

文章编号: 1672-8785(2022)02-0022-06

2048×2048 HgCdTe 红外焦平面杜瓦冷头 热应力有限元分析

熊 雄 胡明灯 吴建乐 段 煜 周勇强 杜 宇 毛剑宏

(浙江珏芯微电子有限公司, 浙江 丽水 323000)

摘 要: 利用有限元方法对 2048×2048 (15 μm) 红外焦平面杜瓦冷头的原始结构以及加入的平衡层结构进行了分析。在陶瓷基板下方增加膨胀系数较小的平衡层, 对探测器芯片变形及热应力有一定的缓解作用。通过增大 AlN 平衡层上表面的直径, 减小了芯片中心以外的翘曲范围, 缓解了应力过于集中的问题。当直径超过芯片对角长度时, 最大热应力骤减, 最终趋于稳定; 芯片变形量随之迅速减小。在直径为 36 mm 时, 达到最小值(6.86 μm); 随后缓慢增加并趋于稳定。当 AlN 平衡层的直径超过芯片对角长度后, AlN 平衡层的厚度对芯片变形的影响开始减小。通过加入 AlN 平衡层能够有效改善大面阵焦平面探测器芯片的变形及热应力, 同时通过调节 AlN 平衡层的结构, 可进一步优化探测器杜瓦组件的可靠性。

关键词: 红外探测器; 杜瓦封装; 有限元分析; 热应力

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.02.004

Finite Element Analysis of Thermal Stress of 2048×2048 HgCdTe Infrared Focal Plane Dewar Cold Head

XIONG Xiong, HU Ming-deng, WU Jian-le, DUAN Yu,

ZHOU Yong-qiang, DU Yu, MAO Jian-hong

(Zhejiang Juexin Microelectronics Co., Ltd., Lishui 323000, China)

Abstract: The original structure and the added balance layer structure of the 2048×2048 (15 μm) infrared focal plane dewar cold head are analyzed by finite element method. Adding a balance layer with a lower expansion coefficient under the ceramic substrate can relieve the deformation and thermal stress of the detector chip to a certain extent. By increasing the diameter of the upper surface of the AlN balance layer, the warpage range beyond the center of the chip is reduced, and the problem of excessive stress concentration is alleviated. When the diameter exceeds the diagonal length of the chip, the maximum thermal stress decreases sharply, and finally tends to be stable; the deformation of the chip decreases rapidly. When the diameter is 36 mm, it

收稿日期: 2021-11-03

作者简介: 熊雄(1986-), 男, 湖南长沙人, 工程师, 主要从事红外探测器封装技术研究。

E-mail: xiongxiong0423@163.com

reaches a minimum of $6.86\ \mu\text{m}$; then it increases slowly and tends to be stable. When the diameter of the AlN balance layer exceeds the diagonal length of the chip, the influence of the thickness of the AlN balance layer on the chip deformation begins to decrease. The deformation and thermal stress of the large area array focal plane detector chip can be effectively improved by adding an AlN balance layer. The reliability of the detector Dewar component can be further optimized by adjusting the structure of the AlN balance layer.

Key words: infrared detector; dewar package; finite element analysis; thermal stress

0 引言

随着空间红外遥感技术的不断发展以及应用需求的不断提高, 可提高遥感器空间分辨率的大规格红外焦平面技术受到了越来越多的关注^[1-2], 比如 $2\text{k}\times 2\text{k}$ 、甚至更大的 $4\text{k}\times 4\text{k}$ 红外焦平面阵列。同时, 芯片的性能也迎来了更大的挑战^[3]。以碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦组件为例, 其冷头主要包含探测器芯片、Si 读出电路和陶瓷基板等。在红外探测器服役过程中, 因其各层封装材料的热膨胀系数 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) 不匹配, 结构间互相约束而不能自由变形, 会在组件中产生一定程度的热机械应力及翘曲变形^[4-5]。芯片尺寸的不断增大会加剧这种现象, 严重时会导致材料出现裂纹损坏, 从而加速探测器组件失效^[6-7]。

目前对红外焦平面低温热失配的研究大多集中在小面阵及长线列方面^[8-10], 针对大面阵尤其是对尺寸大于 $30\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$ 的焦平面研究不多。基于此, 本文以 2048×2048 ($15\ \mu\text{m}$) 红外焦平面探测器为例, 在杜瓦冷台与陶瓷基板之间加入平衡层, 利用有限元对加入平衡层的杜瓦冷头的热应力进行仿真分析, 并对加入的平衡层结构进行优化, 为新一代大面阵红外探测器杜瓦组件设计提供一定的理论依据。

