

文章编号: 1672-8785(2021)04-0025-05

大面阵碲镉汞芯片的热应力分析与优化

付志凯 李雪梨 张 磊 吴 卿 王成刚

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着红外焦平面探测器面阵规模的不断扩大, 大面阵碲镉汞芯片的热应力进一步恶化, 受温度冲击后更容易产生损伤, 进而直接影响探测器的使用, 甚至导致探测器失效。这已成为大面阵探测器生产工艺亟需解决的问题。借助仿真手段研究了大面阵碲镉汞芯片的低温损伤原因, 并结合小面阵探测器进行了对比分析。结果表明, 钢柱与碲镉汞接触边缘部位因应力集中明显而成为损伤的起源点。不同材料的选择以及结构尺寸的设计有助于降低大面阵碲镉汞芯片的热应力和提高其工作可靠性。

关键词: 红外探测器; 大面阵探测器; 热应力

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.04.005

Thermal Stress Analysis and Optimization of Large Array HgCdTe Chip

FU Zhi-kai, LI Xue-li, ZHANG Lei, WU Qing, WANG Cheng-gang

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: With the continuous expansion of the array scale of infrared focal plane detectors, the thermal stress of large array HgCdTe chips becomes worse. The damage is prone to occur after temperature shock, which will directly affect the use of the detectors, and even lead to the failure of the detectors. This has become an urgent problem to be solved in the production process of large array detectors. In this paper, the damage reason of large array HgCdTe chips at low temperature is studied by means of simulation, and the comparison analysis is made with small array detectors. The results show that the stress concentration locates at the edge of indium column and HgCdTe, which is the origin of the damage. The selection of different materials and the design of the structure sizes are helpful to reduce the thermal stress and improve the reliability of large array HgCdTe chips.

Key words: infrared detector; large array detector; thermal stress

0 引言

随着制冷型红外探测器的飞速发展, 它的使用越来越广泛, 并在航天、国防和工业领域

持续得到关注^[1]。红外焦平面探测器的规模也越来越大, 从传统的 320×256 元开始不断提高。国内现已实现 1024×1024 元和 $2048 \times$

收稿日期: 2020-10-26

作者简介: 付志凯(1988-), 男, 河北石家庄人, 工程师, 主要从事红外探测器杜瓦封装结构设计与仿真研究。
E-mail: fuzhikai258@126.com

2048 元等大面阵探测器的工程化。国际上的先进探测器厂商也已实现了 4096×4096 元超大面阵探测器的生产和应用^[2-3]。在大面阵探测器的研制过程中,提高探测器的可靠性以及保证产品的工作一致性,逐步成为生产中的一个重要问题^[5]。

红外探测器杜瓦部件主要由金属杜瓦和探测器混成芯片组成。其中,探测器混成芯片装配于杜瓦冷头(见图 1)。杜瓦冷头主要由探测器混成芯片、垫片、陶瓷框架以及结构件等组成,如图 2 所示。红外焦平面探测器由多层结构组合而成。碲镉汞芯片与硅读出电路之间通过钢柱实现焊接连通,从而形成探测器混成芯片(见图 3)。碲镉汞芯片、硅读出电路和钢柱之间充满填充胶,以提高芯片和电路的连接可靠性^[6]。工作时红外探测器的温度从常温降低到 80 K 以下。由于探测器与冷头中各材料的低温参数(如线膨胀系数、杨氏模量等)存在差异,各组成材料之间会出现低温下的失配现象并产生较大的内应力,容易导致碲镉汞芯片出现裂纹等损伤。这是红外碲镉汞芯片失效的主要原因之一^[7-8]。

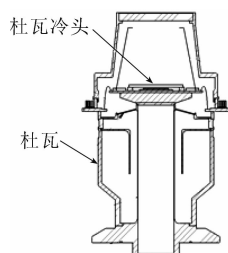


图 1 红外探测器杜瓦示意图

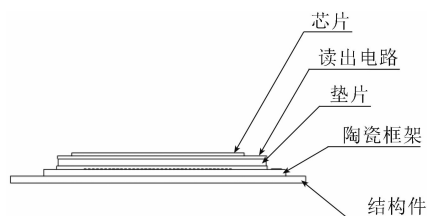


图 2 杜瓦冷头的示意图

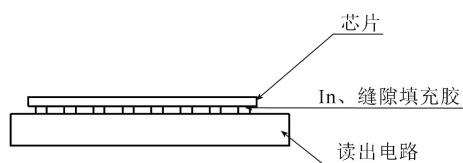


图 3 探测器混成芯片的示意图

本文以 320×256 元(像元间距为 $30 \mu\text{m}$)和 1280×1024 元(像元间距为 $25 \mu\text{m}$)红外焦平面探测器为例,分析讨论了其组成结构及材料,并借助有限元仿真手段研究对比了大面阵红外焦平面探测器的低温应力分布。然后分析了造成碲镉汞芯片损伤的热应力的形成原因和机理,并通过优化冷头材料和结构设计改善了碲镉汞芯片应力。

