

文章编号: 1672-8785(2024)02-0009-09

超大面阵碲镉汞探测器低应力设计 及有限元分析

方志浩 付志凯 王 冠 张 磊

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着碲镉汞材料和器件技术的不断发展, 满足大视场、超高分辨率应用需求的超大阵列规模的红外探测器逐步投入工程应用, 超大面阵探测器芯片的低温可靠性成为封装技术的重点研究内容。以某超大面阵碲镉汞混成芯片为研究对象, 采用有限元仿真分析法研究了冷头材料体系、冷台外径、冷台的结构形式等因素对混成芯片低温应力和芯片光敏面低温变形的影响规律, 最终优化设计出一套可满足超大面阵芯片低温可靠性要求的冷头结构和材料体系。仿真结果显示, 该冷头体系硅电路低温下最大应力约为 70 MPa, 碲镉汞光敏区在低温下的变形约为 30 μm 。仿真结果能满足工程应用可靠性要求的经验仿真阈值, 有效改进了超大面阵红外探测器的高可靠小型化封装技术。

关键词: 超大面阵; 红外探测器; 有限元仿真; 低应力设计

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.02.002

Low-Stress Design and Finite Element Analysis of Super Large Area Array Mercury Cadmium Telluride Detectors

FANG Zhi-hao, FU Zhi-kai, WANG Guan, ZHANG Lei

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

Abstract: With the continuous development of mercury cadmium telluride (MCT) materials and device technology, ultra-large array scale infrared detectors that meet the requirements of a large field-of-view and ultra-high resolution applications are gradually being put into engineering applications. The low-temperature reliability of ultra-large array detector chips has become a key research topic in packaging technology. Taking a certain ultra-large area array HgCdTe hybrid chip as the research object, the finite element simulation analysis method was used to study the influence of factors such as cold head material system, cold head outer diameter, and cold stage structural form on the low-temperature stress and deformation of the chip photosensitive surface of the hybrid chip. Finally, a set of cold head structures and material systems that can meet the low-temperature reliability requirements of the super large area array chips was designed and optimized. The simulation results show that the maximum stress of the silicon circuit in the cold head system at low temperature is about

收稿日期: 2023-08-22

作者简介: 方志浩(1994-), 男, 山西忻州人, 工程师, 主要从事红外探测器结构设计仿真研究。

E-mail: f_zhi_hao@163.com

70 MPa, and the deformation of the mercury cadmium telluride photosensitive region at low temperature is about 30 μm . The simulation results can meet the empirical simulation threshold for engineering application reliability requirements, effectively improving the highly reliability and miniaturized packaging technology of the ultra-large area array infrared detectors.

Key words: super large array; infrared detector; finite element simulation; low-stress design

0 引言

碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面成像器件具有量子效率高、可靠性好以及寿命较长等诸多优点,被广泛应用于各领域。通过改变碲镉汞红外探测器中镉的成分比例,可以实现不同波长范围内(如短波 1~3 μm 、中波 3~5 μm 、长波/甚长波 8~12 μm “大气红外窗口”波段)的响应^[1]。

为满足红外市场对超大视场超高分辨率红外探测器的需求,国内外厂商对大规模面阵碲镉汞器件的研制热潮屡创新高。目前,无论单片还是多片拼接成的超大规模探测器主要采用大冷箱封装平台进行封装,探测器的尺寸、重量、冷量和制冷机功耗等无法满足未来对小型化、轻量化、低成本等指标的要求。因此,需要研究通过微杜瓦结构实现超大面阵探测器的小型化高可靠封装。

碲镉汞红外探测器通常要求在 77 K 及以下的温度下工作。杜瓦可以为其提供必要的真空工作环境,杜瓦冷头作为杜瓦的重要组成部分为芯片提供了装载平台。当制冷机制冷时,冷量通过杜瓦冷头传递到芯片,为芯片提供低温工作环境。杜瓦冷头部位基板与探测器芯片之间有不同材料构成的过渡层。由于其材料膨胀系数、弹性模量、泊松比等参数不可能做到完美匹配,当制冷机在短时间内将探测器芯片由环境温度冷却到探测器芯片工作温度时,降温过程中的温差变化极大,各零件的热胀冷缩量差异和不同部位的温度差异,将导致冷头结构产生形变和芯片受到温度应力,从而造成红外探测器的光电性能劣化、芯片裂片等失效问题^[4]。随着探测器焦平面阵列规模增大,热应力效应更加严重,试验更加复杂且周期

长、成本高。为保证大面阵红外探测器组件芯片的可靠性,我们需要在设计时充分考虑冷头部分的结构强度、热质量、膨胀匹配和材料选择等多方面的折中平衡^[4]。

目前,中国科学院上海技术物理研究所、中国兵工 211 所、中航工业 014 所、河南科技大学、昆明理工大学和北京信息科技大学等^[1]针对面阵芯片热力变形设计仿真的研究成果主要停留于 640×512 及以下阵列规模,形成的材料结构体系主要集中于可伐合金/氧化铝陶瓷结构件的冷头体系。该体系能否适应超大面阵红外探测器芯片的封装,针对超大面阵红外探测器封装有无更可靠的冷头体系,均是下一步的研究重点。