1 模型建立

1.1 杜瓦冷头模型的优化

图 1 为加入平衡层的探测器杜瓦冷头结构的剖面图。其中, 2048×2048 ($15\ \mu\text{m}$) 红外焦平面探测器芯片的尺寸为 $30.72\ \text{mm}\times$

$30.72\ \text{mm}$, Si 读出电路的尺寸为 $35\ \text{mm}\times 35\ \text{mm}$ 。各叠层结构之间采用低温胶粘接, 低温胶的厚度在 $0.01\ \text{mm}\sim 0.1\ \text{mm}$ 之间。根据 320×256 、 640×512 等焦平面杜瓦组件的工程化实践经验, 并综合考虑材料的 CTE、热质量、真空放气以及可加工性等因素, 平衡层采用 AlN、Invar、Kovar 三种材料进行仿真和对比分析。

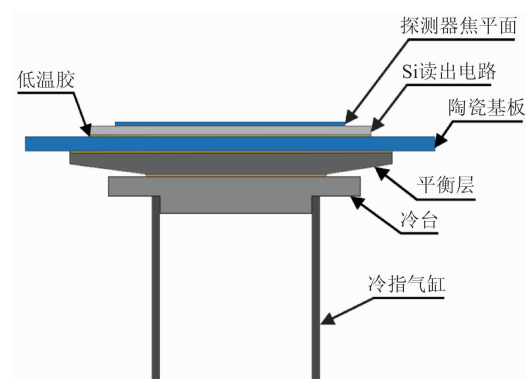


图 1 加入平衡层的探测器杜瓦冷头的剖面图

1.2 有限元模型的建立

由于模型的几何对称性, 选取四分之一模型进行计算。有限元网格划分如图 2 所示。在模型对称面上施加对称边界条件, 同时根据制冷红外探测器的实际工作状态, 在冷台底面施加温度激励载荷。初始温度为 $295\ \text{K}$, 此温度下对应结构处于零应力状态; 结束温度为 $77\ \text{K}$ (液氮温度); 采用斜坡加载方式。整个过程中冷指基座几乎不发生位置和形状变化, 因此对冷指基座底面施加零位移约束。

本文的有限元计算中, 将各层材料视为各向同性, 即在计算过程中不考虑材料属性随温度的变化。其中相关材料的低温参数见表 1。

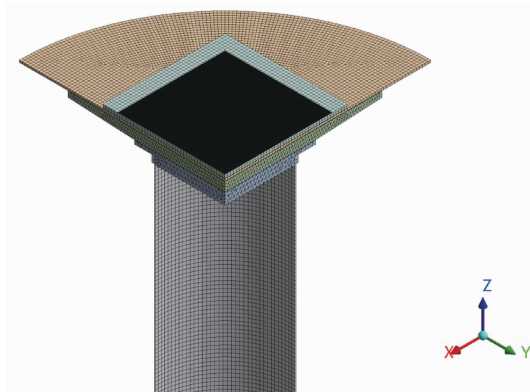


图2 有限元模型结构

表1 相关材料参数

材料名称	弹性模量/GPa	热膨胀系数/ $(\times 10^{-6}/K)$	泊松比
铋镉汞	60	5.0	0.3
硅	130	1.15	0.28
陶瓷基板	420	3.0	0.22
AlN	308	1.75	0.2
Invar	200	1.6	0.303
Kovar	138	6.4	0.32
低温胶	38	82	0.17
TC4 (冷指气缸)	105	96	0.31

