快速制冷启动的中波 320×256 红外焦平面探测器研究

朱颖峰,韩福忠,李东升,黄一彬,毛京湘

(昆明物理研究所,云南 昆明 650223)

摘　要:快速制冷启动所产生的形变应力是对红外焦平面探测器芯片可靠性构成影响的重要方面。采用机械加工结合化学腐蚀的方法对芯片进行减薄以提高其柔韧性,从而减小了由于应力传递产生的像元损伤所引起的盲元和裂纹。并在不增加杜瓦冷头零件结构的前提下对杜瓦冷头膨胀匹配进行优化以减小芯片形变和应力。通过可靠性试验验证,提高了快速制冷启动下中波 320×256 红外焦平面探测器组件长期工作的可靠性和稳定性。

关键词:芯片背减薄;　杜瓦冷头膨胀匹配;　芯片形变和应力

中图分类号:TN216　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-2276(2014)04-1032-05

MW 320×256 IRFPA detector under rapid cooling down

Zhu Yingfeng, Han Fuzhong, Li Dongsheng, Huang Yibin, Mao Jingxiang

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The rapid cooling down stress deformation is one of the key factors for the reliability of FPA. Combined with chemical corrosion, a mechanical grinding method was studied in this paper to reduce the thickness of FPA chip, and therefore improving its flexibility. The amount of bad pixel and crack owing to pixel damage generated by stress transfer was reduced obviously in the thinned chips. The cold head expansion matched to decrease the cool down stress of the chip was also optimized, without increasing the structural components of the Dewar cold head. After verified by reliability testing, the long-term reliability and stability of the 320×256 IRFPA detector under a rapid cooling startup was improved obviously by these optimizations.

Key words: chip thickness reducing;　Dewar cold head expansion match;　chip stress and deformation

收稿日期:2013-08-05;　**修订日期**:2013-09-03

基金项目:国家自然科学基金(40905011)

作者简介:朱颖峰(1971-),男,硕士,研究员,主要从事红外焦平面探测器杜瓦封装技术方面的研究。

Email:jjtong@aiofm.ac.cn

0 引 言

近年来，国内第二代红外焦平面探测器技术获得了长足进步，以长波 288×4 和中波 320×256 为代表的典型二代红外焦平面探测器组件技术趋于成熟，开始在各种军民用红外成像系统中广泛应用[1]。

随着二代红外焦平面探测器组件应用领域的不断拓宽，应用系统对探测器组件外形结构、使用条件的不同，针对不同应用系统的个性化探测器设计和研制要求更加突出，特别是用于红外制导系统的探测器组件，不仅要求满足弹载的高强度环境应力要求，同时还需保证快速制冷启动和外形结构的小巧紧凑，与标准第二代红外焦平面探测器差异较大[2-3]。为满足快速制冷启动的应用，对焦平面探测器芯片的可靠性提出了挑战。

以碲镉汞材料制备的探测器芯片与硅工艺制备的读出电路之间由于材料膨胀系数的不同，当采用快速启动制冷的节流制冷器在 60 s 内将探测器芯片从环境温度冷却至 80 K 左右的探测器芯片工作温度时，探测器芯片上产生较大的应力和形变，造成芯片损伤从而制约探测器组件的可靠性和长期稳定性[4-5]。为此，必须从提高探测器芯片自身抵抗形变应力和通过杜瓦冷头膨胀匹配设计降低芯片形变应力两个渠道采取措施。

1 探测器组件基本原理

快速制冷启动的中波 320×256 红外焦平面探测器组件由探测器芯片、读出电路芯片、微杜瓦和节流制冷器组成，见图 1。来自视场的红外光辐射透过光学系统、杜瓦窗口、低温滤光片，照射到焦平面探测器芯片 PN 结，产生光生伏特效应将光信号转变为电信号并通过铟柱输入到读出电路，读出电路处理后的信号经杜瓦引线环引出[6]。杜瓦封装和节流制冷器为 HgCdTe 红外焦平面探测器芯片正常工作提供保证和支撑。

