

密级:\_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院

## 硕士学位论文

长线列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件封装技术研究

作者姓名: 夏 王

指导教师: 王小坤 副研究员

中国科学院上海技术物理研究所

学位类别: 理学硕士

学科专业: 微电子学与固体电子学

培养单位: 中国科学院上海技术物理研究所

2012年 4月

**Study on long linear HgCdTe LWIRFPA dewar assembly  
package technology**

**By**

**Xia Wang**

**A Dissertation Submitted to**

**Graduate University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of**

**Master of Science**

**Shanghai Institute of Technical Physics,**

**Chinese Academy of Sciences**

**April, 2012**

---

## 致 谢

在攻读硕士研究生期间，无论在学业上还是生活上我都得到了很多人无私的帮助、关怀和教导，对他们的感激之情，绝不是简单的几行感谢的文字所能表达出来的。

首先我要感谢我的导师王小坤老师，本论文是在他的悉心指导下完成的，从选题调研到开题报告，到中期考核，再到最后的论文撰写，王老师在每个环节都给予了认真的辅导和教诲。王老师严谨的工作态度、忘我的工作精神和平易近人的作风，给我留下了深刻的印象。尽管工作繁忙，但王老师仍然十分关心我的学习和工作，对我提出的任何难点，王老师都不辞辛劳地给我耐心细致地讲解，给我提供了很多有益的指导和建议，帮助我开拓思路，深入研究，使我能够在学习研究中不断提高自己的能力。在论文完成之际，谨向恩师表示最诚挚的敬意和由衷的感谢。

同时，要特别感谢李言谨老师。在平时的学习和课题研究过程中，李老师给了我很多建设性的指导和帮助，在人生计划等方面李老师给我提供了很多宝贵的建议和教导，特别是在求职之路上李老师也曾尽心尽力地指引帮助我。他渊博的知识、开阔的视野和敏锐的思维给我深深的启迪，同时他严谨的科学态度、坚定的意志和高尚的人格品德都深深地感染着我，影响我未来的人生道路。

感谢课题组的曾智江、孙闻、郝振贻、李俊、沈一璋、俞君等同事在学习和工作中有益的探讨，使我有效寻求到解决问题的方法，令我受益良多。感谢洪斯敏、刘大福、范广宇、张亚妮、陆华杰、季鹏等同事为我研究工作的开展提供了各方面的帮助。

感谢研究生部汪骏发、廖应良、李淑薇、朱晓琳、曾尚瑾等老师在研究生培养的各个环节给予的关心和帮助。

感谢魏鹏、邓洪海、马学亮、朱耀明、杨波等同学在学习和生活上的关心和帮助。

尤其感谢我的家人，在生活上对我无微不至的关心，在我顺境时的教诲和在我逆境时的鼓励。

最后向论文评阅和答辩的各位老师和专家学者致以最诚挚的谢意！

夏王

2012年04月26日于上海

---

## 摘 要

红外焦平面杜瓦组件封装技术，是指将研制成功的带有读出电路的红外焦平面阵列组装到杜瓦中的一段工艺，是推动红外焦平面探测器应用的必不可少的关键部分。红外焦平面杜瓦组件封装技术主要解决的问题由低温封装、制冷机接口、红外焦平面的高精度组装、空间环境适应性等。

红外探测器已经由过去的单元器件，发展到今天的线列、面阵等多元器件，由过去的单色、单通道，发展到今天的多色、多通道，随着红外焦平面阵列的问世，红外技术有了飞速发展。长线列碲镉汞红外焦平面在空间对地观测方面应用尤其重要，针对其进行的杜瓦组件封装技术的研究也就成为长线列碲镉汞红外焦平面空间应用的关键环节之一。本文针对长线列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件封装的特殊要求，阐明其中的关键难点，通过研究提出合理的解决措施，成功研制出  $256 \times 2$  元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件，并通过了可靠性验证试验。

本文以  $256 \times 2$  元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件为例，利用有限元分析软件 Ansys 进行了碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究。首先研究了器件本身温度从 300K 制冷到 65K 后的热失配应力，然后对器件组装在冷头上的结构进行了热失配应力分析，并分析了柯伐和因瓦两种材料的冷头对器件热失配应力产生的影响，以及器件所受最大热失配应力和两种冷头厚度的关系，最终选择厚度为  $1500\mu\text{m}$  因瓦材料的冷头，并进行高低温冲击试验，实验表明满足要求。

本文以  $256 \times 2$  元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件为例，从杂散光抑制主要技术——结构设计和表面处理技术入手，开展对杜瓦组件的杂散光抑制技术研究。在结构设计方面，提出在冷光阑内增加挡光环的措施，设计了无挡光环冷光阑、一级冷光阑和二级冷光阑三种冷光阑结构，并通过 TracePro 模拟分析了挡光环对抑制杂散光的作用和三种冷光阑对杂散光的抑制效果，具有挡光环的冷光阑对杂散光的抑制比没有挡光环的冷光阑显著，而且具有一级冷光阑和二级冷光阑对杂散光的抑制效果相差不大，权衡冷光阑力学和光学的设计要求，选择一级冷光阑的结构设计。

**关键词：**封装技术，杜瓦组件，长波碲镉汞红外焦平面，杂散光，热失配应力

## ABSTRACT

The research of infrared focal plane array dewar assembly package technology is essential for application of infrared detector. With the use of this technology, the IRFPA detector is assembled into dewar. The problems of package, port of cryogenic cooler, high accuracy assembly technology of IRFPA and compatibility in space environment is resolved in the use of IRFPA dewar assembly package technology.

With the development of infrared technology, infrared detector has the evolution from element to linear and plane array, from monocolour and single channel to multicolour and multichannel. The infrared technology has develop at very fast speed after IRFPA came out. The long linear HgCdTe IRFPA is important in observation from space to ground, so the research of dewar packaging technology is an important step in application of long linear IRFPA detector. According to special requirement of long linear HgCdTe LWIRFPA dewar assembly package, this paper illuminates the key point of difficult problem. With the appropriate method proposed after research, 256×2 pixel HgCdTe LWIRFPA dewar assembly are manufactured successfully.

In this paper, the 256×2 pixels HgCdTe LWIRFPA dewar assembly is taken for example. Thermal mismatch stress of long linear HgCdTe infrared focal plane array in this assembling configuration in dewar is analyzed by finite element method. Thermal mismatch stress of HgCdTe infrared detector itself with the temperature from 300K to 65K is analyzed firstly by Ansys finite element analysis software. Then Thermal mismatch stress of the combined configuration of HgCdTe infrared detector and dewar cold finger is analyzed. The invar material and kovar material are selected as the material of dewar cold finger. The impacts of dewar cold finger of two different materials on the thermal stress of infrared focal plane array are compared and analyzed. According to the analyzing results, one configuration of dewar cold finger of invar material is proposed to reduce the thermal mismatch stress effectively. The 1500μm thickness dewar cold finger of invar material is applied to the dewar assembly, and pass the test. The reliability of long linear HgCdTe infrared focal plane array is improved obviously.

In this paper, the 256×2 pixels HgCdTe LWIRFPA dewar assembly is taken for

example. The method of the stray light suppression in infrared focal plane array dewar is studied through the method of configuration design and surface treatment technics. In configuration design aspect, the configuration optimization of cold shield with vanes is proposed to minimize the stray radiation getting to the detector. The original cylindrical cold shield without vane, the cold shield with one vane and the cold shield with two vanes are designed. The effects of three configurations of cold shield on stray light suppression was simulated, compared and analyzed by using the TracePro software, and the advantage of cold shield with vanes over cold shield without vanes is proved. The cold shield with vanes is much better than the cold shield without vane in the effect on stray light suppression. The cold shield with one vane has the similar effect on stray light suppression with the cold shield with two vanes. The cold shield with two vanes is more weighty, and more complex to machining than the cold shield with one vane. So the cold shield with one vane is chosen.

**Key Words:** package technology, dewar assembly, HgCdTe LWIRFPA, stray light, thermal mismatch stress

致 谢.....	I
摘 要.....	II
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
<b>1 引言.....</b>	<b>1</b>
1.1 红外焦平面探测器封装技术的发展.....	1
1.1.1 前言.....	1
1.1.2 微电子封装技术概述.....	1
1.1.2.1 电子器件封装的概念和功能.....	1
1.1.2.2 微电子封装技术的发展.....	1
1.1.3 红外焦平面探测器封装技术.....	2
1.1.3.1 管壳封装形式.....	2
1.1.3.2 杜瓦封装形式.....	3
1.1.4 红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术.....	4
1.1.4.1 杜瓦的结构、热力学等优化设计.....	4
1.1.4.2 杜瓦的引线技术.....	5
1.1.4.3 红外焦平面探测器的高精度安装及光学配准技术.....	6
1.1.4.4 杜瓦的焊接技术.....	7
1.1.4.5 杜瓦的微漏检漏技术.....	8
1.1.4.6 杜瓦零部件及整体的表面处理技术.....	8
1.1.4.7 杜瓦组件可靠性技术.....	9
1.2 红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术的内涵.....	9
1.3 红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术研究的意义和价值.....	9
1.4 本课题研究的内容和意义.....	10
1.5 论文结构介绍.....	11
1.6 本章小结.....	11
<b>2 长线条长波碲镉汞红外焦平面杜瓦的研究.....</b>	<b>12</b>
2.1 长线条长波碲镉汞红外焦平面杜瓦研究的意义.....	12
2.2 国内外长线条红外焦平面杜瓦的研究动态.....	12
2.3 长线条碲镉汞红外焦平面杜瓦研究的关键问题.....	15
2.3.1 长线条碲镉汞焦平面杜瓦的结构、热力学设计.....	15
2.3.2 长线条碲镉汞焦平面器件在冷平台上的热失配设计.....	16
2.3.3 长线条长波碲镉汞焦平面杂散光的抑制.....	17
2.3.4 长线条碲镉汞焦平面杜瓦基板的制备技术.....	18
2.3.5 长线条碲镉汞焦平面杜瓦零部件的表面处理工艺.....	18
2.3.6 长线条碲镉汞焦平面杜瓦的真空寿命.....	19

2.4 本章小结.....	19
<b>3 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦的研制及热力学和真空分析.....</b>	<b>20</b>
3.1 杜瓦组件构成.....	20
3.2 杜瓦外壳设计.....	20
3.3 杜瓦芯柱设计.....	21
3.3.1 杜瓦芯柱材料和尺寸.....	21
3.3.2 杜瓦芯柱的力学分析.....	22
3.3.3 杜瓦芯柱的模态分析.....	25
3.4 杜瓦冷头的设计.....	26
3.5 杜瓦宝石电极板的设计.....	27
3.6 杜瓦滤光片的选用及安装设计.....	27
3.7 杜瓦引线环的设计.....	27
3.8 杜瓦冷光阑及冷屏的设计.....	28
3.9 杜瓦吸气剂的选用及安装设计.....	28
3.10 杜瓦引线的设计.....	29
3.11 杜瓦窗口与窗口帽的设计.....	29
3.12 杜瓦研制中的焊接工艺.....	30
3.13 杜瓦的放气与真空保持分析.....	31
3.13.1 杜瓦的放气分析.....	31
3.13.2 杜瓦的真空保持分析.....	33
3.13.3 吸气剂的使用对杜瓦真空的影响.....	35
3.14 杜瓦的热分析.....	36
3.14.1 杜瓦的热容量.....	36
3.14.2 杜瓦的总漏热.....	37
3.14.3 杜瓦的寄生热负载的测试实验.....	40
3.15 本章小结.....	40
<b>4 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的热失配应力研究.....</b>	<b>41</b>
4.1 长线列碲镉汞红外焦平面器件的热失配应力研究的意义.....	41
4.2 长线列碲镉汞焦平面器件在冷平台上的热失配设计内涵.....	41
4.3 256×1 元碲镉汞红外焦平面器件芯片的热失配应力分析.....	42
4.3.1 256×1 元芯片模块的结构.....	42
4.3.2 256×1 元芯片模块的热失配应力分析.....	42
4.4 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的热失配应力分析.....	44
4.4.1 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件冷平台结构的热失配应力分 析.....	44
4.4.2 杜瓦冷头厚度设计对碲镉汞芯片的热失配应力影响分析.....	48
4.5 本章小结.....	49
<b>5 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的杂散光研究.....</b>	<b>50</b>
5.1 长线列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的杂散光研究的意义.....	50
5.2 杂散光辐射抑制的基本原理.....	51
5.2.1 杂散光辐射能量的传输.....	51
5.2.2 抑制杂散光辐射能量的方法.....	51

5.3 冷光阑结构的优化设计.....	52
5.3.1 红外辐射对长波碲镉汞红外焦平面的影响.....	53
5.3.2 挡光环设计原理.....	54
5.3.3 三种冷光阑结构及光学分析.....	55
5.4 本章小结.....	58
<b>6 结论与展望</b> .....	<b>60</b>
6.1 结论.....	60
6.2 展望.....	61
<b>参考文献</b> .....	<b>62</b>
<b>附录A</b> .....	<b>65</b>
<b>作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果</b> .....	<b>66</b>



# 1 引言

## 1.1 红外焦平面探测器封装技术的发展

### 1.1.1 前言

随着红外技术的发展，红外探测器经历了由单色、单通道向多色、多通道的发展，也由单元器件发展成为线列、面阵等焦平面阵列多元器件，使以红外焦平面探测器的红外成像系统性能得到很大提高，进而推动了航天航空、红外遥感、红外夜视和环境监测等应用领域上升到一个新台阶。红外焦平面探测器的发展也对红外焦平面探测器的封装技术提出了更高的要求并推动了其发展。

### 1.1.2 微电子封装技术概述<sup>[1-2]</sup>

#### 1.1.2.1 电子器件封装的概念和功能

电子器件封装，从狭义上指利用膜技术及微细连接技术，将半导体器件及其他构成要素在框架或基板上布置、固定及连接，引出接线端子，并通过可塑性绝缘介质灌封固定构成整体立体结构的工艺。而从广义上讲，电子器件封装是狭义封装与实际工程及基板技术的总和。

微电子封装有五种基本功能：电源分配、信号分配、散热通道、机械支撑和环境保护。具体地说作用如下：（1）接通电源，使不同部位的电源分配恰当，使芯片与电路流通电流，同时还要考虑接地线的分配问题；（2）封装要为芯片提供信号的输入和输出通路；（3）封装提供散热通道，将器件、部件长期工作时聚集的热量散出；（4）封装要为芯片和其他部件提供牢靠的机械支撑，适应各种工作环境和条件变化；（5）为芯片提供环境保护。

#### 1.1.2.2 微电子封装技术的发展

1947年美国电报电话公司(AT&T)贝尔实验室的三位科学家巴丁、布赖顿和肖克莱发明第一只晶体管，也同时开创了微电子封装的历史。20世纪50年代以三根引线的TO（晶体管外壳）型金属-玻璃封装外壳为主，后来又发展为各类陶瓷、塑料封装外壳。随着电子系统的小型化、高速化、高可靠性的要求提高，要求电子元器件小型化、集成化。晶体管经过10年的发展后，在1958年第一块半导体集成电路(IC)问世，推动了多引脚封装外壳的发展。随着IC的集成度越来越高，要求封装引脚数越来越多，20世纪60年代开发出了双列直

插式引脚封装 (DIP)。20 世纪 80 年代, 随着表面安装技术 (SMT) 的迅猛发展, 各类表面安装元器件 (SMC) 电子封装也如雨后春笋般出现, 如无引脚陶瓷片式载体 (LCCC)、塑料有引脚片式载体 (PLCC) 和四边引脚扁平封装 (QFP) 等。20 世纪 80 年代至 90 年代, 电子封装引脚由周边型发展成面阵型, 如针栅阵列 (PGA) 封装。90 年代初, 科学家综合了 QFP 和 PGA 的优点后, 研制开发出焊球阵列封装 (BGA), 随后又开发出了芯片尺寸封装 (CSP) 和多芯片组件封装 (MCM), 其中芯片尺寸封装 (CSP) 解决了长期存在的芯片小而封装大的根本矛盾, 使电子封装技术达到了新的阶段。未来的微电子封装将向系统级封装 (SOP 或 SIP) 发展, 典型的封装是单级集成模块 (SLIM), 即将各类元器件、布线、介质以及各种通用 IC 芯片和专用 IC 芯片甚至射频和光电器件都集成于一个电子封装系统内。

### 1.1.3 红外焦平面探测器封装技术

红外焦平面探测器的封装技术属于微电子封装技术的一个分支, 具有微电子封装技术的特点, 而结合自身的特点和工作环境, 其封装技术又有不同的特点和要求。

红外探测器的封装形式主要管壳封装和微型杜瓦封装两种。工作在常温的红外探测器一般采用管壳封装, 工作在低温的红外探测器根据制冷模式, 其封装形式主要有管壳封装和微型杜瓦封装。

#### 1.1.3.1 管壳封装形式<sup>[3]</sup>

工作中的红外焦平面探测器信号多为微弱信号, 采用金属管壳可以减弱外来电磁信号干扰, 管壳封装形式主要有金属-陶瓷封装和金属-玻璃封装。

##### (a) 金属-陶瓷封装

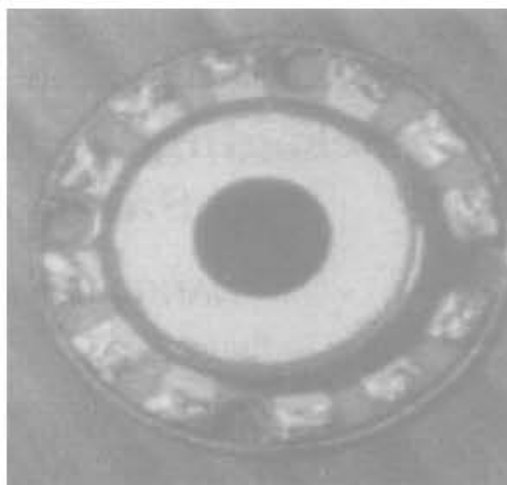


图 1.1 金属-陶瓷封装

金属-陶瓷封装结构简单，并能得到高精度和高气密性，引线数也较多，它一般采用平封结构（见图 1.1），利用陶瓷与柯伐合金进行良好的封接性能，实现陶瓷与金属的热封接。

### (b)金属-玻璃封装

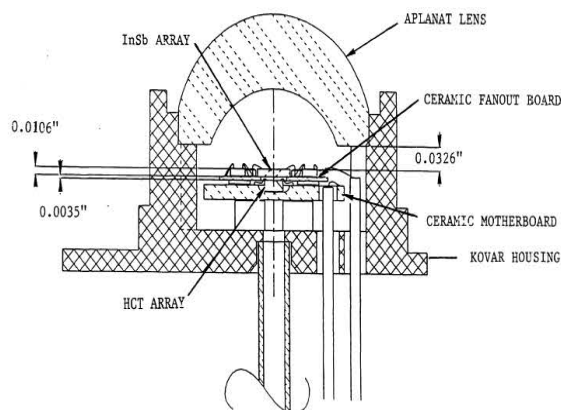


图 1.2 美国 GOES 卫星双色探测器件封装结构图

典型金属-玻璃封装结构，其结构包括：管座（管壳底、阵脚、玻璃珠烧结而成）、官帽。该封装技术利用钼组玻璃与柯伐合金进行良好的封接性能，实现玻璃和金属的热封接。其具有结构和加工工艺简单的优点，但是其引线数不多，且在地面开孔减少了散热面积。美国 2000 年的 GOES 卫星的双色探测器件封装<sup>[4]</sup>（见图 1.2）就是金属-玻璃封装。

### 1.1.3.2 杜瓦封装形式

微型杜瓦封装是工作在低温下的红外焦平面探测器的一种封装形式，微型杜瓦的组成部分主要有：芯柱、冷头、基板、冷光阑、滤光片、红外窗口、引线、引线环、红外探测器、外壳、消气剂和排气管等。微型杜瓦腔内由排气管接真空泵抽成真空环境，探测器安装在基板上，和基板一起接受冷头制冷，探测目标发出的红外射线经过红外窗口和滤光片，到达红外探测器，探测器信号通过引线和引线环引出微型杜瓦外面。

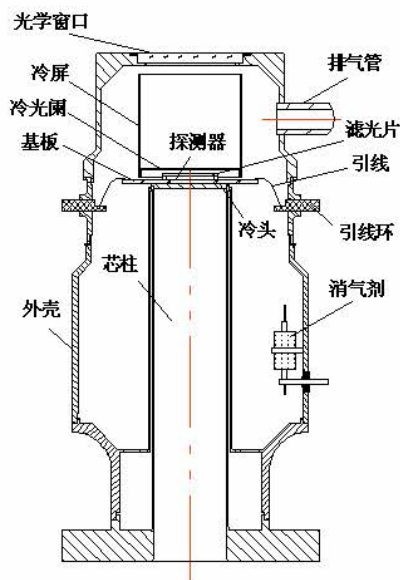


图 1.3 微型杜瓦的结构

### 1.1.4 红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术

红外焦平面探测器杜瓦组件封装主要技术包括杜瓦结构、热力学等优化设计、杜瓦的引线技术、红外焦平面探测器的高精度安装及光学配准技术、杜瓦的焊接技术、杜瓦的微漏检漏技术、杜瓦零部件及整体的表面处理技术、杜瓦组件可靠性技术等。

#### 1.1.4.1 杜瓦的结构、热力学等优化设计

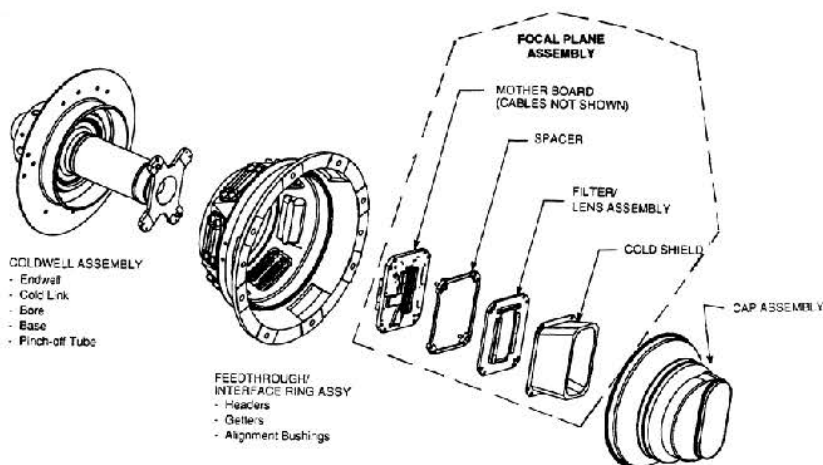


图 1.4 焦平面杜瓦组件分解图<sup>[5]</sup>

红外焦平面杜瓦组件分解见图 1.4，焦平面杜瓦在设计时要求结构紧凑、冷却效率高、可靠性高、寄生热损耗小和高真空寿命。杜瓦设计中个组成部分材料选择如下：芯柱一般采用不锈钢、因科镍合金等，这类材料导热系数较低

且屈服强度比较高；冷头一般采用柯伐或因瓦；基板采用陶瓷或宝石片；窗口一般采用蓝宝石、锗和硅等材料；滤光片支撑材料采用柯伐或钼等；引线采用锰铜或带线；外壳采用不锈钢或柯伐；排气管采用无氧铜。在设计时要特别针对以下几点：（1）芯柱的结构与冷头温度的均匀性；（2）杜瓦要求轻量化设计，并且要抗电磁干扰和强冲击；（3）引线和支撑结构要有足够的强度，和较小的漏热；（4）冷光阑的光学耦合和表面处理工艺；（5）杜瓦的真空寿命要尽量高。

#### 1.1.4.2 杜瓦的引线技术

通常杜瓦的结构形式可按照电极引线形式划分。引线一端连接宝石电极板，另一端连接外壳上的引线环，主要起到传输红外探测器信号的作用。另外，引线漏热是杜瓦热传导漏热的一部分，引线数目的增加会增大杜瓦的热传导漏热，而且引线的装配质量直接影响杜瓦的真空气密性。引线形式制约着杜瓦的外部装配关系，是整个杜瓦设计制造的核心技术之一。

