

文章编号: 1672-8785(2022)03-0016-06

# 红外焦平面探测器芯片应力降低方法研究

张洪瑀 刘 森

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 以  $1280 \times 1024$  红外焦平面探测器为例, 利用三维可视化实体模拟软件建立了包含冷指部件、陶瓷框架、探测器芯片的三维模型, 并利用 ANSYS 仿真软件对模型(仅球形冷台结构与常规冷台不同, 其余零件均相同)进行了仿真对比。研究表明, 球形冷台结构通过增加冷台与制冷机接触面的面积可以实现更低的芯片热应力以及更小的芯片热变形, 进而提高探测器芯片的可靠性。

**关键词:** 红外探测器; 有限元仿真; 可靠性

**中图分类号:** TN20 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.03.003

## Research on Stress Reduction Method of Infrared Focal Plane Detector Chip

ZHANG Hong-yu, LIU Sen

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

**Abstract:** The  $1280 \times 1024$  infrared focal plane detector is taken as an example, and 3D visualization entity simulation software is used to establish a 3D model including cold finger parts, ceramic frame and detector chip in this paper. The simulation comparison is conducted by using ANSYS simulation software (only the spherical cold platform structure is different from the conventional cold platform, and other parts are the same). The results show that the spherical cold platform can achieve lower thermal stress and smaller thermal deformation of the chip by increasing the area of the contact surface between the cold platform and the refrigerator. And the reliability of the detector chip can be improved by this way.

**Key words:** infrared detector; finite element simulation; reliability

### 0 引言

红外探测器组件因具有探测精度高、环境适应性强等特点而被广泛应用于夜视、天文观测等领域。随着红外探测器的高速发展, 红外

探测器芯片的像元规模也越来越大。由于探测器芯片尺寸越来越大, 芯片在受到温度冲击后更容易产生损伤。这直接影响探测器性能, 甚至导致芯片失效。可能的原因是各材料的热膨

收稿日期: 2021-11-03

作者简介: 张洪瑀(1995-), 男, 山西人, 助理工程师, 主要研究方向为杜瓦封装工艺与仿真。

E-mail: iloveit666@yeah.net

胀系数存在差异以及探测器芯片在同一水平面内的温度不均匀。当红外探测器上的温度由室温降至 77 K (低温工作环境) 时, 材料之间的热膨胀系数不匹配所产生的应力或者同一水平面的温差较大, 导致整个冷台结构产生低温形变。在多次高低温循环冲击的作用下, 红外探测器由于始终承受较大且不断变化的热应力和形变的影响而容易疲劳失效。该现象在大面阵探测器中表现得更加明显<sup>[1]</sup>。

目前, 针对该问题的有效解决方法是设计多层结构, 即通过在冷台与框架之间、框架与芯片之间增加结构件来降低芯片热应力和热变形<sup>[2]</sup>。本文基于一种完全不同的方向, 对冷台结构进行了优化, 然后利用 Inventor 三维可视化实体模拟软件建立了三维模型, 并通过 AN-

SYS 仿真软件对比了三种不同冷台结构状态下的芯片热应力和热变形结果, 最终得到了可降低芯片热应力和热变形的球形冷台结构。

## 1 仿真模型构建

### 1.1 全尺寸模型

图 1 为探测器冷台结构示意图。根据实际探测器结构建立三维模型, 并选用像元规格为  $1280 \times 1024$ 、像元中心间距为  $25 \mu\text{m}$  的芯片来分析。它主要由相互之间用低温胶粘接的钢钎合金冷台、AlN 陶瓷基板以及铈化钬芯片组成。在温度冲击后, 大面阵红外焦平面探测器芯片应力集中, 容易产生损伤。而且在冷指外径较小、芯片较大的情况下, 对冷头结构的温度均匀性要求更高<sup>[3]</sup>。图 2 为常用平面冷台尺寸的示意图。