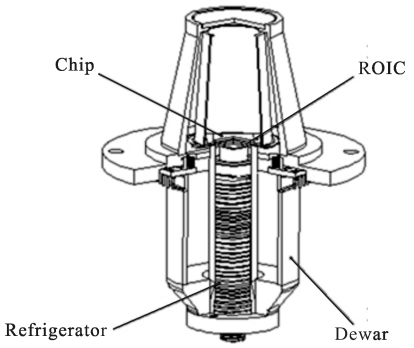

图 1 节流制冷中波红外 320×256 焦平面探测器组件结构图

Fig.1 Structure of JT cooling MW 320×256 IRFPA detector assembly

光伏探测器芯片与读出电路芯片互连采用倒装互连工艺，通过铟柱将探测器芯片上的每一个光伏二极管与读出电路上的单元电路对应互连，如图2所示。红外辐射光信号由 HgCdTe 探测器芯片上的 320×256 光电二极管阵列所吸收并将其转变为电信号，分别注入到读出电路芯片相对应的输入级，经过积分放大、转移传输、滤波等处理后，由读出电路芯片的输出级驱动输出可供热像整机使用的视频信号[7]。

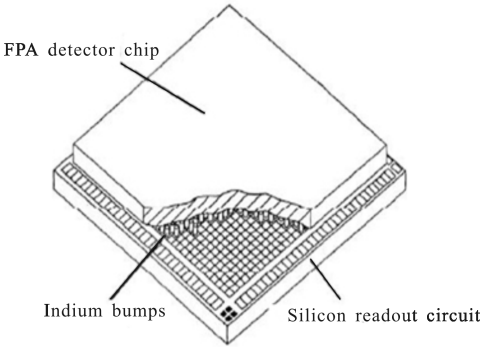

图 2 焦平面探测器芯片与硅读出电路铟柱互连结构

Fig.2 Interconnection structure of FPA detector chip and silicon readout circuit connected by indium bumps

2 芯片背减薄

以碲镉汞薄膜材料制备的探测器芯片与硅工艺制备的读出电路之间由于材料膨胀系数不同，在快速启动制冷时，探测器芯片上产生应力和形变[8-9]。此外，杜瓦冷头部分结构和材料选择难以做到与探测器芯片和读出电路的完美匹配，因而提高芯片自身抵抗应力和形变的能力是研究的重要方向之一[10]。

基于常温边界条件下，对早期研制的中波 320×256 焦平面探测器组件芯片形变和应力状态进行有限元分析，分析结果如图 3 和图 4 所示，芯片最大形变为 7.1 μm，总应力最大为 0.445 E9Pa。

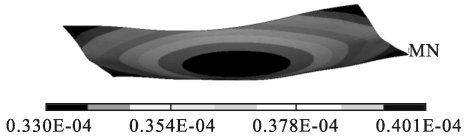

图 3 早期研制的中波 320×256 焦平面探测器组件芯片形变

Fig.3 Chip deformation of early developed MW 320×256 FPA detector assembly

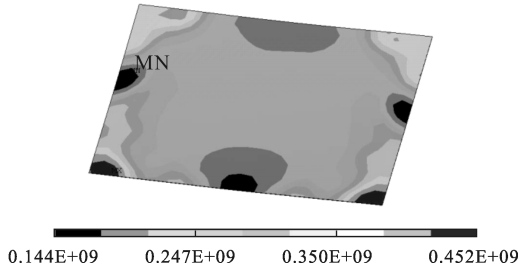

图 4 早期研制的中波 320×256 焦平面探测器组件芯片应力图

Fig.4 Chip stress chart of early developed MW 320×256 FPA detector assembly

当芯片(包含碲锌镉衬底)厚度较大时,其自身强度大,快速制冷下杜瓦冷头结构发生形变时,芯片本身不能跟随形变,形变应力加载于芯片与硅读出电路之间的铟柱、金属电极等连接结构,越靠近边缘应力越大,长期反复的应力加载必然导致探测器芯片四周像元的连接可靠性下降,从而出现盲元,见图5,图 6(a)为信号图,图(b)为盲元图。