1 模型建立

作为红外焦平面探测器芯片的承载结构,杜瓦冷头的结构组成与探测器芯片的热应力关系密切。本文建立了 320×256 元($30 \mu\text{m}$)和 1280×1024 元($25 \mu\text{m}$)焦平面探测器模型(见图 4)。表 1 列出了两种探测器的组成结构及材料。

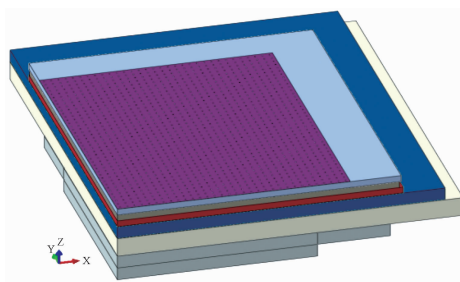


图 4 1280×1024 元($25 \mu\text{m}$)焦平面探测器模型

由于碲镉汞芯片厚度、钢柱尺寸、胶层厚度(微米级)与冷头结构的尺寸(毫米级)差异很大,并且钢柱阵列规模庞大而无法进行模型建立和仿真计算,因此在本文的研究过程中采用等效建模方法。表 2 列出了 320×256 元探测器各组成结构的厚度或尺寸。根据模型的对称性,在建立和计算过程中采用 $1/4$ 模型,同时在研究过程中将钢柱和填充环氧树脂简化为一

表 1 两种探测器的组成结构及材料

	碲镉汞芯片	读出电路	钢柱	填充胶	垫片	陶瓷框架	结构件
$1280 \times 1024 (25 \mu\text{m})$	HgCdTe	Si	In	环氧胶	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{AlN} / \text{SiC}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{AlN} / \text{SiC}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{AlN} / \text{SiC}$
$320 \times 256 (30 \mu\text{m})$	HgCdTe	Si	In	环氧胶	—	Al_2O_3	—

表 2 320×256 元探测器各组成结构的厚度或尺寸

探测器组成结构	厚度或尺寸
碲镉汞芯片	10 μm
读出电路	0.5 mm
钢柱	15 μm
填充胶	15 μm
陶瓷框架	0.8 mm

层, 并在此基础上施加边界条件。

模型的主要组成结构包括碲镉汞芯片(厚度为 10 μm)、硅读出电路(厚度为 500 μm)以及钢-胶层(厚度为 15 μm)。本文采用基于一维模型的计算方法, 即在有限元计算中不考虑各层材料参数随温度的变化。其中, 低温 60 K 下的材料参数由中国科学院理化技术研究所测试和提供。

温度变化会引起组成结构的膨胀或收缩。此时结构本身受到内外约束的综合作用, 使碲镉汞芯片产生应力和形变(见图 5)。在低温下, 探测器芯片四个角的应力和形变比较大。在借助有限元开展计算时, 重点关注模型边角部分的仿真计算, 由此可减少模型的计算量。

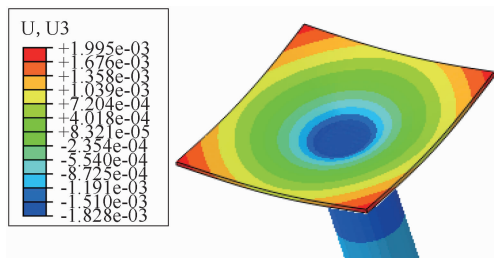


图 5 探测器热变形的示意图

2 仿真计算

2.1 320×256 元碲镉汞芯片的应力分析

320×256 元碲镉汞芯片的尺寸约为 9.57 mm×7.65 mm, 厚度约为 10 μm, 框架厚度为 0.8 mm。图 6 所示为该芯片在低温 60 K 下的热应力分布, 其中最大应力为 81.3 MPa。图 7 所示为该芯片的法向形变, 其中最大值为 2.3 μm。