为了实现红外系统的小型化、轻量化和低功耗,我们拟采用微杜瓦配合分置式脉管制冷机来封装某型超大面阵碲镉汞探测器芯片。本文针对超大面阵芯片在低温下的应力和变形进行仿真对比分析和优化,提出一套适应超大面阵制冷型红外探测器高可靠封装的冷头结构体系,用以支撑超大面阵红外探测器的小型化高可靠封装技术的发展,不断推动超大视场、超高分辨率的先进红外探测系统的进步。

1 仿真模型搭建

基于中国科学院上海技术物理研究所、昆明理工大学、河南科技大学等机构学者的研究成果,目前针对制冷型红外焦平面阵列探测器在工作温度下的热应力分析计算主要采取弹性多层体系热应力计算理论(Hsueh C H 提出),探测器与基板的耦合结构属于多层材料体系,其结构如图 1 所示(t 为各层厚度)^[4]。

当多层弹性系统从生长温度降回到室温时, 用 ΔT 表示其温差。假设各层薄膜之间均无相互束缚, 降温后, 图 1 中各层的自由热应变分别为 $\epsilon_s = \alpha_s \Delta T$ 、 $\epsilon_i = \alpha_i \Delta T$ [4]。

多层弹性系统中, 衬底和薄膜沿 Y 轴方向的平面内正应力 σ 与系统的总应变 ϵ 之间的关系为 [4]

$$\sigma_s = \frac{E_s}{1 - \nu_s} (\epsilon_s - \alpha_s \Delta T) \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{E_i}{1 - \nu_i} (\epsilon_i - \alpha_i \Delta T) \quad (2)$$

当温度发生变化时, 多层材料结构产生了宏观形变(如图 2 夸张表示), 温度的变化范围、热膨胀系数差异和每层材料的厚度决定了形变程度 [4]。

利用纯弯曲理论推导得到中性层的曲率半径 R 和中性层到第一层材料的底面距离 Y_c [4]:

$$R = \frac{(\sum E_i t_i Y_i) - (\sum E_i I_i)(\sum E_i t_i)}{(\sum E_i t_i Y_i)(\sum E_i t_i \alpha_i \Delta T) - (\sum E_i I_i)(\sum E_i t_i Y_i \alpha_i \Delta T)} \quad (3)$$

$$Y_c = \frac{(\sum E_i I_i)(\sum E_i t_i \alpha_i \Delta T) - (\sum E_i t_i Y_i)(\sum E_i t_i Y_i \alpha_i \Delta T)}{(\sum E_i t_i Y_i)(\sum E_i t_i \alpha_i \Delta T) - (\sum E_i I_i)(\sum E_i t_i Y_i \alpha_i \Delta T)} \quad (4)$$

式中, E_i 、 α_i 分别为第 i 层材料的弹性模量和热膨胀系数; I_i 是第 i 层材料的单位长度惯性矩, $I_i = t_i/12 + 2Y_i t_i$; Y_i 是第 1 层材料底部到第 i 层材料中心的距离; ΔT 是温度变化量 [4]。

第 1 层材料的底面曲率半径为 $r = R - Y_c$, 多层结构的长度 L 以及总的厚度要远小于曲率半径 R 和 r , 实际形变比图 2 所示的要微小很多。采用近似法推导出弯曲形变 d 和曲率半径 r 的关系, 再利用弯曲形变评价多层材料体系的热失配程度 [4]。

