

红外焦平面低温形变测试方法及其误差分析

张海燕^{1,2}, 管建安^{1,2}, 庄馥隆^{1,2}, 汪 洋^{1,2}, 陈安森^{1,2}, 龚海梅^{1,2}

1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 在研制制冷型红外探测器组件的过程中, 降低功能模块的热应力是设计及制造的核心目标之一, 这要求首先能够对焦平面模块的热应力进行测量表征, 工程上一般通过形变等间接量来表征碲镉汞的热应力。基于此研究了激光干涉法测量制冷型红外焦平面探测器的表面形变并对其误差进行了分析, 该方法克服了常规的台阶仪测量方法所固有的温度控制不够理想、测试过程中样品表面有结霜等困难, 它利用相干光在标准镜上干涉形成的干涉图样来反映样品表面的形变。试验表明: 该方法可以进行实时变温的表面形变测量, 为制冷型红外焦平面组件的封装设计提供可靠的形变测试数据, 实现了焦平面模块在封装杜瓦内的表面形变的低温在线测量。

关键词: 低温形变; 热应力; 激光干涉法; 误差分析; 红外探测器

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0504001

Measurement and error analysis of low temperature deformation of infrared focal plane arrays

Zhang Haiyan^{1,2}, Guan Jian'an^{1,2}, Zhuang Fulong^{1,2}, Wang Yang^{1,2}, Chen Ansen^{1,2}, Gong Haimei^{1,2}

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)

Abstract: Reducing the thermal stress of the functional module is one of the key goals in the process of design and fabrication of focal plane assembly. As a result the characterization and measurement of the deformation of the module at low temperature is required. Generally the thermal stress is characterized by indirect parameters such as the deformation in engineering. Based on this, a measurement method including its error analysis of laser interference used to acquire the deformation of the cooled infrared detector was discussed. This method overcomes the difficulty of temperature control and frosting inherent in the other method. It uses the interference pattern produced in the surface of the standard mirror by interference of coherent light to characterize the deformation of the sample. Tests show that this method can realize the measurement of deformation of real-time temperature changes. As a result an in situ

收稿日期: 2015-03-06; 修订日期: 2015-04-08

作者简介: 张海燕(1975-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事红外光电探测器组件封装及其可靠性相关技术方面的研究。

Email: haeyaz@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 龚海梅(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事航天遥感用红外光电探测器的应用基础研究和基础研究。

Email: hmgong@mail.sitp.ac.cn

measurement of the deformation of the FPA module packaged in the dewar is realized.

Key words: low temperature deformation; thermal stress; laser interference method; error analysis; infrared detector

0 引言

制冷型红外探测器组件一般工作在低温状态下,其工作温度常常在 100 K 甚至更低,由于它是由各种不同的材料构成,这些材料的热膨胀系数各不相同,组件在室温与工作温度之间变化时必然会产生热应力,热应力是目前影响红外探测器可靠性的主要问题之一,它能导致红外探测器的多种模式的失效,比如分层、光电性能退化、功能材料裂片等。热应力效应随着焦平面规模的增大而增加,因此,长行列、大面阵红外探测器组件的热应力是需要解决的问题。

制冷型红外探测器组件一般包括碲镉汞芯片、硅读出电路、冷平台以及冷屏等,其中碲镉汞上所承受的热应力是影响组件可靠性的关键,在进行封装设计时,降低功能模块的热应力是一个重要目标,通过匹配封装材料、尺寸、结构等参数可以达到降低热应力的目的^[1-7]。在设计完成进入试生产阶段后需要对热应力进行测试表征,这是研究、验证组件热应力的基础,但直接测量应力是困难的,一般通过一些间接的量来描述碲镉汞材料所承受的热应力,比如形变,因为应力和样品的形变之间有确定的关系。

台阶仪是测量样品表面形变的常用设备^[8],它利用探针在样品表面划过,以此获得样品表面的轮廓,对于低温下的形变测量,其测试过程一般是把样品固定在一个热容很大的热沉上,然后一起浸入液氮降温,在热沉完全冷透后置于台阶仪上测量样品表面在低温下的表面形变。这种方法的温度控制不够理想,且测试过程中样品表面有结霜,这些都对测试结果有较大的影响,因此需要新的测量低温形貌的方法。文中对激光干涉法测量制冷型红外焦平面探测器的表面形变进行了研究,实现了焦平面模块在封装杜瓦内的表面形变的低温在线测量。

