

文章编号: 1672-8785(2017)08-0023-04

大面阵红外探测器与低温冷平台 集成后的应变测试研究

夏晨希^{1,2} 孙 闻^{1,2} 王小坤¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 大面阵红外探测器是红外遥感仪器的核心元件。该类探测器大多由小规模面阵探测器拼接组成, 与杜瓦低温冷平台集成后形成杜瓦组件。探测器在杜瓦低温冷平台上安装集成后的应力状态是影响芯片性能和寿命的关键因素。测试了低温时探测器在自由状态下和被安装在杜瓦组件内应变片的热输出, 再利用两者的差值表征了探测器与杜瓦低温冷平台集成后的额外应变。以 2000×512 探测器组件为例, 进行了测试验证分析, 结果表明该方法可行。

关键词: 探测器; 应变; 应变片

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.08.005

Test Study of Strain after Integration of Large Scale Infrared Detector Chip into Cryogenic Cold Platform at Low Temperature

XIA Chen-xi^{1,2}, SUN Wen^{1,2}, WANG Xiao-kun¹

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Large area array infrared detectors are the core components in infrared remote sensing instruments. Most of them are composed of spliced small-scale area array detectors and are integrated on Dewar cold platforms to form Dewar assemblies. The stress state of a detector after being integrated on the Dewar cold platform is a key factor affecting the performance and lifetime of the chip. The thermal output of a strain gage when the detector is both in the free state and in the Dewar is tested at low temperature. The difference between the two values is used to characterize the extra strain after the detector is integrated with the Dewar cold platform. Taking a 2000×512 detector assembly as an example, the test verification and analysis are carried out. The result shows that this method is feasible.

Key words: detector; strain; strain gage

收稿日期: 2017-03-28

作者简介: 夏晨希 (1992-), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事超大规模红外探测器与低温冷源耦合研究。

E-mail: xcx5955@163.com

0 引言

随着我国空间技术的发展,红外遥感仪器向着高灵敏度和高分辨率发展。红外遥感仪器的两个重要性能指标为视场和分辨率。视场的扩大可以增加仪器的观测范围,分辨率的提高可以改善仪器的成像质量。研制高分辨大视场光学系统时,为克服视场和分辨率之间的矛盾,人们一般采用高分辨效率、大面阵红外焦平面探测器组件^[1,2]。但随着波长向长波扩展和探测灵敏度的提高,红外探测器必须在深低温下才能工作。由于机械制冷具有结构紧凑、体积小、重量轻、制冷量大、制冷时间短、制冷温度可控范围大等优点,目前该类探测器在应用中大多采用机械制冷方式^[3,4]。

大面阵红外探测器多由探测器芯片、互连钎柱区、硅读出电路、低温粘接胶、引线基板等组成,如图 1 所示。红外探测器工作时需经历多次高低温冲击。探测器从室温降至低温(65 ~ 150 K)时,红外探测器中各层材料热膨胀系数的差异会使得各层之间产生应力,从而产生低温形变。这些应力和形变会造成焦平面器件的性能衰减,严重时甚至会导致探测器芯片衬底因裂片而失效^[5,6]。目前,国内外对此方面的研究大多集中在探测器各层热失配的相对测试和探测器结构的优化设计验证方面,即利用三维影像测试仪的激光测距功能测试不同材料作为引线基板的情况,并以探测器芯片在 Z 轴方向上的突起或凹陷程度为 Z 轴方向上的形变来评估探测器芯片的应变状态。

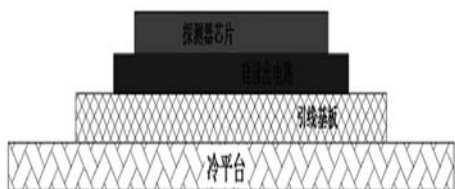


图 1 红外焦平面探测器封装结构示意图

本文以 2000×512 探测器杜瓦组件为例,利用低温应变片测试评估多模块拼接的大面阵探测器与杜瓦低温冷平台集成后的应变,评估红外

探测器杜瓦组件内的探测器应力状态。该方法的优势在于:(1)通过应变片得到的探测器芯片应变是真实的,它是在长度方向受到的拉伸或压缩和 Z 轴方向上的突起或凹陷的综合应变。(2)能够测量探测器芯片与冷平台集成后的应变,得到的结果更接近探测器芯片真实工作状态时的值。

1 模型及测试方法

2000×512 探测器组件由 4 个 512×512 探测器模块呈品字中心对称状态拼接在金属基板上,在金属基板下垫一层大面积热适配层后,通过螺钉将其固定在杜瓦的低温冷平台上(图 2)。

