

文章编号: 1672-8785(2014)07-0016-05

红外光导探测器组件的串音研究

汪 洋^{1,2} 刘大福^{1,2} 徐勤飞^{1,2} 范广宇^{1,2} 龚海梅^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理所传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 作为目标探测与成像系统的核心器件, 红外探测器组件的空间分辨能力会直接影响探测系统的成像质量。通常使用调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 对该能力进行评估。而探测器组件的电学串音和光学串音则是影响其 MTF 的主要因素。利用锁相系统测试了红外探测器组件的电学串音, 同时用一套弥散斑直径为 $30\ \mu\text{m}$ 的红外小光点测试系统测试了红外探测器组件的线扩展函数 (Line Spread Function, LSF) 以评价其光学串音。测试结果表明, $11.5 \sim 12.5\ \mu\text{m}$ 波段探测器的光学串音明显比 $8.0 \sim 9.0\ \mu\text{m}$ 波段探测器的大。最后对测试结果进行了分析, 为红外探测器组件的光学串音设计提供了参考。

关键词: 线扩展函数; 串音; 红外探测器; 空间分辨率

中图分类号: TN06 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.07.004

Study of Crosstalk of Infrared Photoconductive Detector Assemblies

WANG Yang^{1,2}, LIU Da-fu^{1,2}, XU Qing-fei^{1,2}, FAN Guang-yu^{1,2}, GONG Hai-mei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Key Laboratory of Infrared

Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: As a core device of a target detection and imaging system, an infrared detector assembly's space resolution may directly affect the imaging quality of the detection system. Usually, the Modulation Transfer Function (MTF) is used to evaluate the spatial resolution. However, both electric crosstalk and optical crosstalk of a detector assembly are the main factors affecting the MTF. A phase-locked system is used to measure the electric crosstalk of the infrared detector assembly while an infrared micron-spot test system is used to measure the Line Spread Function (LSF) of the assembly so as to evaluate its optical crosstalk. The measurement result shows that the optical crosstalk of the $11.5\text{--}12.5\ \mu\text{m}$ waveband detector is obviously greater than that of the $8.0\text{--}9.0\ \mu\text{m}$ waveband detector. Finally, the measurement result is analyzed. The analysis result provides a reference for the optical crosstalk design of the infrared detector assembly.

Key words: LSF; crosstalk; infrared detector; spatial resolution

收稿日期: 2014-04-12

作者简介: 汪洋 (1981-), 男, 浙江富阳人, 助理研究员, 硕士, 主要从事探测器组件测试技术研究。

E-mail: wangyang@mail.sitp.ac.cn

0 引言

随着探测技术的不断发展, 红外探测器组件不仅在军用和民用领域得到了越来越广泛的应用^[1], 而且其性能也在不断提高, 因此人们对探测系统的空间分辨率的要求也越来越高。探测系统的空间分辨率一般采用 MTF 进行评价, 而影响系统 MTF 的因素主要包括连续光学系统意义上的点扩散函数、探测器的几何结构、探测元将光子转换为电荷的转换效率以及探测元之间的串音等, 它们均会促使空间信息分布发生变换^[2,3]。其中, 探测元之间的串音是一种极为重要的影响因素, 它通常由光学串音和电子学串音两部分组成, 其大小与组件中的滤光片、光阑、探测器结构以及放大器通道间的耦合等因素有关^[4,5]。虽然人们可以在没有入射光的条件下测量其中的电学贡献即所谓的电串音, 但是只有探测元的总串音才能反映其真实的串音大小。

人们通常采用小光点系统对总串音进行测量, 即通过准直光学系统和聚焦装置将小目标(如狭缝和圆孔等)成像到单个光敏元上, 然后测出中心光敏元和邻近光敏元的响应信号, 从而获得用百分比表示的串音数据^[3]。国外许多大学、研究机构和公司都斥巨资积极研制用于测试红外焦平面阵列的光学串音等参数的仪器。例如, 法国 HGH 公司、美国 TI 公司、美国航空航天局(NASA)以及日本北海道大学等都对其进行了研究^[6-8]。法国 HGH 公司生产的 BIRD210 型红外焦平面参数测试系统以黑体作为光源, 其红外小光点聚焦光斑直径(反射式)约为 $50\text{ }\mu\text{m}$ ^[6]。美国陆军夜视和光电技术公司(NVEOD)以可调谐激光作为光源, 其红外小光点聚焦光斑直径(透射式)约为 $50\text{ }\mu\text{m}$ ^[7]。由于这些设备极为昂贵, 国内研究机构难以承受。本文介绍了一种用于测试红外探测器组件的光学串音的小光点测试设备, 并用其测试了红外 HgCdTe 光导探测器组件在波段间和波段内的 LSF, 最终获得了该探测器组件的串音值(百分比)。