$$d = r[1 - \sqrt{1 - (L/2r)^2}] \quad (5)$$

基于上述理论基础, 采用 Ansys 仿真软件对杜瓦冷头结构的热应力变形等进行设计分析, 重点对比不同冷头材料体系和结构尺寸对

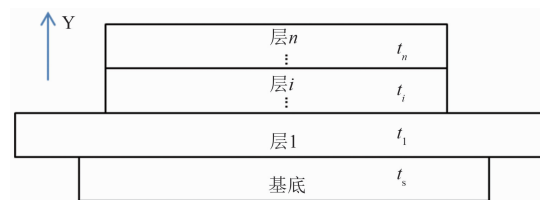


图 1 弹性多层系统的结构示意图

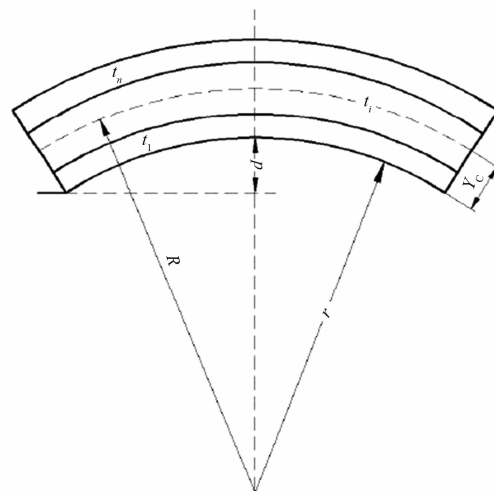


图 2 探测器封装多层结构的弯曲示意图

探测器低温应力变形等指标的影响, 以获得封装超大面阵红外探测器的杜瓦冷头最佳组合。由于该芯片面阵较大, 为保证探测器低温下的温度均匀性, 使制冷机冷量顺利传输到红外芯片并实现冷台与陶瓷结构件的可靠连接, 在金属冷台表面制备螺纹孔, 并在冷台下表面均布设计辐射状加强筋, 在保证冷台轻量化的同时降低冷台上表面低温下的变形。

对冷指冷头部件进行有限元建模分析, 赋予各零件分析必备的材料参数, 检查并建立各零件之间的连接关系。采取恰当的方法进行网格的划分(见图 3), 建立边界条件, 设置冷指安装面为 296.5 K, 陶瓷框架上表面为 77 K。

为节约计算时间且保证计算的可靠性,先对分析过程作出以下假设^[10]:

(1)热分析有稳态热分析和瞬态热分析两种。瞬态热分析增加时间维度的计算,更符合实际热力学过程,但是计算时间长。对比稳态分析结果和瞬态分析结果,两者区别很小。所以本次仿真采用稳态温度场耦合静态力学计算模块进行热力耦合分析。

(2)由于该芯片尺寸规模较大,为减少计算时间,不关注倒装互连结构的应力,故将混成芯片看作一个整体结构进行分析。

(3)网格划分主要采取六面体网格。为加快计算速度,仅对芯片附近尺寸较小的零部件进行网格细化。

(4)在冷头结构的粘接界面不添加粘接剂单元,采用绑定约束的接触形式。

(5)将制冷机冷源设置在冷台下表面并恒定 77 K 温度。探测器读出电路芯片功率按照 1 W 计算。

2 研究内容

2.1 冷头层叠结构材料体系仿真对比分析

目前经过工程验证认为具备可靠性的冷头层叠结构体系有两种:一种是已在微杜瓦结构(封装 $1\text{k}\times 1\text{k}$ ($15\text{ }\mu\text{m}$)及以下的面阵芯片)中广泛应用的氧化铝结构件材料体系;另一种是近年开发的 AlN 结构件材料体系。那么针对超大面阵碲镉汞芯片的微杜瓦封装采用哪种层叠结构材料体系芯片时可靠性更高?我们利用有限元仿真分析对比的结果为超大面阵芯片封装结构设计提供参考。冷头层叠结构如图 4 所示。

