21(3): 14–17.
- [15] Li Shiwu, Xiong Lifang. Study of natural convection in closed a square cavity [J]. *Industrial Heating*, 2007, 36(3): 10–13. (in Chinese)  
李世武, 熊莉芳. 封闭方腔自然对流换热的研究 [J]. 工业加热, 2007, 36(3): 10–13.
- [16] Huang Chunyong, Wang Houhua. Natural convection heat transfer in the air-layer of insulating glass [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2009, 32 (7): 809–814. (in Chinese)  
黄春勇, 王厚华. 中空玻璃空气夹层内的自然对流换热 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2009, 32(7): 809–814.