

文章编号: 1672-8785(2023)09-0016-07

超长线列红外探测器组件的 低温面形研究

张 璐 付志凯 刘 伟

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着红外焦平面探测器阵列规模的不断扩大, 由多层结构低温热失配形变导致的杜瓦可靠性问题愈发突出, 对焦面低温形变的定量化表征需求越来越迫切。基于超长线列红外焦平面探测器冷箱组件开展焦面低温形变研究, 针对多层结构粘接造成的焦面低温形变进行了理论仿真。设计了一种探测器工作温度 90 K 下焦面低温形变的测试方法。对比分析面形测试结果与仿真计算, 低温下焦面整体下移, 但变形曲线呈拱形。仿真得出两边芯片向下凹约 9.24 μm , 中间位置芯片向下凹 1.36 μm 。实验得出两边芯片向下凹约 40 μm , 中间位置芯片向下凹 10 μm 。数据差异与仿真材料的参数设置有关。验证了仿真结果的合理性, 可为超长线列探测器焦面多层结构设计提供参考依据。

关键词: 低温形变; 理论仿真; 面形测试; 材料参数; 红外焦平面探测器

中图分类号: TB133 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.09.003

Study on Low-Temperature Profile of Ultra-Long Line Array Infrared Detector Assembly

ZHANG Lu, FU Zhi-kai, LIU Wei

(The 11st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: With the continuous expansion of the array size of infrared focal plane detectors, the reliability failure of dewar caused by low-temperature thermal mismatch deformation of multi-layer structures is becoming increasingly prominent, and the demand for quantitative characterization of low-temperature deformation of the focal plane is becoming increasingly urgent. Based on the cold box component of the ultra-long linear infrared focal plane detector, a study was conducted on the low-temperature deformation of the focal plane, and theoretical simulation was conducted on the low-temperature deformation of the focal plane caused by multi-layer structure bonding. A test method for low temperature deformation of the focal plane of the detector at a working temperature of 90 K was designed. The results of the surface shape test were compared and analyzed with simulation calculations. The overall focal plane moved downward at low temperature, but the deformation curve was arched. The simulation showed that the chips on both sides were concave downward by about 9.24 μm . In the middle position, the chip was concave downward by 1.36 μm . The experimental results showed that the chips on both sides were concave downwards by about 40 μm , and in the middle position, the chip was concave by 10 μm . The data difference was related to the parameter setting of simulation materials.

收稿日期: 2022-12-07

作者简介: 张璐(1995-), 女, 山东东营人, 工程师, 主要从事红外探测器杜瓦的光机设计方面的研究。

E-mail: luzbit@163.com

The rationality of the simulation results has been verified, which can provide a reference basis for the design of the focal plane multi-layer structure of ultra-long line array detectors.

Key words: low-temperature deformation; theoretical simulation; profile test; material parameters; infrared focal plane detector

0 引言

随着航天、国防等领域红外探测需求的增加, 红外焦平面探测器规模正朝着大面阵、长线列的方向发展。目前国内已研制出 2048×2048 元、8k 长线列等探测器, 国际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^[1]。在长线列、大面阵的碲镉汞红外焦平面探测器中, 碲镉汞芯片与读出电路芯片互连后通过多层拼接衬底、安装基板等(常用材料有 Si、SiC 等)固定在金属冷台(常用材料有 TC4、Invar 等)上^[2]。由于各层材料热膨胀系数的差异, 当探测器由室温降至低温工作环境时, 材料之间的热失配会引发芯片的应力变形^[3], 使整个焦面产生低温形变。

关于探测器封装结构焦面的低温热应力形变情况的量化表征、控制和调节是第二、三代碲镉汞红外焦平面探测器发展过程中面临的关键技术问题: 一方面有利于掌握焦平面器件芯片在低温条件下的平整度情况, 为探测器光学串音的改进设计提供参考数据; 另一方面有利于对探测器热失配程度进行定量表征^[4], 为后续的探测器结构设计参数、模型的建立和验证提供试验数据和验证方法, 对提高大规模焦平面探测器的温度可靠性具有至关重要的意义。