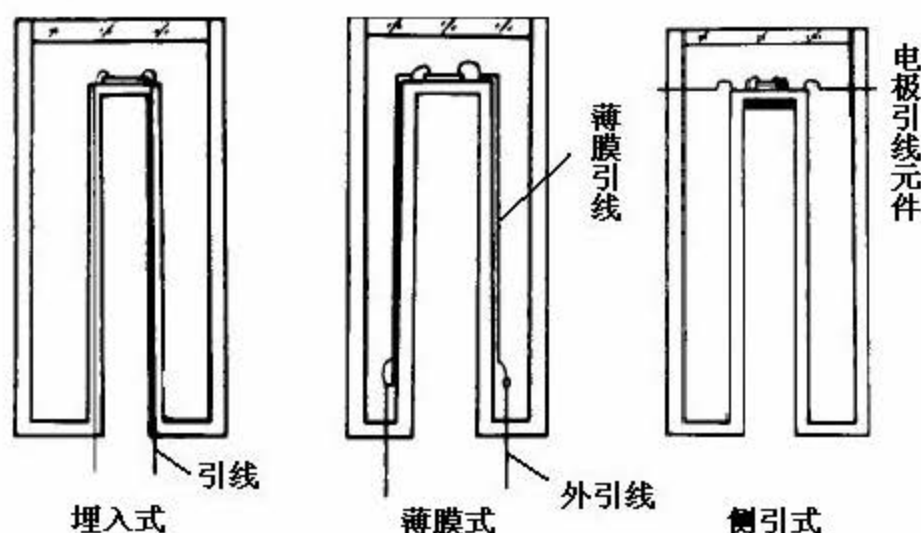


图 1.5 杜瓦引线形式

杜瓦引线有三种基本形式：埋入式、薄膜式和侧引式<sup>[6]</sup>（见图 1.5）。埋入式引线是在精密的薄壁玻璃管中，沿母线方向在管壁内埋入金属丝，金属丝一端在冷指底部露出界面，另一端从杜瓦口部玻璃中抽出，该引线结构的杜瓦漏热小，电学性能好，工艺性好，但是其制造过程手工操作多，要求操作人员有熟练的操作技能；薄膜式引线是指在冷指玻璃管外表面和底部端面镀覆导电膜层，分化成母线方向延伸的导电薄膜带形成内引线，而用外引线完成由真空夹层向杜瓦外侧的信号引出，该引线结构的杜瓦漏热小，电学性能好，但是其工艺性差，需要用先进设备；侧引式引线是将电极引线作为一个元件整体气密性封接在杜瓦外壳上，其位置与红外探测器持平，形成辐射状排列的引线，该引线结构的杜瓦漏热大，电阻小，可能产生振动噪声，但是其工艺性好。

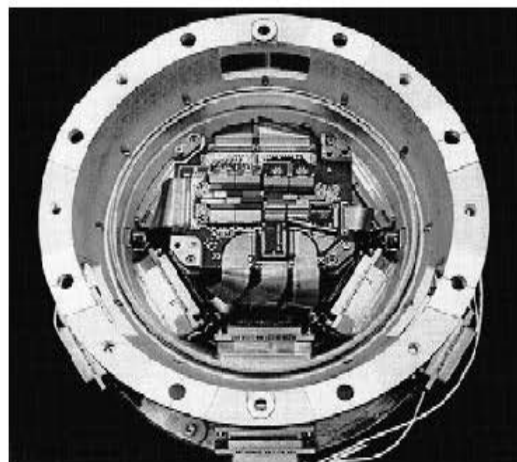
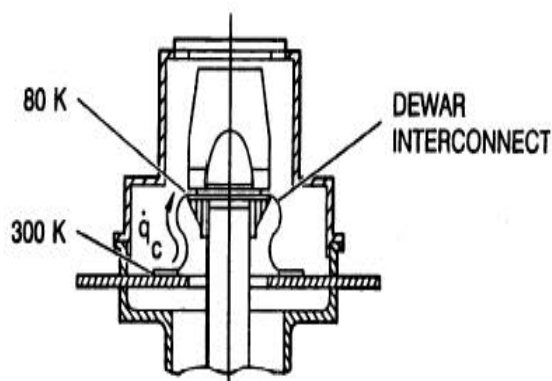


图 1.6 JAVELIN CLU 杜瓦引线结构      图 1.7 AIRS 中杜瓦薄膜引线结构

由于埋入式和薄膜式引线优点突出，应用于很多杜瓦结构设计里。美国德克萨斯仪器公司研制的 JAVELIN CLU 杜瓦采用的薄膜式引线结构<sup>[7]</sup>（见图 1.6），通过薄膜引线及陶瓷引线环结构将信号线引出杜瓦；美国 Aqua 宇宙飞船搭载的大气红外垂直探测器（AIRS）中杜瓦也采用薄膜式引线结构<sup>[8]</sup>，采用适当的接插件将探测器信号引出杜瓦（见图 1.7）；我所研制的 FPA 杜瓦一般采用金属丝引线结构（见图 1.8）。



图 1.8 我所研制的 FPA 杜瓦采用的金属丝引线结构

#### 1.1.4.3 红外焦平面探测器的高精度安装及光学配准技术

##### (a) 基板技术

基板是探测器件的支撑和引线的载体，同时也是热交换的媒介，必须具备一定的机械、电学和热学等性能。目前常用的基板材料有两种：多层陶瓷、蓝宝石片。陶瓷基板金属化的方法有厚膜法、薄膜法和共烧法，三种金属化方法中薄膜法处理的基板表面电阻小。美国的 Aqua 宇宙飞船搭载的大气红外垂直探测仪（AIRS）中杜瓦就是采用多层陶瓷基板<sup>[8]</sup>（见图 1.9）。

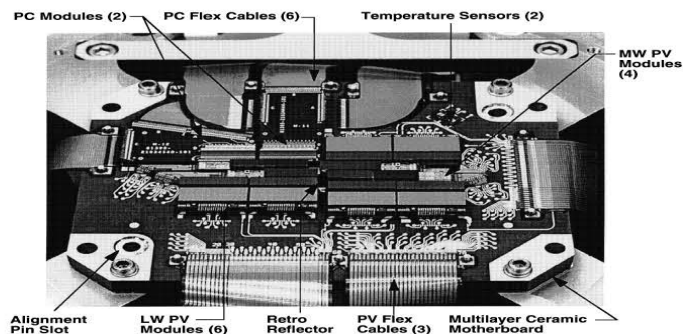


图 1.9 AIRS 中杜瓦多层陶瓷结构基板

蓝宝石基板利用真空蒸镀、离子镀、溅射镀膜和光刻等工艺进行金属化形成。

#### (b) 光学窗口、滤光片及冷光阑安装技术

光学窗口材料一般采用锗、蓝宝石、ZnS 等，是第一层透光介质。在低温环境下可以减少滤光片的背景辐射，滤光片的支撑材料常采用柯伐或钼等。冷光阑利用窄缝进行光学视场限制，外表面要求发射率较高，减少杜瓦的辐射，内表面多为黑色来吸收多余杂散光，克服光串，所以在冷光阑制备中对冷光阑上下表面进行表面处理来达到以上要求。

#### 1.1.4.4 杜瓦的焊接技术

杜瓦的焊接质量直接关系杜瓦的整体漏率和真空寿命，所以在杜瓦研制过程中，焊接方法选择和焊接结构的设计是很重要的。有效杜瓦瓶寿命是指杜瓦瓶热负载增加到超过低温冷却源使焦平面阵列保持在其工作温度的能力所需的时间。杜瓦瓶内的压力增加可能是由图 1.10 中的一种或者多种机理造成的。由扩散和渗透引起的压力增加可以通过材料选择加以控制；由解吸和汽化引起的压力增加可以在组装之前和之后通过处理加以控制；而虚漏泄则可以通过实际杜瓦瓶设计加以解决。由于真的泄露的可能性是一个变数，不可能在制造过程中被全部排除，一般通过测试来消除漏泄现象。

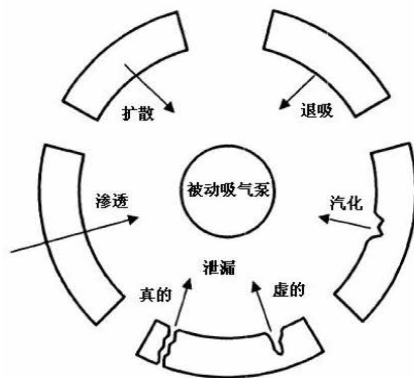


图 1.10 动态真空系统

JAVELIN CLU 杜瓦瓶在瓶内高于 $10^{-4}$  Torr 的压力下，气体传导成了杜瓦瓶总热负载的贡献者，其终止真空为 $10^{-4}$  Torr。表 1 列出了一种内部容积为 18mL，装有消气剂，终止真空为 $10^{-4}$  Torr，其漏率和真空寿命的关系<sup>[9]</sup>。

表 1 一种杜瓦的漏率和真空寿命的比较

漏率 (STP cc He/sec)	达到 $1E^{-4}$ Torr 的 时间
$1E^{-13}$	200 年
$1E^{-12}$	15 年
$1E^{-11}$	2 年
$1E^{-10}$	70 天
$1E^{-8}$	24 小时

在焦平面红外探测器微型杜瓦制备中，涉及的焊接方式有激光焊接、钎焊和红外窗口与金属的焊接。激光焊接主要涉及特殊结构、同异种金属间、非金属与金属间的焊接，如不锈钢与不锈钢、不锈钢与柯伐和柯伐与柯伐之间的焊接，其焊接质量影响参数有：功率密度、激光脉冲的波形、激光脉冲的宽度、激光出光的频率、离焦量种类和离焦量的选择、光斑重叠的选择、保护气体的选择等<sup>[10]</sup>。真空钎焊一般用来实现不同材料之间特殊结构的焊接，它可以保证高精度、小型化和高可靠性<sup>[10]</sup>。杜瓦窗口与金属焊接，一般先将非金属材料的窗口进行金属化，然后再进行焊接。

#### 1.1.4.5 杜瓦的微漏检漏技术

由于杜瓦瓶的容积很小，一个极小的漏孔即可导致内部压强的急剧上升。因而准确测量器件及各部件的漏率是十分重要的，对漏率的测量可以起到指导工艺过程的重要作用。常规检漏方法中最灵敏的一种是氦质谱检漏仪，但是常规检漏仪受检漏方法和制造工艺的限制，一般不能达到高精度要求，目前能够满足军用杜瓦瓶微漏率测量要求的方法主要有：静态累积测量法、信号峰值测量法和信号电流测量法<sup>[11]</sup>。

#### 1.1.4.6 杜瓦零部件及整体的表面处理技术

表面处理技术主要是为了降低杜瓦零部件及整体的表面出气率，提高杜瓦的真空寿命。主要方法有：(1) 对表面进行抛光和在真空中进行高温除气<sup>[12]</sup>；(2) 在杜瓦内表面和内部零部件表面进行化学处理，得到出气率较低的一层表

面结构；(3) 对杜瓦整体和其零部件进行长时间烘烤和排气。

#### 1.1.4.7 杜瓦组件可靠性技术

碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的发展和應用，推动着其可靠性研究的不断深入。组件结构复杂、技术面广同时又价贵量少，其可靠性研究特别是可靠性评价存在着较高的技术难度。目前，国外在红外焦平面杜瓦组件的可靠性研究主要集中在以下几个方面<sup>[13]</sup>：(1) 失效模式的充分暴露和分析；(2) 红外焦平面的耐环境适应性的试验和研究；(3) 红外焦平面组件的可靠性评价方法研究和可靠性水平的广泛调查，从中得到平均寿命的分布情况。在国内对杜瓦可靠性研究主要是对其进行一系列的性能考核试验，从中得出数据进行分析<sup>[14]</sup>。

### 1.2 红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术的内涵

红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术是通过将红外焦平面探测器、微型滤光片、杜瓦组件和制冷机进行集成，使得整个装置从机械结构、力学、电学、光学和热学等一系列特征满足航天工程提出的要求。工作内容主要包括模块组装、封装、制冷及其可靠性等，具体内容包括三大部分：

(1) 红外焦平面探测器微组装技术的研究：a) 红外焦平面探测器和微型光学元件耦合技术的研究，包括高精度光学视场配准技术、电磁兼容技术、降低中心与端点光敏元背景辐射同量差、轻量化冷屏结构等的研究；b) 红外焦平面探测器各模块组装和耦合技术的研究，包括超长线列或大面阵焦平面的安装、超长线列或大面阵焦平面探测器的抗强冲击、高精度光学视场配准、多波段焦平面的精密定位与基准传递、冷平台温度场均衡、无缘衬底的设计与制备技术等研究；

(2) 红外焦平面探测器杜瓦封装技术的研究：a) 红外焦平面探测器杜瓦的研究，包括杜瓦的轻量化结构设计、杜瓦的低温柔性电连工艺技术、杜瓦的真空密封及低漏率、低放气杜瓦表面钝化工艺、低温柔性薄膜电缆等技术的研究；b) 红外焦平面探测器、杜瓦及机械制冷机耦合技术的研究，包括接口兼容的设计、加工、检测技术、低电磁干扰等研究；

(3) 红外焦平面探测器杜瓦组件可靠性技术的研究，通过高低温冲击、力学等环境适应性实验、加速老化模型及寿命实验等实验来提高红外焦平面探测器组件的稳定性、可靠性及加固能力。

### 1.3 红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术研究的意义和价值

目前，随着红外探测器的线列、面阵多元化，发展长线列、大面阵红外焦平面探测器已成为我国红外遥感仪器以及海洋海岸带成像和环境检测红外相机

等民用航天项目的迫切要求，发展长线列、大面阵红外焦平面探测器，将极大地简化空间对地观察红外系统。在空间应用中，作为核心部件的红外焦平面组件化和轻量化技术，以及探测器与机械制冷组件工程化技术工程应用已经非常迫切。

## 1.4 本课题研究的内容和意义

本课题的主要任务是研究和解决 256×2 元长波碲镉汞焦平面红外探测器杜瓦组件结构设计、可靠性和冷光阑效率等封装技术中的一些关键问题，具体内容有：

(1) 完成 256×2 元长波碲镉汞焦平面红外探测器杜瓦组件结构研究和工艺研究，对杜瓦组件进行了热力学和真空的分析计算，并完成其组件试样；

(2) 以 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件为例，通过有限元模拟分析，对碲镉汞红外焦平面器件与杜瓦耦合后的热失配进行了研究。通过 Solidworks 建立器件组装在不同厚度冷头上的结构模型，这些结构整体温度从 300K 制冷到 80K 后，冷头材料分别采用柯伐和因瓦，通过 Ansys 模拟分析了器件的受到的热应力作用及形变，分析了柯伐和因瓦两种材料的冷头对碲镉汞红外焦平面器件热失配应力产生的影响，以及碲镉汞红外焦平面器件最大热应力和冷头厚度的关系。并制造出一系列与冷头粘接面积相同的样品，进行高低温冲击验证试验，实验结果表明满足要求。设计制造出一系列与冷头粘接面积相同的样品，使用不同湿度条件下配备的低温胶粘接，对低温胶进行力学试验，获得低温胶的力学数据，满足粘接碲镉汞红外焦平面器件、宝石片基板与冷头的条件；

(3) 以 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件为例，从杂散光抑制主要技术——结构设计和表面处理技术入手，开展对杜瓦组件的杂散光抑制技术研究。在结构设计方面，提出在冷光阑内增加挡光环的措施，设计了圆柱冷光阑、一级冷光阑和多级冷光阑三种冷光阑结构，并通过 TracePro 模拟分析了挡光环对抑制杂散光的作用和三种冷光阑对杂散光的抑制效果。在表面处理技术方面，介绍了镀黑镍和磷化发黑涂层的工艺，进行了高低温试验、结合力试验。最后制造出设计的三种结构的冷光阑，依次组装在 256×2 元长波碲镉汞焦平面杜瓦组件内进行测试。

本课题研究的意义有：(1) 满足 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面阵列器件应用的要求；(2) 为实现长线列碲镉汞红外焦平探测器杜瓦组件的实用化奠定一定基础；(3) 提升我所航天用红外焦平面工程化应用基础研究水平。

## 1.5 论文结构介绍

本论文主要由以下几部分组成：(1) 第一章引言 介绍了红外焦平面探测器封装技术的发展，重点阐述了红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术的特点，以及本课题的研究内容和目的等；(2) 第二章 长线列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦的研究，针对长线列长波碲镉汞红外焦平面封装的特殊要求，介绍了其杜瓦封装的关键技术；(3) 第三章 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦的研制及热力学和真空分析，详细介绍了杜瓦组件各零部件的优化设计，并对杜瓦结构进行了详细的设计计算，设计出满足 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面器件封装、制冷、光学要求的杜瓦结构；(4) 第四章 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的热失配应力研究；(5) 第五章 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦的杂散光研究。

## 1.6 本章小结

本章首先介绍了微电子封装技术，叙述了电子器件封装的功能与发展，然后重点阐述了红外焦平面探测器杜瓦组件封装的一些关键技术，并针对红外焦平面探测器杜瓦组件封装的现状，阐明本课题研究的内容和意义。最后简单介绍了一下本论文的结构。

## 2 长线列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦的研究

### 2.1 长线列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦研究的意义

红外探测器已经由过去的单元器件，发展到今天的线列、面阵等多元器件，由过去的单色、单通道，发展到今天的多色、多通道，随着焦平面阵列红外器件的问世，红外技术有了飞速发展。第三代碲镉汞红外焦平面探测器发展趋势主要有三个方向：（1）向长线列扫描型焦平面方向发展；（2）向大规模凝视型面阵焦平面探测器发展；（3）向双色灵巧型红外焦平面探测器方向发展。长线列长波碲镉汞红外焦平面探测器在空间对地观测方面尤其重要，它是空间遥感仪器、海洋海岸带成像和环境检测红外相机等民用航天项目的核心部件，通过推扫方式获得地面的红外图像。长线列长波碲镉汞红外焦平面探测器对热辐射敏感，可以对地球目标实现夜间观测，对江、河、湖、海的水面温度探测、热排污监测、城市热岛效应监测、地热资源探测等方面的应用非常广泛，在环境监测和资源开发等方面均有很好的应用情景。我国对地观察遥感仪器和环境检测红外相机，迫切需要发展长线列长波碲镉汞红外焦平面组件。

长波碲镉汞红外焦平面探测器必须工作在深低温下，由于机械制冷具有体积小、重量轻、制冷量大、结构紧凑、制冷时间短、制冷温度可控范围大等优点，故此类探测器在空间应用中大部分采用机械制冷方式<sup>[15]</sup>，因此长波碲镉汞红外焦平面杜瓦成为制冷机与长波碲镉汞红外焦平面探测器耦合非常关键的部件。杜瓦能为长波碲镉汞红外焦平面探测器的低温工作提供良好的光、机、电及热传输通道，是探测器的封装和保护装置，成为探测器稳定工作的关键。

### 2.2 国内外长线列红外焦平面杜瓦的研究动态

国外对红外探测器杜瓦的研制起步早，已经有很长一段时间，其技术已经较为成熟，且已经在空间得到多次成功应用，如美国的改进型同温层大气探测器（ISAMS，1991）、X射线射谱仪（XRS，1996）、欧空局 ERS-1 卫星上的 ATSR 等。美国已经实现了 6000 元线列 PbS 用于预警卫星，法国也已实现了 3000 元和 6000 元线列 GaInAs/InP，均工作在 1-3 $\mu\text{m}$  短波红外区，用于新一代的 SPOT 卫星。现在国外正在发展空间应用超大面阵焦平面组件及其轻量化技术。

法国 SOFRADIR 公司研制的 FPA 杜瓦结构见图 2.1，杜瓦芯柱通过三根斜拉支撑固定在杜瓦外壳上，以加强芯柱壁的力学强度。杜瓦内部采用了四支有支架的意大利 SAES 公司的吸气剂，以最大限度地确保杜瓦内部的真空度。另

外，吸气剂与芯柱之间焊接一个保护屏，用来减小吸气剂激活时产生的高温对 FPA 的影响<sup>[6]</sup>。

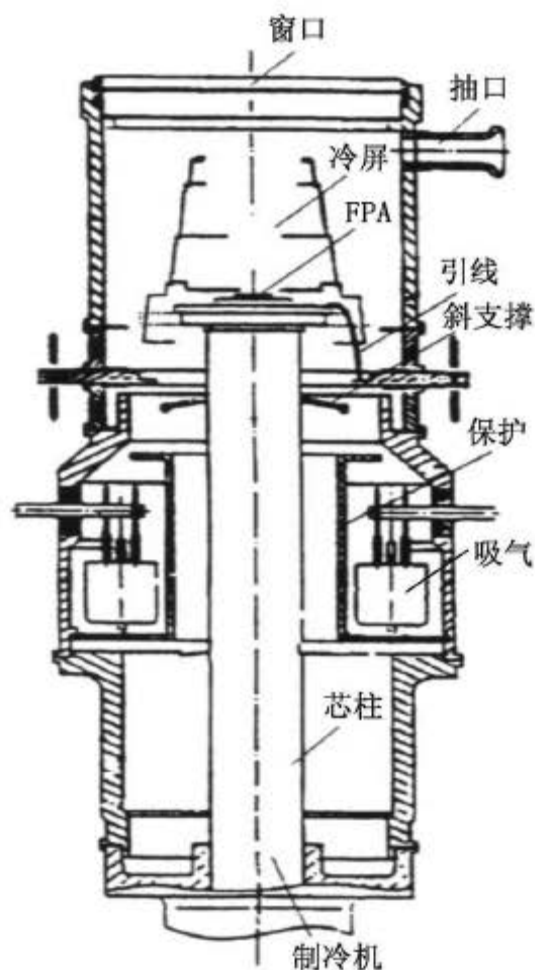


图 2.1 法国 SOFRADIR 公司研制的 FPA 杜瓦结构图



图 2.2 美国 Raytheon 公司研制的可调节光圈大小的 FPA 杜瓦组件

早在上世纪 90 年代，美国 Raytheon 公司在双色红外焦平面阵列的发展中就处于领先地位，Raytheon 公司第一个开发了  $1280 \times 720$  像素双色中波/长波红外焦平面阵列来应用于第三代红外传感系统。美国 Raytheon 公司研制的 FPA 杜瓦组件见图 2.2，杜瓦窗口里面安装了一个可以调节光圈大小的冷光阑。双色中

波/长波杜瓦组件封装中，可以调节光圈大小，选择光学 F 值是第三代红外传感技术的核心之一<sup>[16]</sup>。又见图 2.3，FLIR 系统中也应用了可调冷光阑技术<sup>[17]</sup>。



图 2.3 FLIR 系统中的可调冷光阑结构

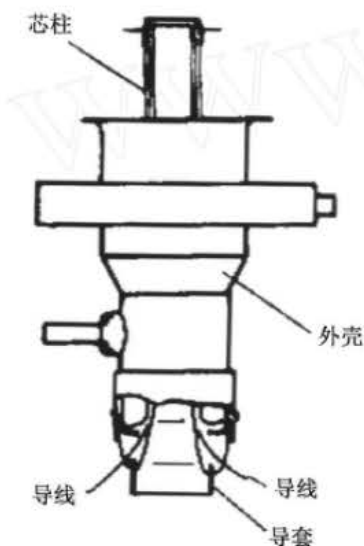


图 2.4 微型多元杜瓦结构

国内较早研制与斯特林制冷机匹配的探测器杜瓦的单位是电子部第十一研究所，该所研制的用于手持热成像仪的 32 元 64 线的微型杜瓦见图 2.4，该杜瓦采用了玻璃芯柱与金属外壳相封接的形式，引线形式为埋入式。还有像合肥低温电子研究所研制的 PtSi256×256CC、杜瓦和 0.5W 分置式斯特林制冷机集成体，这些杜瓦都主要在地面设备中使用，其主要以满足地面使用要求。

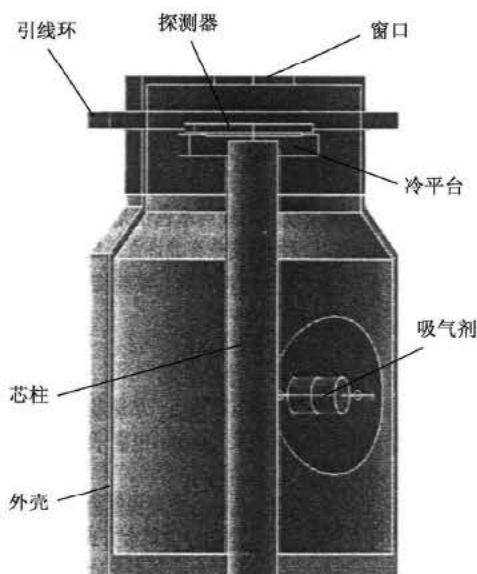


图 2.5 微型红外探测器杜瓦

国内较早研制空间应用探测器杜瓦的单位为上海技术物理研究所，我所早期自行研制的微型红外探测器杜瓦见图 2.5，该杜瓦在随卫星发射升空前，通过了多种严格的空环境模拟试验，确认了其满足微型提出的设计要求，能在 85K 正常工作。近年来，我所成功研制了 2000 元长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦，并经历了严酷的空环境条件的考核，验证了该杜瓦的实用性。

