

文章编号:1001-5078(2025)04-0575-04

· 红外材料与器件 ·

碲镉汞长波红外探测器成像暗环研究

李娟¹, 高璐², 陈彦冠¹, 付志凯¹, 张磊¹

(1. 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015; 2. 火箭军驻北京地区第六军事代表室, 北京 100074)

摘要: 红外整机成像时需要对外红外探测器的输出进行非均匀校正, 来获得相对均匀可观的图像。在一款碲镉汞长波红外探测器整机成像实验时, 图像出现了“暗环”现象, 通过分析确认了“暗环”现象的机理, 并通过优化改进, 消除了成像“暗环”, 为其他长波红外探测器成像应用提供了借鉴。

关键词: 长波探测器; 碲镉汞; 暗环

中图分类号: TN215; TN206 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.014

Research on dark ring imaging in long-wave infrared HgCdTe detectors

LI Juan¹, GAO Lu², CHEN Yan-guan¹, FU Zhi-kai¹, ZHANG Lei¹

(1. The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China;

2. The 6th Military Representative Office of Rocket Army in Beijing Region, Beijing 100074, China)

Abstract: Infrared imaging requires non-uniform correction of the output of the infrared detector to obtain a relatively uniform and impressive image. The dark ring phenomenon occurs during the imaging process of long-wave infrared HgCdTe detector systems, and the mechanism is confirmed through analysis, and the imaging dark ring is eliminated through optimization and improvement. This method serves as a valuable reference for other applications utilizing long-wave infrared detectors in imaging.

Keywords: long-wave infrared detector; HgCdTe; dark ring

1 引言

碲镉汞材料具有较高的量子效率、良好的半导体性能及可调节的波长灵敏度, 是红外探测器应用的理想材料^[1], 也是应用最广泛的红外探测器窄带隙半导体材料之一^[2]。碲镉汞红外探测器的波长可覆盖短波、中波、长波及甚长波。目前, 认为碲镉汞探测器依然是目前性能最好的红外探测器^[3], 国际国内主流的红外探测器几乎均为碲镉汞红外探测器。

以碲镉汞材料制备的长波红外探测器组件在海面复杂目标、远距离探测^[4]、低温目标探测等应用场景下成像性能优于中波组件, 近几年在国内有了较快的发展。但由于碲镉汞长波探测器工艺更复杂、制造难度更大, 技术条件受限, 仍存在许多遗留问题, 需要

攻关解决。

在对一款碲镉汞长波红外探测器组件成像系统实验时, 探测器在放置一段时间开机后图像出现了“暗环”现象, 如图1所示。此种现象影响图像的均匀性, 同时, 在暗弱目标探测时, 对目标的识别和捕获会产生干扰。经数据分析, 暗环处像素灰度与附近正常像素灰度相差约7 mV, 暗环外边缘直径约6 mm。

2 机理分析

成像组件产品主要由光学镜头、红外探测器和预处理电路组成。预处理电路为长波红外探测器组件工作提供斯特林制冷机电源、芯片工作偏置电压以及脉冲等。同时, 在使用过程中, 预处理电路对红外探测器组件的输出信号进行非均匀校正, 非均匀

性校正参数自动存储到成像电路中,每次系统使用时,调用存储好的参数进行图像校正,并输出校正后的图像。长波红外探测器组件由长波探测器芯片、真空微型杜瓦、斯特林制冷机及其驱动控制器组成。成像组件构成如图 2 所示。

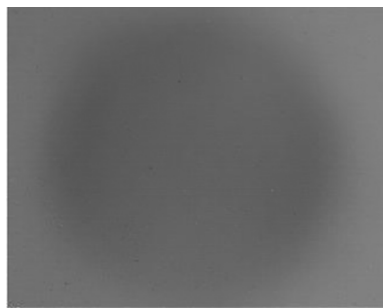


图 1 暗环现象图

Fig. 1 Dark ring map

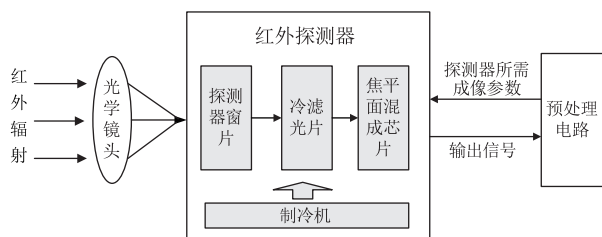


图 2 成像组件功能图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging components

2.1 预处理电路分析

图像预处理电路主要有两个功能。一方面,需要给探测器提供工作所须的偏压和时序,暂称为参数配置模块。另一方面,需要对探测器的输出信号进行 AD 转换、非均匀校正等图像处理,此模块暂称为图像处理模块。参数配置模块主要包括供电电压、GPOL 偏压、积分时间和时钟等。其中,GPOL 电压值的变化及积分时间漂移均会影响探测器组件的输出像元特性。经测试分析,GPOL 电压值及积分时间均未发生变化,且 GPOL 电压值的变化及积分时间漂移造成的图像输出应为全面阵图像的整体变化,无法呈现出“圆圈”形状,因此预处理电路中的参数配置模块正常。

预处理电路中的图像处理模块需要对探测器的输出信号进行 AD 转换、图像处理等。图像处理模块读取探测器输出的原始电平信号进行 AD 转换后,经过两点非均匀性校正,输出校正后图像。非均匀性校正是读取整帧图像数据和校正参数进行的校正运算,不会造成个别像元或区域像元的异常,因此判定非均匀性校正正常,即预处理电路中图像处理

模块正常。

表明成像组件中预处理电路正常。

2.2 红外探测器分析

红外探测器中能够对输出图像特性产生影响的有红外探测器组件制冷机控温点变化、探测器微型杜瓦光学发生变化及探测器芯片发生变化。

2.2.1 探测器制冷机分析

长波红外探测器组件在探测器芯片旁边放置了两个测温二极管用来检测探测器芯片的温度。若探测器芯片的工作温度发生变化,探测器像元的输出响应将随之发生变化,在成像电路固定校正参数的情况下将出现图形变化。经测试分析,红外探测器组件制冷机的控温点未发生变化,因此,制冷机表现正常。

2.2.2 探测器窗片及滤光片分析

真空微型杜瓦的窗口和滤光片选透过谱段,使探测器响应长波红外辐射;另一方面,保持高真空度来降低杜瓦内部热交换,保持探测器芯片低温工作温度稳定。经测试,探测器响应波段及信号未发生变化,表明杜瓦光学正常,初步定位为探测器芯片。

2.2.3 探测器芯片分析

按照初始参数条件进行测试,对比探测器初始和现状态下的性能特性,探测器性能指标、盲元图及电平图基本一致。通过拉偏 GPOL 测试,探测器“暗环”区域与其他正常区域表现基本相当,未发现异常,表明探测器芯片并未发生“物理层”面上的变化,如图 3 所示。

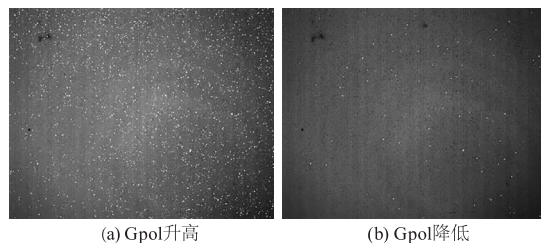


图 3 GPOL 变化后成像图

Fig. 3 Results of GPOL transform

结合探测器半导体的物理特性,能够造成探测器输出电学特性微观变化的因素,主要为探测器的暗电流影响。暗电流是碲镉汞红外探测器组件噪声的主要来源,是半导体器件的固有属性,因此,不能排除暗电流空间分布变化的原因。

2.2.4 暗电流空间分布变化机理分析

探测器暗电流由多种机制的噪声电流组成,在较低的温度下,表面漏电流主导暗电流。碲镉汞器件表面存在的复合中心、表面应力变形、表面

层的导电性以及表面态和表面固定电荷对表面层材料的能带结构的影响是产生表面漏电的主要因素。

对红外探测器结构进行分析,涉及芯片应力的区域集中在探测器冷头部分。其结构如图4所示,从上到下依次为探测器芯片、框架、结构件、冷台,均采用粘接剂粘接工艺。这些材料之间膨胀系数存在差别,不同温度下彼此间会存在应力。对探测器芯片工作在零下196℃时的冷头结构进行应力仿真分析,结果如图5、图6所示。

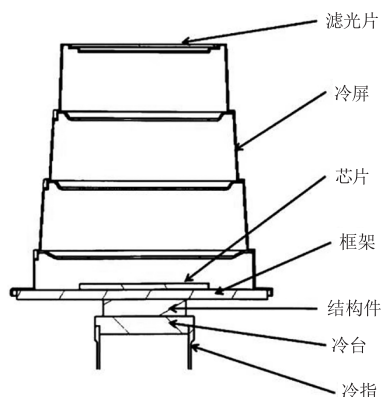


图4 探测器冷头区域结构图

Fig. 4 Structure of the detector cooling head

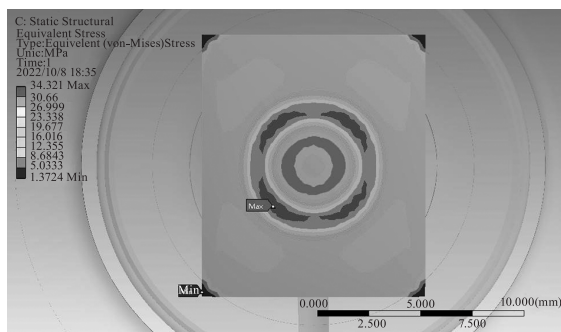


图5 长波320×256探测器低温应力(电路上表面)

Fig. 5 Low temperature stress for long-wave 320 × 256 sensors (up surface of circuit)

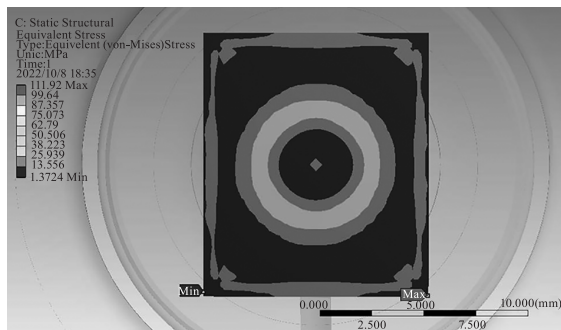


图6 长波320×256探测器77 K低温应力(电路体应力)

Fig. 6 Low temperature stress@ 77 K for long-wave 320 × 256 sensors (stress on circuit)

根据应力仿真分析结果可以得出,芯片应力最大区域分布于 $\phi 5 \sim 5.5$ mm区域内,高应力区域面积较小,与暗环区域尺寸形状(6 mm)均较为接近。

因此,可以确定探测器成像“暗环”现象的机理是:探测器低温工作时,芯片受到结构低温应力分布作用,其表面层的导电性产生了一定的空间变化,暗电流在局部不稳定,导致存储两点参数长时间放置后再次制冷降温响应信号发生少量漂移。

根据分析机理,可以从两方面去改善探测器的成像特性。一方面是提升探测器芯片暗电流的稳定性,另一方面则是改善结构应力分布。本文,将从改善结构应力分布的方面去验证成像“暗环”的改善情况。

3 改进方案及验证情况

3.1 结构件应力分布改进方案

从上述章节分析可知,“暗环”形状近似为直径6 mm的圆环,与探测器杜瓦内部结构件尺寸(7 mm)接近。因此,通过更改结构件来获得最优的结构应力分布来匹配红外探测器芯片,消除“暗环”。在优化结构件方面,需从结构应力分布及热耗两个方面设计考虑,一方面消除结构件应力分布带来的“暗环”,另一方面需兼顾结构件带来的杜瓦热耗变化。

通过设计仿真,最终选定优化后的结构件体系。对结构件尺寸及形态进行了优化,获得最优的结构应力分布。对优化后的结构件应力分布进行仿真,其电路的应力分布如图7、图8所示。最大应力值与优化前状态基本相当,最大应力分布在芯片上下两侧边缘位置,且应力分布面积更大更均匀。

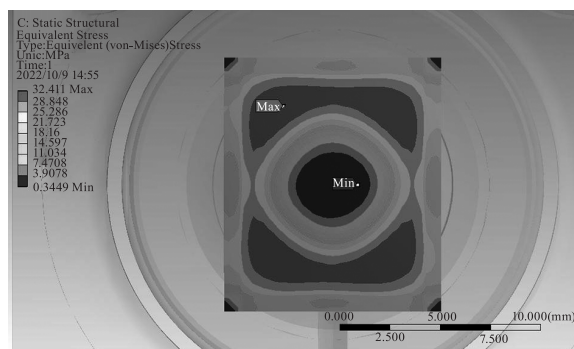


图7 电路上表面应力

Fig. 7 Surface stress on circuit

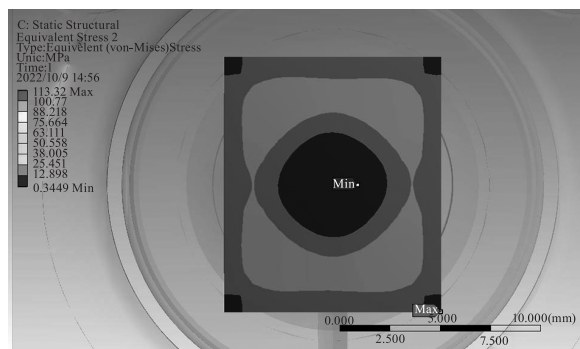


图 8 电路体应力

Fig. 8 Stress on circuit

3.2 实验验证

将出现暗环的探测器组件结构件更换为 3.1 节优化后的结构件,进行产品封装耦合制冷机后,成像测试验证。探测器重新进行两点校正后,贮存 1 个月后采集图像,“暗环”消失,成像图如图 9 所示。进一步验证了暗环的成像机理及更改结构件措施的有效性。

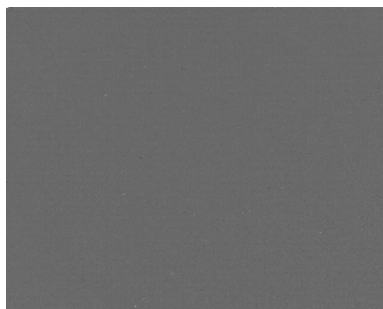


图 9 优化后成像图

Fig. 9 Optimized imaging map

4 结 论

长波红外探测器组件在特定应用场景中具有非常明显的优势,近几年成为各种整机系统的优选方案。但长波红外探测器组件禁带宽度窄,制造难度大,对结构应力更为敏感。本文在一款长波探

测器成像时发现了“暗环”现象,通过分析,确定“暗环”是由于探测器低温工作时,芯片受到结构应力分布作用,表面层的导电性产生了一定的空间变化,暗电流在局部不稳定,导致存储两点参数长时间放置后再次制冷降温响应信号发生少量漂移。通过更改结构应力分布,消除了“暗环”现象。为长波组件的应用提供了借鉴。

参考文献:

- [1] Chen Shuzhen, Qi Jiao jiao, Wang Dan, et al. Effect of material morphology on the performance of HgCdTe infrared focal plane devices [J]. Infrared Technology, 2022, 44 (10):1033 - 1040. (in Chinese)
陈书真,祁娇娇,王丹,等.材料形貌对碲镉汞红外焦平面器件性能的影响[J].红外技术,2022,44(10):1033 - 1040.
- [2] Ma Runze, Zhang Xiaoming, Feng Shuai, et al. Research status and prospect of infrared photoelectric detection technology (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50 (10):1004006. (in Chinese)
马润泽,张晓明,冯帅,等.红外光电探测技术研究现状及展望(特邀)[J].光子学报,2021,50(10):1004006.
- [3] Cai Yi. Review and prospect of HgCdTe detectors (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51 (1): 20210988. (in Chinese)
蔡毅.碲镉汞探测器的回顾和展望(特邀)[J].红外与激光工程,2022,51(1):20210988.
- [4] Ding Liwei, Gan Yuhong, et al. Performance comparison and selection of mid-wave and long-wave infrared detection systems [J]. Infrared, 2004, 35 (5): 1 - 6. (in Chinese)
丁利伟,甘宇红,等.中波红外和长波红外探测器系统性能的比较与选择[J].红外,2004,35(5):1 - 6.