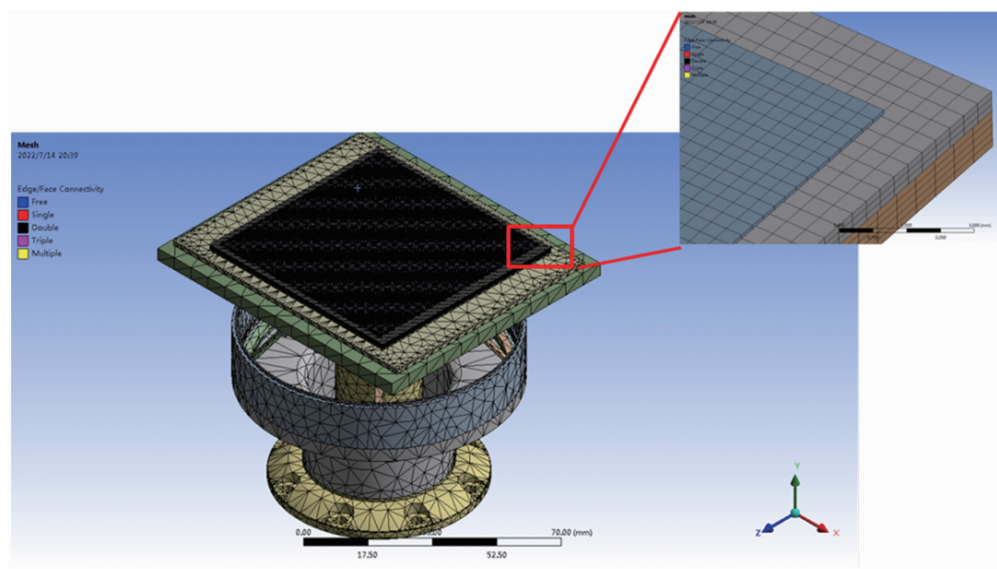


图 3 网格划分

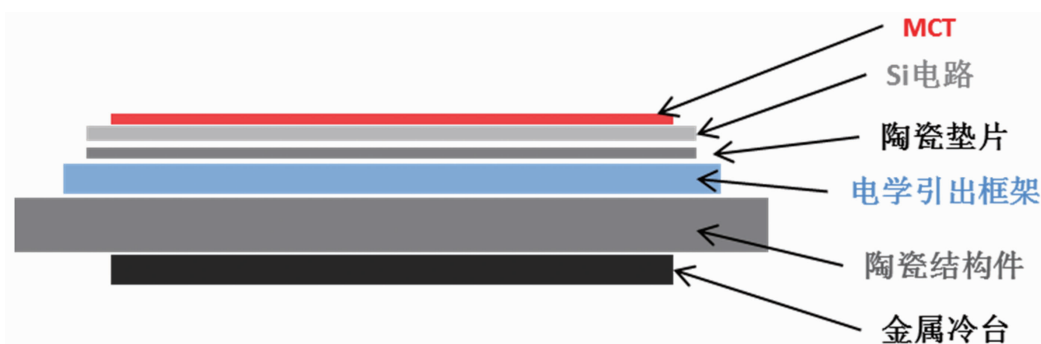


图 4 冷头层叠结构

表 1 探测器在低温下的仿真结果对比

低温指标	AlN 体系	Al ₂ O ₃ 体系
焦面温度均匀性/K	0.19	0.39
低温下焦面变形/ μm	30	84.4
低温下 Si 电路应力/MPa	70	29.8
金属冷台与陶瓷结构件粘接界面应力/MPa	66	133.6

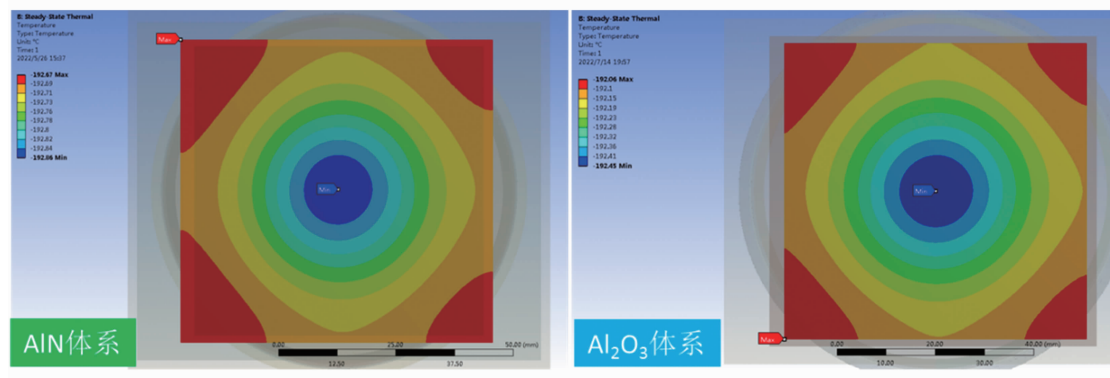


图 5 温度均匀性对比

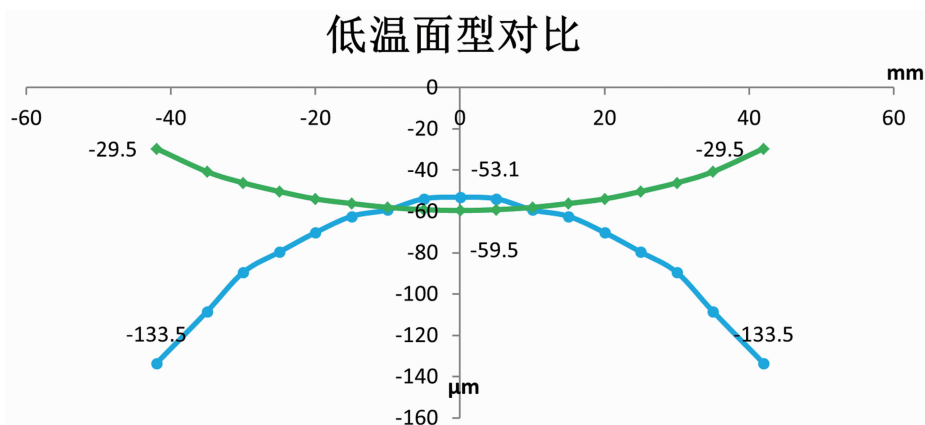


图 6 不同体系冷头低温下的面型对比

2.1.1 芯片低温应力和变形仿真

根据前面选择的仿真参数和制定的各项假设条件,我们仿真计算两种状态探测器在低温下的各项性能(结果见表 1)。由图 5 可见,与 Al₂O₃ 体系相比,AlN 体系可以实现更小的温度均匀性。这对超大面阵成像过程中中心位置和边缘位置的非均匀性有极大的好处,可以有效避免温度差造成的图像失真。