1 测试原理

1.1 探测器组件的光学串音测试

采用小光点测试系统对探测器组件的光学串音进行测试。该系统由探测器组件杜瓦、载物台扫描系统及调焦系统、光学系统、探测器测试系统等 4 部分组成, 如图 1 所示。黑体辐射经过调制盘调制, 在物面处被狭缝限制尺寸, 然后经过光学系统准直和聚焦, 并通过杜瓦窗口, 在探测器感光面上形成细亮线。光导探测器需要施加 Keithley 6220 直流偏置才能正常工作。探测器响应的微弱信号经过 SR554 前放放大后被输入 SR830 锁相放大器。计算机终端通过 NI488 卡采集 SR830 锁相放大器的输出信号, 并采用 NI 公司的 LabView 软件对信号采集和五维位移平台进行控制。边扫描边采集, 采集完成后通过对数据进行归一化处理, 即可获得探测器组件的 LSF 曲线, 从而获得探测器组件的串音值(百分比)。

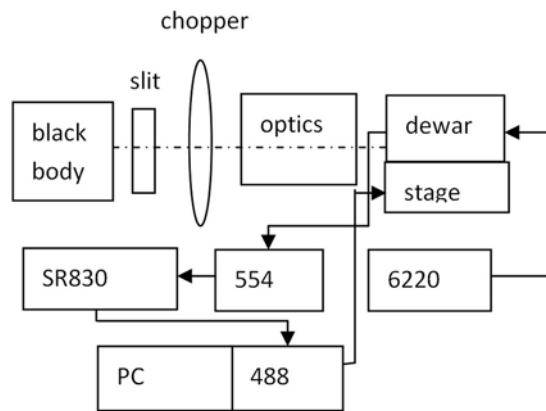


图 1 小光点测试系统的结构框图

这种光学测试系统可以分为准直和聚焦两部分。其中, 准直部分采用双反射镜结构; 聚焦部分采用图 2 所示的镜头设计, 即由 3 片锗镜片(1、2、3)组成。通过合理安排孔径光阑的位置, 使该系统的光路接近像方远心光路。由于 F# 较小, 其 ZNSE(4) 杜瓦窗口不会形成鬼像。表 1 列出了光学聚焦镜头的性能参数。

1.2 探测器组件的电学串音测试

图 3 为探测器电学串音测试系统的结构框图。通过 SR830 锁相放大器的谐振信号发生器输

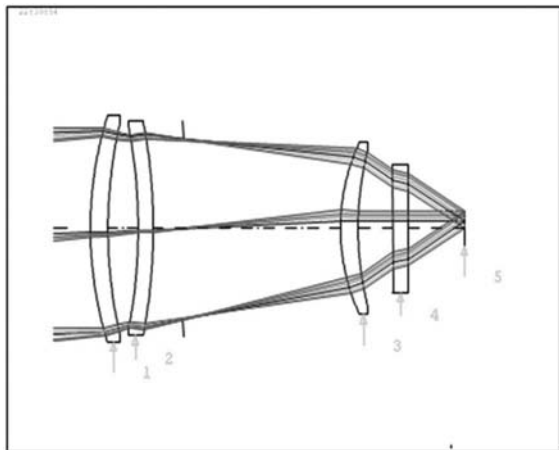


图 2 光学聚焦镜头的光路图

表 1 光学聚焦镜头的性能参数

光谱范围	F#	焦距	视场	光色散
8 ~ 13 μm	≤ 1.3	50 mm	5 mm $\times$ 5 mm	30 μm

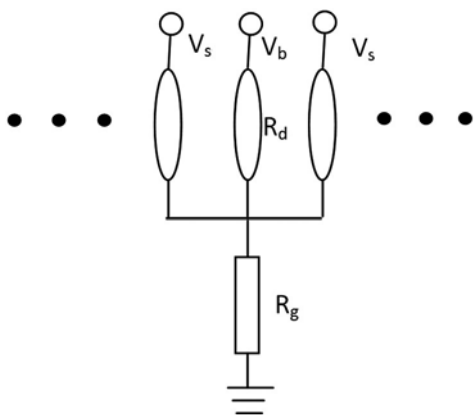


图 3 电学串音测试系统的结构框图

出有效值为 V_b 、频率为 1 kHz 的交流信号并将其输至相邻光敏元的两端。然后采用 SR830 锁相放大器的外同步功能进行锁相测试，得到中心光敏元的串音信号值 V_s 。根据公式 V_s/V_b 即可计算出该光敏元的电学串音（百分比）。依次类推，即可获得其余光敏元的电学串音（百分比）。