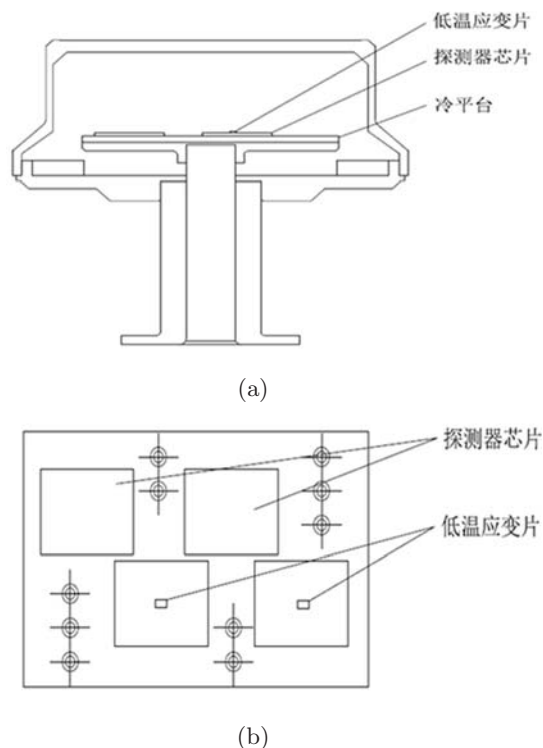


图 2 2000×512 探测器组件及芯片位置示意图

在试件(即探测器芯片)附近安装低温应变片和测温二极管(图 3)。将应变片置于外侧和内侧两个不对称的探测器芯片上(图 2)。低温应变片选用日本共和公司生产的 KFL-1-120-C1-11F1M3 型应变片,其适用于 -200 ℃ ~ 50 ℃ 温度范围,阻值为 120 Ω。惠更斯桥盒连接方法采用 1/4 桥三线制接法,以消除导线电阻的影响。

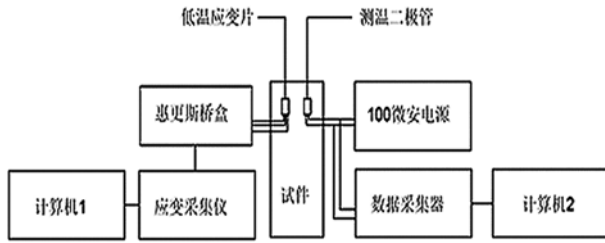


图 3 低温应变片的测试装置示意图

应变采集仪选用日本共和公司生产的 DCS-100A 型。温度数据用 HYDRA 系列采集器采集。

2 测试原理

假设在常温下应变片与探测器芯片完美粘贴, 即探测器芯片的应变等于应变片的应变, 而且胶黏剂在降温时不产生收缩或者膨胀^[7]。

当探测器芯片降温时, 探测器芯片本身和应变片都会收缩。同时, 应变片自身的电阻也会随温度变化而变化。因此, 应变片的热输出不仅与探测器芯片的应变有关, 而且与探测器芯片所处的温度有关。也就是说, 应变片的电阻是探测器芯片应变 e 和温度 T 的函数。

$$R = f(T, e) \quad (1)$$

因此, 在温度和应变的同时作用下, 应变片的电阻变化为

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_e \Delta T + \left(\frac{\partial R}{\partial e}\right)_T \Delta e \quad (2)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_e \Delta T / R + \left(\frac{\partial R}{\partial e}\right)_T \Delta e / R \quad (3)$$

令 $(\frac{\partial R}{\partial T})_e / R = \alpha_R$, $(\frac{\partial R}{\partial e})_T / R = K$; 于是

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_R \Delta T + K \Delta e \quad (4)$$

式中, R 为应变片的电阻值, T 为探测器芯片的温度, E 为应变片的应变, α_R 为应变片栅丝材料的电阻温度系数, K 为应变片的灵敏系数。

由于应变片是粘贴在探测器芯片上的, 因此应变片的应变 Δe 是探测器芯片的应变 $\Delta \varepsilon$ 与探测器芯片与应变片栅丝材料收缩量之差的

和。探测器芯片的线膨胀系数为 α_m , 应变片栅丝材料的线膨胀系数为 α_g , 即

$$\Delta e = (\alpha_m - \alpha_g) \Delta T + \Delta \varepsilon \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (4), 得到

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_R \Delta T + K(\alpha_m - \alpha_g) \Delta T + K \Delta \varepsilon \quad (6)$$

此时, 热输出 (利用应变片电阻变化直接得到的应变值) 为

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R}{RK} = (\alpha_R / K + K(\alpha_m - \alpha_g)) \Delta T + \Delta \varepsilon \quad (7)$$

若探测器芯片没有受到外载荷和热应力作用, 其应变 $\Delta \varepsilon = 0$ 。所以在探测器芯片自由状态下降温时, 式 (7) 可以写为

$$\varepsilon_t = (\alpha_R / K + K(\alpha_m - \alpha_g)) \Delta T \quad (8)$$

因此, 在同样温度下, 探测器芯片与低温冷平台集成后应变片的热输出值和探测器芯片在自由状态下应变片的热输出值之差, 即式 (7) 减去式 (8), 就是探测器芯片与低温冷平台集成后的应变。

3 测试数据及分析

将单个探测器芯片直接放在液氮中浸泡, 待温度稳定至 77 K 时将其取出; 在室温中回温后, 记录应变片热输出随温度的变化, 如图 4 所示。在应变片与探测器模块集成后测试应变时, 应变片表征的数据为探测器在低温下自由状态应变片的热输出。图 4 中, 横坐标为温度, 纵坐标为热输出, 单位为 10^{-6} 。