图 6 中展示了 AlN 体系和 Al₂O₃ 体系低温下造成芯片光敏面的变形情况。AlN 体系芯片为蓝色曲线,呈下凹变形,最高点与最低点的差值约为 30 μm ;而绿色的 Al₂O₃ 体系光敏面呈

上凸变形,中心与边缘的峰谷差可达 84.4 μm 。可以判断,AlN 体系冷头结构对探测器成像虚焦的影响比 Al₂O₃ 体系冷头结构更小。

由于冷头质量更重,超大面阵芯片微杜瓦封装结构对冷头位置的力学可靠性要求更高,因此我们设计了螺接+胶接的连接方式。由冷台粘接界面的应力对比(见图 7)可知,AlN 体系冷台粘接界面的应力大约是 66 MPa,而 Al₂O₃ 体系冷台粘接界面的应力大约是 133.6 MPa。AlN 体系更好地避免了粘接界面脱粘影响制冷机冷量无法传到芯片的问题。

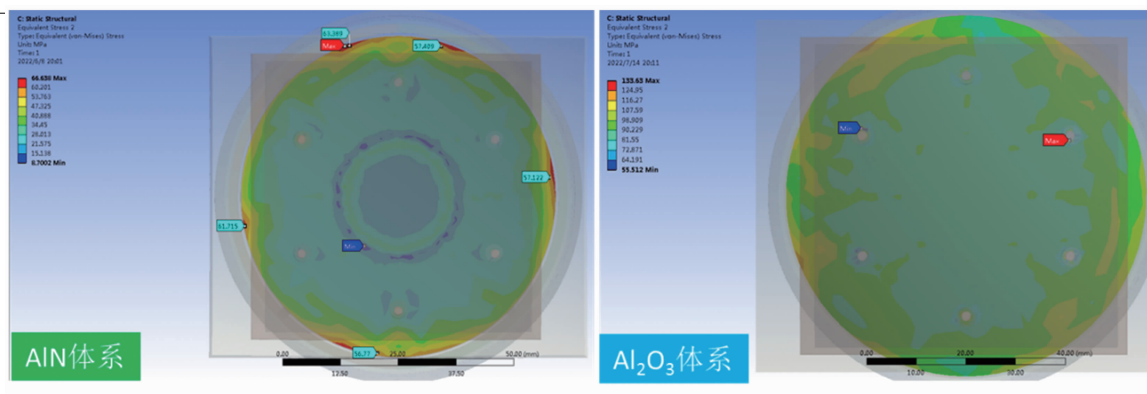


图 7 不同冷头体系冷台粘接界面的应力对比

表 2 不同体系的冷头热容量对比

项目	AlN 体系	Al ₂ O ₃ 体系
层叠结构总热容量/J	16377	17952
层叠结构总重量/g	345	383

2.1.2 冷头热容量计算对比

上述两种冷头体系几乎采用了完全不同的材料，我们有必要对冷头的重量和热容量进行对比分析。根据热容计算公式：

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C dT \quad (6)$$

$$Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (7)$$

式中， m 是质量(kg)； C 是材料的比热($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)； T_1 是起始温度(296.5 K)； T_2 是最终温度(77 K)

我们对比计算了两种不同冷头体系的热容量和重量。计算时不包括冷屏和滤光片的热容量和重量。由表 2 可知，AlN 体系的热容量比 Al₂O₃ 体系小 10% 左右，重量比 Al₂O₃ 体系小 11% 左右。

2.1.3 小结

综合上述两种主要冷头方案的仿真和计算对比结果，我们可以发现：AlN 体系的冷头层叠结构在芯片低温变形、冷头热容量、冷头重量、材料导热率和温度均匀性等诸多方面具有显著优势。虽然读出电路芯片低温下的仿真应力 70 MPa 高于氧化铝体系的 29 MPa，但根据多年设计仿真和工程经验，电路应力仿真值 70 MPa 可以满足使用的可靠性要求。因此，针对超大面阵红外探测器，我们采用 AlN 结构体系层叠结构进行封装。

2.2 冷台尺寸对探测器低温应力变形的影响分析

基于上述分析，用于封装超大面阵红外探测器的层叠结构冷头采用因伐冷台叠层方式。本节中我们主要讨论可变的冷台直径对探测器在低温下的各项性能的影响。金属冷台作为红外探测器芯片的载体，起到冷量传递和承载芯片的双重作用。采用微杜瓦结构封装超大面阵芯片。为保证低漏热和结构的小型化，同时为满足冷头部件与金属冷台的可靠连接，探测器冷指直径较小而冷台外径大于冷指管壁外径。我们通过调整冷台的外径尺寸仿真研究了其对红外探测器芯片在低温工作时的影响。冷台的最小直径由冷台上螺纹孔的位置限制，而冷台的最大直径则受限于外部的封装壳体结构和装配工艺。我们将冷台的外径尺寸设置为 55 mm、60 mm、65 mm、70 mm 和 75 mm 等 5 个尺寸，其他条件保持一致，然后进行仿真对比。