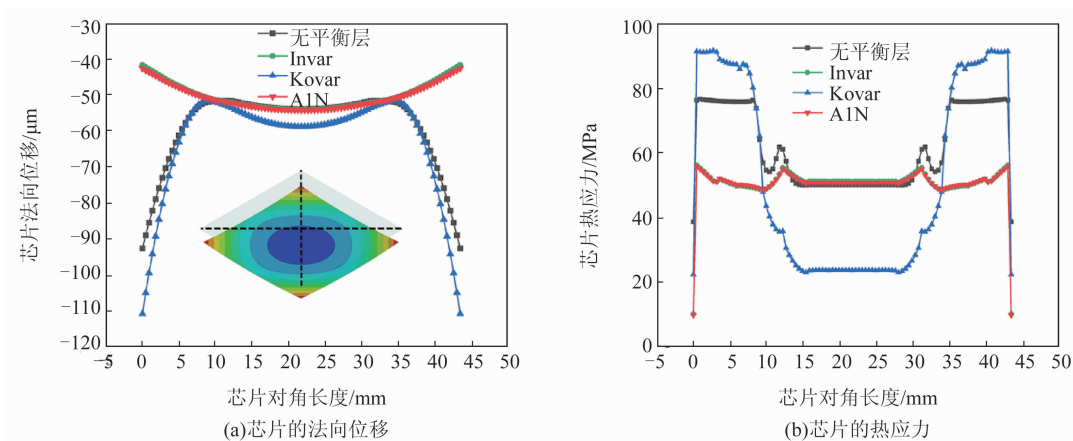


图3 加入不同材料平衡层时芯片的对角法向位移及热应力分布

2 有限元结果及分析

2.1 平衡层对芯片热应力的影响

杜瓦冷头各叠层结构因温度变化会发生不同速率的膨胀和收缩,同时由于各层结构的互相约束,探测器芯片会产生应力和变形。图3(a)所示为加入不同材料平衡层时芯片的对角法向位移。当加入的平衡层材料为AlN、Invar时,芯片的变形量明显比无平衡层和加入Kovar平衡层时小。同时,如图3(b)所示,当平

衡层材料为AlN、Invar时,芯片的热应力分布更加均匀。考虑到Invar材料的热质量明显高于AlN,这会增加制冷机的负载,延长红外探测器组件的降温时间,因此选取AlN材料作为平衡层进行后续分析。

为了保证红外探测器在低温工作下的响应均匀性,对焦平面的温度均匀性进行分析。图4所示为AlN平衡层下探测器芯片/基板的温度场分布。可以看到,焦平面的温度均匀性为

0.49 K, 表现良好。

图 5 所示为加入 AlN 平衡层前后探测器的热变形情况。无平衡层时如图 5(a)所示, 探测器的芯片/电路/基板结构呈现中间凸起的变形; 加入 AlN 平衡层后, 探测器的芯片/电路/基板结构中间向下凹陷, 同时边缘处向上翘起, 具体如图 5(b)所示。值得注意的是, 由于加入了 AlN 平衡层, 在冷指气缸与冷台较近区域出现了低变形区。

图 6 为加入 AlN 平衡层前后探测器芯片的法向变形和应力分布云图。如图 6(a)和图 6(c)所示, 无平衡层时, 因为陶瓷基板的热膨胀系数大于硅读出电路, 所以收缩明显高于硅电路, 产生向上凸起的变形。探测器芯片的最大变形量约为 $41\ \mu\text{m}$ 。由于基板下方与冷台接触, 且接触面积小于芯片尺寸, 又因为冷台材质的低膨

胀特性, 通过基板与电路间接约束芯片部分区域的变形, 因此在芯片中心区域出现与冷台近似大小的圆形低应力区域, 而圆形区域外应力集中出现。图 6(b)和图 6(d)所示为加入 AlN 平衡层后芯片的应力变化。优化后, 芯片的最大热应力从 $99.6\ \text{MPa}$ 降至 $58.93\ \text{MPa}$ 左右, 芯片上冷台等大的低应力区消失, 仅剩部分环形的略高应力区, 但应力值大小差异不大。

2.2 AlN 平衡层结构对芯片热应力的影响

基于上述讨论, 进一步对 AlN 平衡层结构进行分析。图 7 为 AlN 平衡层结构的示意图。根据前面的分析, 未加入平衡层时, 冷台通过与陶瓷基板接触的区域约束上层结构变形, 导致芯片出现应力分布不均匀现象。因此需进一步调整平衡层的厚度以及平衡层与陶瓷基板的接触面积, 从而分析芯片的相关变形及