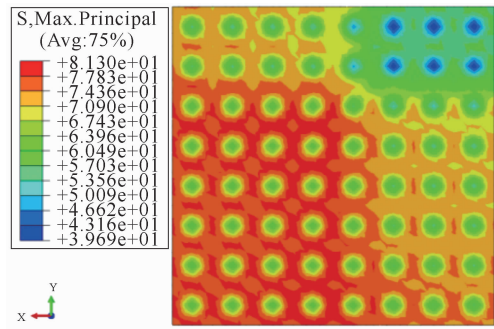


图 6 320×256 元碲镉汞芯片的法向应力

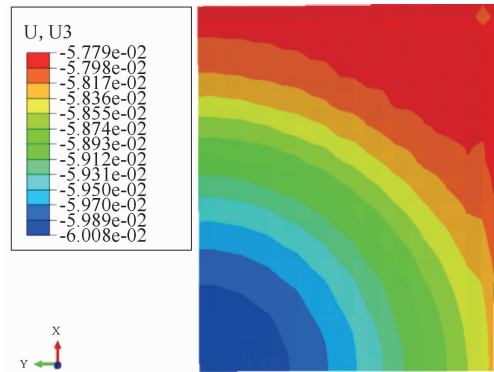


图 7 320×256 元碲镉汞芯片的法向形变

可以看出, 应力集中分布于钢柱与碲镉汞接触边缘部位。

通过结果发现, 钢柱与碲镉汞接触部位的应力集中现象明显, 应力值高于其他部位。这主要是由于钢柱-胶层的弹性模量比碲镉汞材料小, 而且线膨胀系数大导致低温冲击时产生了应力激增和集中。它们作用在钢柱-胶层与碲镉汞芯片接触的外边缘, 使该部位成为芯片失效的危险点。

2.2 1280×1024 元碲镉汞芯片的应力分析

1280×1024 元碲镉汞芯片的尺寸约为 32 mm×25.58 mm, 面积比 320×256 元芯片大 10 倍多。表 3 列出了该探测器各组成结构的材料及厚度(或尺寸)。图 8 所示为碲镉汞芯片在低温 60 K 下的热应力分布, 其中最大主应力为 122.5 MPa。图 9 所示为该芯片的法向形变, 其中最大值为 25.3 μm。可以看出, 应力仍分布于钢柱与碲镉汞接触边缘部位。

表 3 1280×1024 元探测器各组成结构的材料及厚度(或尺寸)

碲镉汞芯片	读出电路	钢柱	填充胶	垫片	陶瓷框架	结构件
10 μm	0.5 mm	10 μm	10 μm	SiC (0.5 mm)	AlN (1.5 mm)	AlN (1 mm)

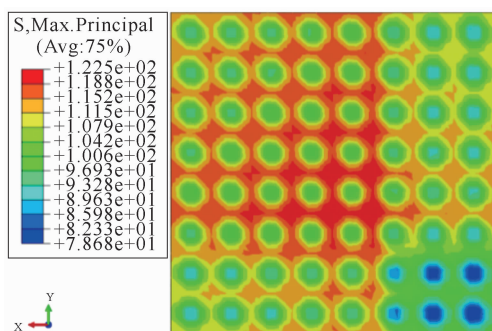


图 8 1280×1024 元碲镉汞芯片的法向应力

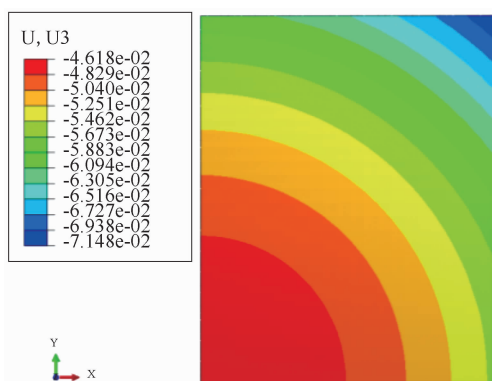


图 9 1280×1024 元碲镉汞芯片的法向形变

通过结果发现, 钢柱与碲镉汞接触的外边缘仍是碲镉汞芯片的危险点, 钢柱与碲镉汞芯片的连接边缘位置上产生较大的应力集中, 并且应力和形变都急剧增大。与小面阵芯片相比, 大面阵探测器各层结构的尺寸发生了变化, 导致各组成结构的膨胀或收缩程度更大。结构本身受到内外约束的综合作用变强, 造成应力和形变的增大。

从图 8 中可以进一步发现, 钢柱之间(像元之间)的应力更加集中。这主要是由钢柱间距的缩小造成的。因此, 在相同的面阵规模下, 像元间距小的探测器的应力集中与增大更加严重。

2.3 大面阵碲镉汞芯片的热应力优化

结合实际的探测器生产工艺, 几乎没有发现 320×256 元碲镉汞芯片在低温下产生裂纹等损伤, 表明碲镉汞芯片低温下的最大热应力

未达到材料本身的应力极限。随着探测器的面阵规模扩大至 1280×1024 元, 在生产工艺中已发现部分芯片在低温 60 K 时会产生损伤。冲击次数的增加也会导致损伤加剧。