总的来说，国外红外探测器微型杜瓦，从机械结构、力学、热学、光学和真空寿命的角度来看，其技术都已经非常成熟，且在实际空应用中得到反复的验证。我国的红外焦平面技术近几年发展也很快，在材料与芯片技术方面开发了制备较大规模面阵和长线列的关键基础技术，但这些基础技术在向工程化组件化转变中需要进一步完善，同时一些新的设计可靠性等工程化的技术需要发展，要实现从过去的单纯芯片技术研究向工程化组件应用的转变还需要投入更大的精力。

### 2.3 长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦研究的关键问题

红外焦平面探测器杜瓦组件封装主要技术包括杜瓦结构、热力学等优化设计、红外焦平面探测器的高精度安装及光学配准技术、杜瓦的引线技术、杜瓦的微漏检漏技术、杜瓦零部件及整体的表面处理技术、杜瓦的焊接技术、杜瓦组件可靠性技术等。而在长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦的研制中，以下关键难点尤其重要。

#### 2.3.1 长线列碲镉汞焦平面杜瓦的结构、热力学设计

长线列碲镉汞红外焦平面探测器一般由多个  $256 \times 1$  的芯片模块组成，且带

有抗温度冲击的大面积沉底，为了滤波和降低背景噪声提高探测器性能，还会采用滤光片等光学元件及冷屏。这些导致了长线条碲镉汞红外焦平面装载面将承受更大的负载，是杜瓦结构设计的重要依据。长线条碲镉汞红外焦平面杜瓦必须通过严格的真空环境力学条件实验并保证焦平面始终位于光学系统焦平面的允许误差范围内，以满足航天应用的要求，所以首先在支撑结构的设计中要保证支撑结构有足够的支撑强度。杜瓦支撑结构一端连接装载面，一端连接外壳，由于长线条碲镉汞焦平面在深低温下工作而外壳为室温，所以杜瓦支撑结构一端为深低温，一端为室温，因此杜瓦装载面支撑结构的漏热大小决定了杜瓦的热负载的高低。所以长线条碲镉汞焦平面杜瓦的结构、热力学设计，必须要使装载面支撑结构有足够的力学强度和较小的漏热，而且由于装载面尺寸较大，温度的波动和均匀性等问题也必须考虑在内。

### 2.3.2 长线条碲镉汞焦平面器件在冷平台上的热失配设计

长线条碲镉汞焦平面器件模块一般有直接倒装焊和间接倒装焊两种结构。直接倒装焊结构中，碲镉汞光敏元阵列通过钢柱倒焊在硅读出电路上，其间填充了环氧树脂粘合剂，然后再粘接到宝石片或陶瓷基片上。间接倒装焊结构中，碲镉汞光敏元阵列和读出电路是通过钢柱采用间接倒装焊联结在公共衬底（宝石片）上，钢柱间填充了环氧树脂粘合剂。

碲镉汞焦平面器件要制冷到较低的温度才能工作，由于各种材料的热膨胀系数的差异，制冷后在这几层材料内部会产生应力，当这种由于热失配引起的应力到达一定程度，就会造成碲镉汞材料的损伤或互联的失效，在高低温冲击实验中，甚至可能会导致材料开裂、低温胶失效等后果。特别是随着焦平面规模的增加，这种由热失配应力引起的损伤会更加显著，严重影响了焦平面器件的可靠性。

在直接倒装焊芯片模块中，碲镉汞光敏元阵列直接与硅读出电路粘接，硅读出电路再粘接到宝石片上，所以硅读出电路和宝石片都对碲镉汞光敏元阵列的热失配应力影响比较大。而在间接倒装焊芯片模块中，碲镉汞光敏元阵列、硅读出电路都直接与公共衬底（宝石片）的一个面粘接，而且碲镉汞光敏元阵列与硅读出电路之间有一定距离，所以碲镉汞光敏元阵列的热失配应力主要受公共衬底（宝石片）影响。长线条碲镉汞焦平面探测器一般是由多个芯片模块组成，芯片模块都要按照结构要求粘接在宝石电极板或者陶瓷基板上，最后宝石电极板或陶瓷基板的另一面与杜瓦冷头粘接，因此基板和冷头也成了碲镉汞光敏元阵列热失配应力的影响因子。

随着芯片模块的增加，冷头和宝石电极板的尺寸也会相应地增加，这就使

得他们之间的热应力分析更加复杂。在冷头和宝石电极板的设计时，必须要保证我们设计的杜瓦和宝石电极板不能给芯片模块带来额外的热应力，最好是能抵消掉芯片模块自身产生的一部分热应力。因此，芯片模块在宝石电极板上的布局应该做到均匀，这样可以使热应力分布也均匀，而且芯片之间应有一定的间隙，产生的热应力不互相影响，不会产生局部热应力过大的现象。

### 2.3.3 长线列长波碲镉汞焦平面杂散光的抑制

光学系统中杂散光辐射会使目标的信噪比、像面的对比度和调制传递函数降低，使整个像面的层次减少、清晰度变差、能量分布混乱。当杂散光能量很强时，被探测的目标信号甚至完全湮没在杂光背景中，系统无法提取目标。另外，可能会因像面杂散光分布不均匀，在系统探测器上形成虚假信号，使系统探测到伪目标，甚至导致整个系统失效。

对于红外光学系统，由于其自身零部件的长波辐射在系统像面上杂散光辐射总量中占的比重比较大，所以对红外光学系统的杂散光分析，不仅要考虑到系统视场外的杂散光源，而且还要考虑到内部零部件自身的辐射源，这就给红外探测器的封装技术提出了更高的要求，所以对红外探测器封装的杂散光研究是非常有必要的。

长线列长波碲镉汞红外焦平面探测器必须工作在深低温下，一般采用杜瓦封装机械制冷方式。工作在深低温下的碲镉汞红外焦平面探测器对长波辐射更为敏感，所以杜瓦中必须要有专门为了抑制杂散辐射而设计的零部件和工艺流程。

在光学系统中，可以从结构设计和表面处理工艺两方面来抑制杂散光。在结构设计中，可以采用在光学系统中设计专门的结构来切断杂散光的传递路径，比如冷屏，冷光阑、遮光罩、挡光环等的设计。在表面处理工艺设计中，可以对杂散光反射或散射的表面进行特殊的物理化学处理，使其表面的吸收率高、发射率低，比如镀黑镍工艺或磷化发黑工艺处理。

为了降低背景噪声并提高红外探测器性能，在红外探测器杜瓦组件中，一般设计有冷光阑将红外探测器罩住，冷光阑上方开有孔，口径与窗口及红外探测器光学匹配。随着长线列碲镉汞焦平面规模的增加，焦平面面积在增加，与之光学匹配的窗口和冷光阑口径也会增大，这导致了杂散光的增多，特别是视场外的光线通过冷屏的反射达到焦平面的机会大大增加。因此，冷屏和冷光阑的设计也更加重要。

冷光阑和冷屏是杜瓦芯柱载荷的一部分，设计时在保证机械强度的前提下要尽量轻，并且一般对冷光阑和冷屏进行如下表面处理工艺：冷屏的外表面采

用抛光工艺或镀金来降低辐射，内表面采用镀黑镍工艺以抑制杂散光；冷光阑的所有表面采用镀黑镍工艺以抑制杂散光。对于口径较大的冷屏和冷光阑，在冷屏内部设计挡光环结构，可以大大降低杂散光通过一次或者两次反射到达焦平面的机会。

### 2.3.4 长线列碲镉汞焦平面杜瓦基板的制备技术

长线列碲镉汞焦平面探测器一般是由多个 256×1 的芯片模块，利用高精度无盲元直线对准子模块镶嵌技术，进行高精度视场和波段配准而形成。每个 256×1 芯片模块都带有读出电路，有 19 根信号引出端，考虑测温二极管引出线则会更多。这样长线列碲镉汞焦平面探测器就要匹配几十根引线，增加了装载面电极制备工艺的困难和杜瓦的漏热。在保证焦平面探测器各模块之间无干扰的前提下，可以对引线进行优化，减少引线数量，这样就可以减小杜瓦漏热和装载面电极制备工艺的困难，提高杜瓦的可靠性。

总的来说，长线列碲镉汞焦平面杜瓦基板要具有良好的电学、热学和焊接性能，以保证内引线互联后有足够的附着强度，能通过强温度冲击实验。目前，杜瓦基板的制备工艺主要有蓝宝石电极制备工艺、陶瓷电极制备工艺和氮化铝电极制备工艺，常见电极工艺的指标对比见表 2.1。

表 2.1 常见电极工艺的主要指标对比<sup>[18-19]</sup>

基体	蓝宝石	氧化铝陶瓷		氮化铝陶瓷
		95 瓷	99 瓷	
晶体结构	单晶	多晶	多晶	多晶
热导率 (W/m·K)	40	20-24	38.9	150-170
电极工艺	薄膜	厚膜	厚膜或薄膜	厚膜或薄膜

### 2.3.5 长线列碲镉汞焦平面杜瓦零部件的表面处理工艺

长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦零部件的表面处理工艺主要有四个方面：(1) 为了满足一定的光学要求，达到消除杂散光、降低辐射的目的，对冷光阑的内表面进行镀黑镍处理，外表面镀金处理；(2) 对杜瓦零部件进行严格的真空除气、真空存放，对放气率比较大的钛合金进行表面渗氮处理形成淡化钛膜层，以降低杜瓦零部件的放气率，提高真空寿命；(3) 对杜瓦零部件将处于真空内工作的内表面经过粗抛、精抛和镜面抛，以增加杜瓦零部件的表面反射率，从而降低热辐射传热；(4) 杜瓦零部件材料的固有或机加工造成的缺陷，会使气密焊接中焊接热影响区形成发纹和龟裂现象，影响到焊缝的气密性，通过对原

材料锻粗和形成零件真空退火,使金属变得致密和晶粒细化来避免这样的问题。

### 2.3.6 长线列碲镉汞焦平面杜瓦的真空寿命

杜瓦的真空寿命是决定红外焦平面探测器工作时间长短的重要因素之一,影响杜瓦真空寿命的因素主要是残气和焊缝微漏。一般来说,杜瓦焊缝漏率优于 $10^{-11}$  Pa·L/S,真空寿命大于2年,在这个漏率下,影响杜瓦真空寿命的最主要因素是残气。在杜瓦研制完成后,支撑结构和引线的漏热、热辐射和探测器焦耳热一般不会变化,而残余气体对流漏热是不断变化的,所以通常用测量热负载的变化作为反映杜瓦真空寿命的一项重要依据。为了减少残气对杜瓦真空寿命的影响,除了对杜瓦零部件进行高温除气和内表面镜面抛光外,还在超高真空排气时进行延长排气<sup>[20]</sup>,并且在杜瓦内部安装吸气剂,在杜瓦完全密封后也能对内部残气进行处理。

## 2.4 本章小结

本章阐述了长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦研究的意义,介绍了国内外长线列红外焦平面杜瓦的研究动态,描述了长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦研究的关键问题并重点阐述了针对这些关键问题的解决方法。

## 3 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦的研制及热力学和真空分析

### 3.1 杜瓦组件构成

如图 3.1 所示，256×2 碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的组成为：杜瓦外壳(1)、杜瓦芯柱(2)、杜瓦冷头(3)、宝石电极板(4)、滤光片与其支架(5)、引线环(6)、冷光阑与冷屏(7)、吸气剂与其支撑(8)、引线(9)、窗口与窗口帽(10)。

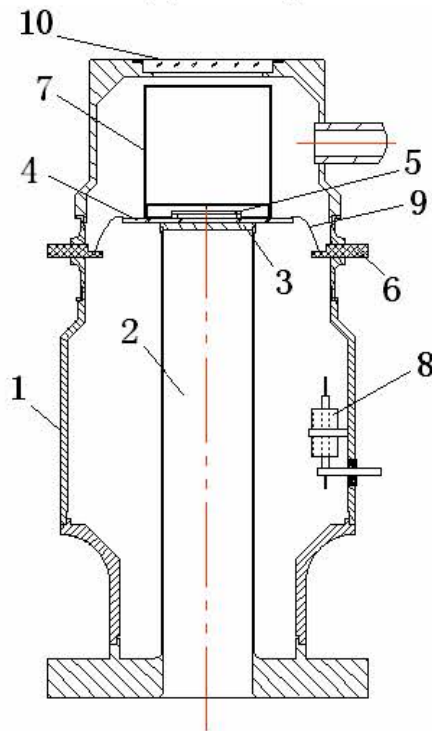


图 3.1 杜瓦组件结构示意图

### 3.2 杜瓦外壳设计

杜瓦外壳的设计原则主要是根据结构设计要求确定其相应的一系列尺寸，同时考虑到真空焊接要求选择相应的焊接结构，以及热力学要求尽量减小其壁厚和提高其表面质量。杜瓦外壳必须确保与制冷机系统安装方式的相容，主要包括外形尺寸、排气管和引线的位置、制冷机的连接方位等，此外还需要考虑杜瓦零部件焊接和装配工艺的可行性等。

杜瓦的外壳材料选用柯伐合金，对外壳零部件表面进行镀镍处理，以满足焊接和产品存放要求。杜瓦外壳和其他零部件采用高真空钎焊和激光焊接工艺

连接，严格控制焊接的气密性，并要求杜瓦焊缝漏率优于 $10^{-11}$  Torr·l/s。

### 3.3 杜瓦芯柱设计

在杜瓦中，芯柱是装载面的支撑结构，其必须通过严格的空问力学条件试验，确保探测器始终位于光学系统焦平面的允许误差范围内，并且芯柱的漏热大小也决定杜瓦的热负载的高低，所以在杜瓦芯柱的设计中，最关键的就是要确保其有足够的力学强度和较小的漏热。在杜瓦连接到制冷系统时，制冷机冷指通过冷链与杜瓦冷头耦合，冷指与杜瓦芯柱采用间隙配合。

#### 3.3.1 杜瓦芯柱材料和尺寸

杜瓦芯柱直接与制冷机冷指配合，安装焦平面组件的杜瓦冷头直接焊接在芯柱上，所以杜瓦芯柱是杜瓦研制中最关键的部分。

首先是芯柱材料的选用，设计考虑的原则是：(1) 良好的机械性能，芯柱是装载面的支撑结构，不仅要承受装载面上组件的重力和真空压力，而且必须通过严格的空问力学环境试验，所以芯柱必须具有较高的屈服强度；(2) 较低的导热系数，杜瓦工作时，由于由制冷机制冷，杜瓦芯柱焊接冷头一端是低温，而杜瓦芯柱焊接杜瓦外壳一端是常温，温度梯度很大；(3) 化学元素对焊接的影响较小；(4) 材料的成本及国内常用材料；(5) 低放气率。

根据杜瓦芯柱材料的选用原则，表 3.1 列出了常用材料的常温力学性能和导热系数。

表 3.1 常用材料的力学参数和导热系数表<sup>[21-25]</sup>

材料	屈服强度(MPa)	导热系数(w/mk)
因科镍合金	985	16.0(300K),10(80K)
Ti-5Al-2.5Sn(钛合金)	760	8.8(300K),4.3(80K)
321不锈钢	430	16.0(295K),8(77K)
316不锈钢	260	11.5(295K),5.9(77K)
304不锈钢	225.6	14.7(295K),7.9(77K)

根据杜瓦芯柱设计材料选用的原则，结合表 3.1 中所示的常用材料的参数，我们可以得到，在金属合金中，从综合性能来看，钛合金是最理想的材料，因为在这几种材料中其屈服强度大，导热系数最低，而且密度比其他几种材料小将近一半，但是钛合金在真空状态下的放气比不锈钢高近两个数量级，而且钛合金与柯伐或者不锈钢在氩弧焊接和激光中极易形成氢脆，焊缝难以得到高气密性，这对杜瓦的真空环境极为不利，对杜瓦的真空寿命影响很大。因科镍合金是一种比较理想的杜瓦芯柱材料，但是其价格昂贵，而且国内使用很少。最终，在杜瓦芯柱设计中我们选择了综合性能较好的 321 不锈钢，虽然其屈服强

度不如之前提到的合金，但是其力学性能可以满足航天应用要求。

杜瓦芯柱一端和杜瓦冷头焊接，另一端与杜瓦外壳焊接并能使制冷机冷指伸入到芯柱内部与冷头耦合。所以杜瓦芯柱尺寸设计的原则是：(1) 与斯特林制冷机冷指接口尺寸的配合；(2) 机械加工工艺的可行性，这主要是考虑芯柱壁厚与长度之间的关系；(3)根据真空压力容器圆筒壁厚的设计公式设计芯柱壁厚。

根据制冷机冷指接口尺寸，且考虑到弹性冷链受压后会向外弯曲端面变大产生变形，芯柱的内径尺寸设计为  $\Phi 13.8\text{mm}$ ，长度为  $71.6\text{mm}$ 。根据真空压力容器圆筒壁厚的设计标准，芯柱壁厚应满足：

$$S = 1.25D \left( \frac{P \cdot L}{E_t \cdot D} \right)^{0.4} \quad (3.1)$$

式中：

S 为芯柱计算壁厚，单位为 mm；

D 为芯柱内径，取值  $13.8\text{mm}$ ；

P 为芯柱设计承受压力，杜瓦内部为真空，P 应该为一个大气压，即  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ；

L 为芯柱长度，取值  $71.6\text{mm}$ ；

$E_t$  为芯柱材料在温度 t 时的弹性模量，不锈钢的弹性模量在低温下要比在常温时高，而低温下的参数无法获得，所以以不锈钢常温参数计算，取值  $199.1\text{GPa}$ 。

将各取值代入芯柱壁厚计算公式(3.1)，计算得到芯柱的壁厚应大于  $0.1013\text{mm}$ ，考虑到力学要求和机械加工可行性，芯柱的壁厚设计为  $0.2\text{mm}$ 。

### 3.3.2 杜瓦芯柱的力学分析<sup>[26]</sup>

杜瓦必须通过严格的空天力学条件试验，并保证焦平面探测器始终位于光学系统焦面的允许误差范围内，以满足航天应用的苛刻要求，所以，对杜瓦进行力学分析是非常必要的。薄壁芯柱是使探测器正常工作的关键部件之一，同时又是杜瓦各零部件中强度最薄弱的部分，因此我们对杜瓦芯柱的负载、质量及其最大加速度承受载荷进行了力学分析。表 3.2 列出了杜瓦芯柱的负载及其质量。薄壁芯柱的自重约  $4.84\text{g}$ ，头部受冷头、基板、芯片及电路、滤光片和冷光阑的重力作用。

表 3.2 杜瓦芯柱的负载及其质量

负载	质量 (g)
----	--------

冷头	2.24
基板	0.82
芯片及电路	1.44
遮光片	0.4
冷光阑	3
合计	7.9

杜瓦芯柱简化后的力学模型为悬臂梁结构，考虑空间应用时的力学条件，最大受力为  $300\text{N/m}^2$ ，其受力情况如下：载荷  $F_1$  为芯柱的自重，载荷  $F_2$  为顶端背压受力。如图 3.2 所示，下面进行抗拉压和弯曲力学分析。

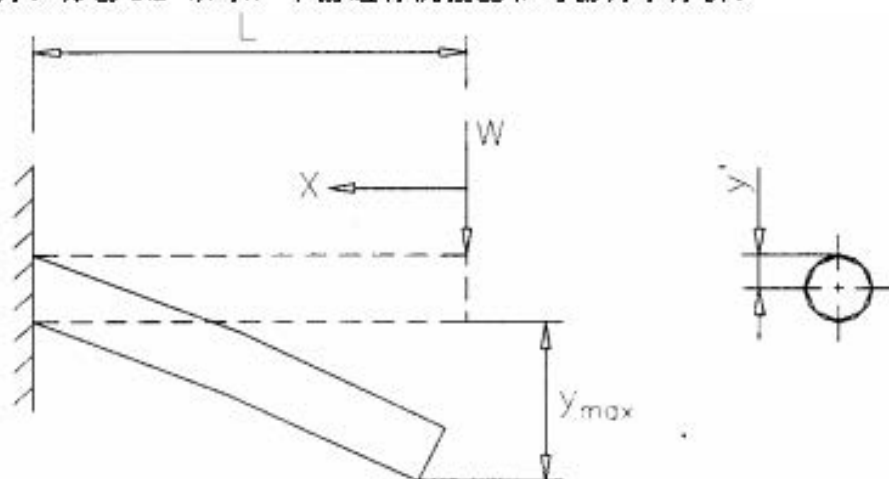


图 3.2 杜瓦芯柱的力学简化模型示意图

#### (1) 抗拉压力学分析

根据公式：

$$[\sigma] = \frac{F_{\max}}{S} < [\sigma]$$

式中：受力  $F_{\max} = F_1 + F_2 = 3.95\text{N}$

截面积：

$$S = \pi \cdot \frac{D^2 - d^2}{4} = 8.8 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

代入公式求出：

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{S} = 0.449 \text{MPa}$$

由表 3.1 可知 321 不锈钢的屈服强度  $[\sigma]$  为  $430\text{MPa}$ ，有足够的余量。

#### (2) 弯曲力学分析

根据悬臂梁的挠度计算公式可知，自由端（芯柱头部）的挠度最大，而且满足：

$$Y_{\max} = \frac{WL^3}{3EI} \quad (3.2)$$

式中：W 为集中载荷，根据模型简化计算为 3.95N；L 为杜瓦芯柱的设计长度，取值 71.6mm；E 为 321 不锈钢的弹性模量，取值 199.1GPa；I 为圆筒芯柱截面对形心轴的二次矩，计算公式为：

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4),$$

式中 D 为圆筒外径取值 13.95mm，d 为圆筒内径取值 13.8mm，则

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64}(14.1^4 - 13.8^4) = 1.5993 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

将所求得各个参数代入公式(3.2)，可得到芯柱头部的最大挠度为：

$$Y_{\max} = \frac{WL^3}{3EI} = \frac{3.95 \times 71.6^3 \times 10^{-9}}{3 \times 199.1 \times 10^9 \times 1.5993 \times 10^{-10}} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m}$$

根据简单弯曲理论可知，固定端（芯柱根部）的应力最大，而且满足公式

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} Y' \quad (3.3)$$

式中：M<sub>max</sub> 是根部的弯矩，取值 M<sub>max</sub> = WL = 3.95 × 71.6 × 10<sup>-3</sup> = 0.282N·m；Y' 为芯柱根部外径距离其中心轴的距离，取值 7.05mm；将参数代入公式(3.3)得到：

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} Y' = \frac{0.282 \times 7.05 \times 10^{-3}}{1.5993 \times 10^{-10}} = 12.43 \text{ MPa}$$

由不锈钢的许用应力

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{0.2}}{n_s}$$

由表 3.1 可知 321 不锈钢的屈服强度  $\sigma_{0.2}$  为 430MPa，安全系数取值 1.5，则许用应力  $[\sigma]$  为 286.67MPa。可以看出，即使该杜瓦承受的最大加速度载荷为 300N/m<sup>2</sup> 时，许用应力仍然有很大的余量。