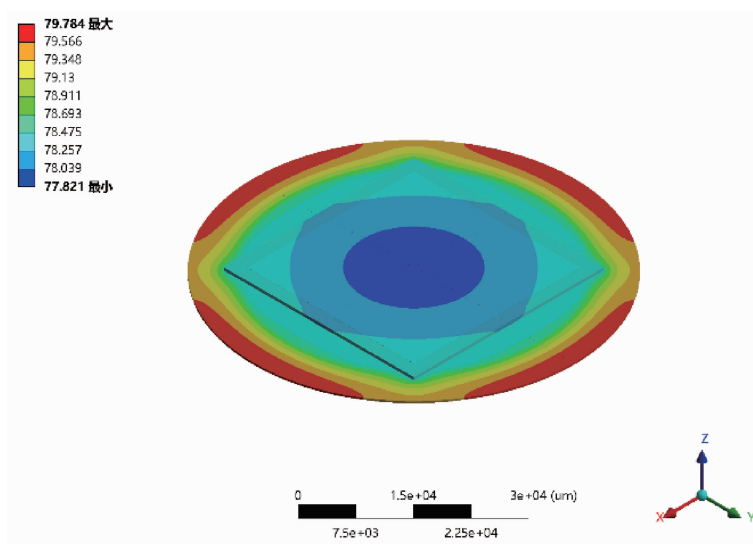


图 4 AlN 平衡层下探测器芯片/基板的温度场分布

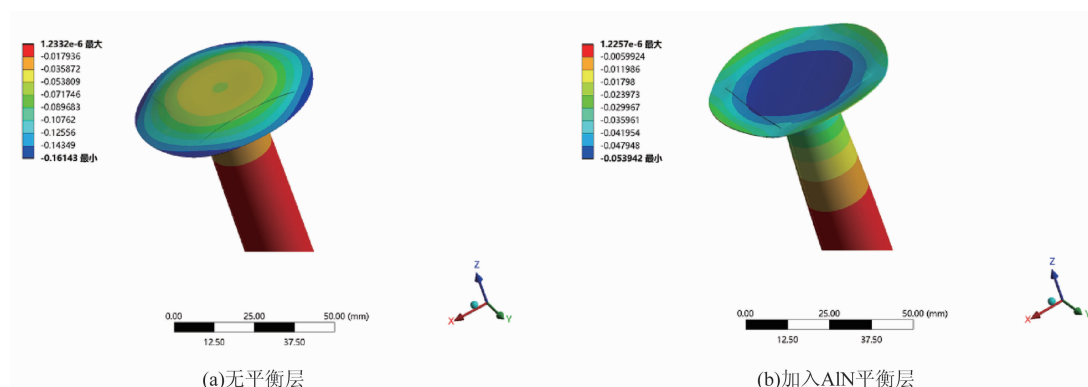


图 5 加入 AlN 平衡层前后探测器的热变形情况

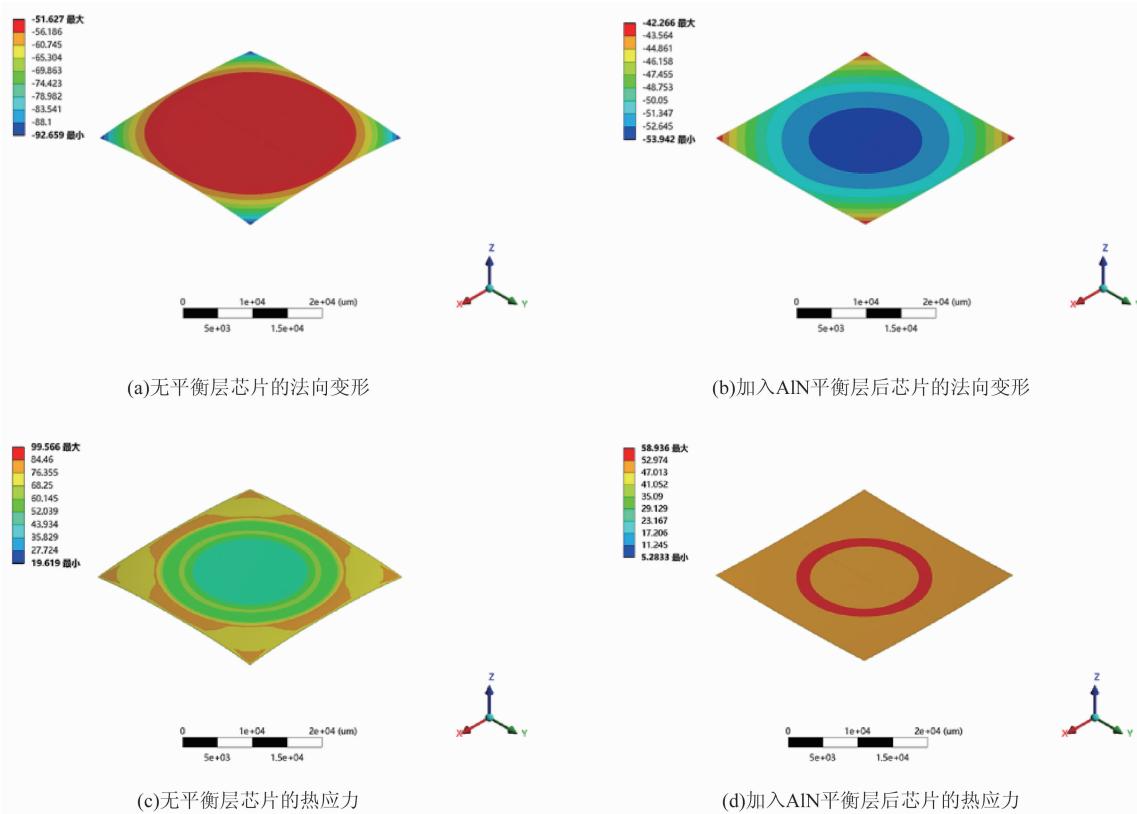


图6 芯片的法向变形及热应力云图

应力情况。

图7中, AlN平衡层的厚度为 $H(h_1 + h_2)$, 通过改变 h_1 大小调节 H ; 在保证平衡层的厚度 H 不变的情况下, 通过改变AlN平衡层上表面的直径 D , 调整其与陶瓷基板的接触面积。

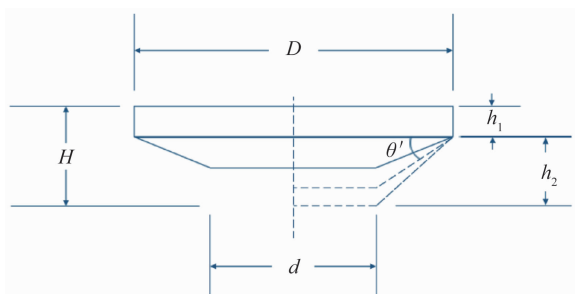


图7 AlN平衡层结构的示意图

图8为AlN平衡层不同直径 D 对芯片变形和热应力的影响。从图8(a)中可以看到, 随着直径 D 增大, 芯片中心以外发生向下弯曲的区域减小。结合上文分析, 增加的直径 D 扩大了可约束芯片变形的面积, 直径 D 接近或超过芯片对角长度(43.44 mm)后, 整体变形

由向上凸起转为向下凹陷, 芯片变形量明显减小。同时如图8(b)所示, 热应力分布也逐渐均匀。通过调整与陶瓷基板的接触面积与芯片的相对大小, 可以改善芯片的变形及热应力情况。

图9(a)为芯片最大热应力及变形量随AlN平衡层上表面直径 D 的变化曲线。可以看到, 当直径 D 等于冷台直径时, 芯片变形及热应力最大。随着AlN平衡层的直径 D 增大到45 mm, 热应力骤减并最终稳定至58.93 MPa。而芯片的变形量则随之迅速减小, 在直径为36 mm时达到最小值(6.86 μm); 随后缓慢增加, 最终趋于稳定。图9(b)中采用的AlN平衡层直径 D 为45 mm。随着AlN平衡层的厚度 h_1 增大, 芯片的最大热应力逐渐减小, 在厚度为0.8 mm时最小; 随后缓慢上升, 最终趋于稳定。可以看到, 在AlN平衡层的厚度 h_1 超过0.2 mm后, 芯片的变形量逐渐稳定。当AlN平衡层的直径超过芯片对角长度后, AlN平衡层的厚度对芯片变形的影响开始减弱。