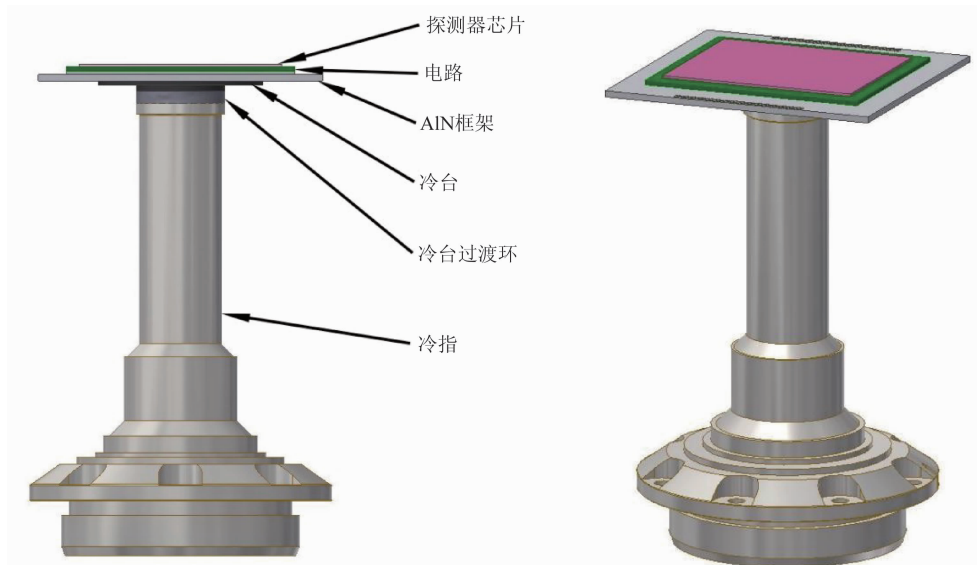


图 1 探测器结构示意图

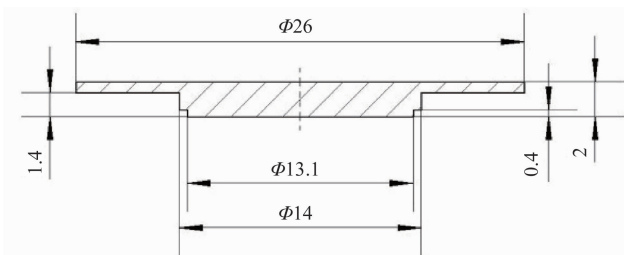


图 2 冷台尺寸示意图

### 1.2 有限元模型

(1) 定义结构网格类型, 用六面体实体单元进行网格划分。

(2) 设置边界条件。选用稳态分析的方法, 固定冷指与制冷机耦合面。将冷台下表面 (见图 3) 作为冷源, 并施加 77 K 的温度载荷 (见图 4)。采用场序热-力耦合法进行芯片热应力分析。先对三维模型进行稳定热状态分析, 再将分析结果作为温度载荷进行静力结构分析。