目前国内外的面形测试方法大致分为以下几种: 激光干涉检测法、激光测距仪检测法和三维影像测试仪检测法。2014 年, 陈星^[4]对 512×512 组件焦面的热应力变形进行了测试。他将 512×512 阵列的单个芯片封装在 L 型专用中测杜瓦中, 然后用高精度三维影像测试仪采集测试数据。张学军等人^[5]提出了一种将相位偏折面形检测法与激光干涉面形检测法相结合的面形检测装置及面形检测方法。该方法可

用于光学元件的面形检测^[6]。

本文基于长线列红外焦平面探测器冷箱组件开展焦面热应力变形研究, 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了长线列红外焦平面探测器的低温应力分布及形变。设计了一种探测器工作温度下焦面热应力形变的测试方法。对比分析面形测试数据与仿真计算之间的误差, 验证仿真结果的合理性, 为大面阵长线列探测器焦面多层结构设计提供参考依据。

1 结构设计及热应力仿真分析

1.1 封装结构形式

作为制冷型红外探测器芯片的封装载体, 封装结构一方面要给探测器提供一个低温工作环境(真空、低温、低噪声), 同时又要满足在红外系统中应用的各种接口(光学、电学、制冷机及机械安装接口)要求^[8]。组件的光谱范围为 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 工作温度大于等于 90 K。采用真空冷箱封装形式, 以满足空间真空环境下的长寿命要求。图 1 为杜瓦结构的示意图。

组件冷头是探测器封装结构的重要部分。它作为探测器芯片的装载面, 将制冷机的冷量传递给探测器芯片; 另外它还用于探测器芯片与电学引出结构的过渡。本结构中的冷头主要由安装基板、拼接衬底、探测器芯片、电学过渡板和冷屏组成。

图 2 所示为探测器芯片的排列方式, 即由 8 片 $1024 \times 6(\times 2)$ 的探测器芯片沿线列方向、呈“几”字形拼接而成。芯片光敏面尺寸为 $192.6 \text{ mm} \times 19.5 \text{ mm}$ 。8 片碲镉汞探测器芯片与 8 片读出电路互连后, 由低温粘接剂粘接在单片 Si 拼接衬底上。拼接衬底通过导热胶粘接在 SiC 安装基板上, 安装基板由螺钉固定于 TC4 支撑法兰上。冷头结构模型如图 3 所示。