图 8 展示了工作温度 77 K 下探测器的温度均匀性。可以看出，随着金属冷台的直径不断扩大，探测器的温度均匀性不断增大。最终当冷台的直径为 75 mm 时，探测器的温度均匀性达到 0.19 K，比冷台直径 55 mm 时的温度均匀性 0.37 K 提升了将近 1 倍。

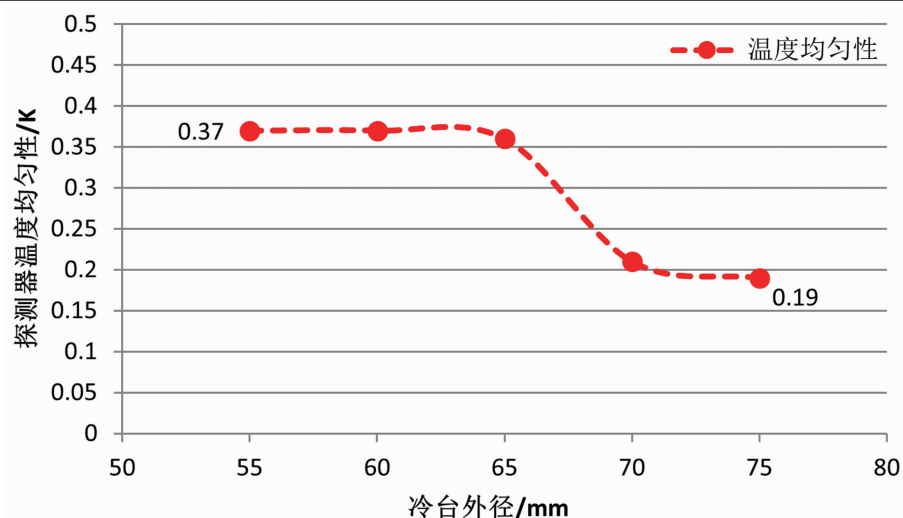


图 8 冷台直径对探测器温度均匀性的影响

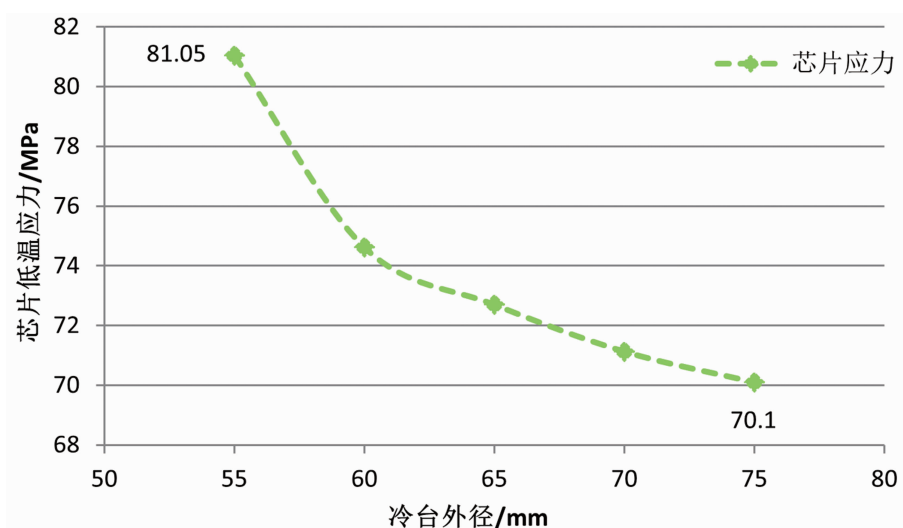


图 9 冷台直径对探测器芯片应力的影响

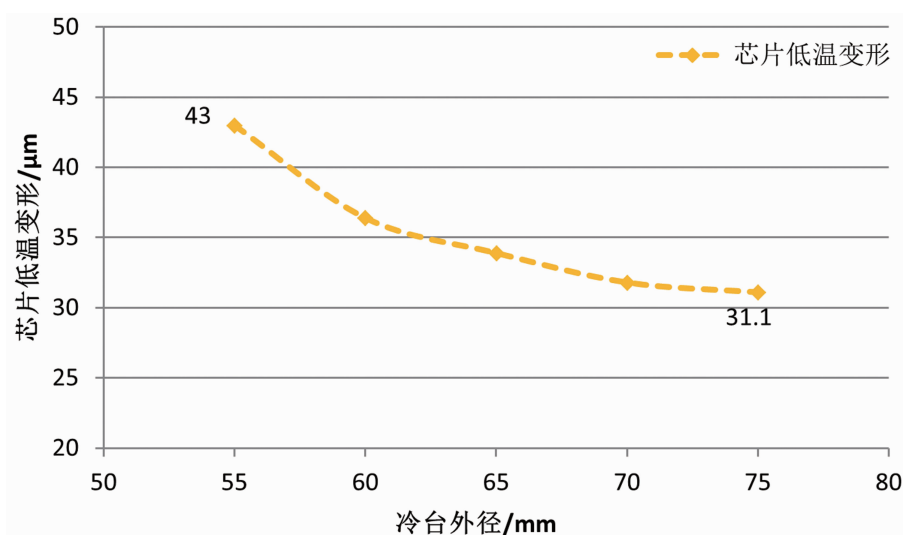


图 10 冷台直径对芯片低温变形的影响

表 3 冷台有无加强筋时的仿真结果对比

组件状态	探测器温度均匀性/K	芯片应力/MPa	芯片低温变形/ μm	冷台上表面应力/MPa