当杜瓦芯柱承受弯矩时，自由端的转角最大，而且满足悬臂梁的转角计算公式：

$$\theta_{\max} = \frac{WL^2}{2EI}$$

代入各参数可计算出  $\theta_{\max}$  为  $3.19 \times 10^{-4}$ ，转角非常小。

### 3.3.3 杜瓦芯柱的模态分析<sup>[27-28]</sup>

采用 ANSYS 软件对杜瓦芯柱进行模态分析，用以获取结构的自然频率和振型。结构的基本模态和频率信息能有助于其动力响应特性，因此模态分析是其他动力分析的基础。

芯柱是用来冷头和焦平面器件的支撑结构，所以我们在模态分析的时候把冷头和宝石电极板考虑在内。杜瓦芯柱的实体模型及其简化网格分布如图 3.3 所示。

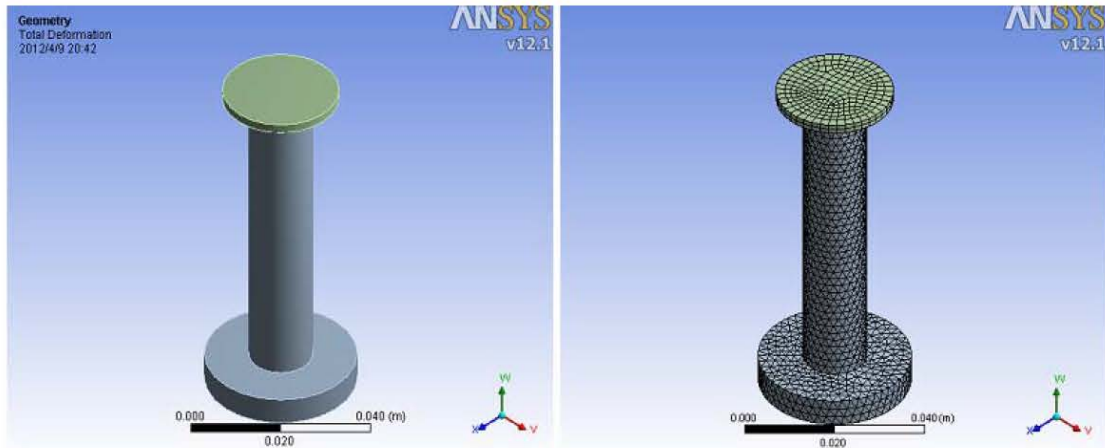


图 3.3 芯柱的实体模型及其简化网格分布

杜瓦芯柱的模态分析结果如表所示：

模态	一阶	二阶	三阶
频率(Hz)	824.12	3487.1	7831.3

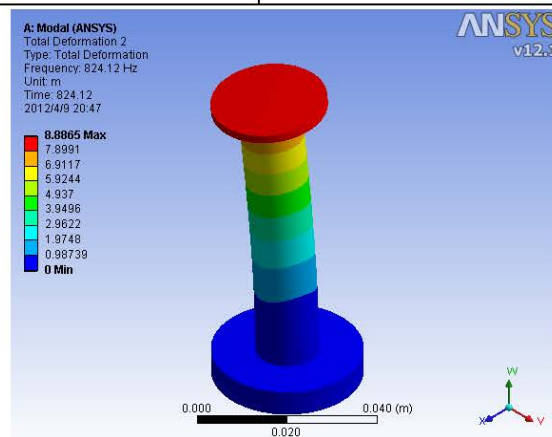


图 3.4 芯柱一阶模态变形

杜瓦芯柱的一阶变形（见图 3.4）同为弯曲，但是方向不一样，二阶（见图 3.5）为扭曲变形，三阶（见图 3.6）为弯曲变形。可以看出，其固有频率较高，环境适应性较好。

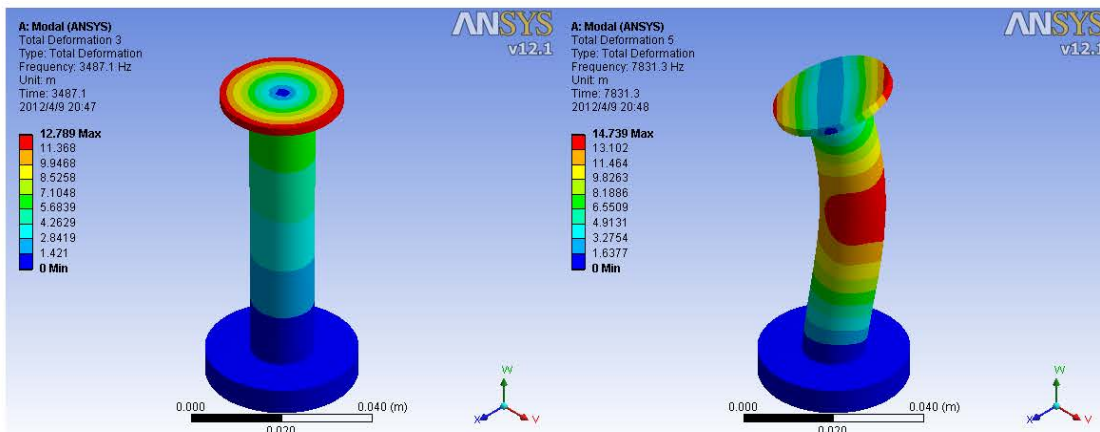


图 3.5 芯柱二阶模态变形

图 3.6 芯柱三阶模态变形

### 3.4 杜瓦冷头的设计

杜瓦的冷头是焦平面探测器的安装平台，并与制冷机弹性冷链直接接触，为红外焦平面探测器提供低温的工作环境。因此冷头的材料选用原则是：(1) 机械性能良好；(2) 低温热导率大；(3) 与不锈钢芯柱容易焊接。在设计时需要考虑几点：(1) 温度均匀；(2)轻量化；(3) 结构外形匹配；(4) 深低温和强温度冲击下，多层结构的材料匹配；(5) 加工工艺兼容。综合考虑以上因素并借鉴以往杜瓦研制的成功经验，选用因瓦 4J32。

杜瓦冷头安装平台的形状和尺寸根据芯片的尺寸和组装来设计，由于该杜瓦中焦平面是由两个 256×1 的芯片模块对称组装在冷平台上，综合考虑到芯片、硅读出电路和宝石电极板的大小与拼装，冷头设计为圆形，直径为 14.8mm。而冷头的厚度可以根据真空压力容器圆形平盖板的厚度计算公式计算得出。真空压力容器圆形平盖板的厚度计算公式如下：

$$S = D \sqrt{\frac{KP}{[\sigma]}} \quad (3.4)$$

式中：

S 为冷头计算厚度，单位 mm；D 为芯柱内径，取值 13.8mm；K 为结构特征系数，取值 0.25；P 为一个大气压，即  $1.013 \times 10^5$  Pa； $[\sigma]$  为冷头材料常温下的许用应力，安全系数去 2， $[\sigma]$  取值 492.5MPa。

将各参数代入到厚度计算公式(3.4)中，可得到冷头的计算厚度为 0.099mm。考虑到在低温下工作，并对冷头、宝石片和芯片等材料组合进行了热失配应力的研究及模拟仿真，最终冷头厚度设计为 1.5mm，这个厚度下芯片模块受到的热应力相对较小，可以提高芯片的可靠性。

### 3.5 杜瓦宝石电极板的设计

宝石电极板是焦平面探测器和引线环之间的桥梁，根据焦平面中碲镉汞芯片模块和硅读出电路的组装结构，事先制备好宝石电极板上的电极引线，然后将碲镉汞芯片与硅读出电路间接互联的焦平面通过低温环氧树脂粘接在宝石电极板上。选用单晶蓝宝石作为电极板材料，是因为单晶蓝宝石相对与陶瓷和 PCB 板有较低的真空出气率，这对杜瓦的真空寿命非常有利。

### 3.6 杜瓦滤光片的选用及安装设计

滤光片是红外焦平面探测器光学分光的重要元件，通过滤光片垫直接安装在芯片上方，用来降低背景辐射和光串，增加结构和工艺的可靠性。对于长波红外焦平面探测器来说，滤光片材料一般选用锗。根据光学设计及安装固定方式的要求，设计滤光片的下表面到芯片光敏元的距离为 0.8mm，滤光片为 13.8mm×2mm，厚度为 0.4mm，滤光片支架采用宝石片。

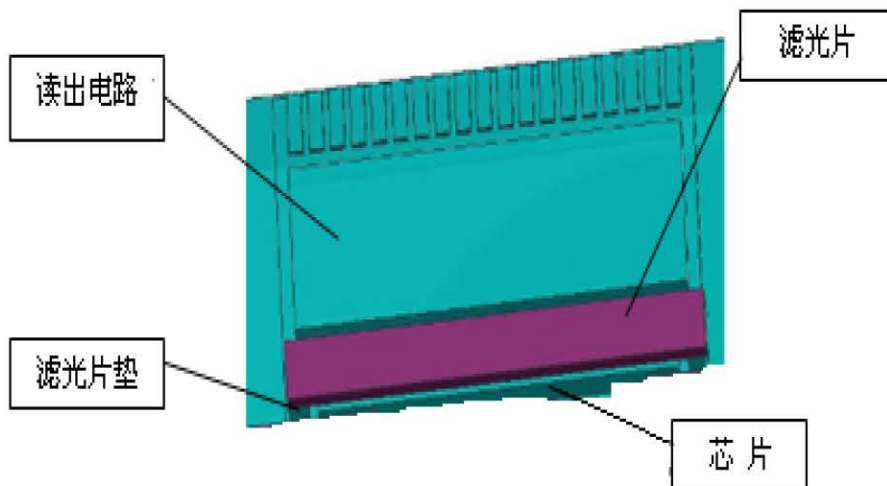


图 3.7 滤光片的安装方式

2 个滤光片分立安装，以适应可改用 2 个长波分裂窗滤光片的要求。滤光片采用架桥式安装，安装方式如图 3.7 所示。

### 3.7 杜瓦引线环的设计

引线环是杜瓦外壳的一部分，通过引线连接宝石电极板的信号电极，将焦平面的信号引出杜瓦。引线环的设计原则是：(1) 结构和引线脚数量要满足芯片引线的要求；(2) 作为杜瓦外壳的一部分，应与杜瓦外壳能够很容易实现焊接，且引线环要具有良好的机械强度，并对将处于真空环境的内表面进行抛光等工艺处理以提高其表面质量，从而降低杜瓦的寄生辐射热和真空放气；(3) 考虑到金属与非金属之间的无漏烧结要求两种材料膨胀系数匹配。

表 3.3 几种常见的柯伐材料的热膨胀系数比较

柯伐材料	热膨胀系数 ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )
4J29	5.60
4J31	7.54
4J33	6.94
4J34	7.90

目前，比较常用的两种烧结形式有陶瓷烧结和玻璃烧结，我们采用传统的陶瓷烧结形式，金属选择柯伐材料，可以与同样采用柯伐材料的外壳直接激光焊接，在表 3.3 中列出了几种常见的柯伐材料的热膨胀系数，可以看出，柯伐 4J29 的热膨胀系数在这几种柯伐材料中最低，而且与 95 瓷匹配，而 95 瓷的出气速度为  $8.0 \times 10^{-8} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ，符合要求，因此选用柯伐 4J29 与 95 瓷进行陶瓷引线脚与柯伐引线环的烧结。

### 3.8 杜瓦冷光阑及冷屏的设计

为了有效的抑制杂散光，我们设计了冷光阑和冷屏。冷光阑设计为两个矩形孔，其通光孔尺寸为  $12.3\text{mm} \times 1.4\text{mm}$ ，两矩形之间的中心距离为  $2.15\text{mm}$ 。冷光阑的上表面距离芯片的距离为  $1.96\text{mm}$ 。冷屏设计为  $\phi 12.8\text{mm}$  孔，冷屏的上表面距离芯片的垂直距离为  $19.5\text{mm}$ 。

在杜瓦冷光阑的优化设计中，我们提出了另外两种冷光阑设计，即含一级挡光环的冷光阑、含两级挡光环的冷光阑的结构设计。这两种冷光阑设计是在冷屏内部增加挡光环，冷屏采用了多个圆筒的形式，将挡光环嵌套其中后激光焊接而成。

冷光阑、冷屏和挡光环均采用薄壁厚度为  $0.2\text{mm}$  的柯伐材料，套装后通过激光焊接连接，并对冷屏和冷光阑进行如下表面处理工艺：冷屏的外表面采用抛光工艺以降低辐射，内表面采用镀黑镍工艺以抑制杂散光；冷光阑的所有表面采用镀黑镍工艺以抑制杂散光。将冷光阑和冷屏焊接成型后通过插脚安装固定在杜瓦冷头上。

### 3.9 杜瓦吸气剂的选用及安装设计

吸气剂是安装在真空容器内的特殊组件，经蒸散或激活后在真空容器内形成一个化学泵，可以保持或提高真空容器的真空度，使真空寿命显著延长。根据工作方式的不同，吸气剂一般可分为蒸散型和非蒸散型两种，蒸散型吸气剂由于工作时要蒸发出金属气体，而蒸发出来的金属气体会覆盖在真空容器的内表面，对红外窗口及焦平面探测器造成污染。所以，我们选择非蒸散型吸气剂。

在吸气剂的选用中，参考产品介绍并通过比较，选择 ST172/LH1/4-7/200

型非蒸散型吸气剂；在吸气剂安装设计中，采用单针二缝一次成型的陶瓷烧结外引结构，在杜瓦内进行吸气剂电串联连接，并安装辅助支撑来力学加固。

### 3.10 杜瓦引线的设计

杜瓦组件中的引线主要是用来传输红外焦平面探测器信号，另外对杜瓦漏热有贡献，其装配的质量直接影响杜瓦的真空气密性。参考第一章中杜瓦的引线技术一节（1.1.3.2），在埋入式、薄膜式和侧引式三种引线方式中，我们选用工艺较简单的直接侧引方式。

引线材料的选用原则是：导热系数越小越好，电阻越小越好。表 3.4 列出了常用的引线材料的平均电阻率和平均导热系数。

表 3.4 常用引线材料的特性<sup>[29]</sup>

材料	平均电阻率 ( $10^{-8} \Omega \cdot m$ )	平均导热系数 [W/(m·K)]
铂金	10.6	71.6
铝	1.52	276.29
铜	0.99	414.10
金	1.35	311.42
银	0.97	441.59
镍	3.66	118.52
锰铜	48.21	17.83
柯伐	44	17.64
铟	5.21	103.28

从表 3.4 中可以看出，银、铜、金和铝的电阻率都非常小，是导线的理想材料，但是在引线设计中，引线较短，而这几种材料的导热系数很大，由此给杜瓦带来的传导漏热都比较大。因此在满足引线电学性能，即焦平面探测器信号引线电阻小于 2 欧姆的前提下，应尽量选用导热系数较低的材料。我们选用的引线为直径 20 $\mu$ m、长度为 6mm 的铂金丝，并采用深埋引线工艺进行连接。

### 3.11 杜瓦窗口与窗口帽的设计

窗口与窗口帽是杜瓦中具有光学元件和杜瓦外壳双重属性的零部件，要同时满足光学性能和高气密性的双重要求。

目前常用的透红外窗口材料有玻璃、锗、石英、硅、蓝宝石、硫化锌、硒化锌。针对本焦平面探测器 8-12.5 $\mu$ m 波段和光学设计要求，窗口材料选用锗，外径为  $\phi 17$ mm，厚度为 2mm，中间通过光刻开一个  $\phi 13$ mm 孔，在  $\phi 14$ mm 范围内在其表面透光部位形成增透膜，四周采用离子束蒸渡 Cr/Au。柯伐材料中 4J29 合金的线膨胀系数和窗口材料锗比较接近，所以选用 4J29 作为窗口帽材料，根据光学设计结果，窗口帽的通光口尺寸为  $\phi 15$ mm，窗口下表面与芯片的

距离为 21.52mm。

窗口通过气密焊接连接在窗口帽上，因为增透膜一般不能承受高温气密焊接，所以焊接方式和焊料的选择就直接决定了窗口部件的质量。针对红外光学窗口材料特性和其增透膜的特点，在窗口的焊接处通过光刻和真空镀膜工艺形成过渡层，采用软金属钎作为焊料，并在低温下焊接，这样就不会对红外光学窗口上的增透膜产生任何不良影响，采用软金属作为焊料连接也可以缓冲光学窗口材料与柯伐合金的膨胀系数的差异。窗口与窗口帽焊接处漏率要求和杜瓦外壳焊缝漏率要求一样，要求此焊接连接处漏率优于 $10^{-11}$  Torr·l/s。

### 3.12 杜瓦研制中的焊接工艺<sup>[30-35]</sup>

焊接的质量直接影响了杜瓦的真空寿命和寄生热负载，决定了杜瓦的性能，要确保杜瓦真空度并保持一定的时间，必须要求杜瓦各零部件之间的焊缝漏率非常小，一般要求焊缝漏率优于 $10^{-11}$  Torr·l/s，因此对于不同材料，不同条件，选择合适的焊接方式非常重要。

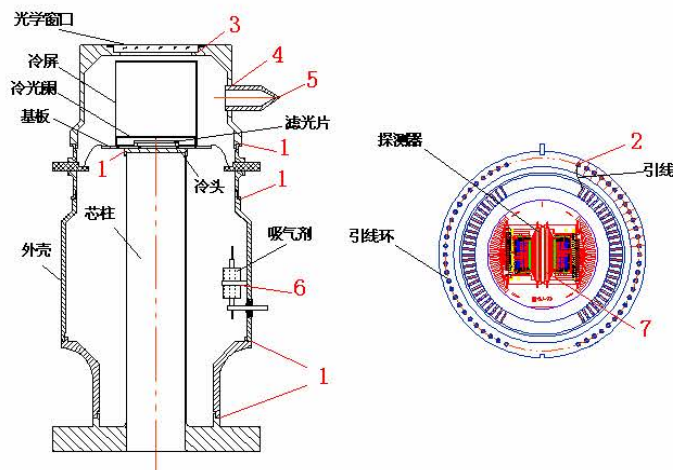


图 3.8 杜瓦的主要焊接点示意图

在以上杜瓦零部件的研制介绍中，已经陆续介绍了杜瓦中的一些焊接工艺，在这一节总结一下杜瓦研制过程中涉及到的焊接工艺。杜瓦研制中主要涉及到的 8 种焊接工艺如图 3.8 所示：(1)激光焊接，杜瓦主题的焊接一般采用氮气保护激光焊接，包括了芯柱与外壳、外壳与引线环和外壳的零部件之间，焊接面要求平滑光滑；(2)金属埋焊，引线与宝石电极板、引线环之间的连接采用深埋引线焊接；(3)金属钎焊，红外光学窗口与窗口帽之间的连接采用钎焊；(4)低温真空钎焊，窗口帽与排气管之间的连接采用低温真空钎焊；(5)冷夹封，在真空排气后对排气管进行冷夹封；(6)碰焊，吸气剂的固环与杜瓦外壳内壁的机械连接采用碰焊；(7)超声键合，焦平面探测器芯片与引线电极板之间的连接采用超声键合。

### 3.13 杜瓦的放气与真空保持分析

杜瓦的真空寿命是决定红外焦平面探测器工作时间长短非常重要的因素之一。在杜瓦研制完成后，支撑结构和引线的漏热、热辐射和探测器焦耳热一般不会变化，而残余气体对流漏热是不断变化的，所以通常用测量热负载的变化作为反映杜瓦真空寿命的一项重要依据。

#### 3.13.1 杜瓦的放气分析

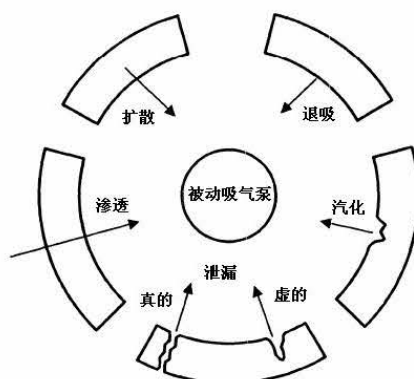


图 3.9 真空杜瓦容器内各种放气源

从图 3.9 中可以看出，影响杜瓦真空的因素主要包括<sup>[36]</sup>：(1)蒸发：在动态平衡下，蒸汽压强等于固体或液体的饱和蒸汽压，杜瓦结构的主体材料为柯伐和不锈钢，其蒸汽压很低，可以不考虑这两种金属蒸发对杜瓦真空寿命的影响，在杜瓦中使用得比较多的环氧树脂低温胶在室温下的蒸汽压低于 $10^{-5}$ ，其对杜瓦真空的影响也可以忽略不计；(2)扩散和渗透：在杜瓦中气体的渗透和扩散都是由于杜瓦内外某气体浓度的不同而导致的其分子或原子的迁移，一般可以分成三个阶段，首先气体吸附在杜瓦的外壁上，然后扩散经过杜瓦外壳，最后从杜瓦内壁上释放出来。对于杜瓦来说，主要考虑氦对窗口的分子渗透和氢对柯伐的原子态渗透带来的对杜瓦真空寿命的影响，一般对于微型杜瓦来说，其渗透主要来源于氢气，其总渗透放气率在 $10^{-11}$  Torr·l/s 级别，渗透放气量对真空的影响相对解析放气来说，可以忽略不计；(3)焊缝微漏：对于现在的焊接工艺来说，可以很好的保证焊缝漏率低于 $10^{-11}$  Torr·l/s，满足杜瓦真空寿命的要求；(4)材料的解吸放气：解吸放气是指吸附在容器内壁上的气体或蒸汽受热激励而释放出来的过程，杜瓦材料的解吸放气是最主要的放气源<sup>[37-39]</sup>，我们主要分析材料的解吸放气对杜瓦真空寿命的影响。

材料解吸速率是时间和温度的反比例函数，在杜瓦夹封之前，一般在 $50^{\circ}\text{C}$ 对杜瓦进行一定时间的烘烤排气，温度影响可忽略，所以在只考虑时间的作用下，材料的解吸速率与时间的关系如下：

$$q_t = \frac{q_0}{t^\alpha} \tag{3.5}$$

式中： $q_t$  是单位面积材料暴露在真空中  $t$  小时后的解吸放气速率，单位 Torr·l/(s·cm<sup>2</sup>)； $q_0$  为常数； $t$  为抽真空的时间，单位小时； $\alpha$  为解吸速率的衰减系数。

在杜瓦内部，裸露在真空中的材料主要有无氧铜、窗口材料、柯伐和环氧树脂，探测器及测温二极管等材料由于表面很小，故不考虑其放气。由于一些材料常温解吸速率无法查到，我们在计算中做近似，将窗口和宝石电极板近似为 95 陶瓷，柯伐近似为不锈钢。杜瓦内部各材料在常温下的解吸速率以及依据杜瓦结构的真实尺寸计算得到的它们在真空中裸露的面积如表 3.5 所示

表 3.5 杜瓦材料常温下的解吸速率和真空裸露面积

材料	零件	解吸速率 [Torr·l/(s·cm <sup>2</sup> )]		真空裸露 面积(cm <sup>2</sup> )
		1h	25h	
无氧铜	排气管	1.9×10 <sup>-9</sup>	6×10 <sup>-10</sup>	6.91
95 瓷	窗口、宝石电极板	1.0×10 <sup>-6</sup>	8×10 <sup>-8</sup> (20h)	8.07
环氧树脂	低温胶	2.7×10 <sup>-6</sup>	6×10 <sup>-7</sup> (20h)	4.58
不锈钢	芯柱、冷头、外壳、引线环、光阑、窗口帽等	2.2×10 <sup>-9</sup>	2×10 <sup>-10</sup>	175.67

根据公式(3.5)，利用表中两个时间点的解吸速率，通过计算得到杜瓦内部各材料的  $q_0$  值和  $\alpha$  值，即得到解吸速率随时间变化的关系，如表 3.6 所示。

表 3.6 杜瓦材料解吸速率的参数及表达式

材料	解吸速率参数		解吸速率 $q_t$ 表达式 [Torr·l/(s·cm <sup>2</sup> )]
	$q_0$	$\alpha$	
无氧铜	1.9×10 <sup>-9</sup>	0.358	1.9×10 <sup>-9</sup> · t <sup>-0.358</sup>
95 瓷	1.0×10 <sup>-6</sup>	0.843	1.0×10 <sup>-6</sup> · t <sup>-0.843</sup>
环氧树脂	2.7×10 <sup>-6</sup>	0.502	2.7×10 <sup>-6</sup> · t <sup>-0.502</sup>
不锈钢	2.2×10 <sup>-9</sup>	0.745	2.2×10 <sup>-9</sup> · t <sup>-0.745</sup>