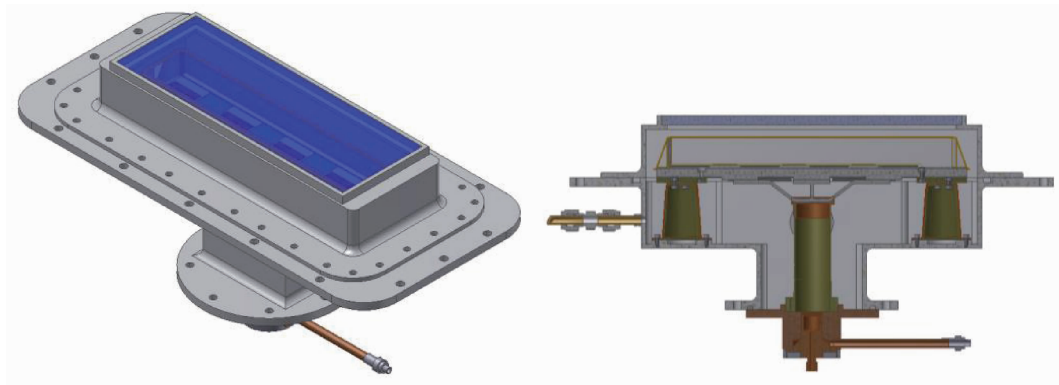


图 1 杜瓦结构的示意图

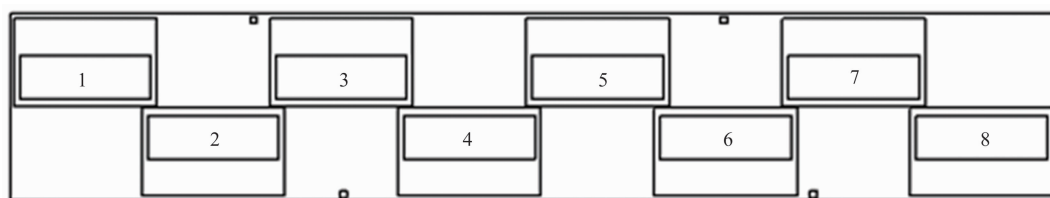


图 2 芯片排列方式示意图

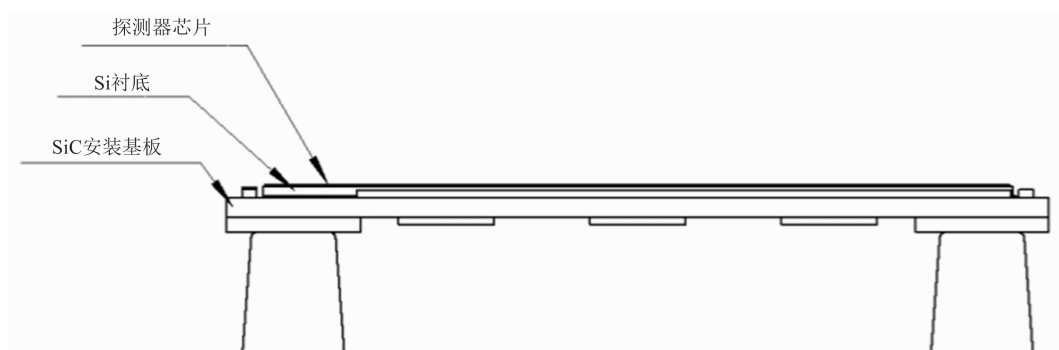


图 3 冷头结构的示意图

表 1 探测器各组成部分的材料及厚度

名称	碲镉汞芯片	读出电路芯片	钢柱	填充胶	拼接衬底 (Si)	安装基板 (SiC)	支撑法兰台面 (TC4)
厚度	0.4 mm	0.5 mm	10 μm	10 μm	1.5 mm	6 mm	4 mm

低温下不同材料的热膨胀系数不同会引起热失配,故需对冷头结构进行低应力低变形设计分析。

1.2 焦面热应力仿真分析

仿真时,采用等效建模方法将钢柱和填充环氧胶简化为一层,并在此基础上施加边界条件^[1]。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 90 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。探测器各组成部分的材料及厚度见表 1。

本文设计了合理的边界条件和温度参数,并对焦面应力及变形进行了仿真计算(结果见图 4~图 6)。从图 4 中可以看出,探测器的温度约为 88 K。从图 5 中可以看出,芯片 1 右下角、芯片 2 左上角、芯片 7 右下角、芯片 8 左上角所受的应力较大,最大值约为 30.63 Mpa,这是由于此位置安装基板下方有两个支撑法兰结构。从图 6 中可以看出,焦面呈拱形,两边芯片向下凹约 9.24 μm ,中间位置芯片向下凹 1.36 μm 。

2 结构热应力变形测试

2.1 测试方法介绍

超长线列红外焦平面探测器面形测试存在以下难点: 一是需测量探测器实际工作温度 90 K 下的焦面变形, 并且规避体积较大的制冷型红外探测器工作状态下由制冷机^[8]、真空泵带来的振动影响, 从而保证测试结果与探测器真实工作状态的匹配性更好, 数据说服力较强; 二是探测器焦面规模大, 由多片芯片耦合在拼接基板上制备而成, 相当于对多芯片进行共焦面测试; 三是测试精度要求高, 芯片拼接精度 X、Y 方向优于 8 μm 、Z 向优于 18 μm , 所以测试精度需达微米级。

通过对结构测试要求进行分析, 我们研制了精密芯片拼接检测系统。此系统 X、Y 向定位精度为 0.5 μm , 重复定位精度为 0.7 μm ; Z 向定位精度为 1.2 μm , 重复定位精度为 0.5 μm 。项目要求的拼接焦面平面度小于 20 μm , 识别精度为微米级, 故该系统能满足低温面形测试要求。此系统的测量工作台由 CCD 相机、变倍显微系统、基准大理石底座、X 向运动及控制系统、Y 向运动及控制系统和 Z 向运动及控制系统组成。CCD 相机、变倍显

