

文章编号: 1672-8785(2017)12-0013-04

红外焦平面探测器快速启动的影响因素分析

李进武 刘建伟 李娟

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着红外焦平面成像制导的应用越来越广泛, 人们对探测器组件的体积、快速启动能力等方面的要求也越来越高。针对这个问题, 基于探测器的芯片、杜瓦结构和快速制冷器的设计, 对探测器快速启动的影响因素进行了分析, 得出对提高红外焦平面探测器快速启动具有帮助意义的结论。

关键词: 红外焦平面探测器; 杜瓦结构设计; 快速启动

中图分类号: TN949 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.12.003

Analysis of Influence Factors of Fast Cool-down of IRFPA Detectors

LI Jin-wu, LIU Jian-wei, LI Juan

(The Eleventh Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: With the wide application of infrared focal plane arrays (IRFPA), the requirements of detector assemblies in volume and fast cool-down etc are becoming higher and higher. To solve this problem, the influence factors on the fast cool-down of IRFPA detectors are analyzed on the basis of the design of detector chip, Dewar structure and fast cool-down cooler. The conclusions which are helpful to the improvement of fast cool-down of IRFPA detectors are drawn.

Key words: IRFPA detector; Dewar structure design; fast cool-down

0 引言

红外探测器组件能将红外信号转换为电信号, 因此可用于探测目标的红外辐射信号, 达到对目标探测、识别和跟踪等目的。探测器组件包括焦平面阵列与硅读出电路 (Readout Circuits, ROIC) 互连的混成芯片 (以下简称: 探测器芯片)、封装混成芯片的微杜瓦、快速制冷器三部分。这种探测器组件由于体积小、重量轻、启动快, 已被广泛应用于红外制导领域。随着红外

焦平面成像制导的应用越来越广泛, 人们对探测器组件的要求也越来越高, 尤其是从发现目标到实施打击, 红外探测器的快速启动能力显得非常重要。为了实现快速启动的战术要求, 本文重点分析了影响红外焦平面探测器快速启动的因素。

1 快速启动的影响因素

快速启动是这类型探测器组件的主要特点。通过制冷器制冷, 怎么使探测器芯片在 3

收稿日期: 2017-10-18

作者简介: 李进武 (1979-), 男, 甘肃景泰人, 硕士, 工程师, 主要从事红外探测器及测试技术研究。

E-mail: jinwu_lee@163.com

~ 6 s 的很短时间内迅速冷却并达到工作温度, 同时保证探测器的输出图像稳定, 是问题的关键。

红外探测器组件由探测器芯片、微杜瓦、快速启动制冷器三部分组成, 其中探测器芯片的探测器阵列与读出电路芯片一般采用钢柱倒装焊接结构互连, 实现探测器电学输出与读出电路电学输入的连通, 它必须在低温下工作。微杜瓦通过高真空密封条件保证探测器芯片具有真空工作环境。快速启动制冷器为探测器芯片提供冷源, 保证探测器在低温条件下正常工作。

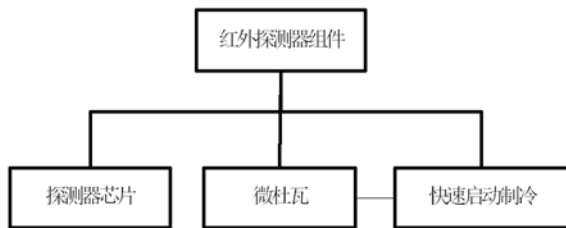


图 1 红外焦平面探测器组件的构成

图 1 为红外焦平面探测器组件的构成, 其三个组成部分是影响快速启动的三大主要因素。探测器芯片、微杜瓦、快速启动制冷器等的设计和工艺都是影响快速启动的关键。因此可从以下几个方面提高探测器的启动速度:

(1) 减少被冷却物的热容量。热容量的大小与探测器芯片的尺寸、微杜瓦结构的设计都有很大关系。

(2) 进行高真空绝热设计, 减少结构的漏热。

(3) 提高换热效率。杜瓦改善换热效率主要从冷头设计等方面进行, 制冷器提高换热效率主要从换热器结构设计、材料选用及工艺等方面入手。

(4) 采用节流效应大的纯制冷工质或混合工质, 并选用合适的压力值。

实际使用中, 只有当探测器芯片、微杜瓦、制冷器在形状、尺寸、功率、温度等各方面配合最佳时, 才能发挥探测器本身的优良性能, 达到快速启动的要求。

2 快速启动的影响因素分析

2.1 探测器芯片的影响

探测器芯片由探测器阵列与读出电路芯片构成, 如图 2 所示。

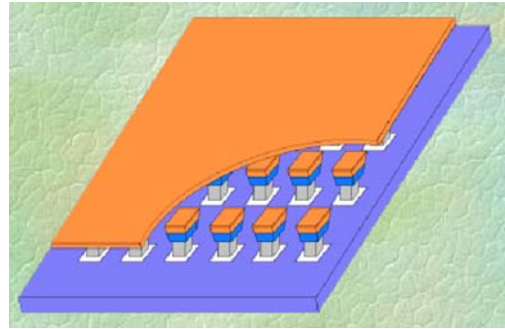


图 2 探测器芯片的结构图

在探测器组件制冷的过程中, 如果制冷的热质量比较大, 启动时间一般都比较长。因为热质量大, 需要的冷量更多。因此在同样的杜瓦结构和制冷器条件下, 探测器芯片的像元规模选择、像元尺寸选择以及读出电路的设计都会影响快速启动。为了达到快速启动指标, 在实际工作中, 设计探测器芯片时需要注意以下几点:

(1) 在系统指标满足条件时, 尽量选用像元尺寸小、规模小的焦平面阵列, 例如 $30\ \mu\text{m}$ 、 128×128 规格或 $15\ \mu\text{m}$ 、 256×256 规格的等;

(2) 在系统指标满足条件时, 尽量将读出电路设计为通道数少、增益小, 同时读出电路功能简单、版图布局最小等的结构;

(3) 设计读出电路时除了要考虑减小尺寸, 还要降低功耗, 以保证探测器加电工作时工作温度及稳定性不受影响。

2.2 微杜瓦的影响

影响探测器启动时间的因素主要是制冷器的制冷效率。由于快速启动探测器组件的体积小、重量轻、可靠性高, 同时还要保证 J-T 制冷器有足够大的换热面积, 所以需要采用合适的杜瓦结构设计和工艺。杜瓦结构及工艺中影响快速启动的因素主要是杜瓦的静态热负载、杜瓦热容和换热效率。图 3 为一款全金属快速启动探测器组件杜瓦的示意图, 探测器芯片为 $30\ \mu\text{m}$ 、 128×128 元的铋化铟探测器。



图 3 快速启动探测器杜瓦的示意图

2.2.1 降低静态热负载

影响杜瓦静态热负载的因素主要是传导、辐射、对流等。因此要降低静态热负载,需要在结构芯柱材质及壁厚,内部引出线的材料、直径及长度,杜瓦内壁及光阑表面状态,杜瓦真空度等方面进行设计优化。探测器材料的物理性质见表 1。材料是根据常用探测器材料选取的,因此能满足实际运行的需求。

表 1 探测器材料的物理性质

材料名称	密度 (g/cm ³)	热容 (kJ/kg·K)	热导率(w/m·K)	表面发射率
光阑材料 2A12	2.78	0.921	188 (25℃时)	0.95-0.98
氮化铝	3.26	0.72-0.76 (100℃时)	180	--
4J33	8.4	0.5 (100℃时)	16 (25℃时)	--
硅片	2.2	0.7 (100℃时)	149 (25℃时)	--
黑色氧化铝	3.7	0.79 (100℃时)	17	0.9-0.95
TC4 钛合金	4.43	0.55	8.4	

杜瓦内部的引线材料主要有金丝、铂丝、铂铱丝等。表 2 是直径为 25 μm、长度为 5.5 mm 的引线的导热计算结果。从结果中可看出,若将金丝换成铂丝,导热量会大幅减小;若换成铂铱丝,效果会更好。

表 2 金丝、铂丝导热的计算结果

材料	金丝	铂丝	铂 0.9/铱 0.1
导热系数 (W/m·K)	317	72.6	31
单根导热量 (W)	0.006115356	0.001400551	0.000598032
20 根导热量 (W)	0.122307111	0.028011029	0.011960632

2.2.2 降低热容

要降低杜瓦热容,需减少多余的部件。一般设计杜瓦时主要考虑以下几个方面:杜瓦冷头设计以及其材质、厚度、形状等的选择,光阑材质的选择、光阑形状的设计以及副光阑的翅片设计,滤光片厚度的选择,衬底冗余部位及外径尺寸的控制和减薄设计等。有文献表明,采用铜

镍合金电铸光阑代替铝材机加工光阑,可有效降低热质量。

2.2.3 提高换热效率

制冷器的气液混合物与冷头底面换热的过程比较复杂。对冷头底面的形貌状态进行优化设计,可以提升换热效率,但工艺实现的难度较高。图 4 为杜瓦冷头底面的形貌示意图。

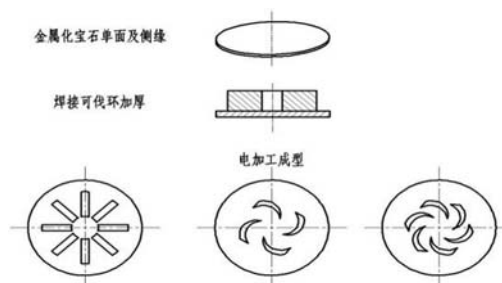


图 4 杜瓦冷头底面形貌示意图

2.3 快速启动制冷器的影响

快速启动制冷器是红外探测器组件的关键部件,它的表现状况决定了组件性能的优劣。在

实际使用中, 制冷器要在形状、尺寸、功率、温度等方面与器件、杜瓦等其它部件配合最佳, 才能发挥芯片本身的优良性能。因此, 制冷器的研制要根据整机系统以及芯片和杜瓦对制冷功率、制冷温度、结构尺寸等的需求而采取相应的措施。