2 测试样品及条件

2.1 测试样品

测试样品为红外 HgCdTe 光导探测器组件。如图 4 所示，该探测器组件由 8.0 ~ 9.0 μm (D)、10.3 ~ 11.3 μm (C)、11.5 ~ 12.5 μm (B) 和 13.2 ~

13.8 μm (A) 等 4 个波段部分组成，它们成一字排列。而且每个波段部分包含四元器件。其中，探测器敏感元的尺寸为 56 $\mu\text{m} \times 56 \mu\text{m}$ 。通过低温胶将探测器芯片固定在宝石基板上，并通过光阑架将 4 个波段的滤光片安装在相应的探测器芯片上。光阑架已通过磷化发黑处理，可以降低表面反射。然后将探测器组件安装至测试杜瓦内，使其在低温下工作。

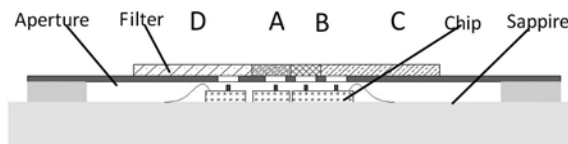


图 4 探测器组件的结构示意图

2.2 测试条件

黑体辐射源的温度为 800 $^{\circ}\text{C}$ 。将调制盘的工作频率设置为 400 Hz，并采用小亮条扫描方式即通过千分尺将狭缝宽度限制在 0.1 mm，然后通过多维位移平台移动测试杜瓦，使探测器测试系统接收到最强的信号，此处即为光学系统的聚焦位置；接着在一个方向上从左向右移动扫描（移动步长为 5 μm ），获得探测器组件的 LSF。LSF 可以分为波段间 LSF 和波段内 LSF 两种。其中，波段间采用 A1、B1、C1 和 D1 四元探测器敏感元进行扫描，波段内采用 B 和 D 波段内的四元探测器敏感元进行扫描。对探测器组件的 LSF 提取总串音（百分比），并将其与电学串音测试结果放在一个表格中进行比较。

3 测试结果及讨论

3.1 探测器组件的波段间 LSF

为了测试探测器组件的波段间 LSF，我们将探测器组件安装到测试杜瓦中以后，依次选择 4 个波段内的第一个探测器敏感元 D1、A1、B1 和 C1 作为信号采集器件，并利用多维位移平台将探测器组件调至光学系统的聚焦位置。狭缝的开口与波段内敏感元的排列方向一致，而且扫描方向为 D $\rightarrow$ C。4 个器件采集的 LSF 数据经过归一化处理后被绘制于同一图像中。图 5 已经标明了滤光片和芯片的位置。可以看出，

测试结果与实际位置相符, 而且 4 个波段的 LSF 的半高宽约为 $60\text{ }\mu\text{m}$, 与敏感元的实际尺寸 $56\text{ }\mu\text{m}$ 相符; 由滤光片边缘损伤引起的串音 (百分比) 约为 3%, 但是 LSF 左右不对称且探测器的敏感元边缘有响应。针对 LSF 左右不对称的情况, 采用了 C→D 反方向扫描, 然而测试结果未见改善, 因此初步推测其是由狭缝聚焦光路不一致所造成的。探测器敏感元的边缘响应可能是由于狭缝光信号在光阑架、芯片、宝石衬底和滤光片之间的反射、散射和衍射效应使光敏元接收到部分光信号以及存在载流子扩散引起的。