冷台有加强筋	0.19	70	31	66
冷台无加强筋	0.2	81	33.4	81.4

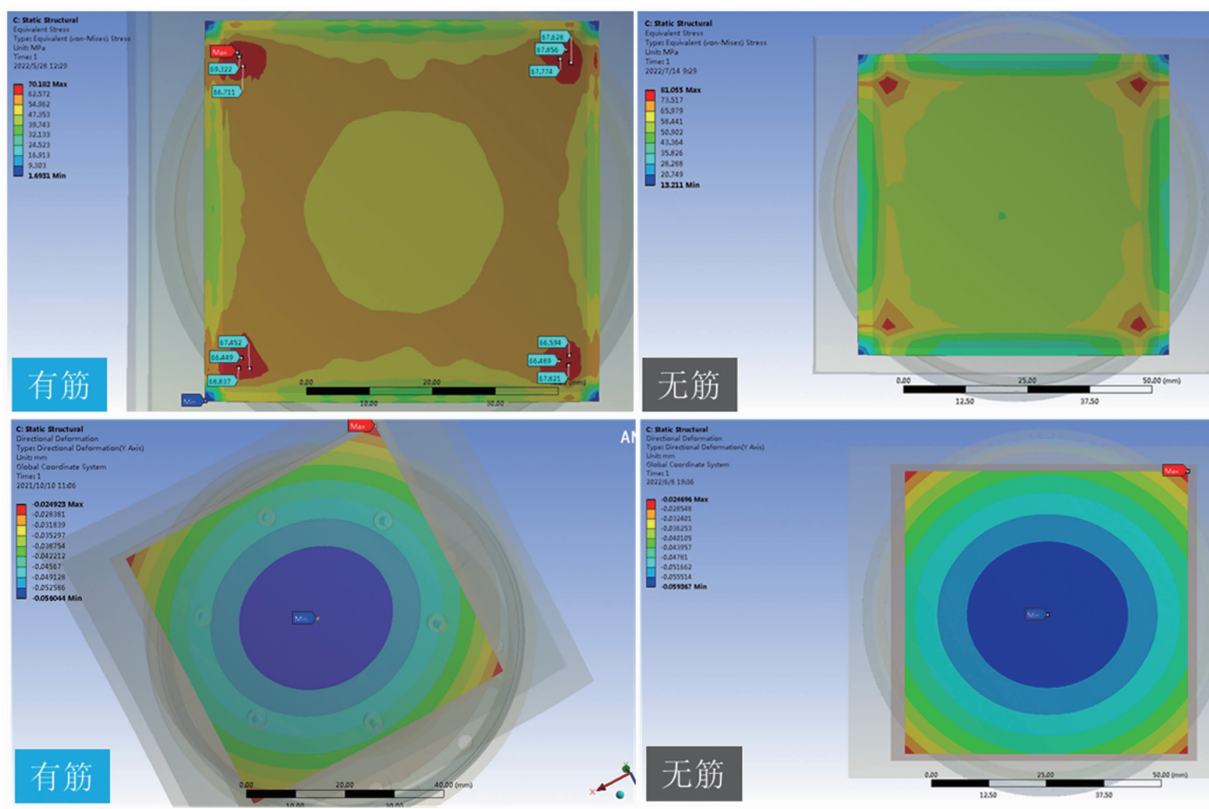


图 11 冷台有无加强筋对芯片应力变形的影响

探测器的低温应力是关乎探测器工作可靠性的重要指标。图 9 展示了芯片应力随冷台直径的变化趋势。随着冷台直径增大,探测器的低温应力逐渐减小,且应力减小的速度逐渐变缓。当冷台的直径为 75 mm 时,芯片的应力降低到 70 MPa,比冷台直径 55 mm 时减小了约 14%。

芯片的低温变形会影响探测器的成像效果。由图 10 可见,探测器芯片的低温变形随着冷台直径的增大而减小,且随着冷台直径的增大,芯片变形减小量逐渐减少;继续增大冷台外径,对芯片低温变形的改善不再显著;当冷台直径达到最大值 75 mm 时,探测器芯片的低温变形约为 31 μm 。该仿真值可满足中波器件的成像焦深要求。