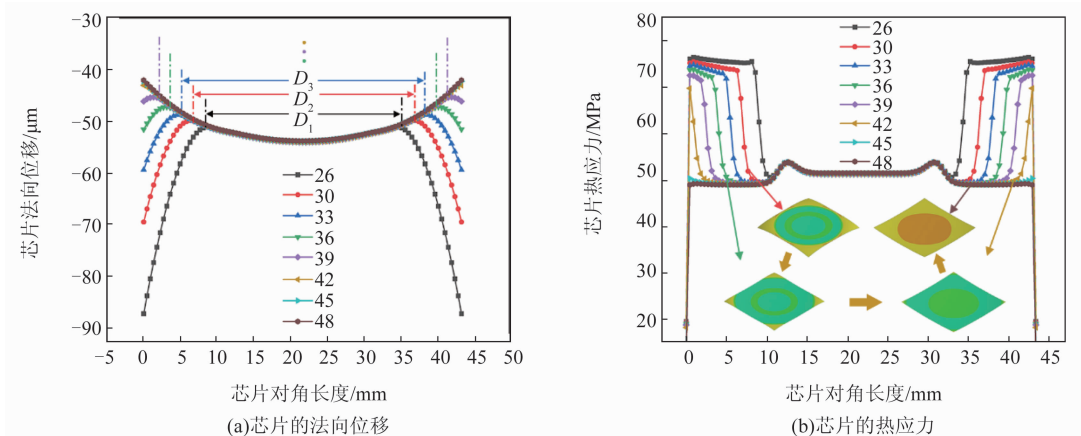


图 8 不同 AlN 平衡层直径 D 对芯片对角位移及热应力的影响

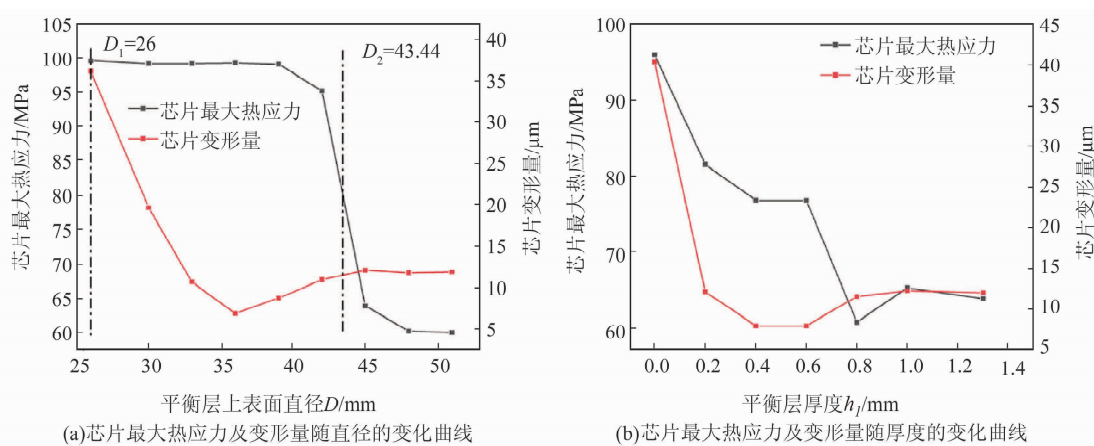


图 9 AlN 平衡层直径 D 及厚度 h_1 对芯片的影响

综上所述, 通过选择合适的平衡层厚度及直径 D , 可对杜瓦冷头的可靠性作进一步优化。其中, 平衡层上表面直径对芯片的影响要大于平衡层厚度。在设计优化方面可重点关注此因素。

3 结论

本文通过对 2048×2048 ($15 \mu\text{m}$) 红外焦平面探测器杜瓦冷头原始结构以及加入的 AlN 平衡层结构的有限元分析发现, 在加入 AlN 平衡层后, 探测器芯片的变形量和最大热应力明显降低。通过增大 AlN 平衡层的上表面直径, 减小了芯片中心以外的翘曲范围, 并缓解了应力过于集中的问题。当直径超过芯片对角长度时, 最大热应力骤减, 最终稳定至 58.93 MPa ; 芯片变形量随之迅速减小, 在直径为 36 mm 时达到最小值 ($6.86 \mu\text{m}$), 随后缓慢增加并趋于稳定。随着 AlN 平衡层的厚度 h_1 增加,

芯片的最大热应力逐渐减小, 随后缓慢上升, 最终趋于稳定。AlN 平衡层的厚度 h_1 超过 0.2 mm 后, 芯片的变形量逐渐稳定。

加入 AlN 平衡层能够有效改善大面阵焦平面探测器芯片的变形及热应力情况。通过调节 AlN 平衡层的结构, 可进一步优化探测器杜瓦组件的可靠性。本文仅从有限元仿真层面对大面阵杜瓦冷头的热应力进行分析, 下一步将通过设计比对实验来积累数据, 并对仿真模型进行优化以提高精度, 使其更好地指导工程应用。

参考文献

[1] Chen X, Dong F, He K, et al. Warpage and Thermal Stress Analysis of Hybrid Infrared Focal Plane Assembly [C]. SPIE, 2012, 8419: 84191B.