将探测器安装在杜瓦低温冷平台上后, 探测器不再处于自由状态, 而是受探测器冷平台安装方式和拼接基板的低温约束的。实验通过液氮对杜瓦组件进行制冷。图 5 给出了应变片的热输出随温度的变化。其中, 位置靠内侧的探测器芯片上的应变片的热输出略高于靠外侧的探测器芯片上的应变片的热输出。

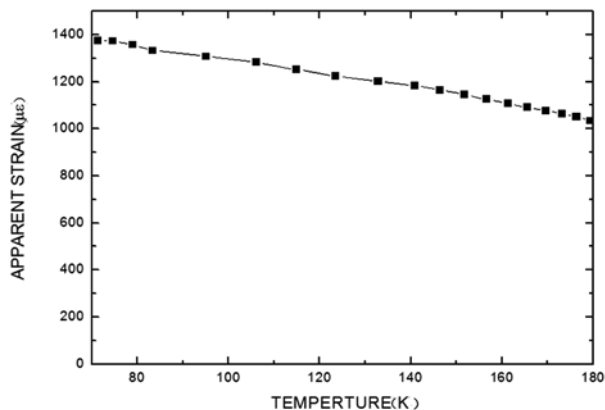


图 4 探测器在自由状态下时应变片的热输出

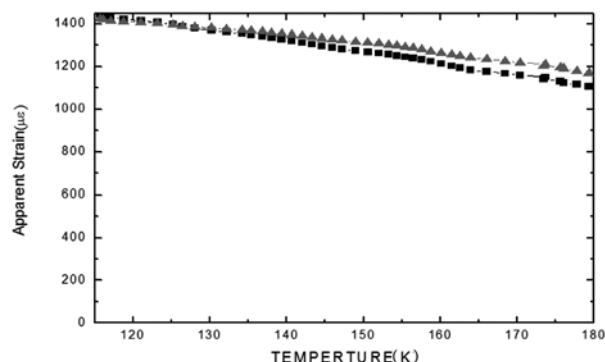


图 5 探测器在组件中时应变片的热输出

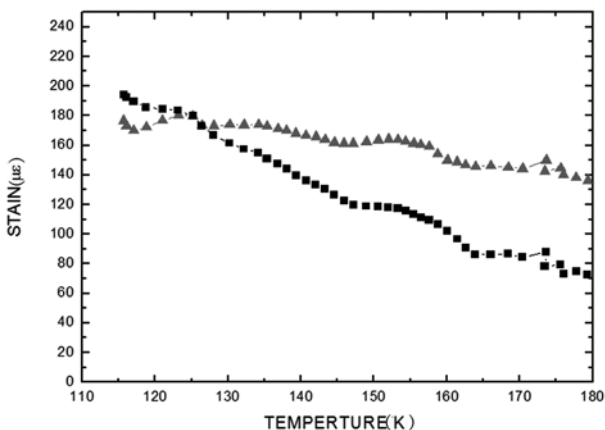


图 6 探测器安装在组件内附加的应变

将探测器芯片在组件中时的应变片的热输出减去相同温度下探测器芯片处于自由状态下的应变片的热输出, 就能得到探测器芯片在组件中受外力时的应变, 如图 6 所示。可以看出,

探测器芯片在组件中受到外力作用时的应变为正, 即受到了一定的拉伸作用。这是因为探测器芯片是粘在冷平台上的, 而冷平台通过螺钉固定, 收缩变形小; 探测器芯片受到了一定的拉伸作用。该拉伸作用产生的应变随温度的增加而减小。位置靠内侧的探测器芯片所受的低温冷平台的额外应变略大于外侧探测器芯片的应变。

4 结论

通过低温应变片测试评估了多模块拼接大面阵探测器与杜瓦低温冷平台集成后的应变, 评估了红外探测器杜瓦组件内探测器的应力状态。以 2000×512 探测器杜瓦组件为例, 测量了 2000×512 探测器组件在探测器芯片处于自由状态下和处于组件安装方式下时应变片的热输出, 通过两者差分得到了不同位置探测器在杜瓦冷平台安装方式下的应变。实验结果表明, 该方法切实可行, 可作为杜瓦组件内探测器低温安装应力的评估方法。

参考文献

- [1] 龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技术及应用 [J]. 红外与激光工程, 2010, 40(12): 3129-3140.
- [2] Rogalski A. Infrared Detectors for the Future [J]. Optical and Acoustical Methods in Science and Technology, 2009, 116(3): 389-406.
- [3] Raab J, Tward E. Northrop Grumman Aerospace Systems cryocooler Overview [J]. Cryogenics, 2010, 50(9): 572-581.
- [4] 曹永刚, 陈曦, 吴亦农. 空间用斯特林型脉管制冷机的应用现状研究 [J]. 红外, 2013, 34(6): 1-9.
- [5] 陈星. 碲镉汞红外焦平面探测器可靠性相关技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [6] 夏王. 长行列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件封装技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2012.
- [7] 尹福炎, 王文瑞, 闫晓强. 高温/低温电阻应变片及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.