各材料的解吸速率随时间的变化曲线如图 3.10 所示，从图中可以看出，无氧铜的解吸放气速率降低得最快，由于窗口、宝石电极板和环氧树脂的解吸放

气速率比不锈钢高三个数量级，而且衰减系数也相对较小，因此窗口、宝石电极板和环氧树脂是主要的放气源。

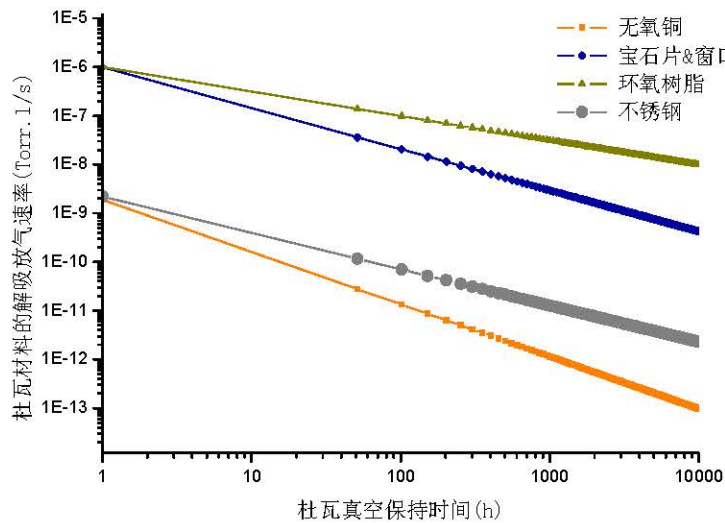


图 3.10 杜瓦材料的常温解吸速率-时间曲线

### 3.13.2 杜瓦的真空保持分析

从杜瓦抽好真空算起，任一放气源的解吸放气总量满足：

$$Q_{(0 \rightarrow t)} = S \cdot \int_0^t q_t dt \quad (3.6)$$

式中： $S$  为放气源的真空裸露面积， $Q_{(0 \rightarrow t)}$  是从材料处于真空时刻到任一时刻  $t$  时的解吸放气总量，单位为  $\text{Torr}\cdot\text{l}$ 。将杜瓦内各材料的解吸放气速率和真空裸露面积代入到公式(3.6) 中，可以计算得到各材料的解吸放气总量随时间的关系，表 3.7 列出了从杜瓦抽好真空算起，杜瓦内各材料的解吸放气总量随时间的关系。假设杜瓦内各材料分别单独解吸放气，由各个材料的解吸放气总量  $Q$  与时间的关系，计算各个材料的解吸放气量使杜瓦内真空上升到  $0.1\text{Pa}$ ，杜瓦内容积取  $100\text{ml}$ ，即各材料单独放气量到达  $7.5006 \times 10^{-5} \text{Torr}\cdot\text{l}$  需要的时间，按照时间由短到长的顺序，宝石和窗口 11 小时、环氧树脂(低温胶)131 天、铜  $1.5 \times 10^4$  天、不锈钢  $1.8 \times 10^5$  天。也就是说，影响杜瓦真空寿命的材料解吸放气绝大部分来自于低温胶、宝石和窗口。

表 3.7 杜瓦内各材料的解吸放气总量-时间关系

材料	解吸速率 $q_t$ 表达式 [ $\text{Torr}\cdot\text{l}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ ]	真空裸露面积 ( $\text{cm}^2$ )	解吸放气总量 $Q$ ( $\text{Torr}\cdot\text{l}$ )	夹封后放气量 $\Delta Q$ ( $\text{Torr}\cdot\text{l}$ )

无氧铜	$\frac{1.9 \times 10^{-9}}{t^{0.358}}$	6.91	$2.05 \times 10^{-8} \cdot t^{0.642}$	$2.05 \times 10^{-8} \cdot (t^{0.642} - t_0^{0.642})$
95瓷	$\frac{1.0 \times 10^{-6}}{t^{0.843}}$	8.07	$5.14 \times 10^{-5} \cdot t^{0.157}$	$5.14 \times 10^{-5} \cdot (t^{0.157} - t_0^{0.157})$
环氧树脂	$\frac{2.7 \times 10^{-6}}{t^{0.502}}$	0.25	$1.36 \times 10^{-6} \cdot t^{0.498}$	$1.36 \times 10^{-6} \cdot (t^{0.498} - t_0^{0.498})$
不锈钢	$\frac{2.2 \times 10^{-9}}{t^{0.745}}$	175.67	$1.52 \times 10^{-6} \cdot t^{0.255}$	$1.52 \times 10^{-6} \cdot (t^{0.255} - t_0^{0.255})$

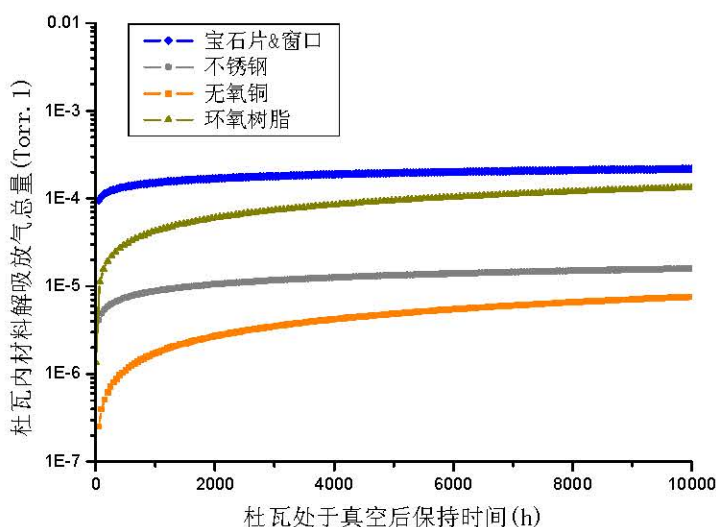


图 3.11 杜瓦处于真空后内部材料的常温解吸放气总量-时间曲线

杜瓦处于真空后，内部材料的常温解吸放气总量  $Q$  和时间  $t$  的关系曲线见图 3.11，从图中可以看出，排气量由大到小依次为蓝宝石片&窗口、环氧树脂(低温胶)、不锈钢、铜，低温胶、蓝宝石片和窗口是主要放气源，而且低温胶的解吸放气速率减小得比较慢，所以杜瓦内部应尽量减少对低温胶的使用量。这些曲线都有一个特点，即 0-500h 区间曲线都上升得很快，而越到后面曲线越趋于平缓，也就是说在上升特别快的区间内，这些材料都放出了大部分气体，而越到后面放出的气体越少，越到后面材料的解吸放气总量变化极小。因此，在杜瓦研制成功后，对它进行一定时间的真空烘烤排气是非常有必要的，在真空烘烤排气后，杜瓦内裸露在真空中的材料已经放出了大部分气体且解吸放气速率变小几个数量级，然后进行夹封，这样才可以保证杜瓦的真空寿命较长，而且真空烘烤排气时间越长，材料解吸放气对杜瓦真空的影响越小。

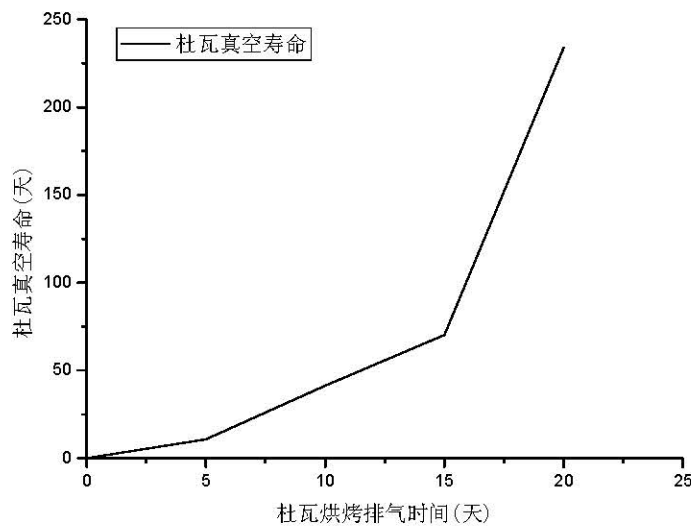


图 3.12 杜瓦真空寿命与烘烤排气时间的关系曲线

杜瓦研制成功后，我们对其进行 $t_0$ 时间的真空烘烤排气，以排除杜瓦内部材料的大部分解吸放气量，夹封后排气量 $\Delta Q$ 见表 3.7 所示。以从夹封起到杜瓦真空上升到 0.1Pa 来计算杜瓦的真空寿命，杜瓦内容积取 100ml，即所有材料总放气量到达  $7.5006 \times 10^{-5}$  Torr·l 需要的时间，由于无氧铜和不锈钢的解吸放气量对杜瓦真空寿命的影响与宝石、窗口和低温胶比起来可以忽略不计，所以只考虑宝石、窗口和低温胶，可以得到杜瓦的真空寿命与真空烘烤排气时间 $t_0$ 的关系如图 3.12 所示。从图中可以看出，对杜瓦进行 20 天的真空烘烤排气并进行夹封，由于杜瓦内部材料的解吸放气，杜瓦的真空度上升到 0.1Pa 需要 240 天左右，即杜瓦的真空寿命。

在杜瓦的研制过程中，我们为保证杜瓦的真空寿命采取的工艺及措施有：  
 (1)对各个焊接零部件的超高真空检漏筛选控制，确保焊缝漏率低于  $10^{-11}$  Torr·l/s；  
 (2)杜瓦研制成功后，对杜瓦进行超高真空 50℃烘烤除气 20 天；  
 (3)在杜瓦内部安装了 2 个吸气剂，可以在杜瓦夹封之后吸收杜瓦内部残气，提高杜瓦的真空度，提高杜瓦的实际能到达的真空寿命指标。

### 3.13.3 吸气剂的使用对杜瓦真空的影响

杜瓦中安装的吸气剂一般可以吸收除惰性气体的其他所有气体，大气中惰性气体所占的体积百分比约为 0.936%，也就是说吸气剂可以吸收杜瓦内部 99% 的气体，在杜瓦夹封后可以利用吸气剂来吸收杜瓦内部残气，提高杜瓦真空寿命。

吸气剂在不同温度下吸气的机理不同，而其工作温度又会受到限制，所以要按照实际情况是吸气剂工作在合适的温度下。杜瓦内的材料在常温下的解吸

放气的主要成分是 H<sub>2</sub>O，选用的 ST172 型非蒸散型吸气剂在常温下仅对 H<sub>2</sub> 有较高的吸气速率，而对 H<sub>2</sub>O、CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的吸气速率都很低，而在 200℃ 时对 H<sub>2</sub>O 的吸气较好，所以 ST172 的最佳吸气温度应该是 200℃，即最佳工作电流为 1.5A。

从前面的分析可以知道，杜瓦内部材料的解吸放气是影响杜瓦真空寿命的主要因素。在杜瓦真空 50℃ 烘烤排气 20 天并进行夹封后，吸气剂用来吸收杜瓦内部材料的解吸放气，即使吸气剂相率只有 50%，杜瓦的真空寿命也可以达到两年多。

### 3.14 杜瓦的热分析

杜瓦的热分析是杜瓦设计的重要部分，为杜瓦的设计提供理论依据。杜瓦的热分析主要目的是：（1）计算出杜瓦的热容量，估计其降温时间；（2）计算出杜瓦的总漏热，确保满足制冷机的工作温度与总功耗的要求，使杜瓦组件能够为红外焦平面探测器组件提供需要的工作温度和制冷量。

#### 3.14.1 杜瓦的热容量

热容量的定义为：

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C dT$$

式中：Q 为物体温度从 T<sub>1</sub> 到 T<sub>2</sub> 的过程中吸收或放出的热量；m 为物体的质量 (Kg)；C 为材料的比热 (J/Kg·K)；T<sub>1</sub> 为起始温度 (K)；T<sub>2</sub> 为最终温度 (K)。

表 3.8 杜瓦内各零部件的热容量计算值

零部件	材料	平均比热容 (J/Kg·K)	质量 (g)	平衡温度 (K)	热容量 (J)
冷头	因瓦	239	2.24	65	125.8
基板	蓝宝石	590	0.82	65	113.7
芯片及电路	硅	703	1.44	65	237.9
滤光片	锗	590	0.4	65	55.5
芯柱	不锈钢	409	4.84	182.5	361.3
冷光阑	柯伐	352	3	100	190.1
总计					1084.3

在杜瓦连接制冷机进行制冷过程中，杜瓦芯柱、冷头、基板、芯片及电路和冷光阑等的温度都将下降，外壳、窗口及窗口帽和引线环等温度基本保持环

境温度不变。因此杜瓦的热容量就是指杜瓦芯柱、冷头、基板、芯片及电路和冷光阑等温度从初始环境温度降低到相应平衡温度的热容量。环境温度为 300K，即外壳、窗口及窗口帽和引线环等的温度。冷头、基板、芯片及电路等平衡温度为 65K。芯柱的平衡温度为 182.5K，冷光阑的平衡温度为 120K。表 3.8 是杜瓦内各零部件从环境温度 300K 到其平衡温度的热容量。

### 3.14.2 杜瓦的总漏热

杜瓦的漏热由四部分组成：热传导漏热、辐射漏热、焦耳漏热和对流漏热。其中焦耳漏热包括红外探测器、读出电路和引线的焦耳热，是由其本身的额定功率决定的，一般不大于 100mW。对流漏热由杜瓦的真空度决定的，杜瓦设计成功后要对其进行高真空烘烤排气，排气口相应位置真空度可达到 $10^{-6}$  Pa，夹封后杜瓦工作时其内部真空度一般也小于 $1.0 \times 10^{-4}$  Pa，对流漏热非常小，可以忽略不计。因此我们主要来讨论热传导漏热和辐射漏热两部分内容。

#### (1) 热传导漏热

热传导漏热包括杜瓦芯柱热传导漏热、引线热传导漏热。由于杜瓦芯柱和引线的截面都非常小，而且同为轴对称结构，可将其导热简化为一维稳态热传导模型，一维稳态热传导公式为：

$$Q = K \frac{A}{L} \Delta T \quad (3.7)$$

式中：K 为材料在  $\Delta T$  温度范围内的平均热导率，A 为热传导面积，L 为热传导的长度， $\Delta T$  为材料两端的温度差。在杜瓦结构设计时，芯柱和引线材料的选择原则之一就是要求热传导系数较小，设计时在满足机械强度的前提下，截面面积越小越好，这就是为了降低杜瓦热传导漏热量。

杜瓦芯柱热传导漏热：不锈钢的平均热导率为 $12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，热传导面积 A 为 $6.58 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ，热传导长度 L 为 $7.16 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，温度差  $\Delta T$  为 235K，代入公式 (3.7) 得到杜瓦芯柱热传导漏热 259mW。

引线热传导漏热：铂金丝的平均热导率为 $71.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，热传导面积 A 为 $3.14 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ，热传导长度 L 为 $6 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，温度差  $\Delta T$  为 235K，代入公式 (3.7) 得到杜瓦单根引线热传导漏热为 0.88mW，由于共有 44 根引线，杜瓦引线热传导总漏热为 38.7mW。

综上所述，杜瓦的热传导总漏热为 297.7mW，其中杜瓦芯柱漏热 259mW，引线漏热 38.7mw。

#### (2) 辐射漏热<sup>[40]</sup>

辐射漏热是杜瓦寄生热负载的重要组成部分之一，由于该杜瓦结构比较特殊，芯柱、外壳、冷头、冷屏、冷光阑和窗口帽等可以简单地看成同轴的结构，

且冷屏已经将冷平台的大部分遮住，因此辐射漏热主要包括：外壳内壁对芯柱的辐射、窗口帽内壁对冷屏侧面的辐射、窗口和窗口帽内壁冷屏和冷光阑上表面的辐射三部分。

任意两个表面之间的辐射热流可以表示为：

$$Q = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (3.8)$$

式中： $E_b$ 是与表面同温度的黑体的发射功率，而且满足 $E_b = \sigma T^4$ ，其中 $\sigma$ 为波尔兹曼常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； $T$ 为绝对温度； $\varepsilon$ 为发射系数； $A$ 为表面的面积； $F_{12}$ 是表面 $A_1$ 到表面 $A_2$ 的视觉系数。

外壳内壁对芯柱的辐射：简化为在长同轴圆筒模型如图 3.13 所示，该模型中

$$F_{12} = 1, \quad \frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2},$$

辐射传热量公式可以简化为<sup>[41]</sup>：

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (3.9)$$

其中 $A_1 = 2.94 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ， $T_1 = 300 \text{ K}$ ， $T_2$ 为芯柱平均温度， $T_2 = 182.5 \text{ K}$ ， $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.04$ ， $r_1 = 7.1 \text{ mm}$ ， $r_2 = 18.8 \text{ mm}$ ，代入公式(3.9)可计算出外壳内壁对芯柱的辐射传热量为 34.2mW。

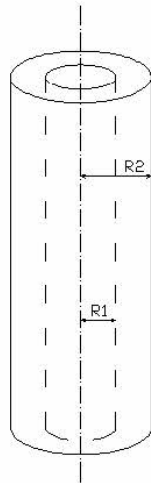


图 3.13 长同轴圆筒模型

窗口帽内壁对冷屏侧面的辐射：简化为在长同轴圆筒模型如图 3.13 所示，依据上述公式，其中 $A_1 = 1.48 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ， $T_1 = 300 \text{ K}$ ， $T_2$ 为冷屏平均温度，

$T_2 = 130\text{K}$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.04$ ,  $r_1 = 11.9\text{mm}$ ,  $r_2 = 17\text{mm}$ , 代入公式(3.9) 可计算出窗口帽内壁对冷屏侧面的辐射量为 15.7mW。

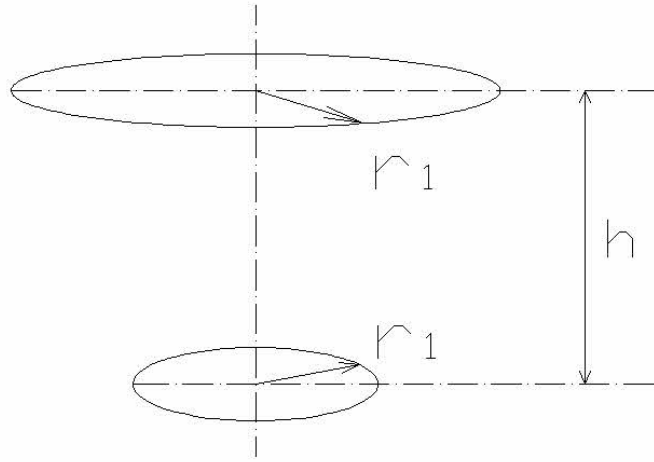


图 3.14 同轴圆盘模型

窗口和窗口帽内壁对冷屏和冷光阑上表面的辐射：简化为同轴圆盘模型如图 3.14 所示，该模型中，视觉系数满足<sup>[41]</sup>：

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left[ X - \sqrt{X^2 - 4 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right] \quad (3.10)$$

式中：

$$R_1 = \frac{r_1}{h}, \quad R_2 = \frac{r_2}{h}, \quad X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}。$$

对冷屏上表面的辐射：冷屏上表面为开孔的环状表面， $r_1 = 12\text{mm}$ ,  $r_2 = 15\text{mm}$ ,  $h = 3\text{mm}$ , 代入公式(3.10)计算得  $F_{12} = 0.91$ , 发射系数  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.04$ ,  $A_1 = 3.24 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ,  $A_2 = 7.07 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ,  $T_1 = 195\text{K}$ ,  $T_2 = 300\text{K}$ , 代入公式(3.8) 可以计算出窗口和窗口帽对冷屏上表面的辐射漏热为 3.39mW。

对冷光阑上表面的辐射： $r_1 = 11.7\text{mm}$ ,  $r_2 = 5.48\text{mm}$ ,  $h = 20.3\text{mm}$ , 代入计算得  $F_{12} = 0.131$ , 发射系数  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.04$ ,  $A_1 = 4.3 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ,  $A_2 = 9.43 \times 10^{-5} \text{m}^2$ ,  $T_1 = 80\text{K}$ ,  $T_2 = 300\text{K}$ , 代入公式(3.8) 可以计算出窗口和窗口帽对冷光阑上表面的辐射漏热为 1.39mW。所以，窗口和窗口帽内壁对冷屏和冷光阑上表面的辐射漏热为 4.78mW。

综上所述，杜瓦的辐射漏热总漏热为 54.68mW，其中外壳内壁对芯柱的辐射漏热为 34.2mW，窗口帽内壁对冷屏侧面的辐射漏热 15.7mW，窗口和窗口帽内壁对冷屏和冷光阑上表面的辐射漏热为 4.78mW。

杜瓦在排气时，用离子泵排气 20 天，杜瓦排气口处真空度可达到  $10^{-6} \text{Pa}$ ，杜瓦内真空至少也小于  $10^{-5} \text{Pa}$ 。下面对杜瓦刚夹封后寄生热负载进行归纳如下

表 3.9 所示。

表 3.9 杜瓦的寄生热负载

热传导	对流	辐射	总计
297.7mW	忽略不计	54.68mW	352.38mW

### 3.14.3 杜瓦的寄生热负载的测试实验

通过设计实验来实际测试杜瓦的热负载，并与理论计算的热负载进行比较，以验证简化模型的合理性。采用传统的液氮称重法，利用电子天平和电脑数据采集卡实时测量跟踪。并根据测得的实际温度采用温度补偿的方法计算得到杜瓦的寄生热负载。实验选取 5 个样品杜瓦，测试结果见表 3.10。

表 3.10 5 个样品杜瓦的寄生热负载测试结果

样品号	1	2	3	4	5
实测热负载 (mW)	351	359	349	355	353
理论热负载 (mW)	352.38				
偏差	-0.4%	1.88%	-0.96%	0.74%	0.18%

从表 3.10 中的实测寄生热负载结果可以看出，5 个杜瓦样品的实测热负载之间是有差异的，这些差异主要是由实验的误差和杜瓦的个体差异决定的，如杜瓦的表面质量差异和杜瓦装配尺寸的误差等。而 5 个杜瓦样品的实测热负载与计算得到的理论热负载的偏差在 2% 以内，正好验证了上面提出的热负载理论计算的简化模型基本正确合理。

## 3.15 本章小结

本章介绍了长线 256×2 碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的构成，以及各个构成零部件的结构设计及工艺设计，并对重要零部件芯柱进行了力学分析，并利用 ANSYS 有限元分析软件对其进行了模态分析。对 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦的真空保持分析，计算了杜瓦内部各材料的解吸放气量，并提出了对杜瓦进行 20 天的真空烘烤排气才进行夹封后，在不使用吸气剂的情况下，杜瓦的真空寿命提高到 240 天左右。对 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦的各种漏热进行了分析，并进行漏热模型简化，在高真空下不考虑对流漏热，只考虑传导漏热和辐射漏热，对杜瓦的总热负载进行了详细的计算。

## 4 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的热失配应力研究

### 4.1 长线列碲镉汞红外焦平面器件的热失配应力研究的意义

长线列碲镉汞焦平面探测器一般是由多个 256×1 的芯片模块组成，每个模块中碲镉汞光敏元阵列和硅读出电路是通过钢柱采用间接倒装焊联结在公共衬底（宝石片）上，钢柱间填充了环氧树脂粘合剂。碲镉汞红外焦平面器件模块由多种材料组成，由于这几种材料的热膨胀系数的差异，制冷到工作温度后，在这些材料内部会产生应力，这种由热失配引起的应力可能会造成碲镉汞材料的损伤或者互联的失效。为了解决这一问题，国内外主要从事碲镉汞红外焦平面器件研究的机构，基于芯片模块本身的研制，进行了一系列的研究工作，有的将碲镉汞薄膜生长在硅衬底上，将问题转化为碲镉汞材料制备过程<sup>[42]</sup>；有的采用衬底减薄的办法，对减薄工艺提出了很高的要求<sup>[43]</sup>；有的在倒装焊结构的芯片模块中采用在宝石片下面粘接因瓦，或者在硅读出电路和宝石电极板之间粘接柯伐，使这些材料的结合产生中间凹进的作用，抵消碲镉汞芯片中产生的部分张应力，从而降低碲镉汞材料中的应力，达到提高可靠性的作用<sup>[44]</sup>。

长线列碲镉汞焦平面探测器必须进行封装才能进行工作，在杜瓦组件封装中，芯片模块会粘接到宝石电极板或陶瓷基片上，最后宝石电极板或陶瓷基片的另一面与冷头粘接，因此碲镉汞焦平面的热失配应力分析与宝石电极板和冷头都有关系。256×2 元碲镉汞红外焦平面器件由两个 256×1 的芯片模块组成，粘接到宝石电极板上并对称分布，然后宝石电极板的另一面再粘接到冷头上，其工作温度为 65K，由于粘接在一起的这几种材料的热膨胀系数的差异，从室温 300K 制冷到 65K 后，在这些材料内部会产生更加复杂的应力，当这种由于热失配引起的应力到达一定程度，就会造成碲镉汞材料的损伤或互联的失效，在高低温冲击实验中，甚至可能会导致材料开裂、低温胶失效等后果。特别是随着焦平面规模的增加，这种由热失配应力引起的损伤会更加显著，严重影响了焦平面器件的可靠性，因此对长线列碲镉汞红外焦平面器件的热失配应力的研究是很有必要的。