(下转第 39 页)

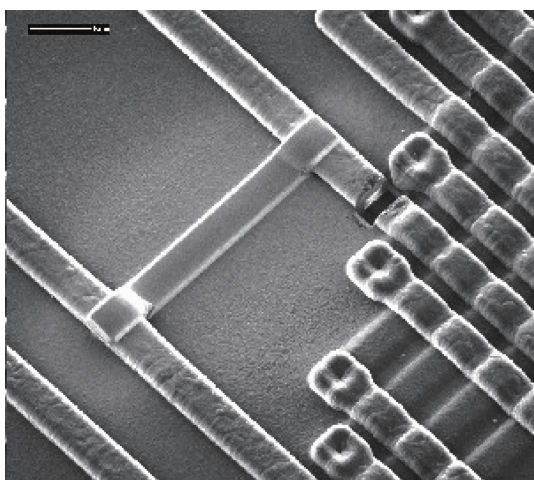


图 9 基于 FIB-SEM 的电路修补图

的产生原因。详细介绍了问题像元的定位及解剖, 从而改进工艺和提升产品质量。(4) 修复问题电路, 可大大降低电路设计及加工成本。随着 FIB-SEM 双束系统分辨率与加工精度的不断提升, 可解决更多其他测试设备无法表征的问题。该系统也将在红外焦平面探测器的研制过程中扮演越来越重要的角色。

(上接第 27 页)

- [2] 张伟婷, 陈星, 叶振华. 大面阵红外探测器的发展现状与趋势 [C]. 苏州: 红外、遥感技术与应用研讨会, 2019.
- [3] Starr B, Mears L, Fulk C, et al. RVS WFIRST Sensor Chip Assembly Development Results [C]. *SPIE*, 2016, **9915**: 99150Q.
- [4] Rogalski A. Recent Progress in Infrared Detector Technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 136–154.
- [5] Chen X, He K, Wang J, et al. Thermal Cycling Reliability of Indirect Hybrid HgCdTe Infrared Detectors [C]. *SPIE*, 2013, **8907**: 890749.
- [6] Geng D, Zheng K, He Y. Fracture Analysis of InSb Focal Plane Arrays Chip under Thermal Shock [C]. *SPIE*, 2014, **9300**: 93002I.

参考文献

- [1] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. 10 μm 像元间距 1024 \times 1024 中波红外探测器研制进展 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(8): 915–920.
- [2] 马向国, 刘同娟, 顾文琪. 聚焦离子束技术及其在微纳加工技术中的应用 [J]. *真空*, 2007, **44**(6): 74–78.
- [3] Kim C S, Ahn S H, Jang D Y. Review: Developments in micro/nanoscale fabrication by focused ion beams [J]. *Vacuum*, 2012, **86**(8): 1014–1035.
- [4] 罗浒. 聚焦离子束电子束系统集成及应用研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- [5] 程雨, 李忠贺, 谢珩, 等. InSb 红外焦平面探测器十字盲元问题的研究 [J]. *红外*, 2021, **42**(4): 15–20.
- [6] 车羿. 失效分析在半导体制造中的原理及应用 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [7] Zhang L, Li Y, Zhang J, et al. Numerical Analysis of Temperature and Stress Fields in Hybrid Indium Antimonide Arrays Detector with Laser Irradiation [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, **51**(8): 1–16.
- [8] Zhang H, Lu H. Analysis of the Thermal Stress of IRFPA Assembly Using FEM [C]. *SPIE*, 2008, **6835**: 68350J.
- [9] Zhang W T, Ye Z H, Chen X. A FEA Study on Thermal Stress of HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays Detector [C]. *SPIE*, 2018, **10624**: 106241X.
- [10] 刘伟, 张冬亮, 闫杰, 等. 超长线列碲镉汞探测器组件的冷头结构设计 [J]. *红外*, 2021, **42**(6): 12–18.