由上述仿真结果可知,针对超大面阵红外

探测微杜瓦封装结构,冷台外径的增大有助于提升探测器的温度均匀性,降低探测器的低温应力和变形,是提升超大面阵红外芯片封装可靠性的有效手段。冷台直径超过芯片尺寸后提升效果会随着冷台的增大而降低,同时受限于微杜瓦结构的外部尺寸、封装工艺操作顺序设备以及冷头悬臂梁结构的力学可靠性等因素,冷台的尺寸不可无限放大。

2.3 冷台结构优化对探测器低温应力和变形的影响分析

我们进一步研究降低芯片低温变形和应力的手段。由于冷台和薄壁冷指的直径差距明显,金属冷台位于悬臂梁前端更容易产生低温应力和变形。因此根据机械设计中常用的加强筋结构,我们拟在金属冷台的下表面均布设计 8 条加强筋以提升冷台的刚度,使其在低温下

不易变形, 进而降低由于低温变形传递到芯片上的应力。

表 3 列出了冷台有无加强筋时的仿真数据。可以看出, 二者的温度均匀性基本一致, 而有加强筋时的冷台结构芯片应力约为 70 MPa, 小于无加强筋结构的 81 MPa。有加强筋时的芯片低温变形约为 31 μm , 略小于无加强筋结构的 33.4 μm 。可见在冷台上设置加强筋的方案有效地降低了芯片在低温下的应力和变形, 是可行的优化手段。仿真结果对比如图 11 所示。

3 结束语

本文利用有限元仿真从冷头材料体系设计和冷头结构尺寸设计等方面研究了微杜瓦封装结构封装超大面阵芯片时芯片低温应力和变形等指标的变化规律。结果表明:

(1)通过对比常用的两种冷头多层材料体系可发现, 针对超大面阵芯片的封装, 选用膨胀系数芯片更接近的 AlN 体系, 热适配的风险更小, 冷头的整体热容量和重量也更小, 综合性能比氧化铝体系更优。

(2)增大冷台外径可显著提升探测器芯片低温下的温度均匀性, 降低芯片的低温变形和芯片的低温应力, 为微杜瓦结构封装大面阵芯片提供了可能性。

(3)对于冷台尺寸相同的结构, 在冷台背部增加辐条状加强筋是有效降低芯片的低温应力变形的优化手段。

本文的研究成果对超大面阵制冷型红外探测器的微杜瓦封装具有重要的设计指导意义, 预期可以实现超大面阵探测器在低温下的高可靠小型化封装, 但实际的样品制备和相关试验测试有待验证, 本文中的理论需要进一步实物验证和优化。

参考文献

- [1] 夏润秋, 刘洋, 张悦, 等. 激光辐照碲镉汞红外焦平面探测器的热应力损伤研究 [J]. 应用光学, 2018, **39**(5): 751-756.
- [2] 陈星, 华桦, 何凯, 等. 红外焦平面探测器封装结构热应力分析 [J]. 激光与红外, 2014, **44**(6): 645-648.
- [3] 高玲. 低应力红外探测器杜瓦冷头结构设计及仿真 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [4] 李俊. 超大规模线列红外焦平面杜瓦封装关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2021.
- [5] 张江风, 刁云飞, 张晓玲, 等. 铟化铟红外焦平面阵列探测器的热应力结构优化 [J]. 红外技术, 2021, **43**(12): 1202-1206.
- [6] 吕克林, 张立文, 张晓玲, 等. 温度冲击下背向集成微透镜阵列红外探测器热应力分析 [J]. 激光杂志, 2013, **34**(2): 12-14.
- [7] 孟庆端, 黄志慧. 液氮冲击中 InSb 焦平面探测器热应力计算 [J]. 红外技术, 2018, **40**(1): 6-10.
- [8] 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.
- [9] 娄文忠, 马婷, 于秀丽. 温度冲击下倒装芯片的热应力数值模拟研究 [J]. 传感技术学报, 2006, **19**(5): 1623-1625.
- [10] 能立强. 多芯片并联 SiC MOSFET 模块的电-热-力多物理场仿真设计研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [11] 张洪瑀, 刘森. 红外焦平面探测器芯片应力降低方法研究 [J]. 红外, 2022, **43**(3): 16-21.
- [12] 李雪梨, 张磊, 付志凯. 红外焦平面探测器热应力的有限元仿真方法分析 [J]. 激光与红外, 2020, **50**(4): 429-434.
- [13] 吴永红, 武文. HgCdTe 焦平面探测器热应力有限元分析 [J]. 计算机辅助工程, 2011, **20**(1): 113-116.
- [14] 屈晓庆. 硅通孔(TSV)热应力分析及优化 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.