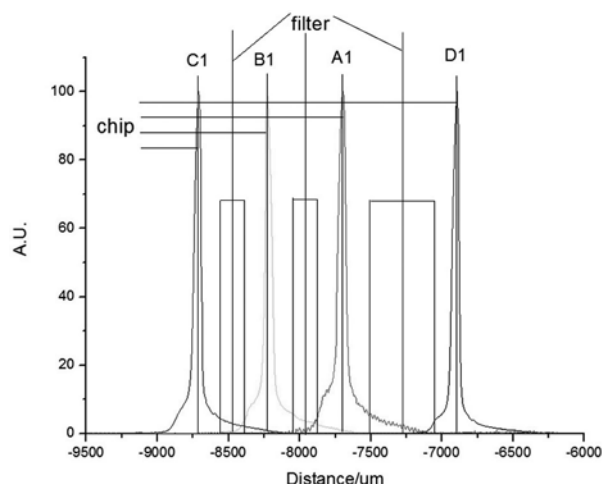


图 5 探测器组件的波段内 LSF

3.2 探测器组件的波段内 LSF

探测器组件的波段内 LSF 测试方法与波段间 LSF 测试方法相似。狭缝方向改变 90° , 缝宽也为 0.1 mm , 与波段内敏感元的排列方向垂直; D 波段选择 D1、D2、D3 和 D4 探测器敏感元作为信号采集器件, 扫描方向为 D1→D4; B 波段选择 B1、B2、B3 和 B4 探测器敏感元作为信号采集器件, 扫描方向为 B1→B4。4 个探测器敏感元采集的 LSF 数据经过归一化处理后被绘制于同一图像中。如图 6 和图 7 所示, 4 个光敏元的光串曲线的半高宽约为 $60\text{ }\mu\text{m}$, 与光敏元的实际尺寸相符; 4 个光敏元的位置与图中相符, 串音曲线依旧左右不对称, 敏感元边缘有响应, 而且 B 波段的光学串音明显比 D 波段大。

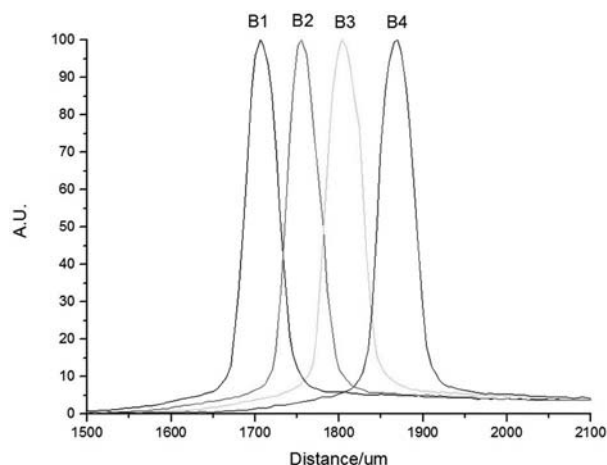


图 6 探测器组件在 B 波段内的 LSF

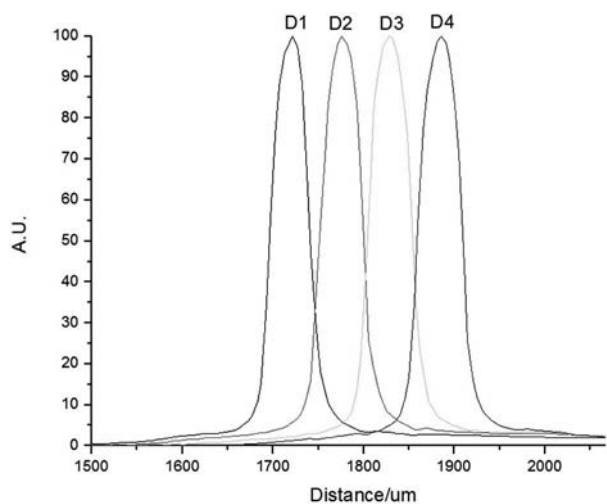


图 7 探测器组件在 D 波段内的 LSF

3.3 探测器组件的串音比较

根据相邻元器件的 LSF 在相应器件位置上的响应对 B 波段和 D 波段内的器件串音进行计算。这个串音包含器件的电学和光学串音。然后将 B 波段和 D 波段内器件的总串音和电学串音列在一张表中, 接着根据总串音和电学串音计算出相应的光学串音 (见表 2)。其中, B 波段和 D 波段的电学串音相差很小, 这是因为光导探测器的电学串音主要是由共用地引起的^[4,5]; B 波段的光学串音明显比 D 波段的大。图 8 所示为磷化发黑表面的反射光谱。可以看出, B 波段和 D 波段的反射很大, 在探测器表面容易形成由反射、散射和衍射综合效应引起的光学串音; 探测器表面的衍射效应强度与波长成正比,

表 2 波段内器件串音结果的比较

探测器	总串音	电学串音	光学串音
B1	7.32%	2.66%	4.66%
B2	9.04%	2.66%	6.38%
B3	7.66%	2.47%	5.19%
B4	8.03%	2.47%	5.56%
D1	5.56%	2.31%	3.25%
D2	5.89%	2.31%	3.58%
D3	6.54%	2.39%	4.15%
D4	6.59%	2.39%	4.20%