(3) 由于稳态分析的结果只与最终状态的材料特性、边界条件等有关, 而与中间过程无关, 因此选择表 1 中列出的低温下的材料参数进行计算。

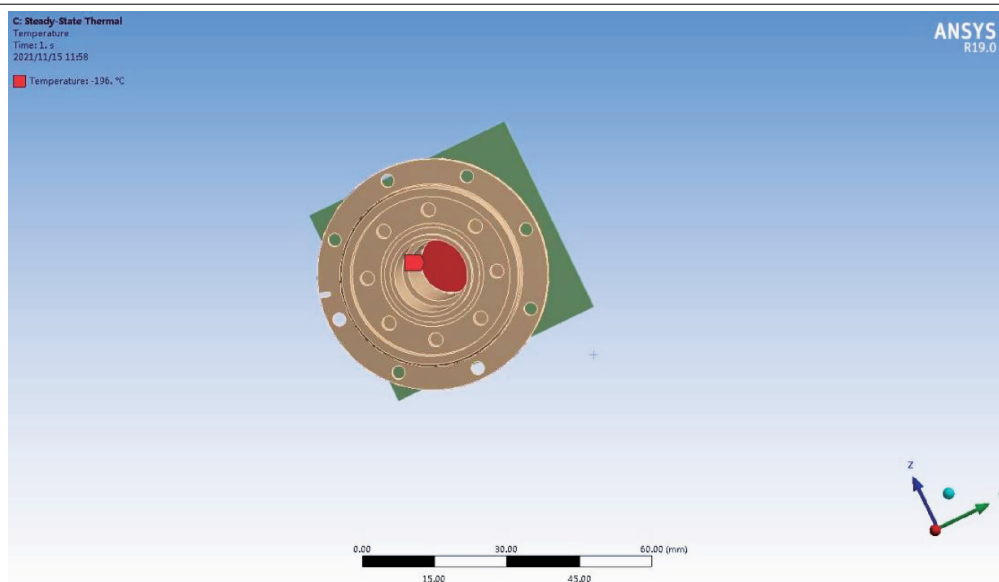


图3 施加温度位置示意图

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
ID (Beta)	200
Type	Temperature
<input type="checkbox"/> Magnitude	-196. °C (ramped)
Suppressed	No

图4 施加温度条件

## 1.2 优化模型

通过对冷台结构进行优化来增大冷台与制冷机的制冷面积，从而达到降低芯片应力与芯片变形的目的。该想法来源于傅里叶定律，其定义为单位温度梯度在单位时间内经单位导热面所传递的热量。单位时间内通过平板传导的热量与温度梯度和传热面积成正比。以平面冷台结构为例：根据傅里叶定律，对冷台底面进行制冷时，冷台上表面的温度均匀性并不相同。

冷台的温度均匀性不相同，也会导致降温过程中锑化铟芯片表面温度均匀性不同。

较大的温差会使芯片内部产生热应力，并产生热形变。若热应力、热形变过大，则会影响探测器正常工作<sup>[5]</sup>。为了保证探测器组件的稳定性和可靠性，通过优化冷台制冷面的形状来提升冷台表面的温度均匀性，从而使锑化铟芯片温度在水平平面内趋于一致。

$$Q = \frac{KA\Delta T}{d} \quad (1)$$

$$R = \frac{A\Delta T}{Q} \quad (2)$$

式中， $Q$ 为热量， $K$ 为导热率， $A$ 为接触面积， $d$ 为热量传递距离， $\Delta T$ 为温度差， $R$ 为热阻值。

热阻表示物体对热流传导的阻碍能力。在材料相同的情况下，热阻与传导距离成正比。热阻还可以表达为

$$\theta = \frac{L}{\lambda S} \quad (3)$$

式中， $\lambda$ 是导热系数， $L$ 是材料厚度， $S$ 是传热面积。

表1 仿真用材料参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	导热率/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
TC4	113	0.36	7.89	5.44	4.45
Invar	144	0.31	17	48	7.93
AlN	310	0.22	4.2	160	3.26
Si	80	0.28	2.3	160	2.33