### 4.2 长线列碲镉汞焦平面器件在冷平台上的热失配设计内涵

随着长线列碲镉汞焦平面规模的增加，冷头和宝石电极板的尺寸也会相应地增加，这就使得他们之间的热应力分析更加复杂。在冷头和宝石电极板的设计时，必须要保证我们设计的杜瓦和宝石电极板不能给芯片模块带来额外的热

失配应力，最好是能抵消掉芯片模块自身产生的一部分热失配应力。

因此，选择热膨胀系数合适的材料作为冷头，并设计合理的尺寸，使冷头与宝石电极板的组合不会增加芯片模块的热失配应力，最好能抵消一部分，使芯片模块的热失配应力有所降低。芯片模块在宝石电极板上的布局应该做到均匀，这样可以使热失配应力分布也均匀，而且芯片之间应有一定的间隙，产生的热失配应力不会相互影响，不会产生局部热失配应力过大的现象，热失配设计必须通过高低温冲击试验。

### 4.3 256×1 元碲镉汞红外焦平面器件芯片的热失配应力分析

首先，我们对单个 256×1 元芯片模块进行热失配应力分析，由于碲镉汞材料是我们最关心的，也是其中强度最低的，因此我们主要考虑碲镉汞材料的下表面，即光敏元所在的表面的热失配应力。

#### 4.3.1 256×1 元芯片模块的结构

256×1 元芯片模块的光敏元采用“品”字形布局，像元为  $46\mu\text{m}\times 46\mu\text{m}$ ，中心距为  $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$ ，光敏元阵列布局见图 4.1。碲镉汞 (HgCdTe) 光敏元列阵与硅读出电路 (Si) 通过间接倒装焊技术互联 (图 4.1)，即光敏元列阵和读出电路分别通过铟 (In) 柱和一个公共衬底 (宝石片) 相连，两者之间通过高密度引线实现电学连接，然后再粘接到衬底上。

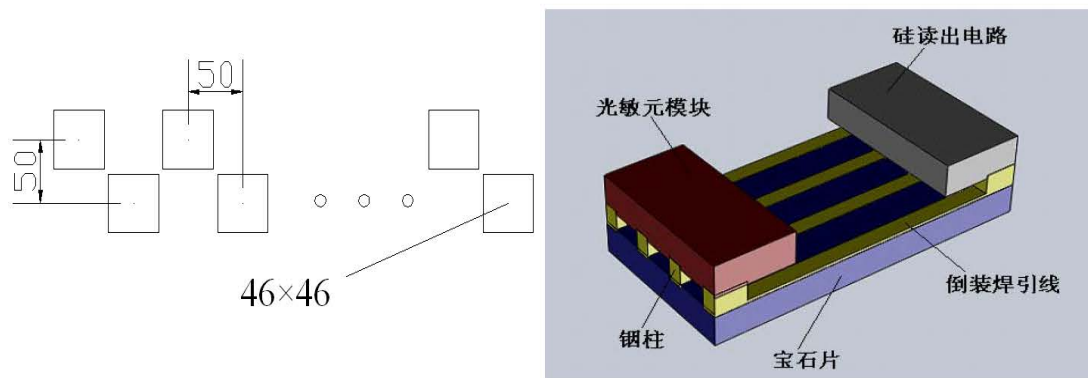


图 4.1 光敏元阵列布局与倒装焊示意图

#### 4.3.2 256×1 元芯片模块的热失配应力分析

按照芯片模块的真实参数建立模型：碲镉汞芯片为  $12.46\text{mm}\times 1\text{mm}$ ，高  $0.35\text{mm}$  的长方体，硅读出电路为  $8.76\text{mm}\times 3.79\text{mm}$ ，高  $0.5\text{mm}$  的长方体，宝石片衬底为  $13.90\text{mm}\times 7.62\text{mm}$ ，高  $0.33\text{mm}$  的长方体，芯片模块实体模型如图 4.2 所示。由于我们主要考虑的是碲镉汞芯片的热失配应力，所以在用 ANSYS 进行分析时采用下列方法对芯片模块划分网格：对碲镉汞芯片的网格划分比较细，

元素尺寸 0.1mm；对硅读出电路和宝石片衬底划分适中，元素尺寸为 0.3mm，芯片模块的简化网格分布见图 4.2。

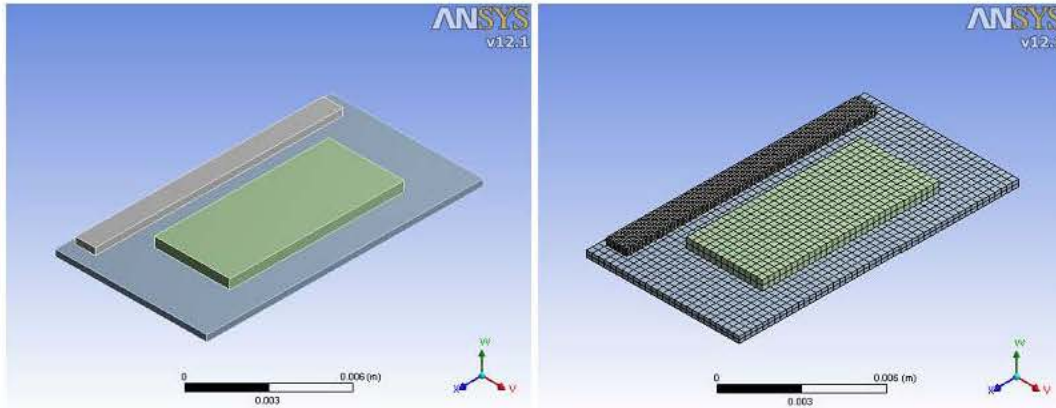


图 4.2 芯片模块实体模型及简化网格分布

碲镉汞光敏元阵列和读出电路是通过钢柱采用间接倒装焊联结在宝石片衬底上，钢柱间填充了环氧树脂粘合剂，其他几层材料之间均采用粘合剂粘接。由于粘合剂很薄，弹性模量很小，可以不作考虑。表 1 为所涉及材料的热膨胀系数和弹性模量<sup>[29, 44]</sup>，可以看出在这些材料中 HgCdTe 强度最低，极易受到损伤。

表 4.1 几种材料的热膨胀系数和弹性模量

材料	热膨胀系数 (1/K)	弹性模量 (Pa)
HgCdTe	$5 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{10}$
Si	$2.8 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{11}$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$4.6 \times 10^{-6}$	$4.2 \times 10^{11}$
因瓦 (invar)	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{11}$
柯伐 (kovar)	$7 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{11}$

芯片模块温度从 300K 制冷到 65K 后，由于各材料的热膨胀系数的差异，各材料之间产生热失配应力，产生中间凸起的形变如图 4.3 所示，其中，碲镉汞芯片的下表面（光敏元）最大应力值为  $2.7889 \times 10^7 \text{Pa}$ ，这是芯片模块本身带给碲镉汞芯片光敏元的热失配应力最大值，是后面设计的重要参考，形变最大值为  $9.7564 \times 10^{-6} \text{m}$ 。

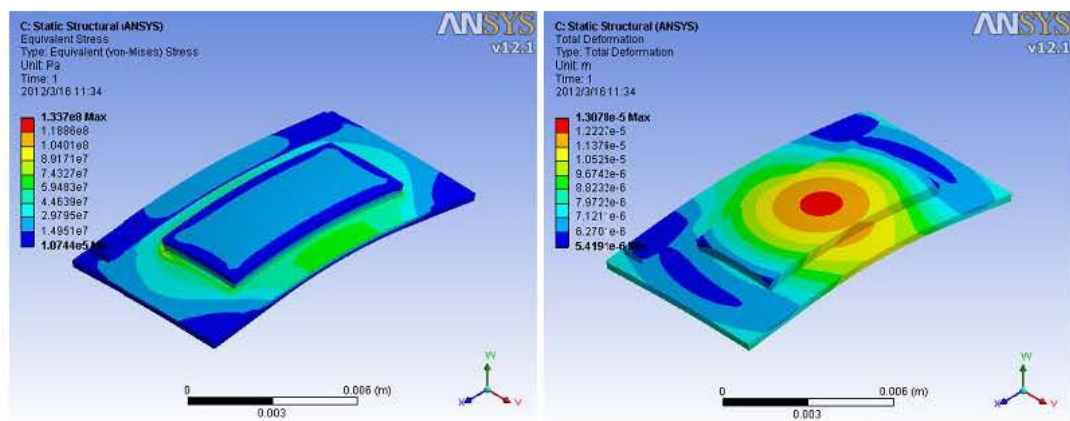


图 4.3 芯片模块在低温下的应力分布和形变分布

#### 4.4 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的热失配应力分析

256×2 元碲镉汞红外焦平面器件由两个 256×1 的芯片模块组成，将它们粘接到宝石电极板上，然后宝石电极板的另一面再粘接到冷头上并呈对称分布，构成了杜瓦组件的冷平台。因此，与碲镉汞红外焦平面热失配应力有关的杜瓦组件主要有宝石电极板和杜瓦冷头。宝石电极板是根据芯片模块的布局设计加工的而成的，主要作用是探测器信号的电极引出，材料（选用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  宝石片）和尺寸可以说都是既定的，所以杜瓦冷头的材料选择和尺寸设计就更加重要了。由于粘接在一起的这些材料热膨胀系数的差异，宝石电极板和冷头的组合在低温下可能会对碲镉汞芯片的热失配应力产生影响，我们研究如何最大限度地降低和排除这样的影响，甚至使这些影响变得有益无害。

##### 4.4.1 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件冷平台结构的热失配应力分析

将两个 256×1 的芯片模块对称粘接到宝石电极板上，然后宝石电极板另一面与冷头上表面粘接，构成了 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的冷平台整体结构。

##### (1) 芯片模块与宝石电极板组合后的热失配应力分布

我们先分析两个芯片模块粘接到宝石电极板上后，它们的热失配应力分布情况。

宝石电极板为  $\Phi 26\text{mm}$ ，高为 0.6mm 的薄圆柱体，两个 256×1 芯片模块在宝石电极板上呈轴对称分布，两模块相距 0.72mm。宝石电极板上粘接两个 256×1 芯片模块的结构和简化网格分布如图 4.4 所示。

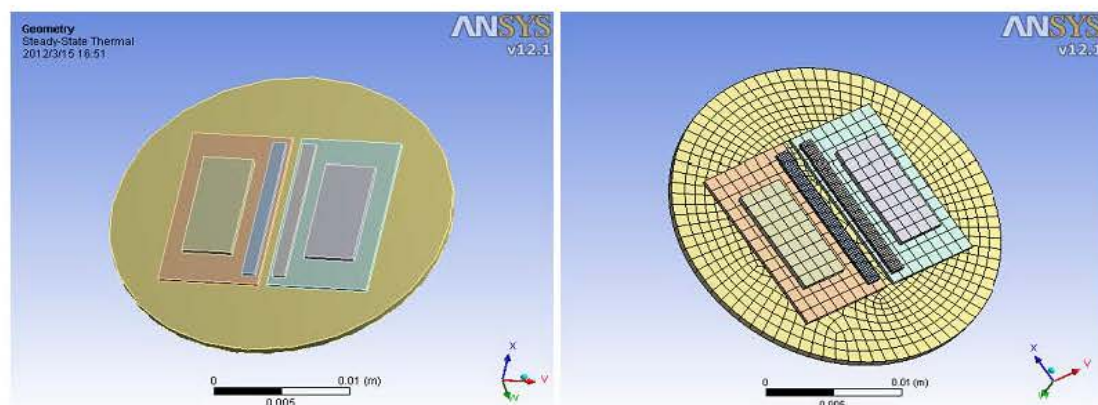


图 4.4 芯片模块与宝石电极板的结构和简化网格分布

分析所涉及到的材料的各项参数已经由表 4.1 列出，当芯片模块与宝石电极板组合结构的温度从 300K 制冷到 65K 后，由于各材料的热膨胀系数的差异，各材料之间产生热失配应力，产生中间凸起的形变如图 4.5 所示，其中，碲镉汞芯片的下表面（光敏元）最大应力值为  $2.8737 \times 10^7 \text{Pa}$ ，光敏元表面的最大应力值稍有变大，最大形变值为  $6.1627 \times 10^{-6} \text{m}$ 。从材料的热膨胀系数差异也可以分析得出：芯片模块在低温下本来就产生向上凸起的形变，而宝石电极板的材料和宝石衬底的材料一样，同为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，可以看成是将  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层加厚了一点，从而使碲镉汞芯片的光敏元面在低温下的最大应力值稍有增加。所以，冷头材料的选择和尺寸设计就更加重要，必须要抵消掉宝石电极板对芯片应力产生的影响，并能产生积极作用。

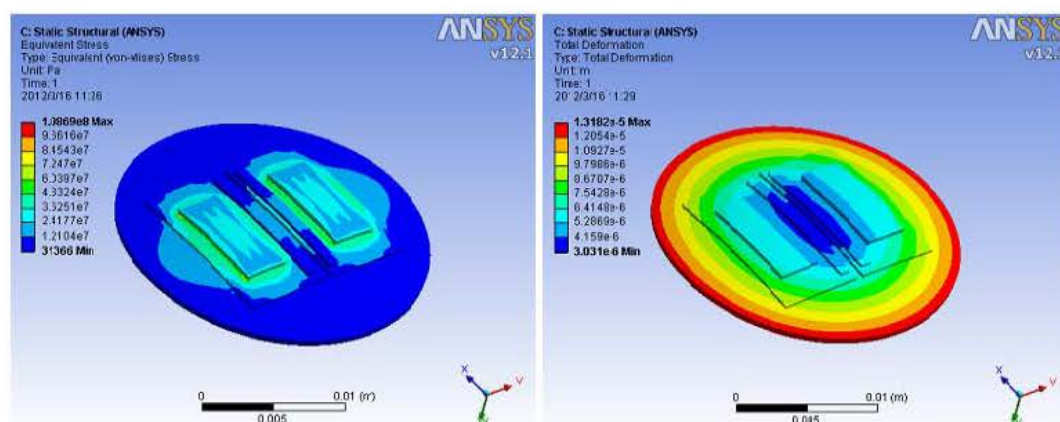


图 4.5 芯片模块和宝石电极板低温下的应力分布和形变

## (2) 杜瓦冷头与宝石电极板的组合结构的热失配应力分析

杜瓦的冷头一面是红外焦平面探测器和宝石电极板的安装载体，一面与制冷机弹性冷链直接热接触，其导热性能决定焦平面探测器的实际温度，因此冷头在保证机械强度的前提下，选用低温导热率较大，且和不锈钢芯柱容易焊接的材料。将宝石电极板粘接到冷头表面即得到它们的组合结构，该结构在低温

下的热失配应力分布和形变分布直接影响了碲镉汞焦平面的可靠性。

从第二章中可知冷头的计算厚度为 0.099mm，冷头的厚度必须大于这个值，才能由足够的机械强度抵挡一个大气压。在设计中，必须要考虑到冷头的加工特性和与芯柱的配合焊接，所以在冷头连接芯柱端，有一个  $\Phi 13.8\text{mm}$ ，高 0.4mm 的圆柱体小凸台，用来嵌入芯柱内。冷头主体直径与芯柱末端的外径相同，为  $\Phi 14.8\text{mm}$  的圆柱体。冷头上表面粘接宝石电极板和芯片模型的组合结构，上表面的大小根据需要的制冷面积而定，冷头有传递冷量到焦平面探测器的作用，他的上表面应该能够将两个芯片模块中的碲镉汞芯片包括在内，所以冷头上部分是一个  $\Phi 12.5\text{mm}$  的圆柱凸台。

杜瓦冷头的材料一般有柯伐和因瓦两种，它们的热膨胀系数和弹性模量如表 4.1 所示。比较  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和柯伐的热膨胀系数， $\text{Al}_2\text{O}_3$  的热膨胀系数小于柯伐，在低温下柯伐比  $\text{Al}_2\text{O}_3$  收缩得更厉害，它们的组合结构会产生中间向上凸起的形变（见图 4.6），与芯片模块一样。整体将仍然产生中间向上凸起的形变，如果  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和柯伐组合结构凸起的程度小于芯片模块，则芯片模块内的应力会有所减轻；而如果  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和柯伐组合结构凸起的程度大于芯片模块，则会加剧芯片模块向上凸起，使芯片模块内的热失配应力加强。

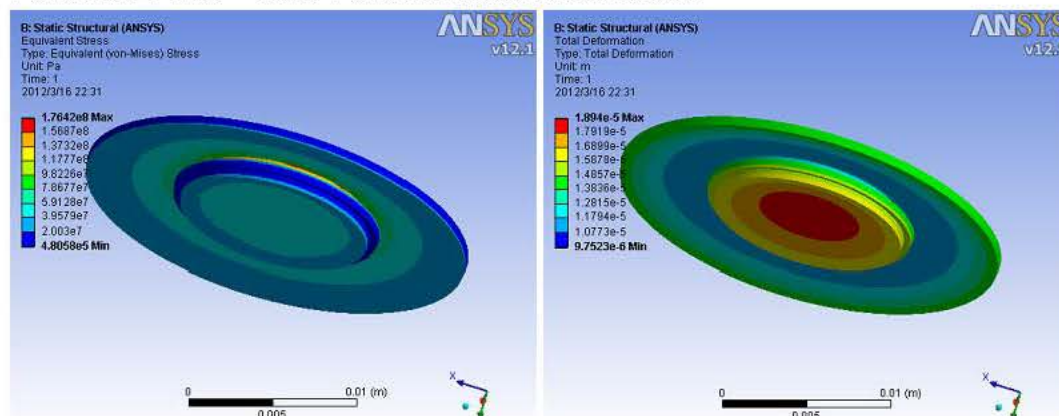


图 4.6  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和柯伐组合结构在低温下的热失配应力分布和形变

再比较  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和因瓦的热膨胀系数， $\text{Al}_2\text{O}_3$  的热膨胀系数大于因瓦，在低温下， $\text{Al}_2\text{O}_3$  比因瓦收缩得更厉害，它们的组合结构会产生中间向下凹进的形变（见图 4.7），与芯片模块相反。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和因瓦的组合在低温下会直接给芯片模块的变形产生反作用，这样就可以抵消部分张应力，使碲镉汞的热失配应力有所减小，达到提高可靠性的作用；但是如果这种反作用大于芯片模块的自身变形，则整体变成中间向下凹进的变形，芯片内部的主要热失配应力也会发生变化。如果这种反作用力非常大，也可能会增加芯片内部的热失配应力，对碲镉汞造成损伤。所以，选择合适的因瓦冷头厚度非常重要。

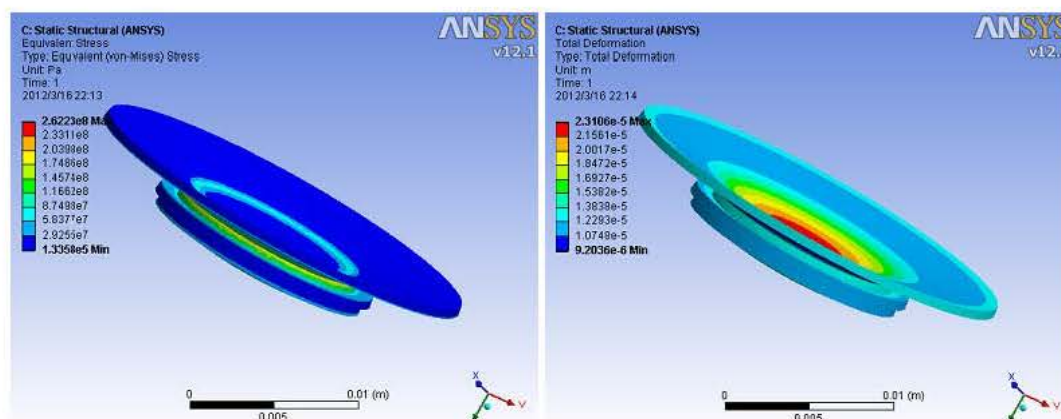


图 4.7  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和因瓦的组合结构在低温下的热失配应力分布和形变

### (3)冷平台整体结构热失配应力分析

按照以上各个元件的尺寸建立模型，暂定冷头的三个不同直径圆柱层厚度分别为 0.4mm、0.6mm、0.5mm，冷头总厚度为 1.5mm。冷平台整体结构和简化网格分布如图 4.8 所示

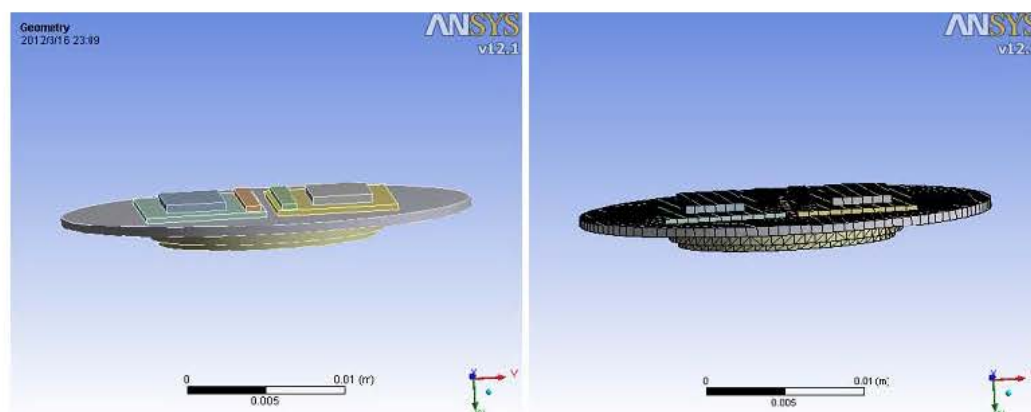


图 4.8 整体结构和简化网格分布

当采用因瓦冷头时，冷平台整体结构温度从 300K 制冷到 65K 后，由于各材料的热膨胀系数的差异，各材料之间产生热失配应力，产生中间凹进的形变如图 4.9 所示，其中，碲镉汞芯片的下表面（光敏元）最大应力值为  $1.812 \times 10^7 \text{Pa}$ ，比芯片模块本身带给碲镉汞芯片光敏元的应力最大值要低，说明此设计减小了碲镉汞芯片的热失配应力，最大形变值为  $1.4614 \times 10^{-5} \text{m}$ 。

当采用柯伐冷头时，冷平台整体结构温度从 300K 制冷到 65K 后，由于各材料的热膨胀系数的差异，各材料之间产生热失配应力，产生中间凸起的形变如图 4.10 所示，其中，碲镉汞芯片的下表面（光敏元）最大应力值为  $3.657 \times 10^7 \text{Pa}$ ，比芯片模块本身带给碲镉汞芯片光敏元的热失配应力最大值要高，说明此设计增加了碲镉汞芯片的热失配应力，厚度为 1.5mm 的柯伐冷头设计不可取，最大形变值为  $1.1248 \times 10^{-5} \text{m}$ 。

