

文章编号: 1672-8785(2017)04-0001-05

# 微型红外探测器组件集成 技术及其应用

孙 闻<sup>1,2,3</sup> 俞 君<sup>1,2</sup> 张 磊<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;
2. 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:** 针对微型红外探测器组件的应用特点, 介绍了国内外微型红外探测器组件集成技术的发展现状, 重点阐述了红外探测器组件集成中的几种关键技术。这些技术的研究和发展对于推进微型红外探测器组件的应用至关重要。

**关键词:** 红外探测器; 低温制冷机; 集成

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.04.001

## Integrated Technology of Miniature Infrared Detector Assembly and Its Application

SUN Wen<sup>1,2,3</sup>, YU Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG lei<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** According to the application features of miniature infrared detector assembly integrated technology, the current status of miniature infrared detector assembly integrated technologies at home and abroad is presented. Several key technologies in infrared detector assembly integration are discussed. The research and development of these technologies are of great importance to the promotion of the application of miniature infrared detector assemblies.

**Key words:** infrared detector; cryocooler; integration

## 0 引言

红外成像技术不仅在军用领域已有广泛应用, 而且在安防、电力和医药等民用领域也有越来越多的应用。随着红外成像技术的不断发展, 人们对红外成像设备也提出了体积小、重量轻以及可靠性高等要求。红外探测器组件是红外成像设备的核心部件。微型致冷红外探测器组

件的集成, 主要是指将红外探测器、杜瓦以及制冷机等部件整合成一个组件的过程。常见的集成方法是先将红外探测器直接安装在制冷机冷指的冷头上, 然后通过封装形成杜瓦, 最后将其与斯特林制冷机进行耦合集成, 即集成式探测器-杜瓦-制冷机组件(Integrated Detector Dewar Cooler Assembly, IDDCA)集成技术<sup>[1]</sup>。本文主要

**收稿日期:** 2017-01-16

**作者简介:** 孙闻(1987-), 男, 上海人, 助理研究员, 在职硕士, 主要从事红外探测器封装技术研究。

E-mail: jacksunwen@mail.sitp.ac.cn

对国内外微型红外探测器组件集成技术的发展以及部分封装集成的关键技术进行介绍。

## 1 微型红外探测器组件的集成技术

微型红外探测器组件的集成技术以微型化和轻量化为要求,目前主要是 IDDCA 组件集成技术。该技术在应用中大多采用基于旋转电机和曲柄连杆结构的小型斯特林制冷机。与基于直线活塞结构的斯特林制冷机相比,此类制冷机具有结构紧凑、效率高、技术成熟、价格低等特点,因而在各种微型红外探测器组件中得到了广泛应用。由于微型红外探测器组件集成后对组件体积、重量、快速启动能力等技术指标有着严格的要求,所以在其设计与制造过程中需要着重考虑组件的热力学结构设计并开展影响组件热学特性的关键技术研究。

## 2 组件的热力学设计

对于微型致冷红外探测器组件来说,热学设计影响着组件冷端的低温热学特性,比如快速启动能力及功耗等关键技术指标,而力学结构设计则需适应组件可能经历的恶劣力学环境。

### 2.1 热学设计

热学设计主要包括冷指气缸的热学结构设计、探测器的引线基板设计以及组件热负载优化设计。

在冷指气缸的热学设计中,主要考虑其固体传导的漏热情况。根据理论计算及工程经验,冷指气缸的固体传导漏热可达微型红外探测器组件漏热的 50%,所以冷指气缸一般选用低热导金属材料,如 TC4、L605 和 1Cr18Ni9T 等,并将其加工成 0.1 ~ 0.3 mm 的薄壁零件<sup>[2]</sup>以获得较低的固体漏热。同时对冷指气缸的外表面进行抛光处理以减小表面发射率,从而进一步降低冷指气缸的辐射漏热。气缸结构在低温下漏热的计算公式为

$$Q = \frac{\lambda \cdot A_c}{l} \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

式中,  $Q$  为传导漏热量;  $\lambda$  为材料热导率;  $A_c$  为导热截面积;  $l$  为导热段长度。

探测器的引线基板是探测器读出电路与引线磁环之间的电学过渡层。同时,引线基板的上表面装有探测器,下表面组装至冷头上,这又是一个热学过渡层。AlN 陶瓷的热导率约为 180 W/mK,比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.5%) 陶瓷的 25.1 W/mK 高 7 倍左右。前者与探测器粘接后的热学匹配性也更好,所以一般采用 AlN 陶瓷作为引线基板的制备基材。