在原有的基础上优化了冷台模型。其中, 平面冷台结构为方案一, 优化后的弧面冷台结构分别为方案二(见图 5)和方案三(见图 6)。

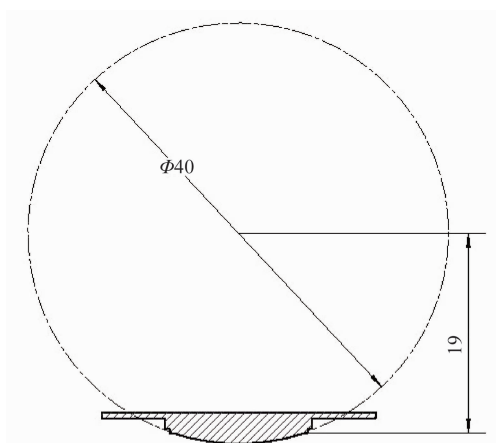


图 5 方案二的冷台尺寸图

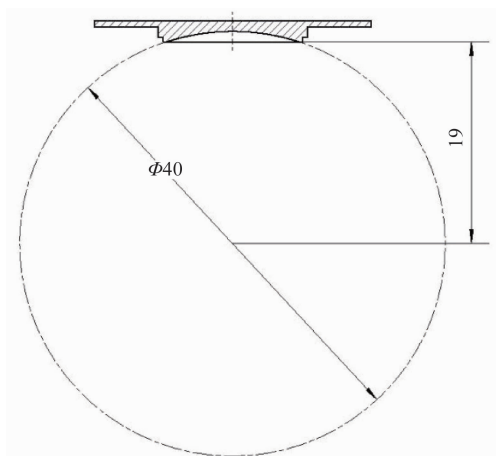


图 6 方案三的冷台尺寸图

与平面冷台相比, 方案二、三均将冷台底面做成弧形来增大制冷面积。根据式(1)和式(2)可知, 要想同一时间冷台上表面的温度均匀性更好, 就需要让冷台各个位置的传导路径长度的差异尽可能小。对比方案二和三发现, 前者差异更小。

## 2 结果分析

### 2.1 热分析结果

为了计算出铈化钕芯片的热应力, 需要对有限元模型进行热分析, 求出其温度场分布。由于铈化钕芯片的厚度很小, 当选用不同的冷台结构进行分析时, 其温度分布大致相同。现以平面冷台结构的分析结果(见图 7)为例。其中, 环境温度为  $22^{\circ}\text{C}$ , 芯片温度为  $-196^{\circ}\text{C}$ , AlN 陶瓷基板温度为  $-196^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2 冷台结构的影响

提取芯片上的静力结构分析结果。其他零件的静力结构分析结果不在云图中显示。不同冷台结构对铈化钕芯片热应力和热变形的分析结果如表 2 和图 8 所示。可以看出, 应力最大值  $44.9\text{ MPa}$  出现在方案三中, 明显大于方案二的  $37.4\text{ MPa}$ 。方案一已经投入使用: 通过一系列的温度、力学等环境试验后, 已完成封装的探测器组件的性能及各项指标均满足要求。

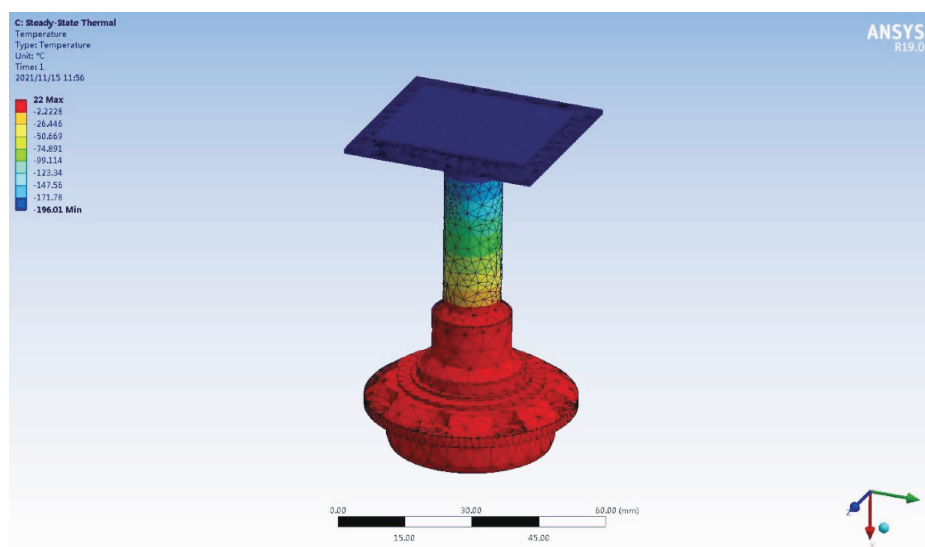


图 7 温度分布结果图

表 2 不同简化模型结果对比

	芯片热应力/MPa	芯片热变形/ $\mu\text{m}$
方案一	41.98	13.9
方案二	37.4	10.4
方案三	44.9	12.2

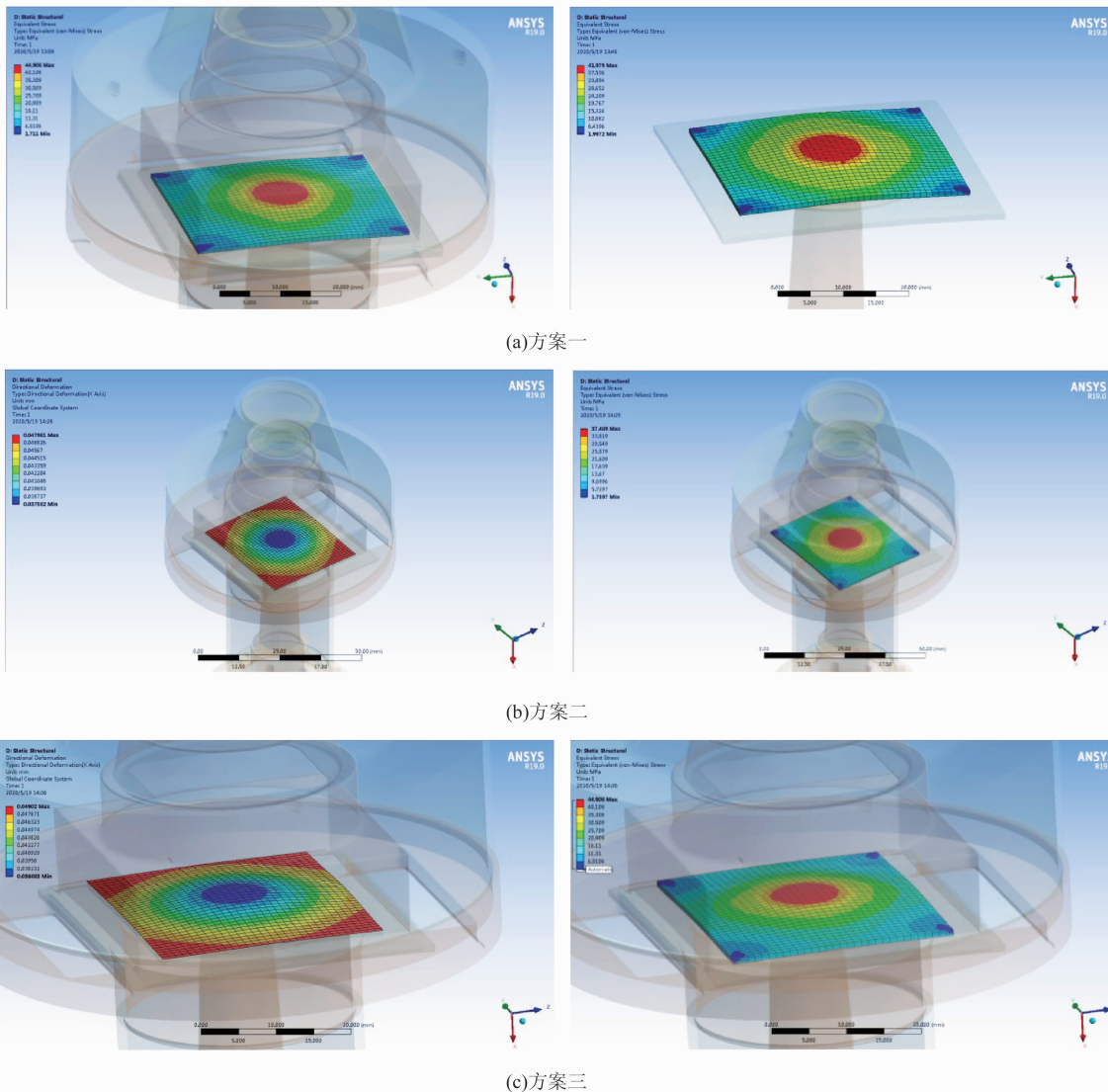


图 8 仿真结果

方案一的探测器芯片热应力为 41.9 MPa, 芯片变形为 13.9  $\mu\text{m}$ 。方案二的探测器芯片热应力为 37.4 MPa (与方案一相比减小了 10.7%), 芯片变形为 10.4  $\mu\text{m}$  (与方案一相比减小了 25.2%)。方案三的探测器芯片热应力为 44.9 MPa (与方案一相比增加了 7.2%), 芯片变形为 12.2  $\mu\text{m}$  (与方案一相比减小了 12.2%)。

由仿真结果可知, 方案二的芯片热应力与芯片热变形结果在三个方案中最小。根据傅里叶定律, 热传递的快慢与传导路径成正比。冷台每个位置的传导路径相差越小, 同一时间下冷台面的温度越均匀, 水平平面上的钢化钢芯片温度也就越均匀。所以该方案可以降低芯片的热应力与热变形。

方案三的热应力结果最大。根据其冷台结

构可知, 冷量传递到冷台中心的时间要远远大于传递到冷台周围的时间。因此, 该方案的结构使得冷台面的温度均匀性更差, 导致芯片热应力增大。实际仿真结果也与理论相吻合。

### 3 总结

本文根据傅里叶定律对冷台结构进行优化, 将冷台零件的制冷面设计为球形。通过减小冷台制冷面到冷台上表面的路径差来提高冷台温度均匀性。经仿真对比, 分析了三种不同结构的 Invar 冷台方案对探测器芯片应力和变形的影响。结果表明, 该设计方法可以有效降低探测器芯片的热应力与热变形。

通常情况下, 降低芯片热应力均从材料热膨胀系数的匹配性上入手, 通过优化材料或者设计多层基板结构来达到这个目的。本文通过优化单一冷台结构也有效降低了芯片热应力, 且没有影响芯片的降温时间。该设计方法为以

后杜瓦冷头的设计提供了一种新的思路。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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): 113–118.