微系统组成的探头部分可通过龙门控制系统在 X、Y、Z 向位移。CCD 相机通过依次识别 8 个芯片上左右两侧的定位标识可获得芯片的 Z 向高度。

根据精密芯片拼接检测系统的景深要求, 为保证 CCD 相机识别到芯片闪电标定位标识, 需设计专用窗座, 保证窗口到焦面的距离小于 30 mm。设计专用 K9 玻璃窗片, 保证探测器焦面的真空度和可见光探测环境。实验采用控制变量法。

2.2 测试过程

首先搭建实验平台: 将探测器组件固定, 使焦面正对 CCD 相机; 控制探头部分 Z 向高度, 使焦面位于相机焦深范围内。把探测器抽真空泵组、制冷机电源以及温度监测万用表置于系统平台外的桌子上, 防止其抖动对测试产生影响。装置搭建情况如图 7 所示, 芯片左右两侧定位标识如图 8 所示。

实验中采用控制变量法分别对常温、低温工作温度、回温至常温时的焦面平面度进行测量。为保证测试结果的准确性, 每组实验均重复三次, 测试结果取平均值。

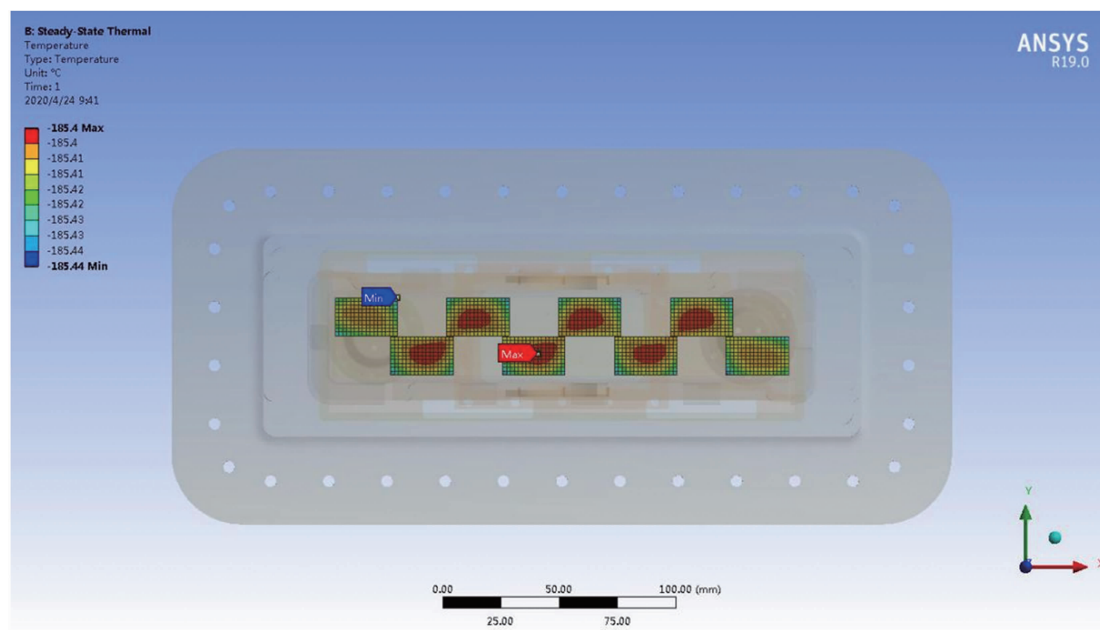


图 4 探测器的温度均匀性云图

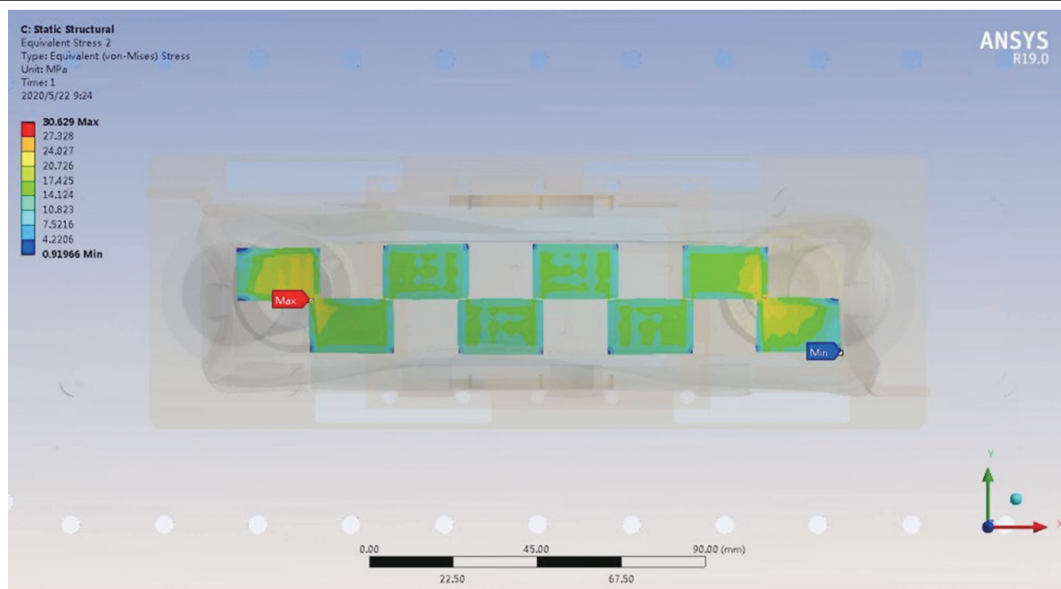


图 5 90 K 工作温度下的焦面应力仿真数据

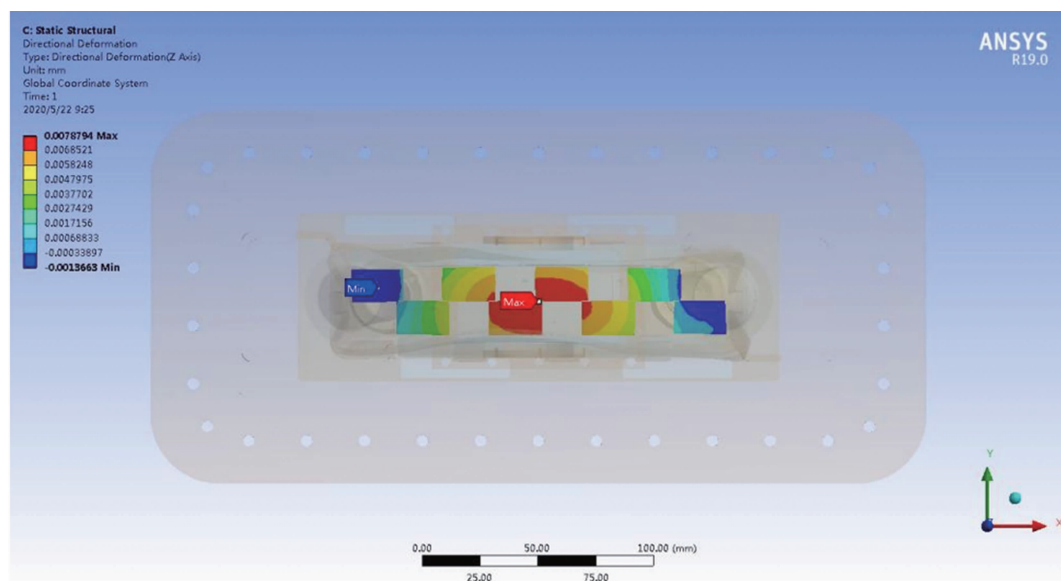


图 6 90 K 工作温度下的焦面低温形变仿真数据

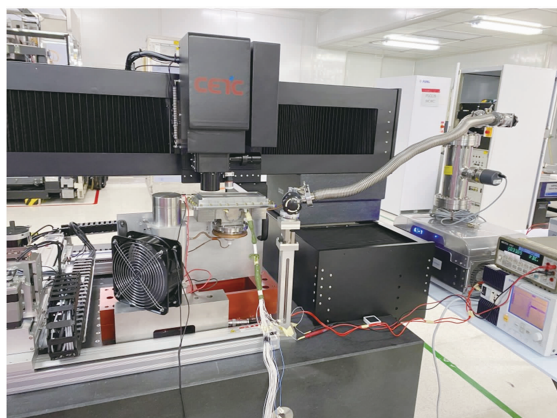


图 7 实验平台搭建示意图

2.2.1 常温面形测试

打开排气管喇叭口旋钮，启动抽真空泵。组件排气后，真空度降至 10^{-3} Pa 量级时关闭泵和喇叭口旋钮。控制 CCD 相机移动，使其依次识别清楚芯片定位标识，依次记录芯片定位标识的 Z 向高度。