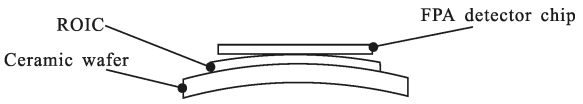

图 5 形变应力施加于铟柱连接部位

Fig.5 Deformation stress is applied on indium bumps

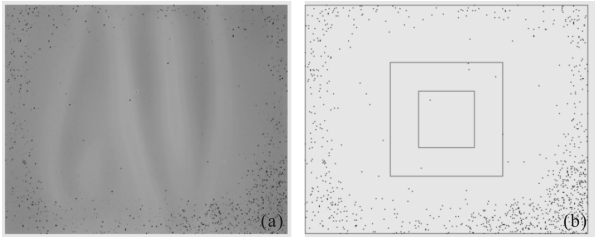

图 6 芯片在长期反复应力加载下芯片四周盲元显著增加

Fig.6 Long-term deformation stress applied on chip, bad pixel of chip increased obviously

当探测器芯片厚度减到很薄时,芯片本身能够跟随形变,在芯片与读出电路之间的背填充胶加固了铟柱、金属电极等连接结构,不会出现芯片与读出电路之间像元连接失效的问题。当芯片形变或应力过大时,沿芯片材料生长中解理面产生裂纹成为主要的芯片失效现象,图 7 中,图(a)为信号图,图(b)为盲元图。

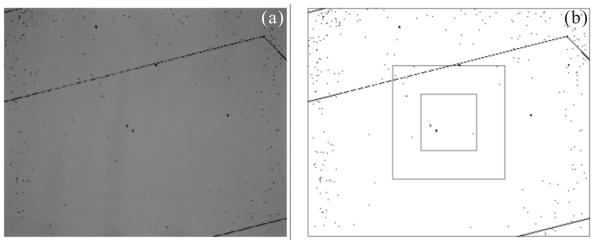

图 7 芯片沿材料解理面产生裂纹

Fig.7 Chip cracked along material cleavage plane

由于材料和结构的限制,快速启动制冷时在探测器芯片上产生的应力和形变不可避免,只能通过减薄芯片提高其柔韧性,当发生形变时芯片伴随结构形变,显著减小了铟柱所随的应力,如图 8 所示,从而减小在边缘像元处产生损伤引起的盲元和裂纹。

图 8 当芯片减薄至足够厚度时,芯片随读出电路一起形变

Fig.8 Chip would deform with ROIC together, when chip thickness is decreased enough

在探测器芯片与硅读出电路之间,采用流动性好、低温下稳定的填充胶进行填充加固,当加工去除芯片衬底碲锌镉材料时,可以防止加工应力导致芯片与读出电路之间像元连接失效。芯片背减薄采用了机械加工结合化学腐蚀的方法,即保证了减薄厚度的控制又减小了加工应力,从而减小由于应力传递至 PN 结产生像元损伤,减薄前后芯片盲元对比见图 9。

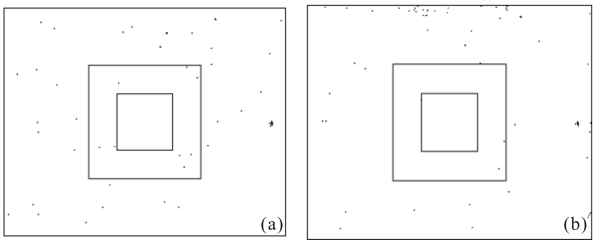

图 9 芯片减薄后盲元无明显变化

Fig.9 Bad pixel has no obvious change for chip after thickness reducing

在测试杜瓦中采用液氮冲击快速冷却探测器芯

片所产生的形变应力环境更为苛刻，可以作为评估芯片减薄质量的方法之一，经过工艺优化后的背减薄芯片，在测试杜瓦中经历 120 次液氮冲击后性能稳定,信号图和盲元图见图 10。

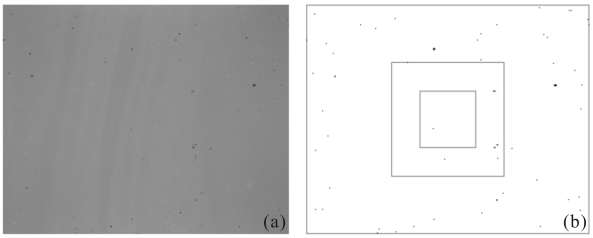

图 10 经历 120 次液氮冲击后减薄芯片的盲元未出现变化

Fig.10 Bad pixel has no obvious change for thickness reducing chip after 120 times liquid nitrogen cool down shock