- [3] 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.
- [4] 任凯, 肖健, 袁夫通, 等. 不同装片工艺对硅片翘曲的影响 [J]. *电子与封装*, 2020, **20**(9): 1681–1070.
- [5] 陈国真, 吴静怡, 杨光, 等. 耦合传热下低温柱体温度均匀性的优化分析 [J]. *低温与超导*, 2018, **46**(8): 6–11.
- [21] Yang B C, Wan B S, Zhou Q H, et al. Te-doped Black Phosphorus Field-effect Transistors [J]. *Advanced Material*, 2016, **28**: 9408–9415.
- [22] Yang J, Pan Z, Qiu Y, et al. Free-standing Black Phosphorus Thin Films for Flexible Quasi-solid-state Micro-Supercapacitors with High Volumetric Power and Energy Density [J]. *ACS Applied & Materials Interfaces*, 2019, **11**: 5938–5946.
- [23] Kwak D H, Ramasamy P, Lee Y S, et al. High-performance Hybrid InP QDs/Black Phosphorus Photodetector [J]. *ACS Applied & Materials Interfaces*, 2019, **11**(32): 29041–29046.
- [24] Gabriel C. Constantinescu and Nicholas D. M. Hine. Multipurpose Black-Phosphorus/hBN Heterostructures [J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(4): 2586–2594.

(上接第 15 页)