2.2.2 低温面形测试

在做完常温面形测试后，分次调高电源电压值，直至电源功率达到组件制冷要求。通过读取焦面二极管电压值确定焦面工作温度。为防止真空泵抽气造成的振动影响焦面测试，把

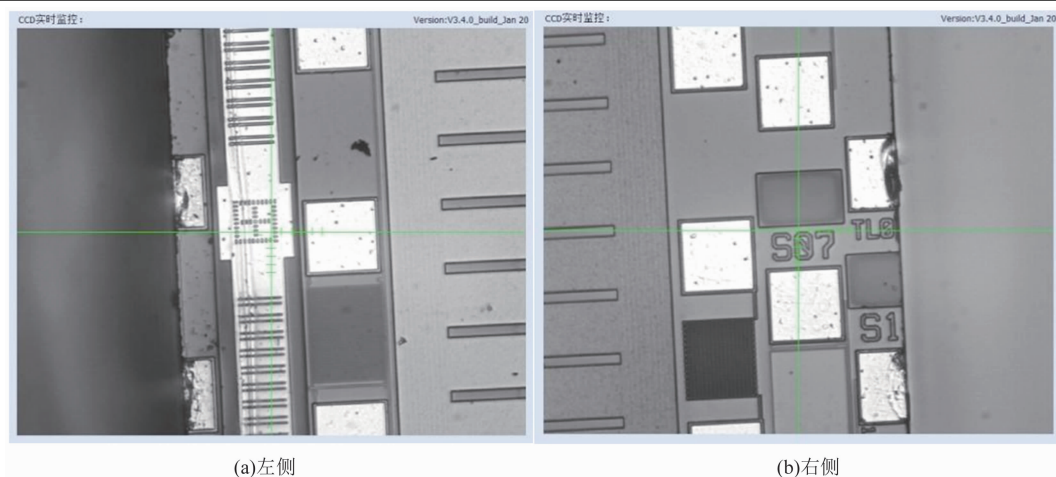


图 8 芯片定位标识

表 2 面形测试数据统计表 1

芯片编号	1		3		5		7	
	左	右	左	右	左	右	左	右
296 K 时面形/mm	26.709	27.391	27.911	28.580	29.099	29.758	30.320	30.979
120 K 时面形/mm	26.667	27.357	27.883	28.562	29.087	29.738	30.295	30.943
面形变化 $\Delta/\mu\text{m}$	-42	-34	-28	-18	-12	-20	-25	-36

表 3 面形测试数据统计表 2

芯片编号	2		4		6		8	
	左	右	左	右	左	右	左	右
296 K 时面形/mm	27.437	28.075	28.618	29.269	29.809	30.470	31.019	31.708
120 K 时面形/mm	27.397	28.040	28.591	29.259	29.801	30.448	30.993	31.674
面形变化 $\Delta/\mu\text{m}$	-40	-35	-27	-10	-8	-22	-26	-34

排气管喇叭口旋钮拧上, 将泵关闭; 制冷机持续打开, 制冷机造成的振动对焦面测试的影响很小, 可忽略不计。控制 CCD 相机移动, 使其依次识别清楚芯片定位标识, 依次记录定位标识的 Z 向高度。

2.2.3 回温测试

在完成低温面形测试后, 将制冷机停止。为防止芯片结霜, 真空泵仍处于关闭状态。待焦面温度恢复到与常温面形测试温度一致时, 控制 CCD 相机移动, 使其依次识别清楚芯片定位标识, 依次记录定位标识的 Z 向高度。