2.3.1 制冷工质的选择

图 5 为氮气和氩气在不同压力下的制冷能力。用氩气节流比用氮气的效果更佳, 虽然液氩的温度比液氮高出 10 K 左右, 但由于氩气的焦耳—汤姆逊系数比氮气大得多, 并且在相同的热交换器中氩气的热交换效率比氮气高, 因此, 需快速制冷的系统中都用高压氩气作为气源。从图 5 中也可以看到, 氩气的最佳工作压力为 50 MPa 左右。

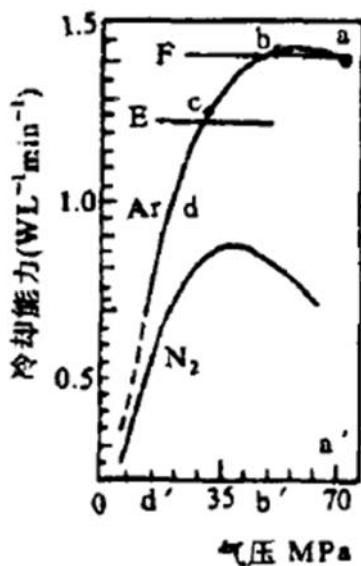


图 5 不同压力条件下氮气和氩气的制冷能力

2.3.2 制冷器热交换器的设计

J-T 制冷器一般由换热器、芯管、节流阀等组成。热交换器采用薄壁金属毛细管, 毛细管外接一定螺距绕制翅片, 形成热交换管, 强化传热, 提高换热效率。热交换管的一端接高压制冷工质, 另一端连接节流阀。因此热交换器的性能好坏很关键, 直接决定了气体节流前的温度。节流前的温度越低, 制冷器的降温速度就越快。理想的热交换器的特点是效率高 (如低压气体出口的温度等于高压气体出口的温度), 无流动阻力, 自身无热负载。

根据经典传热学理论, 有:

$$\tau \propto \frac{T - T_{CD}}{[(\frac{\rho\alpha}{\mu})^{0.8} K(\Delta T)_h]_{t=0}} = f(\rho, T, coolant) \quad (1)$$

式中, ρ 为介质在节流孔部位时的密度; α 为声速; K 为传热系数; μ 为动力粘度系数; T 为制冷工质温度; $(\Delta T)_h$ 为等焓节流效应。

从式 (1) 可以看出, 在常温条件下, 影响启动时间的主要因素是 ρ 和 K 的变化。 ρ 值与工质流量和压力相关。如果增大制冷流量, 虽然会提高启动时间, 但是工质流量加大后流道的阻力会变大, 严重情况下会使制冷器的工况恶化, 制冷器的制冷温度升高, 制冷效率下降。因此具体选用多大的工质流量, 需要根据实际情况通过试验来界定, 有时还要考虑所用气瓶的容积大小。 K 值是传热系数, 影响其大小的是换热器的结构参数, 包括换热器的层数、翅片管翅片的螺距、厚度、材料、加工工艺、毛细管的壁厚、材料、热处理工艺、毛细管与翅片的电镀工艺、电镀方式等。

2.3.3 制冷器工作方式的选择

正常情况下, 流量随着压力的升高而增大, 同时制冷器的降温速度也随着压力的升高而加快。但是压力变得越高, 节流后的温度点就越高。在整个降温过程中, 前期降温速度很快, 随后出现一个“拐点”, 然后降温速度变缓。根据降温工质和压力的不同, “拐点”的位置也不一样。降温工质的流速越快, 出现“拐点”的温度就越高。形成这种拐点前, 降温速度快。形成拐点后, 降温速度慢, 原因主要是流量越大, 在有限节流膨胀腔室内的压力就越高, 节流后的液化点温度就越高。因此需要具体分析拐点形成前后降温过程中的温度变化情况, 根据实际快速启动的需求来决定是采用直喷型制冷器还是自调式制冷器。

自调制冷器分为固体形变型、波纹管型和记忆合金型三种。固体形变型自调制冷器为法国原品采用的方案, 目前国内没有成功应用的先例; 波纹管型和记忆合金型自调制冷器技术国内较为成熟。

(下转第 20 页)