组件热负载主要包括固体传导、辐射漏热以及对流传导。在对流传导方面,完好组件杜瓦的真空度约为 10<sup>-3</sup> ~ 10<sup>-5</sup> Pa,此时对流换热基本可忽略不计;固体传导主要受冷指气缸及杜瓦引线的影响,均可通过上述固体传导漏热公式计算;辐射漏热主要是组件冷端与封装外壁之间的辐射漏热。可将组件的辐射换热简化成一个嵌套圆桶模型。这样,辐射漏热主要包括圆桶侧壁间的辐射换热以及顶部的辐射换热。辐射漏热的简化计算公式为

$$Q_r = \delta \cdot \varepsilon_n (T_1^4 - T_2^4) A_1 \quad (2)$$

其中,圆桶侧壁间的辐射换热主要是指冷屏侧壁与杜瓦内壁之间的辐射换热,平均辐射系数为

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / \left[ \varepsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_1 \right] \quad (3)$$

顶部的辐射换热主要是指冷屏顶端与窗口下表面之间的辐射换热,平均辐射系数为<sup>[3]</sup>

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / [\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_1] \quad (4)$$

通过上述简化计算公式可获得组件辐射漏热的数值。由上述公式可知,减小组件辐射漏热的主要途径在于降低各换热面间的平均辐射系数。

### 2.2 力学设计

在 IDDCA 组件集成技术中,由于制冷机的冷指气缸是杜瓦芯柱,冷指气缸与探测器模块及冷屏组件集成后的冷端结构的力学设计显得尤为重要。该设计主要包括冷指气缸的力学结构强度设计、辅助固定加强结构设计以及组件冷端的轻量化设计。

冷指气缸是一种悬臂梁结构,同时由于红外探测器、电极板和冷屏等均组装在冷指气缸

的顶端, 冷指气缸是整个红外探测器组件的力学薄弱环节。因此, 需要通过冷指气缸的低导热高强度材料的选择以及壁厚的优化, 设计一种高强度低漏热的冷指气缸结构。

在力学要求严苛的情况下, 通过简单增加气缸壁厚的途径来提高力学强度将会对组件漏热产生不利影响。因此, 一般采用冷指气缸顶端辅助加固方法对悬臂梁结构进行结构加强。对于红外探测器组件的冷指气缸结构, 主要有两种低漏热增加的结构加强方式, 即低导热连杆辅助支撑结构和微小配合间隙加强结构。

为了提高悬臂梁结构的一阶共振频率, 除了加强结构刚度之外, 减小冷端质量也是提高基频的一种有效方法。传统的冷屏加工方法是设计加工多个薄壁件, 然后将其焊接组合成冷屏结构。由于电铸技术在精密薄壁件制备上的发展, 利用该技术可制备出壁厚在 0.1 mm 以内且精度较高的超薄壁金属冷屏。使用电铸冷屏技术可显著减轻组件冷端质量, 从而提高组件结构的一阶共振频率, 并最终提高组件对力学环境的适应性水平。

### 3 提高组件热学特性的关键技术

在红外探测器组件结构一定的情况下, 通过优化组件的低温热学特性可降低组件杜瓦热负载继而降低制冷机功耗, 同时减少组件的启动时间。因此, 为了实现红外探测器组件较好的

低温热学性能, 针对影响组件低温热学特性的关键技术的研究是相当有必要的。对于红外探测器组件的低温热学特性, 每个处在低温下的零件对其均有影响。在红外探测器组件中, 处于低温下的零件主要有冷指气缸、电极基板和冷屏组件。为了优化组件在低温下的热学特性, 冷指气缸一般使用导热率较低的金属材料并进行表面处理以减小发射率; 陶瓷基板在制备时要求具有较高的导热率和良好的电学性能; 而冷屏则可使用基于由电铸制备的轻量化复杂结构的薄壁冷屏零件并通过内外表面的定向处理来实现外表面具有较低发射率和内表面具有较好杂光抑制的效果。

#### 3.1 冷指气缸技术

作为红外探测器组件的关键零件, 冷指气缸既是红外探测器的力学支撑结构, 又是制冷机的膨胀气缸。根据不同的热学设计, 冷指气缸可选用的材料有 TC4、不锈钢和 L605 等低热导率金属。如图 1 所示, 冷指气缸的结构属于管状薄壁零件。由于固体的热传导与传热面积成正比, 为了减少固体传导的热损失, 在保证强度的前提下, 冷指气缸的壁厚越薄越好。在薄壁零件的具体加工中, 有人因未避免在薄壁加工过程中产生形变, 因而影响了制冷机的配合精度<sup>[4-5]</sup>。这给冷指气缸的加工制备技术以及各关键尺寸与指标的检验和检测提出了更高的要求。

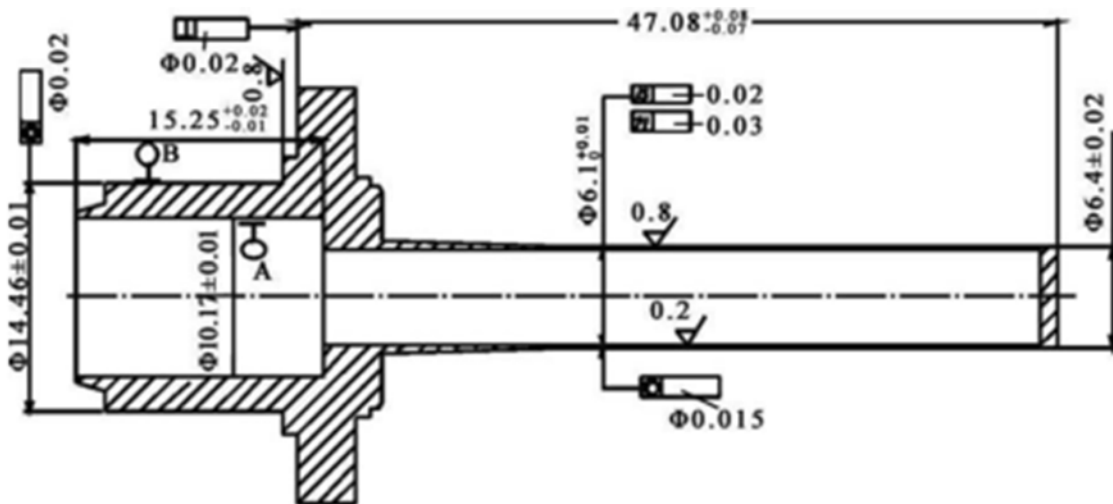


图 1 冷指气缸的结构示意图

表 1 各类陶瓷的性能指标

性能指标	BeO	AlN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (96%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99.5%)
密度 (g·cm <sup>3</sup> )	2.85	3.28	3.75	3.8
热导率 (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	285	180	21	25.1
特定比热容 (J·g <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1.046	0.75		
弯曲强度 (N·mm <sup>-2</sup> )	232.2	186	275.6	232.8
体积电阻率 (Q·cm)	>10 <sup>15</sup>	>10 <sup>13</sup>	>10 <sup>14</sup>	>10 <sup>14</sup>

表 2 陶瓷掺杂与热导率的关系

Sintering additives	Sintering schedule	Heat conductivity (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
(YCa)F <sub>3</sub>	1650 °C, 6 h	208
YLiO <sub>2</sub> -CaO	1600 °C, 6 h	170
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -CaF <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1650 °C, 8 h	167
CaF <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1650 °C, 8 h	148
YLiO <sub>2</sub> -CaF <sub>2</sub>	1675 °C, 6 h	97

### 3.2 陶瓷基板技术

由于具有优异的综合性能,陶瓷材料在电子产品封装中得到了广泛应用。对于红外探测器封装中的陶瓷基板,高电阻率、高热导率和低介电常数是基板选型时需要考量的基本要求。在电子产品封装中,比较常用的陶瓷材料有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、AlN、SiC 和 BeO 等(见表 1)。其中,AlN 陶瓷的热膨胀系数与硅基电子器件相近,且具有较高的绝缘性和热导率,同时其化学性能相对比较稳定,所以是电子产品封装中比较常用的一种基板制备材料<sup>[6]</sup>。

在国内外采用 IDDCA 技术封装的红外探测器组件产品中,由于 AlN 陶瓷的导热性好,化学性质稳定,同时与硅基和 GaAs 等半导体材料的热膨胀系数具有较好的热匹配性,所以 AlN 陶瓷基板技术得到了较为广泛的应用<sup>[7]</sup>。在 AlN 陶瓷研究中,对于简单形状的 AlN 陶瓷基板,可通过热压法制备出较为致密且热导率较高的 AlN 陶瓷;而复杂形状的 AlN 陶瓷基板则可通过新型凝胶铸模成型工艺来制备<sup>[8-9]</sup>。AlN 陶瓷烧结后的致密化程度的改善,不仅可以通过不同烧结工艺来实现,而且还可以通过在 AlN 粉末中加入某些稀土金属氧化物和氟化物、碱土金属氧化物和氟化物(如 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、YF<sub>3</sub>、CaO 和 CaF<sub>2</sub>

等)来加以控制(见表 2)。通过在 AlN 陶瓷中进行特定的掺杂和使用一定的烧制工艺,可在一定范围内实现对 AlN 陶瓷的热导率控制<sup>[10]</sup>。由于具有与红外探测器膨胀系数的匹配性、高热导率以及稳定的化学特性,AlN 陶瓷基板技术已经在红外探测器组件集成技术中得到了越来越广泛的应用。

### 3.3 冷屏制备技术

作为红外探测器组件的关键零件之一,冷屏主要通过低温下为探测器提供低背景噪声的环境以及通过冷屏结构设计来对杂散光进行抑制。对于红外探测器组件用冷屏,国内外现有的主要制备方法包括机械加工制备方法和高精密薄壁电铸制备方法。微型红外探测器组件用冷屏的主要结构有单级圆筒型、圆锥型以及多级组合台阶型等。对于微型红外探测器组件,国内外一般采用多级组合台阶型镍钴合金电铸冷屏(见图 2)。它具有重量轻、强度高、复杂光学结构的制备性好以及热力学性能优良等特点。

在冷屏零件的电铸工艺中,一般使用镍基金属。由于纯镍电铸产品质地较软,其硬度和耐磨性较差,可通过在电铸镍中添加钴金属来提高产品的表面硬度及耐磨性。有报道称,当钴含



图2 多级组合台阶型电铸冷屏

量为 39.4% 时, 电铸件的硬度可达最高<sup>[12]</sup>。另外, 通过镍钴电铸工艺还可获得超薄壁冷屏零件, 即最小可制备厚度为 0.03 mm 的镍钴合金冷屏零件<sup>[13]</sup>。目前国内的镍钴合金冷屏制备技术已较为成熟。由于用镍钴合金制备的冷屏具有硬度高、耐磨性强、耐蚀性好以及导热性强等优点, 电铸镍钴合金是目前冷屏零件最为理想的制备方法<sup>[14]</sup>。电铸完成后的冷屏零件再通过冷屏零件内外表面上进行定向表面处理(一般在外表面上定向镀金以减小发射率, 并对内表面进行黑化以增强冷屏内部对杂散光的抑制能力), 即可制造出满足微型红外探测器组件应用需求的冷屏零件。

另外, 利用电铸冷屏技术也可将部分光学透镜组集成于红外探测器组件内部<sup>[11]</sup>, 从而形成低温光学透镜组组件(见图3)。基于电铸冷屏技术制备的低温光学透镜组组件是红外探测器组件冷光学集成技术发展的重要技术途径。

#### 4 结束语

在微型红外探测器组件中, 冷端各零部件的热导率、冷端的总热容量和各表面的发射率等对组件降温过程以及降温温度稳定后的组件热学特性具有重要影响。通过对冷指气缸、陶瓷电极基板和电铸冷屏等关键技术进行研究, 可进一步优化组件的热学特性。通过改善红外探测器组件的热学特性, 最终可实现微型红外探测器组件在启动时间、功耗和可靠性等技术指标上的优化目标。

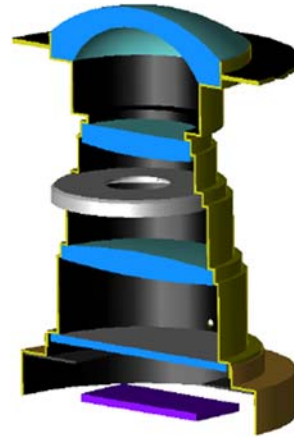


图3 冷屏透镜组的示意图

针对微型红外探测器组件的应用特点, 本文介绍了国内外微型红外探测器组件集成技术的发展情况, 重点阐述了红外探测器组件集成中的几种关键技术。这些技术的研究和发展对于推进微型红外探测器组件的应用至关重要。

#### 参考文献

- [1] 孙朋红, 杨海明, 朱魁章, 等. 集成微型杜瓦的研制[J]. *低温与超导*, 2000, **28**(1): 15-17.
- [2] 林日东, 王鑫, 孟令伟. 红外探测器用微型杜瓦冷指结构优化设计[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(11): 1206-1208.
- [3] 苏宏毅. 微型金属复合杜瓦瓶的漏热分析[J]. *航空兵器*, 2002, **20**(6): 28-30.
- [4] 闫春杰, 潘雁频, 许国太, 等. 斯特林制冷机与红外探测器耦合集成技术[J]. *航天返回与遥感*, 2011, **32**(2): 64-67.
- [5] 范仙红, 杨萍. 斯特林制冷机薄壁气缸加工工艺研究[J]. *低温技术*, 2010, **38**(7): 33-34.
- [6] Markstein H W. A Wide Choice of Materials for MCMs [J]. *Electronic Packaging and Production*, 1997, **37**(3): 34-38.
- [7] Li X Q. Present Status of AlN Ceramic Package [J]. *Semiconductor Information*, 1999, **36**(2): 13-20.
- [8] Xiong Y, Wang H, Fu Z Y. Transient Liquid-phase Sintering of AlN Ceramics with CaF<sub>2</sub> Additive [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, **33**(11): 2199-2205.
- [9] Guo J, Qiu T, Yang J, et al. Process Dependant Sintering Behavior of Aqueous Gelcast AlN Slurries [J]. *Ceramics International*, 2012, **38**(4): 2905-2911.

(下转第27页)