2.3 测试结果处理

采用以上测试方案对红外焦平面探测器进行了低温面形测试实验(结果见表 2 和表 3)。

组件放置在 CCD 下方时有一定的倾斜, 所以常温 296 K 下芯片定位识别点的 Z 向位置

差别大。对于本实验, 仅考虑低温下 Z 向位置偏移量即可分析芯片低温面形的变化, 对数据进行拟合处理(结果见图 9)。从图中可以看出, 低温下芯片呈拱形, 与仿真结果基本一致; 整个焦面都向下弯曲, 两侧弯曲程度大, 中间弯曲程度小; 左侧芯片 1、3、2、4 的弯曲程度大于芯片 5、7、6、8。

焦面低温形变与胶层厚度、胶层均匀性、拼接衬底、安装基板材料及平面度等多种因素有关。综合测试数据和仿真数据, 在后续设计时可预留边缘位置芯片的形变公差, 增大探测器低温工作时的焦面平面度, 从而提高探测器的光学响应度。

2.4 仿真与测试结果分析

通过对比仿真结果与测试结果可以看出, 低温下焦面变形曲线均为上凸形, 这与多层材

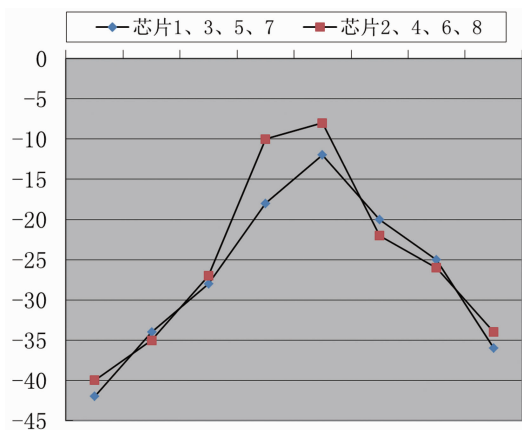


图 9 低温下的面形变化趋势

料的热膨胀系数不同有关。在后续设计中应进一步优化材料的匹配性。另外,仿真数据变形量与实测数据变形量存在差值,表明仿真数据的边界条件、网格划分、胶层设置还存在优化空间。该研究可用于指导后续的设计工作,以增大探测器低温工作时的焦面平面度,从而有利于提高探测器的光学响应度。

3 结束语

为满足航天等领域的特殊需求,红外焦平面探测器的阵列规模日益扩大,多层结构的低温热失配形变导致的杜瓦可靠性问题愈发突出。本文对超长线列红外探测器开展了焦面低温形变研究,针对多层结构粘接造成的低温形变进行了理论仿真;设计了探测器工作温度下焦面低温形变的测试方法(测试精度达 $1\text{ }\mu\text{m}$)。该方法可规避体积较大的制冷型红外探测器工作状态下由制冷机、真空泵带来的振动影响,数据说服力较强。

对于本文研究的红外探测器组件来说,低

温下焦面呈拱形,对比分析面形测试结果与仿真计算之间的误差,验证仿真结果的合理性。在以后的探测器设计中,通过对模型的精准仿真可以有效评估焦面的变形。未来可选择线膨胀系数更匹配的材料,提升探测器低温工作时的焦面平面度,从而提高探测器的光学响应度。

参考文献

- [1] 付志凯,李雪梨,张磊,等. 大面阵碲镉汞芯片的热应力分析与优化 [J]. 红外, 2021, 42(4): 25–29.
- [2] 东海杰,张磊,白绍竣,等. 长线列红外探测器组件冷台面结构设计 [J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 1020–1022.
- [3] 孟令伟,东海杰,张懿. 多谱段集成长线列红外探测器研究进展 [J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 697–702.
- [4] 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.
- [5] 张学军,胡海翔,陶小平. 一种面形检测装置及面形检测方法: CN110514142A [P]. 2019–11–29.
- [6] 王孝坤,郑立功,张学军. 接触式非球面面形检验装置: CN102128599A [P]. 2011–07–20.
- [7] 夏王,王小坤,林春,等. $12.5\text{ }\mu\text{m}$ 长线列碲镉汞焦平面杜瓦组件 [J]. 激光与红外, 2012, 42(4): 389–392.
- [8] 范广宇. 直线脉管集成耦合杜瓦封装设计及其关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.