1 测试原理

不同于台阶仪测量方法,激光干涉法测量所需

的低温环境由真空杜瓦提供。图 1 为样品置于真空杜瓦中的实物照片,典型的测试杜瓦结构如图 2 所示,测试杜瓦一般由金属材料制成,由真空腔体、

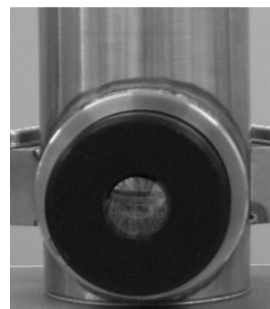


图 1 置于真空杜瓦中的待测样品
Fig.1 Samples in the dewar

冷头、液氮腔体及窗口组成。样品粘贴于冷头上,冷头和样品均处于真空中,液氮存储于液氮腔体中,直接对冷头进行制冷。真空主要起到绝热及隔离水汽的作用,制作良好的杜瓦真空度很高,其对环境的漏热很小,也不会有水汽冷凝在样品表面^[9]。窗口材料对可见光透明,一般采用宝石材料。样品粘贴于杜瓦冷头上后,安装好窗口帽,然后抽真空,待杜瓦真空度优于 1×10^{-3} Pa 以后,在液氮腔体内注入液氮制冷降温,同时监测冷头温度,待样品降温至液氮温度以后便可以进行低温形貌的测量。

一束单色平行光依次透过标准镜、杜瓦窗口后入射到样品表面(见图 2),设光线 1 在样品表面反射后透出窗口再次入射到标准镜,形成光线 1', 光线

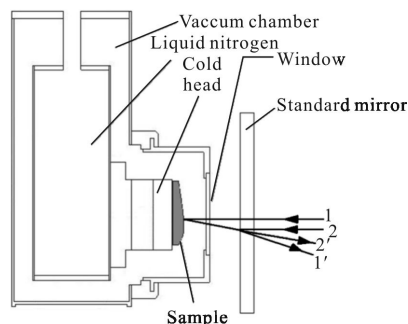


图 2 激光干涉法测量原理示意图

Fig.2 Diagram of the principle of laser interferometry method

1'在此处与平行光束中的光束 2 在标准镜的表面处的反射光 2'相遇,形成相干光而产生干涉条纹,不同的条纹代表平行光在遇到待测样品表面反射后光程差的不同,在样品的表面形变与光程差、干涉条纹之间形成一一映射关系,通过对干涉条纹的分析可以得到样品的表面形变,由此测量出焦平面的低温表面形变。

2 误差分析

激光干涉法测量封装于杜瓦内低温样品的表面形变的误差主要来自于杜瓦窗口厚度不均匀及窗口材料折射率不均匀所带来的光程差的变化,下面对这个测量误差做定量分析。图 3 为在不均匀的杜瓦窗口的情况下测量系统的光路示意图,其中: d 为窗口的厚度, p 为窗口的两个面的平行度, l 为窗口与标准镜之间距离。

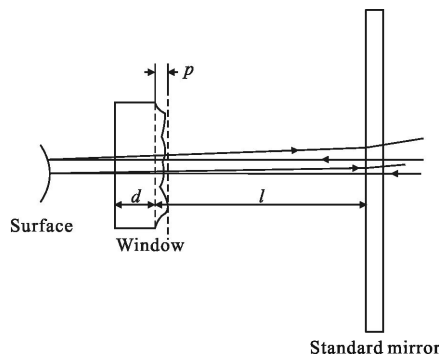


图 3 不均匀窗口情况下的光路示意图

Fig.3 Diagram of optical path with nonuniform window

在没有窗口的情况下,激光束垂直入射,两条入射到样品表面的光线及其相应的反射光线在几何长度之差也正好是两点干涉的光程差之差,它恰恰反映了两点之间的高度差。现在考虑在光路中加入一个杜瓦窗口,且该窗口的厚度是不均匀的,其两个面的平行度为 p ,在这种情况下,两点干涉的光程差之差不再与几何长度之差相等,而是反映了两点之间高度差以及窗口厚度、折射率不均匀性带来的额外的光程差,也就是说,干涉图样叠加了样品的表面形变及窗口的厚度、折射率的不均匀性这几个因素所带来的光程差之和,因此窗口的厚度及折射率的不均匀性即为测量的误差。记由窗口上下两个面的平行度 p 及其折射率 n 带来的光程差为 δ :

$$\delta = n * p \tag{1}$$

则 δ 带来的误差

$$e = \delta / 2 \tag{2}$$

3 试验及结果

对某线列模块进行了低温形变的测量(见图 4),测试采用 ZYGO 激光干涉仪,激光波长为 $0.632 \mu\text{m}$,真空杜瓦为专用测试杜瓦。样品以导热油脂粘贴于真空杜瓦冷头的中心位置,杜瓦窗口为宝石片,宝石的折射率 $n=1.7$,厚度 $d=0.3 \text{ mm}$,窗口的两个面的平行度 $\Delta d_1=0.1 \mu\text{m}$,窗口直径为 30 mm ,设定窗口与标准镜之间的距离 $l=250 \text{ mm}$ 。



图 4 测量实物图

Fig.4 Photo of the measurement

测试过程如下:

- (1) 首先对杜瓦抽真空,使得杜瓦真空腔体的真空优于 $1\text{E}^{-3} \text{ Pa}$ 。
- (2) 将杜瓦放在六自由度位移平台上并与干涉仪的激光束对准,调整杜瓦的位置使得杜瓦窗口与标准镜直接的距离符合试验设定值。
- (3) 调整位移平台的俯仰及倾斜,使之符合杜瓦窗口垂直于激光束以及其他干涉成像要求。
- (4) 向杜瓦液氮腔体内缓慢注入液氮进行降温,同时监测杜瓦冷头的温度,直至杜瓦冷头温度达到 80 K (见图 5)。

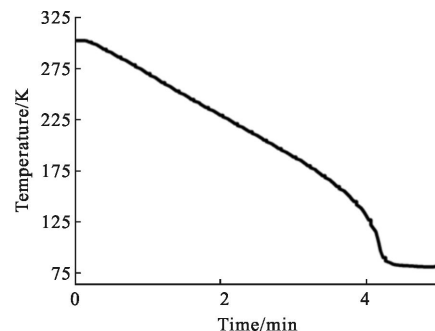


图 5 杜瓦冷头的降温曲线

Fig.5 Cooling curve of the cold head

(5) 进行激光干涉图形采样。

(6) 采样完成后,激光干涉仪自带的数据处理软件自动识别干涉图形并进行数据处理,最终得到样品的表面形变。

测试的干涉云图如图6所示,图7为激光干涉仪自带的数据处理软件对干涉云图做数据处理后得



图6 干涉图样

Fig.6 Interference pattern

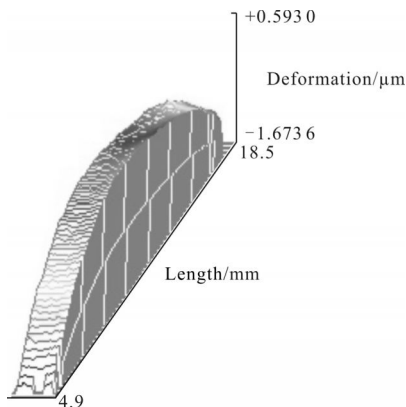


图7 表面形变

Fig.7 Surface deformation

到的形变云图。此次测量的样品长约14 mm,由测量结果的云图可以看到,样品在低温下变形凸起,呈现出两边低中间高的形状,两边的位置在 $-1.67\ \mu\text{m}$,中间的位置在 $0.59\ \mu\text{m}$,整个表面的PV值约为 $2.26\ \mu\text{m}$ 。

将 n 、 p 等参数分别代入公式(1)及公式(2),得测量误差 $e=0.085\ \mu\text{m}$,即总的测试误差小于 $0.085\ \mu\text{m}$ 。

4 结论

文中提供了一种在真空杜瓦内测量制冷型红

外焦平面器件的低温表面形变的方法,该方法克服了常规的台阶仪测量方法所固有的温度控制不够理想、测试过程中样品表面有结霜等困难。激光干涉法是一种非接触式的测量方法,它利用相干光在标准镜上干涉形成的干涉图样来反应样品表面的形变,对镜面反射的样品表面的形貌测量非常有效,通过对测量方法的误差分析,给出了影响测量误差的窗口材料、几何尺寸、平行度、杜瓦与标准镜的距离等关键参数的选择原则。实际测量表明,激光干涉法测量制冷型红外焦平面探测器的表面形变切实可行,测试误差满足工程需求并可控,同时该方法可以实现表面形貌在变温情况下的实时测量,为制冷型红外焦平面组件的封装设计提供基础的形变测试保障。

参考文献:

- [1] Jean-Luc Tissot, Francois Marion. Collective flip-chip technology for hybrid focal plane arrays [C]//SPIE, 2000, 4310: 581-586.
- [2] Tribolet P, Costa P, Fillon P, et al. Large staring arrays at Sofradir[C]//SPIE, 2003, 4820: 418-428.
- [3] Ziegler J, Finck M, Kruger R. Long linear HgCdTe arrays with superior temperature-cycling-reliability [C]//SPIE, 2000, 4028: 380-389.
- [4] Hu Xiaoning, Zhang Haiyan, Li Yanjin, et al. Thermal stress analysis of HgCdTe focal plane arrays on Si substrates [J]. *Laser and Infrared*, 2006, 11(36): 1020-1022. (in Chinese)
- [5] Breniere X, Manissadjian A, Vuillermet M. Reliability optimization for IR detectors with compact cryo-coolers [C]//SPIE, 2005, 5783: 21.
- [6] Fan Guangyu, Gong Haimei, Li Yanjin, et al. Temperature-cycling-reliability of IRFPA device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 608-610. (in Chinese)
- [7] Gong Haimei, Zhang Yani, Zhu Sengen, et al. Study of reliable packaging for IRFPA detector [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2009, 28(2): 85-89. (in Chinese)
- [8] Li Yanjin, He Li, Yang Jianrong, et al. Study on thermal mismatch stress of HgCdTe infrared focal plane array [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2008, 27 (6): 409-412. (in Chinese)
- [9] Stephen Whicker. New technologies for FPA dewars [C]//SPIE, 1992, 1683: 102-112.