除了材料自身的缺陷以外, 碲镉汞芯片的低温热应力是探测器损伤的重要原因之一。由于探测器混成芯片的材料组成相对固定, 环氧胶的开发也受到极大的限制。此外, 冷头组成结构在低温下的不匹配对探测器损伤的影响也较为明显。因此主要从冷头组成结构的厚度以及材料搭配入手来进行优化, 从而降低碲镉汞芯片的应力集中。表 4 列出了优化后 1280×1024 元探测器各组成结构的材料及厚度(或尺寸)。

通过对比优化前后的 1280×1024 元探测器数据发现, 冷头组成结构的厚度(或尺寸)和材料的变化都能够有效改变碲镉汞芯片的应力和形变。虽然钢柱与碲镉汞接触的外边缘仍是芯片失效的危险点, 但是最大主应力降至 64.65 MPa (见图 10), 低于 320×256 元碲镉汞芯片的应力(81.3 MPa)。法向形变降至 6.4 μm (见图 11), 从理论上来说已经处于安全范围内。这表明优化后各组成结构的搭配更加合理。受材料低温热膨胀系数和弹性模量等参数的影响, 各组成结构在低温下的膨胀与收缩得到缓解。结构本身的综合约束更加合理, 使碲镉汞芯片的应力和形变得到了改善。

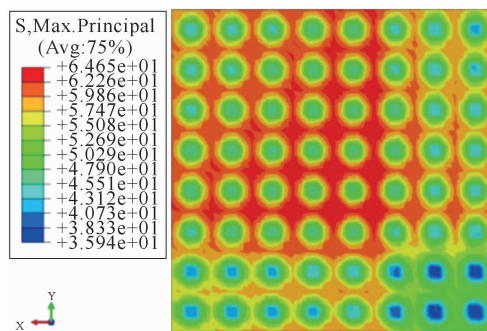


图 10 1280×1024 元碲镉汞芯片的法向应力

表 4 优化后 1280×1024 元探测器各组成结构的材料及厚度(或尺寸)

碲镉汞芯片	读出电路	钢柱	填充胶	垫片	陶瓷框架	结构件
10 μm	0.5 mm	10 μm	10 μm	Al ₂ O ₃ (1.1 mm)	Al ₂ O ₃ (0.6 mm)	AlN (0.5 mm)

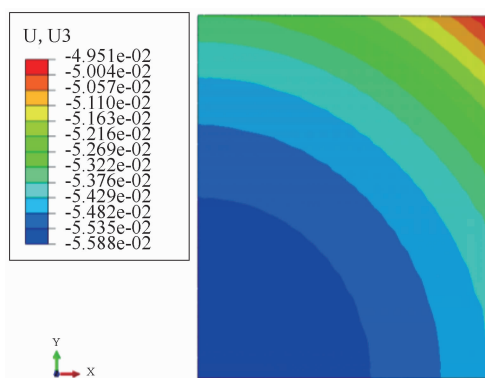


图 11 1280×1024 元碲镉汞芯片的法向形变

3 结论

通过结合仿真计算和实际生产可知,冷头组成结构在低温下的不匹配是碲镉汞芯片应力大的重要原因。本文对两种规模的碲镉汞探测器进行了热应力仿真分析,并结合生产工艺情况分析了探测器芯片低温损伤的原因及改善方向,形成了以下几点结论:

(1) 钢柱与碲镉汞芯片接触边缘部位因应力集中明显而成为芯片失效的起源点。热应力不断作用产生的热疲劳,或者热应力超过了材料本身的应力极限会导致微损伤贯通,形成微裂纹。

(2) 面阵规模的增大以及探测器像元间距的缩小会导致碲镉汞芯片应力集中的恶化。

(3) 探测器冷头结构和材料的改变有助于

缓解碲镉汞芯片的应力集中,从而减少其低温损伤。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 雍朝良,林剑春,赵明,等. 空间大规模 CMOS 面阵焦平面拼接技术 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2561-2566.
- [3] 夏晨希,孙闻,王小坤. 大面阵红外探测器与低温冷平台集成后的应变测试研究 [J]. 红外, 2017, 38(8): 23-26.
- [4] 王鑫,周立庆,谭振. 制冷型大面阵红外探测器研制进展 [J]. 红外, 2019, 40(12): 1-9.
- [5] 耿红艳,周州,宋国峰,等. 红外探测器倒装互连技术进展 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 722-726.
- [6] 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.
- [7] 李鹏飞. 红外焦平面探测器热应力耦合分析 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
- [8] 胡晓宁,张海燕,李言谨,等. 硅基 HgCdTe 面阵焦平面器件结构热应力分析 [J]. 激光与红外, 2006, 36(11): 1020-1022.