3 杜瓦冷头结构匹配

虽然由于探测器芯片、读出电路和杜瓦冷头结构等材料限制，在快速制冷启动时不可避免要产生形变和应力,但可以通过杜瓦冷头结构、材料、粘接胶的调整将形变和应力控制在最小范围。

调整杜瓦冷头结构的膨胀匹配，通常需要增加结构零件,减小快速制冷启动时的温度梯度。增加结构零件意味着杜瓦冷头热质量的增加，不利于快速制冷启动,如图 11 所示。

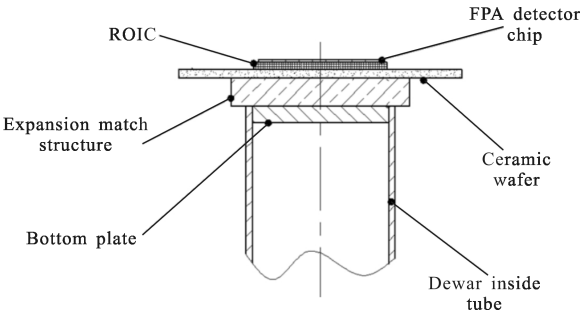

图 11 常规结构冷头膨胀匹配结构

Fig.11 Cold head expansion match of conventional structure

因此在不增加杜瓦冷头结构零件的前提下,通过零件结构和材料的优化达到了降低芯片形变应力的目的。基于常温边界条件下,对探测器组件芯片形变和应力状态进行有限元分析,分析结果如图 12 和图 13 所示,芯片最大形变为 1.6 μm,总应力最大为 0.445E9 Pa。

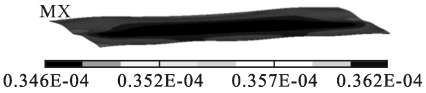

图 12 结构和材料优化后芯片形变显著减小

Fig.12 Chip deformation is reduced significantly, after structure and material are optimized

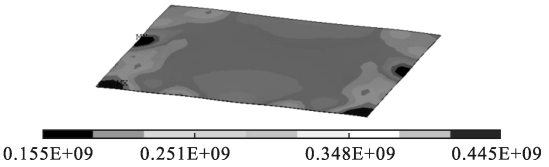

图 13 零件结构和材料优化后芯片应力减小

Fig.13 Chip stress is reduced significantly, after parts structure and material are optimized

4 快速制冷启动下的芯片可靠性试验

国外采用多次制冷启动作为考核探测器芯片长期工作稳定性的主要方法之一,如法国 Sofradir 公司采用斯特林制冷机开关机制冷 2 000 次以上作为评价探测器芯片在制冷启动应力条件下的可靠性[11-12]。而采用液氮向杜瓦内管直接注入冷却芯片的方式其制冷时间(小于 20 s)远小于制冷器的制冷启动时间,芯片所承受的温度应力要更大[13-14]。为缩短试验时间,采用液氮冲击制冷作为考核探测器组件耐受温度冲击应力的方法之一,两只样品经历 2 000 次液氮冲击试验后,其盲元数和盲元分布基本未发生变化,试验结果如图 14 和图 15 所示，其主要光电性能未发生明显变化,见表 1。

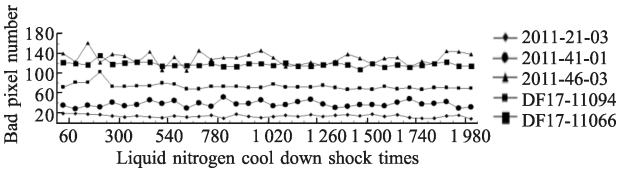

图 14 2 000 次液氮冲击后探测器盲元数统计

Fig.14 FPA detector bad pixel statistic result after 2 000 times liquid nitrogen cool down shock

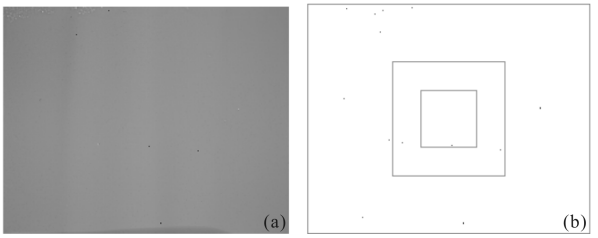

图 15 2 000 次液氮冲击后探测器组件盲元数未出现变化

Fig.15 There is no significant change for FPA detector's bad pixel, after 2 000 times liquid nitrogen cool down shock

表 1 2 000 次液氮冲击后探测器主要光电性能(由于测试系统固有误差,冲击前后光电性能变化不超过 10%均为正常)

Tab.1 Performance of FPA detector, after 2 000 times liquid nitrogen cool down shock (consider 10% tolerance of FPA test system, test result is reasonable)

		D *	NETD	Non-uniformity of respon-sively	Bad pixel number
Sample 1#	Before cool down shock	6.00E11	7.69	4.94	122
	After cool down shock	5.98E11	7.72	4.59	115
Sample 2#	Before cool down shock	5.81E11	7.97	5.82	72
	After cool down shock	5.92E11	7.83	5.59	70

5 结 论

通过芯片背减薄结合杜瓦冷头膨胀匹配的优化，既提高了探测器芯片在快速制冷下的应力承受能力,同时也降低了芯片所承受的应力形变,综合两项措施，大幅度提高了探测器组件的长期工作可靠性和稳定性。

随着快速制冷启动的中波 320×256 红外焦平面探测器组件的技术成熟，必将推动二代红外焦平面探测器组件在红外成像制导技术领域的广泛应用。

参考文献:

[1] Tao Yu, Zhang Zhiquan. Military application of staring infrared focal plane subassembly [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2001, 30: 70-73. (in Chinese)

[2] Xavier B, Philippe T. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance [C]//SPIE, 2008: 69400.

[3] Marianne M, Xavier B, Philippe T. IR detector dewar and assemblies for stringent environmental conditions [C]//SPIE, 2007: 6542-6585.

[4] Gong Haimei, Zhang Yani, Zhu Sangen, et al. Study of reliable packaging for IRFPA dector [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2009, 28(2): 85-89. (in Chinese)

[5] Fang Guangyu, Gong Haimei, Li Yanjin, et al. Temperature-cycling-reliability of IRFPA device [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 8: 607-610. (in Chinese)

[6] Rolin K A. Infrared focal plane array storage life assessment by accelerated aging[J]. ***Qualitity and Reliability Engineering International***, 1998, 14(6): 425-432.

[7] Rogalski A, Chrzanowski K. Infrared devices and techniques [J]. ***Pto-Electronics Review***, 2002, 10(2): 111-136 .

[8] Li Yanjin, He Li, Yang Jianrong, et al. Study on thermal mismatch stress of HgCdTe infrared focal plane array [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2008, 27 (6): 409-412. (in Chinese)

[9] Li Yanjin. Method of reducing thermal mismatch stress in infrared focal plane assembly [J]. ***Science and Technology Review***, 2011, 29(8): 27-30. (in Chinese)

[10] Qiu Hong, Cao Lingxia. InSb IRFPA back lpping technology [J]. ***Laser and Infrared***, 2001, 31(5): 286-287. (in Chinese)

[11] Xavier B, Philippe T. IR detectors life cycle cost and reliability optimization for tactical applications [C]//SPIE, 2006: 63950D.

[12] Brenière X, Manissadjian A, Vuillermet M, et al.Reliability optimization for IR detectors with compact cryo-coolers[C]// SPIE, 2005: 187.

[13] Tian Liping, Zhu Yingfeng, Liu Xiangyun, et al. Back-thining on reliability influence for MW 320 ×256 MCT IRFPA [J]. ***Infrared Technology***, 2013, (10): 629-631. (in Chinese)

[14] Deng Gang, Han Hengli, Zhong Sicheng. Backside-illuminated charge-coupled devices (CCDS) thinning technology [J]. ***Electronoic Science and Technology***, 2014, 27(2): 68-70. (in Chinese)