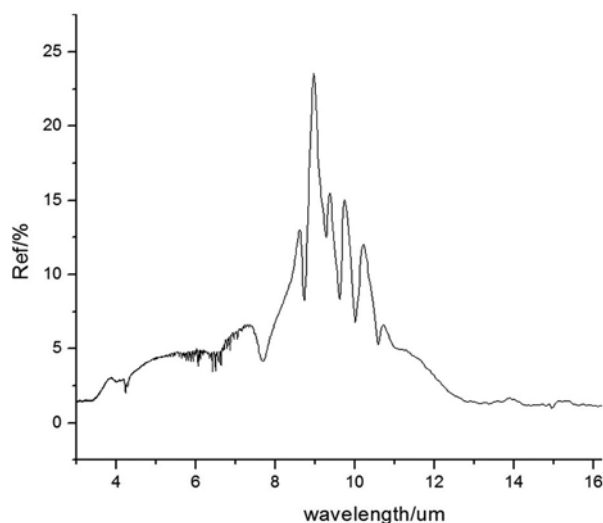


图 8 磷化发黑表面的反射光谱

而 B 波段的光学波长比 D 波段的长, 因此其光学串音比 D 波段的大。

4 结束语

本文采用小光点测试系统对红外 HgCdTe 光导探测器组件的波段间 LSF 和波段内 LSF 进行

了测试。结果表明, 探测器芯片的位置与实际位置相符, LSF 的半高宽约为 $60\text{ }\mu\text{m}$, 与敏感元的实际尺寸相符; 由滤光片边缘损伤引起的波段间串音 (百分比) 约为 3%, $11.5\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ 波段探测器的电学串音与 $8.0\sim 9.0\text{ }\mu\text{m}$ 波段的相当, 但是前者的光学串音明显更大, 这可能是由于 $11.5\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ 波段比 $8.0\sim 9.0\text{ }\mu\text{m}$ 波段的波长更长, 而探测器表面的衍射效应强度又与波长成正比引起的; 同时器件边缘存在部分响应, 这可能是由少数载流子扩散造成的, 其根本原因仍有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Antoni Rogalski. Infrared Detectors: An Overview [J]. *Infrared Phys Tec*, 2002, **43**: 187–210.
- [2] 黄巧林, 姜维. 航天光学遥感器 MTF 测试技术研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2006, **27**(4): 33–37.
- [3] 许中华, 方家熊. 利用红外焦平面调制传递函数曲线计算串音值 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(4): 041101.
- [4] 梁宏林, 蔡毅, 姚英. 多元光导碲镉汞探测器的电串音 [J]. *红外与毫米波学报*, 1997, **16**(1): 77–80.
- [5] 李大宇, 段星辉, 魏焕东. 多元红外光导探测器电子学串音研究 [J]. *激光与红外*, 2009, **39**(9): 952–955.
- [6] 刘子骥, 蒋亚东, 祝红彬, 等. 基于 PCIE 的红外焦平面探测器测试系统 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(4): 255–258.
- [7] Khoa V D, Christopher L K, Zenon I D. Crosstalk Measurement System and Technique: US, 5563409 [P]. 1996–10–08.
- [8] David R H. Vacuum Window Optical Power Induced by Temperature Gradients [C]. *SPIE*, 1999, **3750**: 1–12.

新闻动态 News

用新技术照射深空中的冷目标

据 www.spacedaily.com 网站报道, 宇宙中的许多物体因为温度太低或太微弱而无法用可见光探测。现在, 美国麦考密克工程与应用科学学院的一个团队独创了一项新技术, 能使温度低的物体更容易被发现, 为进一步探索深太空提供了条件。

高性能红外摄像机对太空探索非常关键。通过研究冷行星和冷恒星发出的红外波, 科学家们正在揭开这些

低温目标的神秘面纱。由于红外光比可见光波长更长, 因此它穿过稠密的气体 and 尘埃时被散射和吸收的量很少。目前的红外探测器一般采用在中波红外和长波红外波段性能良好的碲镉汞材料。然而, 这种成熟的碲镉汞红外技术在甚长红外波段的均匀性和稳定性较差。

麦考密克工程与应用科学学院的研究团队通过巧妙地处理 II 型超晶格材料的量子特性, 研制出了世界上首个高性能的 InAs/InAsSb 甚长波红外二极管。这种价廉而稳定的新探测器可作为当前红外探测技术的一种补充。

□ 张小华