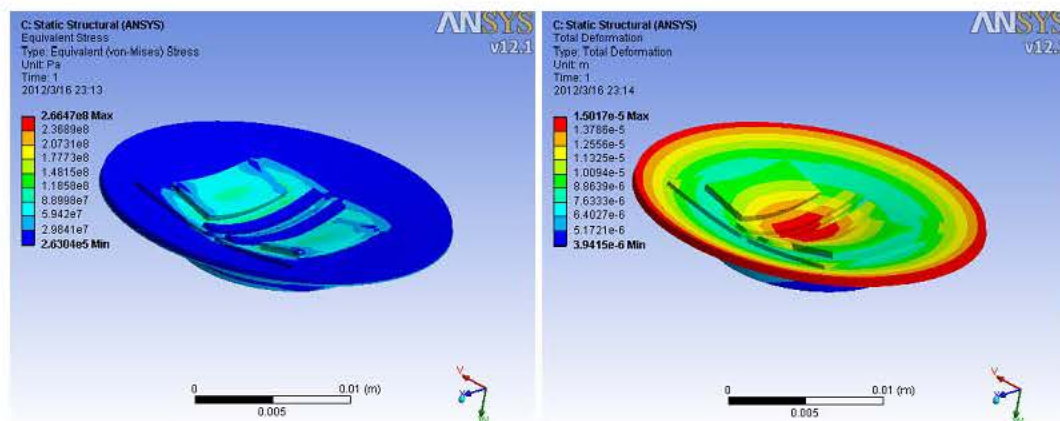


图 4.9 因瓦冷头整体结构低温下的热失配应力分布和形变

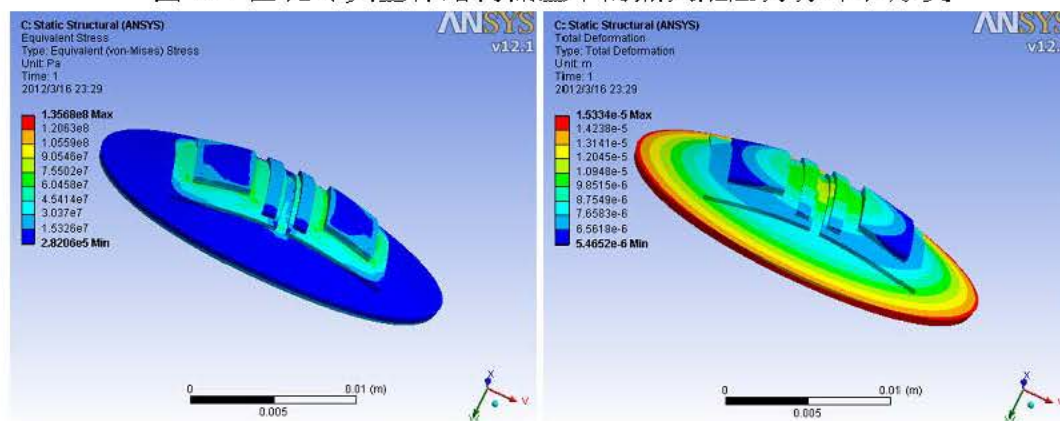


图 4.10 柯伐冷头整体结构低温下的热失配应力分布和形变

#### 4.4.2 杜瓦冷头厚度设计对碲镉汞芯片的热失配应力影响分析

由于冷头结构中各个直径都是已经设计好的，所以我们研究在低温下冷头的厚度变化带给碲镉汞芯片的热失配应力。冷头一般选择因瓦材料或柯伐材料，采用 ANSYS 有限元分析软件重点考察了碲镉汞下表面的应力状态和因瓦及柯伐厚度的关系，因为碲镉汞下表面是光敏元所在的位置。

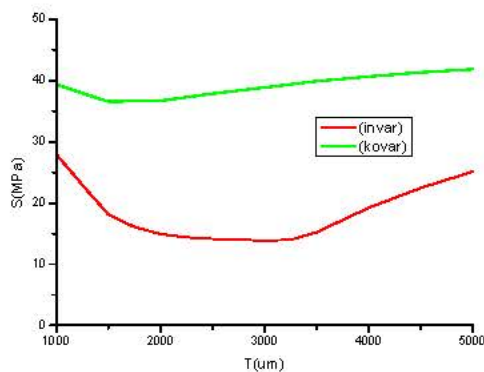


图 4.11 碲镉汞下表面应力与因瓦及柯伐厚度的关系

图 4.11 是碲镉汞下表面的热失配应力  $S$  和因瓦及柯伐厚度  $T$  的关系。使用

因瓦作为冷头，碲镉汞下表面的应力比柯伐小，这是由于因瓦的热膨胀系数很低，将宝石片衬底粘接在因瓦上面，低温下这两种材料的结合将会产生中间凹进的作用，从而压缩模块中的宝石片在碲镉汞中产生压应力，这样就可以抵消部分张应力，达到提高可靠性的作用。而因瓦的厚度又不能过大，如果因瓦厚度过大，也可能会增加芯片内部的热失配应力，对碲镉汞造成损伤。而柯伐的热膨胀系数比宝石片高，将宝石片衬底粘接在柯伐上面，低温下将加剧中间凸起的作用，使 HgCdTe 中产生更大的应力。

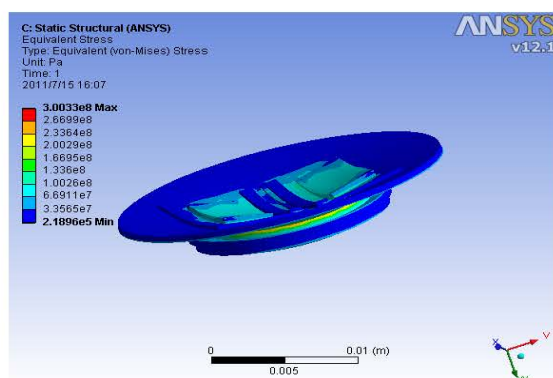


图 4.12 器件在冷平台上应力分布

结合冷头的设计原则，在满足机械性能、机械加工要求和热失配应力要求的前提下，冷头质量要尽量小，即选择较小的冷头厚度。采用总厚度为 1500 $\mu\text{m}$  因瓦材料冷头，冷头的三个不同直径圆柱层厚度分别为 0.4mm、0.6mm、0.5mm，在低温下器件在冷平台上应力分布见图 4.12，产生中间凹进的形变，碲镉汞光敏元区域最大应力  $2.1882 \times 10^7 \text{Pa}$ ，满足要求，不会产生热失配失效。

## 4.5 本章小结

本章介绍了长线列碲镉汞红外焦平面器件的热失配应力研究的意义，阐述了长线列碲镉汞焦平面器件在冷平台上的热失配设计内涵，采用 ANSYS 有限元分析软件对 256×1 元芯片模块的结构的热失配应力进行了研究，并对分别采用因瓦和柯伐两种材料作为冷头给碲镉汞芯片带来的热失配应力影响进行了研究，以及不同厚度的冷头给碲镉汞芯片带来的热失配应力影响进行了研究，最后采用总厚度为 1500 $\mu\text{m}$  因瓦材料冷头，既满足机械强度、加工要求和热失配应力要求，而且质量小，不会给芯柱带来比较大的负担。

## 5 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的杂散光研究

### 5.1 长线条长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的杂散光研究的意义

杂散光，也叫杂光辐射，是指光学系统中除了目标或者成像光线以外，传输到探测器或成像表面上的其他非目标或非成像光线辐射能量，以及经非正常光路到达探测器或成像表面上的目标光线辐射能量<sup>[45]</sup>。杂散辐射是光学系统中非正常传输辐射能量的总称，产生于漏光、透射光学表面和镜筒内壁等非光学表面的残余反射，以及由于光学表面质量问题产生的散射光辐射。

杂散光辐射对光学系统的影响包括：(1)使目标的信噪比、像面的对比度和调制传递函数降低；(2)使整个像面的层次减少、清晰度变差、能量分布混乱；(3)杂散光能量很强时，被探测的目标信号甚至完全湮没在杂光背景中，系统无法提取目标；(4)可能会因像面杂光分布不均匀，在系统探测器上形成虚假信号，使系统探测到伪目标，甚至导致整个系统失效<sup>[46]</sup>。

对于红外光学系统，由于其自身零部件的长波辐射在系统像面上杂散光辐射总量中占的比重比较大，所以对红外光学系统的杂散光分析，不仅要考虑到系统视场外的杂散光源，而且还要考虑到内部零部件自身的辐射源，这就给红外探测器的封装技术提出了更高的要求，所以对红外探测器封装的杂散光研究是非常有必要的。

长波碲镉汞红外焦平面探测器必须工作在深低温下，一般采用杜瓦封装机械制冷方式。工作在深低温下的碲镉汞红外焦平面探测器对长波辐射更为敏感，所以杜瓦中必须要有专门为了抑制杂散辐射而设计的零部件，即冷光阑。

冷光阑作为杜瓦的一个重要零部件，主要起减少背景光通量、降低背景噪声的作用。它是距离红外焦平面最近一个零部件，和探测器一样需要制冷到低温下工作，降低自身对探测器的红外辐射量，对杂散光有吸收或者削弱其能量的作用，对红外系统最终的性能有着重大的影响。在器件响应率不变的情况下，通过减少背景噪声，可以提高红外探测器的信噪比，进而提高整个系统的探测率。另外，冷光阑还可以抑制进入的杂散光，提高探测器的成像质量。

可见，对长线条长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件杂散光的产生和传输进行精确分析，并为抑制杂散光采取合适的工艺设计和结构设计等方面进行深入的研究是非常有必要的。本章以 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件为例，借鉴光学系统杂散光抑制的基本原理和方法，对其冷光阑的结构设计进行优化，并对几个冷光阑进行比较分析。

## 5.2 杂散光辐射抑制的基本原理

### 5.2.1 杂散光辐射能量的传输

辐射能量传输发生在两个物体的表面，我们从辐射能量传输公式出发，设有两个面元  $dA_s$  和  $dA_c$ ，中心距为  $R_{sc}$ ，法线与中心连线的夹角分别为  $\theta_s$  和  $\theta_c$ ，面元  $dA_s$  的辐亮度为  $L_s(\phi_0, \theta_0)$ ，则面元  $dA_c$  所接受到的由  $dA_s$  面元发出的辐射通量为<sup>[47]</sup>：

$$\begin{aligned} d\phi_c &= L_s(\phi_0, \theta_0) \cdot \cos(\theta_s) \cdot dA_s \cdot d\Omega_s \\ &= BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_0, \theta_0) \cdot d\phi_s(\phi_i, \theta_i) \cdot d\Omega_{sc} \\ &= BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_0, \theta_0) \cdot d\phi_s(\phi_i, \theta_i) \cdot GCF \cdot \pi \end{aligned} \quad (5.1)$$

式中， $d\phi_c$  为传递到单位接受表面的辐射通量； $d\phi_s(\phi_i, \theta_i)$  为源面的出射辐射通量； $d\Omega_{sc}$  为几何构成因子，是从光源到探测器的投影立体角，只由系统几何结构决定；

$BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_0, \theta_0)$ ：双向反射分布函数，它是在不同入射角情况下材料表面在任意观测角的反射特性，它是材料表面出射光的辐亮度  $L_s(\phi_0, \theta_0)$  和入射光的辐照度的比值，用于描述材料表面对于不同角度的入射光线，在以入射点为中心的半球内，各个单位立体角产生的辐亮度分布，主要反映材料本身的散射特性，与入射能量无关。

$GCF$ ：形状系数，表示辐射源物体和目标物体的几何关系，它是目标面积所接受的辐射和源面积所发出的辐射的比值，与两个表面的面积成反比，而且与孔径和中心遮拦有关。其物理意义为：假设光源变成一个单位辐亮度郎伯发射体，入射在接受表面上的那部分能量就等于  $GCF$ 。可以采用改变两个表面的方向或者阻挡从光源到探测器之间的传播途径来减小  $GCF$  值甚至是使其为零<sup>[48]</sup>。

### 5.2.2 抑制杂散光辐射能量的方法

由辐射能量传递公式（5.1）可知，要减小到达红外焦平面探测器的杂散光辐射能量，即传递到探测器接受表面的辐射通量  $d\phi_c$ ，可以从减小公式（5.1）右边的  $BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_0, \theta_0)$ 、 $d\phi_s(\phi_i, \theta_i)$  和  $GCF$  三个参数出发，它们的减小代表了不同的意义如下：

（1） $BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_0, \theta_0)$  的减小：即对杂散光反射或散射的表面进行特殊的物理化学处理，使其表面的吸收率高、发射率低，比如镀黑镍工艺或磷化发黑工艺处理；

（2） $d\phi_s(\phi_i, \theta_i)$  的减小：源面的出射辐射通量的减小，即减小上一级杂散

光源面的出射杂光，主要是降低光学系统内表面的辐射，与改变出射表面的传播特性类似：

(3)  $GCF$  的减小：形状系数的减小，即减小杂光能量每一级传递的几何构成因子，可以采用在光学系统中设计专门的结构来切断杂散光的传递路径，比如冷屏，冷光阑、遮光罩、挡光环等的设计。

在这三个参数中， $BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_o, \theta_o)$  永远不可能为零，它是随着入射和出射角度的变化而变化，可以通过表面工艺处理来减小  $BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_o, \theta_o)$ 。同理， $d\phi_s(\phi_i, \theta_i)$  也不可能为零，除非没有杂散光源或者上一级的  $d\phi_s(\phi_i, \theta_i)$  为零。对杂散光抑制的结构设计的目的主要是降低  $GCF$ ，即从散射路径出发来进行抑制杂散光的结构设计，从而让杂散光辐射的传输路径完全被阻挡。

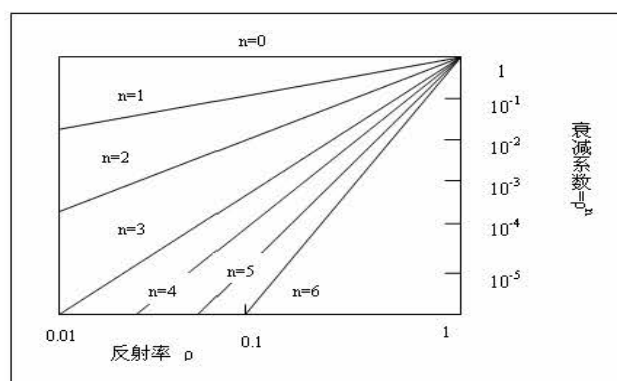


图 5.1 对于不同弹跳次数  $n$  的衰减—反射率的关系图

对于一般的漫反射体，杂散光每经过一次散射或者衍射，其能量强度都会产生数量级的衰减<sup>[49]</sup>，如当反射率为 0.1 时，其衰减系数为  $0.1^n$ ， $n$  为弹跳次数，对于不同弹跳次数  $n$  的衰减-反射率的关系见图 5.1。杂散光经过多次散射或者衍射后到达焦平面探测器，其能量将大大降低，对探测器的影响也大大减小。因此使  $GCF$  趋近于零，可以使杂散光辐射经过多重散射后再到达焦平面探测器，即杂散光辐射到达探测器时能量已经非常小了。

### 5.3 冷光阑结构的优化设计

我们对冷光阑结构进行优化设计来提高其抑制杂散光的能力，即采用减小  $GCF$  的方法来提高抑制杂散光的效率。结构优化设计是通过在焦平面杜瓦组件中设计专门的结构来切断杂散光的传递路径来减小杂散光能量每一级传递的几何因子，从而减少杂散光到达探测器的能量。原有的冷光阑对抑制杂散光已经起到了减少背景光通量、降低背景噪声的作用，但是仍然有很多杂散光通过冷光阑的内壁一次反射到达红外焦平面探测器，说明其结构还不够完美。因此我们提出了在冷光阑内设计挡光环的结构，阻碍杂散光通过冷光阑的内壁一次反射到达探测器，并保证视场角外的杂散光到达探测器时起码经过了两次以上的

反射衰减，这样经过多次反射的杂散光辐射通量小了几个数量级。

### 5.3.1 红外辐射对长波碲镉汞红外焦平面的影响

在 256×2 元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件中，焦平面工作温度为 65K，一般来说，在焦平面视场角范围内，与焦平面温度差越大的零部件发出的杂散光对焦平面的影响越大。焦平面的视场角范围内有冷光阑和杜瓦窗口，由于由冷光阑的存在，杜瓦外壳的辐射不能直接到达探测器。

首先，我们先从杜瓦的结构来分析芯片可能接收到的来自杜瓦本身的杂散红外辐射来源。图 5.2 为杜瓦中芯片可能接收到的杜瓦本身的红外辐射来源，由于冷光阑的存在，所有辐射要到达探测器，必须经过冷光阑顶端的开孔，探测器视场角内的窗口的一部分辐射可以直接到达探测器，窗口的一些辐射可能通过冷光阑内壁反射到达探测器，而外壳的辐射不能直接到达焦平面探测器，但是可能会通过窗口与冷光阑内壁的多次反射到达探测器。

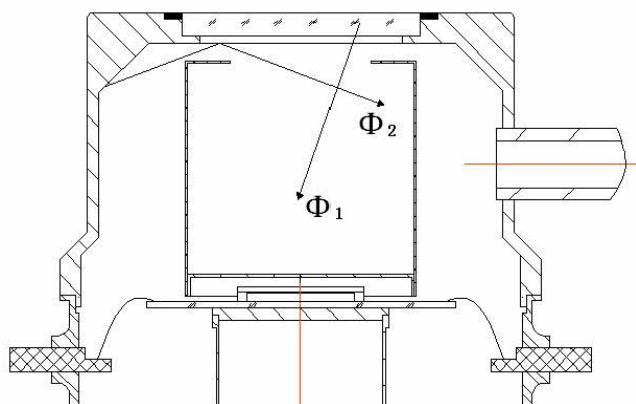


图 5.2 杜瓦本身的红外辐射来源

通过 TracePro 软件分别分析这两部分辐射对探测器的影响，杜瓦中焦平面温度为 65K，杜瓦外壳与窗口的温度为 300K，冷光阑由于接触到冷头也接受制冷机的制冷，冷光阑的温度为 65K-100K，杜瓦窗口和窗口帽的温度为 300K。以外壳作为辐射源，分析其进入冷光阑的辐射  $\Phi_2$  对光敏元的影响，发射红外辐射波段 8-12.5  $\mu\text{m}$ ，结果得到外壳发出的红外辐射能量没有能到达探测器，可以得到处于 300K 的外壳对焦平面没有影响。以窗口作为辐射源，分析其进入冷光阑的辐射  $\Phi_1$  对光敏元的影响，发射红外辐射波段 8-12.5  $\mu\text{m}$ ，结果得到窗口发出的红外辐射能量中有 1.7% 到达探测器。可见，窗口辐射是最主要的杜瓦本身的红外辐射来源，所以我们主要通过分析窗口辐射对焦平面产生的影响来优化设计冷光阑。

然后我们分析杜瓦本身的红外辐射对长波碲镉汞红外焦平面探测器的影响程度，在原有冷光阑的基础上，加热杜瓦窗口，使杜瓦窗口的热辐射变强，并保持其他条件不变化，然后分析窗口在不同温度下对焦平面的影响。

选取一个芯片作为实验对象进行测试，在窗口没加热（温度为  $17^{\circ}\text{C}$ ）时测试一次芯片中所有光敏元输出电平信号，然后加热窗口到一定温度达到平衡（温度为  $57^{\circ}\text{C}$ ），再测试一次芯片中所有光敏元输出信号。对两次测试数据进行分析，在 256 个光敏元中，除了个别光敏元可能有损伤，两次测试数据没什么变化，其他的光敏元的输出电平信号均有明显增大。取其中 128 个光敏元作为分析对象，窗口辐射对这 128 个光敏元的影响如图 5.3 所示，可见，窗口的温度升高，其发出的红外辐射增强，而碲镉汞红外焦平面对红外辐射非常敏感，在窗口为  $57^{\circ}\text{C}$  时所有光敏元的输出电平信号要比窗口  $17^{\circ}\text{C}$  时明显要高，说明红外辐射对探测器影响很大，因此对冷光阑结构进行优化设计非常有必要。

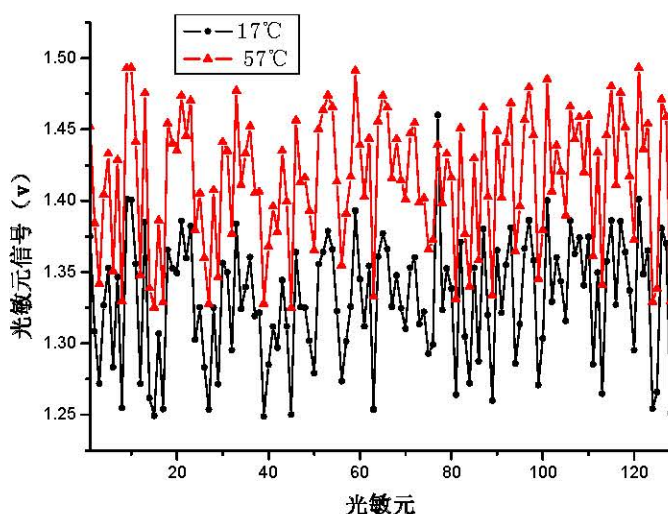


图 5.3 窗口辐射对红外焦平面的影响

### 5.3.2 挡光环设计原理

对于不同标准冷光阑内设计挡光环的原理是不同的<sup>[49]</sup>。如果冷光阑内壁表面为镜面反射表面，则按照没有一阶镜面反射从冷光阑到达红外焦平面探测器的结构来设计（见图 5.4），即探测器在冷光阑内壁表面“看”不到视场角外杂散光源的像。

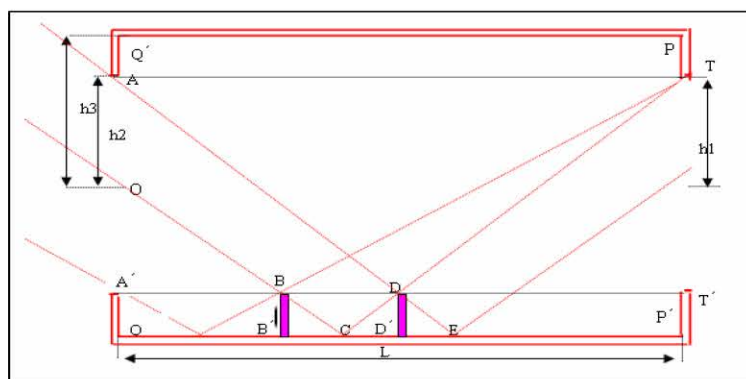


图 5.4 没有一阶镜面反射从冷光阑到达探测器的结构

如果冷光阑内壁表面为漫反射表面，则按照没有一阶漫反射从冷光阑到达红外焦平面探测器的结构来设计（见图 5.5），即探测器只能“看”到冷光阑内壁表面上的没有被直接照亮的部分。

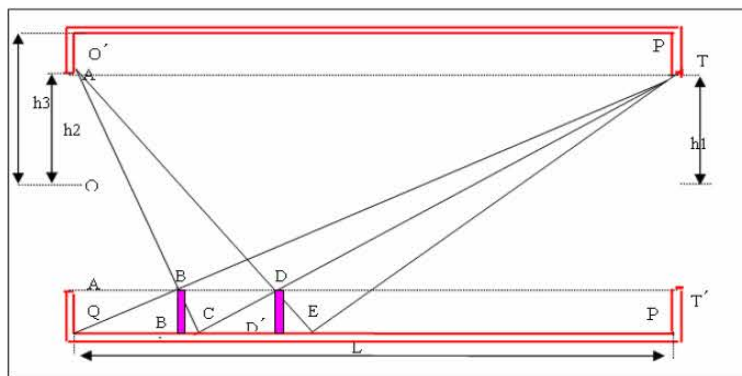


图 5.5 没有一阶漫反射从冷光阑到达探测器的结构

### 5.3.3 三种冷光阑结构及光学分析

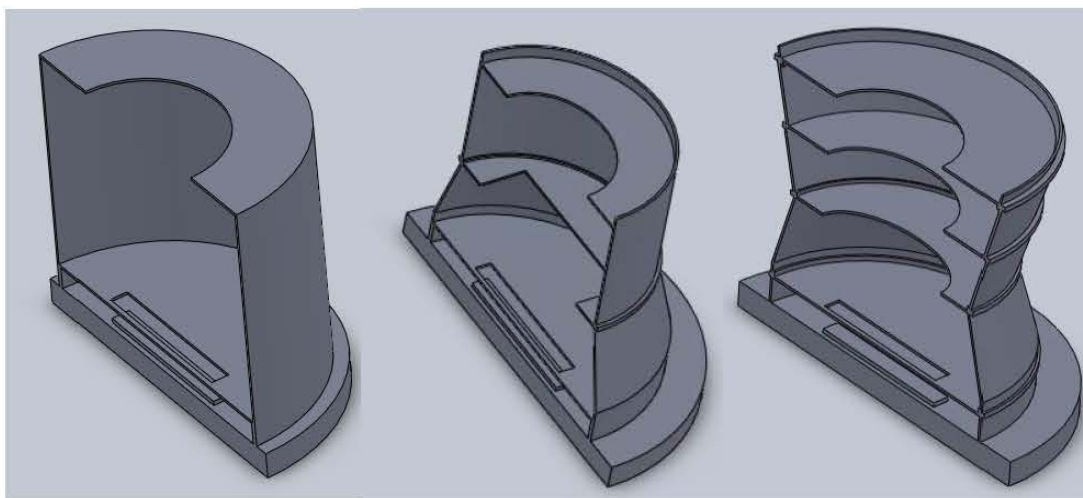


图 5.6 三种冷光阑的模型剖面图

考虑到我们的冷光阑内壁表面采用镀黑镍工艺处理，为漫反射表面，所以我们利用没有一阶漫反射从冷光阑到达探测器的设计原理，提出了含一级挡光环的冷光阑、含两级挡光环的冷光阑的结构设计，加上原有的无挡光环的冷光阑，三种冷光阑的结构如图 5.6 所示，从左到右分别为无挡光环冷光阑、一级冷光阑和二级冷光阑。

通过 TracePro 软件模拟三种冷光阑结构对杂散光的抑制的实验，以窗口作为热辐射源，并保证辐射源的面积，辐射光线数（非常多）等参数都一样，三种冷光阑的内壁表面和挡光环的表面的反射率均设置为 0.15。窗口发出的视场角内的光线可以直接到达探测器，这是无可避免的，而窗口发出的视场角外的光线属于杂散光的范畴，是我们重点分析得对象。三个冷光阑结构都是对称的，

两个红外焦平面芯片模块也是对称的，两个芯片模块的光敏元接收到的杂散光辐射是一样的，所以我们对其中一个芯片模块的光敏元接受到的杂散光进行分析。

当窗口温度为 300K 时，在三种冷光阑结构下，窗口热辐射对焦平面探测器的影响比较如图 5.7 所示。图 5.7 比较直观地比较了三种冷光阑对杂散辐射的抑制作用：（1）左边的无挡光环冷光阑对杂散光抑制作用最弱，有很多视场角外的光线通过冷光阑内壁表面一阶漫反射到达焦平面探测器，这么多的一阶漫反射光线的能量还是很可观的，直接到达探测器的光线能量与通过反射到达探测器的光线之比为 9.63；（2）中间的一级冷光阑对杂散光的抑制作用比无挡光环冷光阑要好很多，只有少数几条视场角外的光线通过冷光阑内壁表面一阶漫反射到达探测器，直接到达探测器的光线能量与通过反射到达探测器的光线之比为 39.39；（3）右边的二级冷光阑对杂散光的抑制作用在三者中最好，几乎没有视场角外的光线通过冷光阑内壁表面一阶漫反射到达探测器，直接到达探测器的光线能量与通过反射到达探测器的光线之比为 142.5。因此，三种结构冷光阑对杂散光的抑制作用从左到右依次增强。

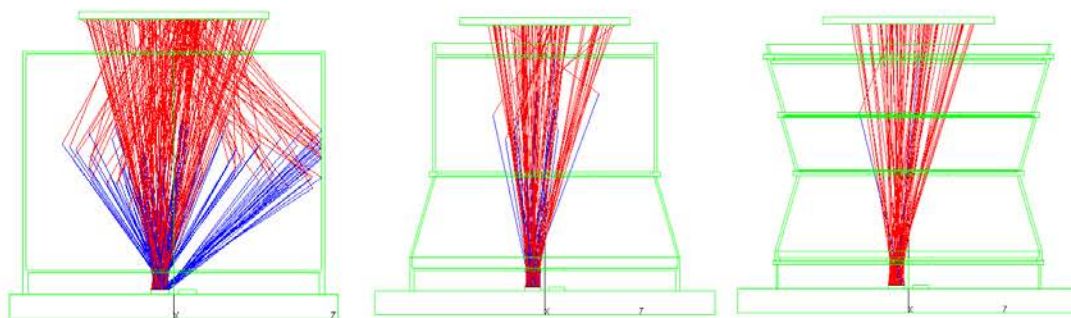


图 5.7 窗口热辐射对焦平面探测器的影响

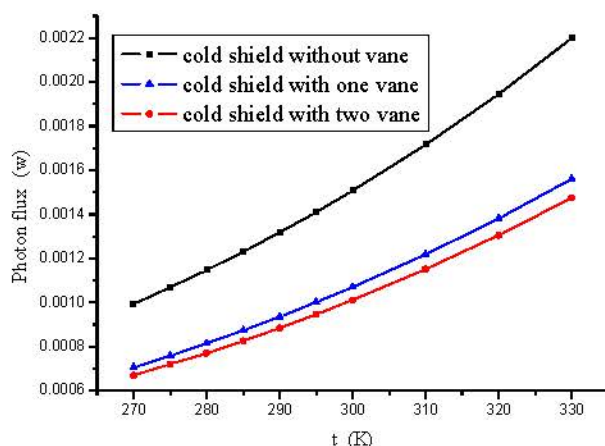


图 5.8 探测器受到辐射量和窗口温度的关系

在每个冷光阑结构下，改变窗口的温度，即就是改变窗口辐射总能量的大小，并测量到达焦平面探测器表面的光通量大小，然后就可以比较三种冷光阑对杂散光的抑制作用，见图 5.8。在没有挡光环的冷屏的系统中，有大量的光线通过冷光阑内壁表面一级反到达焦平面探测器，具有挡光环的冷光阑对杂散光的抑制比没有挡光环的冷光阑显著，而具有一级冷光阑和二级冷光阑对杂散光的抑制效果相差不大。

另外，冷光阑的设计必须要符合光学匹配的要求，并且作为杜瓦芯柱的负载之一，要求设计的冷光阑质量要小。综上所述，既然具有挡光环的冷光阑对杂散光的抑制比没有挡光环的冷光阑显著，而且具有一级冷光阑和二级冷光阑对杂散光的抑制效果相差不大，权衡冷光阑力学和光学的设计要求，选择一级冷光阑的结构设计。

最后我们制造出一级冷光阑组件，将它与原来的无挡光环冷光阑依次安装在同一个 256×2 碲镉汞红外焦平面杜瓦组件内进行测试。选取同一个芯片作为实验对象进行测试，改变窗口的温度，分别在四个温度点测试芯片中所有光敏元输出电平信号。

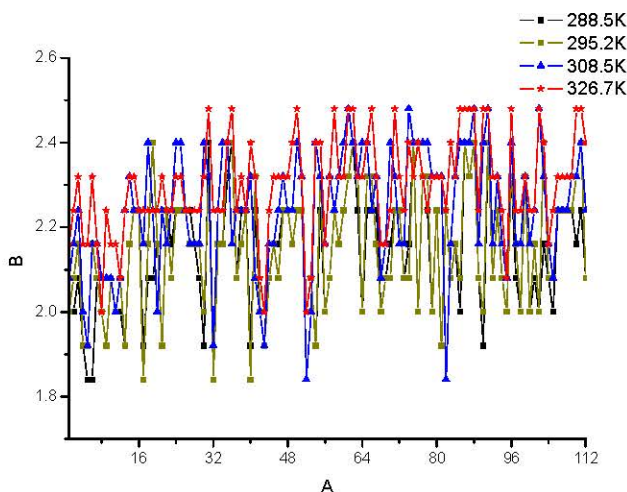


图 5.9 不同窗口温度下光敏元输出电平(无挡光环冷光阑)

在安装无挡光环冷光阑的杜瓦中，不同窗口温度下光敏元的输出电平分布如图 5.9 所示。将该杜瓦中的无挡光环冷光阑换成一级冷光阑后进行测试，得到不同窗口温度下光敏元的输出电平分布如图 5.10 所示。从图中可以看出，在同一温度曲线下，一级冷光阑中所测得的输出电平明显小于无挡光环冷光阑中所测得的输出电平，而且在一级冷光阑中各温度下输出电平的差值也小于无挡光环冷光阑中的对应值。可见，使用了一级冷光阑的结构，芯片中所有光敏元的输出电平信号有所减小，其随温度增加而增大的程度也变小了。所以，使用一级冷光阑的结构对杜瓦中杂散光的抑制有所提高。

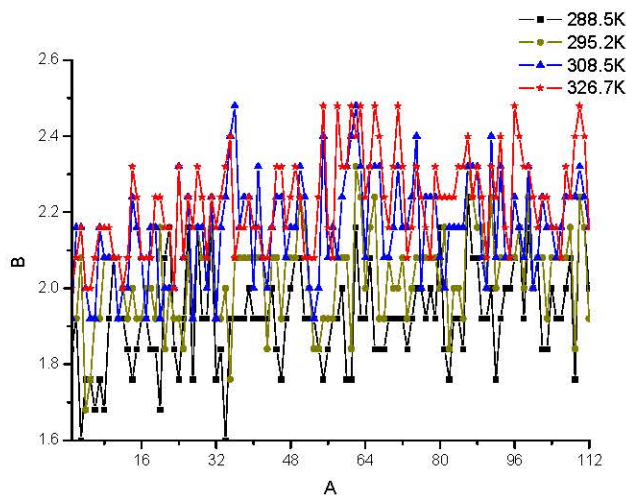


图 5.10 不同窗口温度下光敏元输出电平(一级冷光阑)

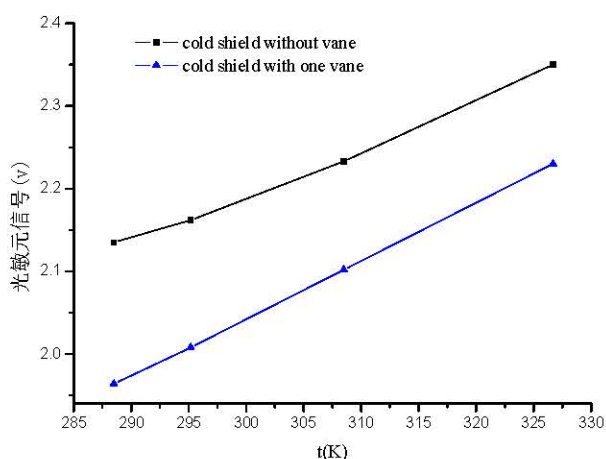


图 5.11 输出电平和窗口温度的关系

对两次测试数据进行分析，在同一温度点下，使用一级冷光阑的测试数据要比使用无挡光环冷光阑的测试数据要低。两次测试得到的四个温度点下的平均电平与窗口温度的关系如图 5.11 所示，可见，使用一级冷光阑测试得到的输出电平平均值明显比使用无挡光环冷光阑要低，说明了一级冷光阑对杂散光的抑制比无挡光环的冷光阑显著，正好验证了模拟分析的合理性，使用优化设计后的一级冷光阑，对杂散光的抑制作用效果显著。

## 5.4 本章小结

本章阐述了长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的杂散光研究的意义，重点介绍了抑制杂散光辐射的基本原理和有效方法。以  $256 \times 2$  碲镉汞红外焦平面杜瓦组件为例，测试并分析了红外杂散光辐射对焦平面的影响，并提出了在冷光阑内设计挡光环的结构，可以保证视场角外的杂散光到达探测器时起码经过了

两次以上的反射衰减，使其能量降低几个数量级。采用 TracePro 软件分析和比较了三种冷光阑结构对杂散光的抑制作用，权衡冷光阑力学和光学的设计要求，选择一级冷光阑的结构设计。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

(1) 总结了红外焦平面探测器杜瓦组件封装的一些关键技术, 并针对红外焦平面杜瓦组件封装的现状, 阐明了本课题研究的内容和意义。

(2) 总结了国内外长线列红外焦平面杜瓦组件封装技术的研究状况, 阐明了长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦研究的意义, 并描述了长线列碲镉汞红外焦平面杜瓦研制的关键问题和针对这些关键问题的解决方法。

(3) 针对  $256 \times 2$  元长波碲镉汞红外焦平面器件的封装要求, 并满足光学匹配和制冷要求, 完成了  $256 \times 2$  元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的研制, 并对杜瓦结构做了详细的设计计算。

(4) 对  $256 \times 2$  元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦的各种漏热进行了分析, 并进行漏热模型简化, 在高真空下不考虑对流漏热, 只考虑传导漏热和辐射漏热, 对杜瓦的总热负载进行了详细的计算, 并选用 5 个样品杜瓦对其热负载进行了实际测量, 结果与理论值基本符合。

(5) 对  $256 \times 2$  元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦的真空保持分析, 计算了杜瓦内部各材料的解吸放气量, 并提出了对杜瓦进行 20 天的真空烘烤排气才进行夹封后, 在不使用吸气剂的情况下, 杜瓦的真空寿命提高到 240 天左右。

(6) 采用 ANSYS 有限元分析软件对  $256 \times 1$  元芯片模块的结构的热失配应力进行了研究, 并对分别采用因瓦和柯伐两种材料作为冷头给碲镉汞芯片带来的热失配应力影响进行了研究, 以及不同厚度的冷头给碲镉汞芯片带来的热失配应力影响进行了研究, 最后采用总厚度为  $1500 \mu\text{m}$  因瓦材料冷头, 既满足机械强度、加工要求和热失配应力要求, 而且质量小, 不会给芯柱带来比较大的负担。

(7) 以  $256 \times 2$  元长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件为例, 测试并分析了红外杂散光辐射对焦平面的影响, 并提出了在冷光阑内设计挡光环的结构, 可以保证视场角外的杂散光到达探测器时起码经过了两次以上的反射衰减, 使其能量降低几个数量级。采用 TracePro 软件分析和比较了三种冷光阑结构对杂散光的抑制作用, 并结合冷光阑的设计要求, 得到一级冷光阑的结构是最佳设计的结论。

## 6.2 展望

碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦组件封装技术具有广阔的应用前景，本研究在 256×2 元碲镉汞红外焦平面杜瓦组件的研制上取得了一定的成果。针对不同的焦平面组成需要设计不同的杜瓦组件与之配合，在不同的杜瓦研制中，有很多共同点和相似性，随着焦平面探测器的发展，以后将会设计出规模更大、性能更好的线列或者面阵焦平面，对杜瓦组件的研究和设计提出更高的要求。以下仅列出了本人所认识到的，在杜瓦组件的研制中一些可以改进的地方：

(1) 在长线列或大面阵焦平面杜瓦组件的研制中，可以选择新型合金材料。从综合性能上来看，钛合金屈服强度大，导热系数最低，而且密度小，是杜瓦应用最理想的材料。若钛合金作为杜瓦主体材料，杜瓦的总质量会降低很多，可以提高芯柱的强度和负载，也能降低杜瓦的漏热。钛合金在杜瓦组件中应用最大问题是其在真空状态下的放气比不锈钢高近两个数量级，而且钛合金与柯伐或者不锈钢在氩弧焊接和激光中极易形成氢脆，焊缝难以得到高气密性，这对杜瓦的真空环境极为不利。因此需要研究钛合金的表面处理技术，使其表面放气率降低，以及研究钛合金与杜瓦常用金属材料的高真空焊接技术，为钛合金能够应用于杜瓦组件中打好基础。

(2) 采用放气率更低的材料，或者对放气率高的材料进行表面处理，提高杜瓦的真空寿命的研究。对杜瓦真空寿命影响最大的是其内部暴露在真空下的材料的解吸放气，主要考虑的是宝石片和低温胶两种材料，寻找放气率更低的材料或者研究在杜瓦研制完成后对这两种材料表面进行处理以降低其放气率的方法，从而提高杜瓦的真空寿命。

(3) 研究孔径大小可以调节的冷光阑结构，可以针对不同的应用要求来调节冷光阑孔径大小，即调节冷光阑的光通量，以得到不同的成像效果。

(4) 研究消杂光涂层和表面处理工艺，降低冷光阑内表面和挡光环表面的反射率。

## 参考文献

- [1] 中国电子学会生产技术学分会丛书编委员会组编.电子封装工程[M].中国教育出版社, 2002, 1~30.
- [2] 中国电子学会生产技术学分会丛书编委员会组编.微电子封装技术[M].中国科技大学出版社, 2003, 1~21.
- [3] 王小坤, 朱三根, 龚海梅.星用红外探测器封装技术及其应用[J].红外, 2005, 11: 13~14.
- [4] D.Cousins, M.S.Cafferty and L.M.Candell et al. GOES imager update design for minimum system impact[J].SPIE, 1996, Vol.2812: 376~388.
- [5] James Rutter, Dave Jungkman, James Stobie et al. A Multispectral Hybrid HgCdTe FPA/Dewar Assembly for Remote Sensing in the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) Instrument[J].SPIE, Vol.2817: 200~213.
- [6] 郭立春.红外探测器封装微型杜瓦瓶结构与分析[J].红外与激光技术, 1995, 24(1): 50~53.
- [7] Stephen Whicke. New Technologies for FPA dewar[J]. SPIE, 1992, Vol.1683:102~111.
- [8] James Rutter, G.Scott Libonate, Gene Robillard et al. Performance of the PV/PC HgCdTe Focal Plane/Dewar Assembly for the Atmospheric Infrared Sounder Instrument (AIRS)[J].SPIE, 1998, Vol.3437:249~260.
- [9] 乐子玲, 朱魁章等.微型金属杜瓦的激光焊接技[J].低温与超导, 1997, 34(1): 13~16
- [10] 王志敏.炉中钎焊在红外探测器组件中的应用[J].激光杂志, 2000, 21 (5): 23~37.
- [11] 朱颖峰, 卢云鹏, 李海英等.金属杜瓦瓶微小漏率检测[J].激光与红外工程, 2001, 30 (2): 143~146.
- [12] 于小兵.微型杜瓦绝热和真空保持的分析[J].激光与红外, 2004, 34 (4): 275~278.
- [13] 王蕴辉, 姜小波.国外碲镉汞红外焦平面杜瓦组件可靠性研究进展[J].电子产品可靠性与环境试验, 1999, 6: 8~11
- [14] 何兴伟.空间用微型红外探测器杜瓦的研制现状及未来的发展方向[J].红外, 2005, 5: 35~40
- [15] 朱建炳, 潘雁频.空间制冷在星载红外遥感器中的应用与发展[J].真空与低温, 2003, 19(1): 6~11
- [16] D.F. King, W. A. Radford, E.A. Patten et al. 3<sup>rd</sup>-Generation 1280x720 FPA development status at Raytheon Vision Systems [J].SPIE, 2006, Vol.6206 62060W: 365~372
- [17] Nahum Gat, Jingyi Zhang, Ming De Li et al. Variable Cold Stop for Matching IR Cameras to Multiple f-number Optics[J].SPIE Vol.6542 65420Y-1
- [18] M.V 斯温主编.陶瓷的结构与性能[M].郭景坤等译.北京科学出版社, 1986, 78~91
- [19] J H Rutter, Jungkman D, Stobie J, et al. A Multispectral hybrid HgCdTe FPA-dewar assembly for remote sensing in the atmospheric infrared sounder(AIRS) instrument[J].SPIE, 1996, 2817: 200~213.

- [20] 赵建权. 延长排气周期能提高杜瓦真空寿命—对 HgCdTe 红外探测器的放气量测试[J]. 半导体技术, 1994, 2: 57~60
- [21] 温秉权主编. 金属材料手册[M]. 电子工业出版社, 2009, 59~200
- [22] 陈国邦主编. 低温工程材料[M]. 兰州大学出版社, 1997, 90~159
- [23] 国营第七七二厂编委会主编. 电真空用金属材料手册[M], 国营第七七二厂出版社, 1973, 110~120
- [24] 赵世臣. 常用金属材料手册-有色金属的产品部分[M]. 冶金工业出版社, 1995, 63~95
- [25] 中国制冷学会第一专业委员会编. 国产材料低温性能数据汇编(一)[M]. 中国制冷学会第一专业委员会, 1986, 154~239
- [26] E.J. 赫恩主编. 材料力学[M]. 人民教育出版社, 1975, 45~85
- [27] Saeed Moaveni 主编. 有限元分析—ANSYS 理论与应用[M]. 王崧等译. 电子工业出版社, 2008, 146~255
- [28] 博弈创作室主编. ANSYS7.0 基础教程与实例[M]. 中国水利水电出版社, 2004, 79~221
- [29] 饭田修一等合编. 物理学常用数表[M]. 张质贤等译. 北京科学出版社, 1987, 13~36
- [30] 乐子玲, 朱魁章等. 微型金属杜瓦的激光焊接技术[J]. 低温与超导, 1997, 25(1): 13~16
- [31] 方鸣岗. 激光焊接钛金属[J]. 激光与红外, 1996, 26(3): 185~186
- [32] 王小坤, 孙闻, 曾智江. 红外焦平面微型金属杜瓦高气密激光焊接的研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 361~364
- [33] 熊丽娟, 都东等. 小尺寸不锈钢片激光焊接技术的研究[J]. 焊接技术, 2002, 31(4): 14~16
- [34] 史晓强. 激光焊接合金钢的试验研究[J]. 实验室研究与探索, 1997, 5: 51~54
- [35] 陆斌峰, 芦凤桂等. 激光焊接工艺的现状及发展[J]. 焊接, 2008, 4: 53~57
- [36] 日本真空技术株式会社编. 真空手册[M]. 原子能出版社, 1986, 16~59
- [37] 贾斯汀主编. 真空技术[M]. 四川人民出版社, 1980, 53~89
- [38] 威斯勒主编. 真空物理和技术[M]. 原子能出版社, 1988, 56~67
- [39] 奥隆主编. 真空技术实用指南[M], 国防工业出版社, 1988, 42~53
- [40] 梅飞鸣主编. 辐射传热[M]. 高等教育出版社, 1989, 150~170
- [41] 杨贤荣主编. 辐射传热角系数手册[M]. 国防工业出版社, 1992, 25~28
- [42] Dhar N K, Chen Y, Brill G, et al. Composite substrate for large-format HgCdTe IRFPA[J]. SPIE, 2003, 5074: 157~165
- [43] Jean-Luc Tissot, Francois Marion. Collective flip-chip technology for hybrid focal plane arrays[J]. SPIE, 2000, 4310: 581~586
- [44] 李言谨, 何力, 杨建荣等. 碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 409~412
- [45] 李晖, 李英才. 星载光学系统遮光罩消杂光结构优化设计方法[J]. 光子学报, 1996, 25(10): 914~919
- [46] 张燕. 杜瓦中冷光阑的杂散光抑制研究[J]. 红外, 2010, 31(7): 1~8
- [47] R.P. Breault. "Problems and Techniques in Stray Radiation Suppression" in Stray-Light Problems in Optical Systems[J]. SPIE, 1977, 107: 2~23,
- [48] Yan Zhang, Dafu Liu, Xiangrong He, Xiaokun Wang et al. Stray light in infrared detector[J].

SPIE, 2009, 7383: 331~339

[49] Edward R.Freniere. First-order design of optical baffles[J].SPIE, 1980, 257: 20~28

## 附录A

## 作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简介:

1985年10月22日出生于贵州省思南县。

2004年8月——2008年7月,在清华大学精密仪器与机械学系获得学士学位。

2008年9月——,在中国科学院上海技术物理研究所攻读硕士学位。

获奖情况:2010年度所优秀学生奖学金三等奖。

工作经历:

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

1. 夏王,王小坤,林春,曹妩媚,孙闻,郝振怡,李言谨,丁瑞军. 12.5 $\mu\text{m}$ 长  
线列碲镉汞焦平面杜瓦组件[J].激光与红外,2012年4期
2. Wang Xia, Wen Sun, Xiaokun Wang, Yanjin Li. Study on stray light suppression  
in IRFPA Dewar. SPIE, 2012

### 申请或已获得的专利:

1. 夏王,王小坤,孙闻,王煜宇,曹岚,马学亮.红外探测器杜瓦组件空间在  
轨真空处理装置及实现方法,申请号:201110252360.7(发明专利)
2. 夏王,王小坤,孙闻,王煜宇,曹岚,马学亮.红外探测器杜瓦组件空间在  
轨真空处理装置,申请号:201120320593.1(实用新型专利)
3. 夏王,王小坤,孙闻.一种用于分置式杜瓦热负载测试的高兼容多功能测试  
杜瓦,申请号:201110354611.2(发明专利)
4. 夏王,王小坤,孙闻.一种分置式杜瓦不同制冷温度下热负载测试方法及装  
置,申请号:201110354623.5(发明专利)
5. 夏王,王小坤,孙闻.一种分置式杜瓦不同制冷温度下热负载测试装置,申  
请号:201120443093.7(实用新型专利)
6. 夏王,王小坤,孙闻.一种高兼容多功能测试杜瓦,申请号:201120443942.9  
(实用新型专利)

### 参加的研究项目及获奖情况: