

## 不同结构红外光导探测器组件光串分析

汪 洋, 刘大福, 徐勤飞, 王妮丽, 李 雪, 龚海梅

(中国科学院上海技术物理所 传感技术国家重点实验室 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

**摘 要:** 红外探测器组件作为目标探测和成像系统的核心器件, 其空间分辨能力直接影响着探测系统的成像质量。评估探测器组件空间分辨能力时, 常使用调制传递函数(MTF), 而探测器组件光学串音是影响探测器组件 MTF 的主要因素。介绍了一套弥散斑直径为 30  $\mu\text{m}$  的红外小光点测试系统, 并用于测试不同结构红外探测器组件的线扩散函数(LSF)来评价组件的光学串音。测试结果表明: 叠层电极结构侧面存在的光响应会导致 LSF 展宽和次峰等现象, 该结果为红外探测器组件光学串音设计提供了参考。

**关键词:** 线扩散函数; 光学串音; 红外探测器; 空间分辨率

**中图分类号:** TN06 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0404001

## Analysis on optical crosstalk of infrared photoconductive detector modules with different structures

Wang Yang, Liu Dafu, Xu Qinfei, Wang Nili, Li Xue, Gong Haimei

(Key Laboratories of Infrared Imaging Materials and Detectors, State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The infrared detector module is the key device of target detection and imaging system and its spatial resolution directly affects imaging quality of detection system. When evaluating the spatial resolution of detector modules, researchers usually adopt modulation transfer function(MTF), which optical crosstalk is the crucial factor to impact MTF. A set of infrared micron-spot test system was introduced whose optical dispersion diameter can achieve to 30  $\mu\text{m}$  in order to test the line spread functions(LSF) of detectors with different structures to acquire optical crosstalk data. The results show that the profile of overlap electric region is photosensitive, which is the main factor to cause widening LSF, secondary peak and so on. The results provide reference for optical crosstalk design of infrared detector modules.

**Key words:** LSF; optical crosstalk; infrared detectors; spatial resolution

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61376052)

作者简介: 汪洋(1981-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事红外光电探测器相关技术方面的研究。Email: wangyang@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 龚海梅(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事航天遥感用红外光电探测器的应用基础研究和基础研究。

Email: hmgong@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

随着探测技术的不断发展, 红外探测器组件在军用和民用上的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>, 红外探测器组件的性能也不断提高, 尤其是对探测系统的空间分辨率要求越来越高。探测系统的空间分辨率一般采用调制传递函数(MTF)进行评价, 而影响探测系统MTF有连续光学系统意义上的点扩散函数、探测器的几何结构、探测元的光子转换为电荷的转换效率、探测元之间的光学串音等主要促使空间信息分布发生变换的因素<sup>[2]</sup>。探测元之间的光学串音大小和组件中的滤光片、光阑、探测器结构以及放大器通道间的耦合等因素有关<sup>[3-4]</sup>。虽然可以在没有入射光时测量其中的电学贡献即所谓电串音, 但反映探测元真实串音大小的只能是探测元的光学串音。

对光学串音的测量常用到小光点系统, 通过准直光学系统和聚焦装置将小的目标(如狭缝、圆孔等)成像到单个光敏元上, 测出中心光敏元和邻近光敏元的响应信号, 从而获得百分比表示的串音<sup>[2]</sup>。国外的许多大学、研究机构以及公司都投入巨资, 积极研究能测试红外焦平面光串等参数的仪器。法国 HGH 公司, 美国 TI, NASA, 日本北海道大学等也都进行了研究<sup>[5-7]</sup>。法国 BIRD210 红外焦平面参数测试系统以黑体作为光源, 红外小光点聚焦(反射式)约  $50\ \mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>。美国陆军夜视和光电技术公司(NVEOD)以可调谐激光为光源, 红外小光点聚焦(透射式)约  $50\ \mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>。这些设备极为昂贵, 国内研究机构很难承受。文中介绍了一种测试红外探测器组件光学串音的小光点测试设备, 并用该设备测试了不同结构 HgCdTe 红外光导探测器组件的线扩散函数(LSF), 最后分析了影响探测器组件光学串音的原因。

## 1 测试原理

探测器组件的光学串音测试采用小光点测试系统, 该系统由四大部分组成: 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, 如图 1 所示。黑体辐射经过调制盘调制, 被狭缝在物面处限制尺寸, 经过光学系统准直和聚焦, 通过杜瓦窗口, 在感光面上形成细亮线, 光导探测器需要加 Keithley6220 直流偏置才能工作, 探测器

响应的微弱信号经过 SR554 前放放大后输入锁相放大器 SR830, 计算机终端通过 NI488 卡采集锁相放大器 SR830 的输出信号, 信号的采集和五维位移平台采用 NI 公司的 LabView 进行控制, 边扫描边采集, 采集完成后将数据归一化后即可获得探测器组件 LSF 曲线, 从而获得探测器组件的百分比光学串音值。

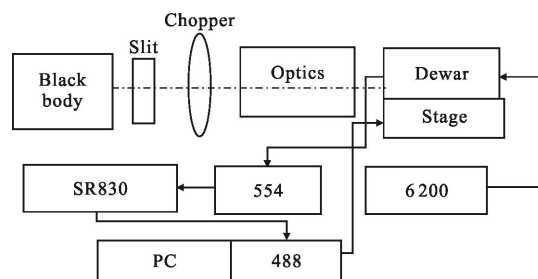


图 1 小光点测试系统框图

Fig.1 Schematic of micro-spot measurement system

该测试光学系统分为准直和聚焦两部分, 准直部分采用双反射镜结构, 聚焦部分采用如图 2 的镜头设计, 由三片锗镜片(1、2、3)组成, 合理布置孔径光阑位置, 光路接近像方远心光路, 杜瓦窗口为 ZNSE(4), 由于  $F\#$  小, 杜瓦窗口形成不了鬼像。聚焦镜头性能如表 1 所示。

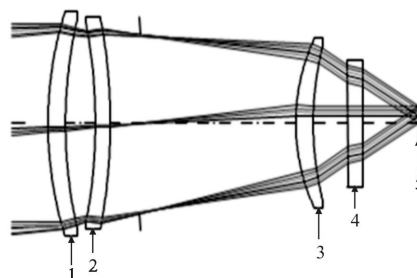


图 2 光学聚焦镜头光路图

Fig.2 Light path of optical focusing lens

表 1 光学聚焦镜头性能参数

Tab.1 Parameter of optical focusing lens

Parameter	Value
Spectral range/ $\mu\text{m}$	8-13
$F\#$	$\leq 1.3$
Focal length/mm	50
Field of view/mm	5×5
Optical dispersion/ $\mu\text{m}$	30

## 2 测试条件及样品

### 2.1 测试样品

测试样品为红外 HgCdTe 光导探测器组件,如图 3 所示,探测器组件由四个波段组成,分别为 8.0~9.0  $\mu\text{m}$ (D), 10.3~11.3  $\mu\text{m}$ (C), 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ (B), 13.2~13.8  $\mu\text{m}$ (A),其中 A 波段器件作为文中的研究对象,探测器芯片通过低温胶固定于宝石基板上,四个波段的滤光片通过光阑架安装在相应探测器芯片上,光阑架通过磷化发黑的方式降低表面的散射和反射。探测器敏感元的尺寸为 56  $\mu\text{m}$ ×56  $\mu\text{m}$ ,成一字排列,每个波段含四元器件,如图 4 所示,采用三种结构的器件,垂直敏感元排列方向为东西(EW)向,沿敏感元排列方向为南北(SN)向,其中 S1 为常规的芯片结构,为了抑制长波光导探测器的扫出效应<sup>[8]</sup>,S2 采用叠层设计的芯片结构,叠层电极为 29  $\mu\text{m}$  和 58  $\mu\text{m}$ ,S3 的叠层电极两边对称,并都为 20  $\mu\text{m}$ ,最后将探测器组件安装至测试杜瓦内低温工作。

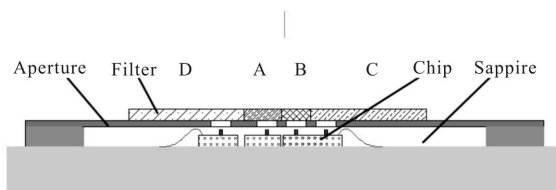


图 3 探测器组件结构示意图  
Fig.3 Structure of detector module diagram

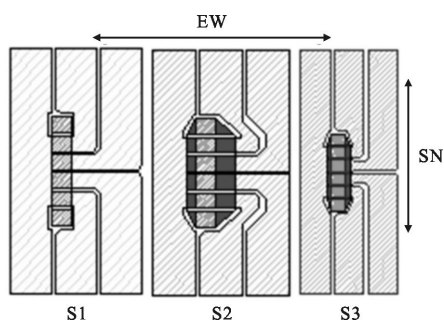


图 4 三种不同探测器芯片结构示意图  
Fig.4 Three structures of detector chip

为了进一步验证小光点测试系统 30  $\mu\text{m}$  的设计狭缝宽度,制作了 15  $\mu\text{m}$ ×2 mm 的细长形 HgCdTe 光导探测器组件,响应波段为 10.3~11.3  $\mu\text{m}$ ,组件结构与图 3 一致。

### 2.2 测试条件

黑体辐射源采用 800  $^{\circ}\text{C}$  温度,设置调制盘工作频率为 400 Hz,采用小亮条狭缝扫描方式,即通过千分尺将狭缝宽度限制在 0.1 mm,通过三维位移平台移动测试杜瓦位置,使探测器测试系统接收到最大的信号,此时即光学系统的聚焦位置,然后在一个方向从左向右移动扫描,获得探测器组件的 LSF,移动步长为 1  $\mu\text{m}$ 。探测器组件的 LSF 分为东西(EW)向和南北(SN)向,东西(EW)方向采用 A1 和 A2 两元探测器敏感元扫描,南北(SN)方向采用 A1~A4 四元探测器敏感元扫描,对测试的探测器组件 LSF 进行对比分析。

## 3 测试结果及讨论

### 3.1 测试系统重复性及聚焦后狭缝宽度

为验证小光点测试系统的测试重复性和 30  $\mu\text{m}$  聚焦后狭缝设计尺寸,采用 15  $\mu\text{m}$  宽的细长条光导探测器测试,获得间隔时间较长的两次探测器 LSF。将探测器的组件安装至测试杜瓦后,利用三维位移平台调节探测器组件至光学系统的聚焦位置,狭缝的开口与探测器平行,并且扫描方向为垂直细长条探测器,间隔时间较长的两次探测器 LSF 归一化后绘制于同一图像中,如图 5 所示。两次测试的探测

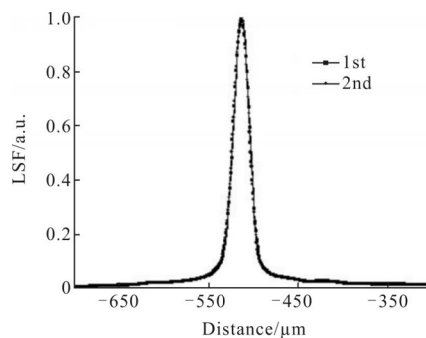


Fig.5 LSF of detector module in narrow strip

器 LSF 的半高宽(FWHM)为 22  $\mu\text{m}$  左右,聚焦后狭缝宽度的计算如公式 (1) 所示,其中  $W_{\text{slit}}$  和  $W_{\text{detector}}$  分别为聚焦后狭缝宽度和细长形探测器宽度,经过计算可得聚焦后狭缝宽度为 29  $\mu\text{m}$ ,接近设计的 30  $\mu\text{m}$  聚焦狭缝尺寸,扫描的探测器 LSF 也接近设计要求,两边对称且没有多余的杂光响应。从两次间隔时间较长的探测器 LSF 可以获得测试系统的重复性小于 10%,对于文中的红外 HgCdTe 光导

探测器组件的光学串音测试研究是满足要求的。

$$W_{\text{slit}} = 2FDHM - W_{\text{detector}} \quad (1)$$

### 3.2 探测器组件 EW 方向 LSF

为测试探测器组件 EW 方向的 LSF, 采用与 3.1 小节相同方法, 狭缝的开口与探测器敏感元排列方向一致, 并且扫描方向为垂直探测器敏感元排列方向, 两个探测器敏感元采集的 LSF 归一化后绘制于同一图像中, 如图 6~8 所示。

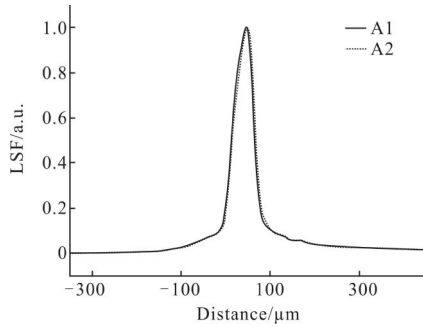


图 6 S1 结构的探测器组件 EW 方向 LSF

Fig.6 LSF of S1 detector module in EW direction

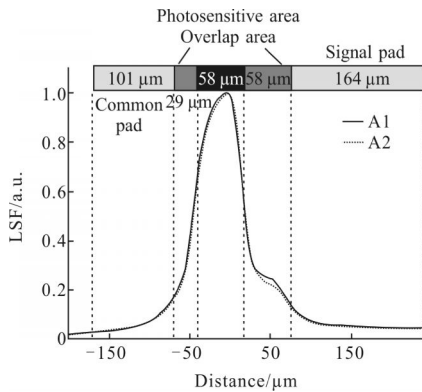


图 7 S2 结构的探测器组件 EW 方向的 LSF

Fig.7 LSF of S2 detector module in EW direction

图 6 为采用 S1 结构的探测器组件 LSF, 两边对称无多余的杂光响应, 并且 LSF 的 FWHM 为 55 μm 左右, 与实际光敏元尺寸相符。图 7 为采用 S2 结构的探测器组件 LSF, 与设计的探测器结构尺寸进行对应, 可以看出 LSF 存在两边展宽和右边有一个缓变的台阶, 并且 LSF 的 FWHM 为 64 μm 左右, 从分析可以得出, 由于 S2 结构的探测器采用叠层电极设计, 在两边叠层电极各为 29 μm 和 58 μm 的下面为光敏感层, 叠层电极只能挡住正面的光源, 对于两个侧面无法阻挡, 从而当狭缝扫描至侧面光敏感区时会有信号响应, 其值大小与侧面的高度、叠层电极

的长度和探测器响应率直接相关, 图 7 可以明显看出 58 μm 叠层电极区相对 29 μm 叠层电极区存在一个缓变台阶, 并且叠层电极区的存在导致探测器 LSF 存在两边展宽。

为了提高探测器的响应率和减小探测器 LSF 的展宽, 采用 S3 芯片结构优化叠层电极设计, 两边叠层电极都为 20 μm, 然后再测试 S3 结构的探测器组件 EW 方向的 LSF, 如图 8 所示, 探测器 LSF 两边对称, 不存在 S2 结构的缓变台阶, 并且 FWHM 为 58 μm 左右, 从分析可以得出, 由于侧面存在响应, 相对于 S1 结构的探测器, 线扩散函数存在一定展宽。

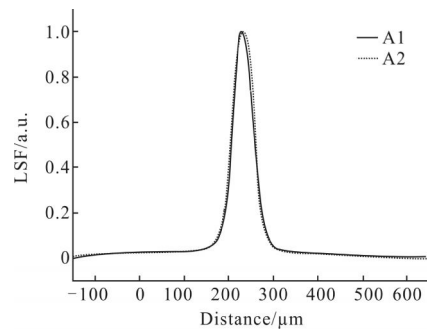


图 8 S3 结构的探测器组件 EW 方向 LSF

Fig.8 LSF of S3 detector module in EW direction

### 3.3 探测器组件 SN 方向 LSF

测试探测器组件 SN 方向的 LSF 与 EW 方向测试方法相似, 缝宽也为 0.1 mm, 与探测器敏感元排列方向垂直, 扫描方向为 A1→A4, 四个探测器敏感元采集的 LSF 归一化后绘制于同一图像中, 如图 9~11 所示, 图 9 为采用 S1 结构的探测器组件 LSF, 两边对称无多余的杂光响应, 并且 LSF 的 FWHM 为 52 μm 左右。图 10 为采用 S2 结构的探测器组件 LSF, 与设计的探测器结构尺寸进行对应, 可以看出 LSF 存在两边展宽和有两个次峰, 并且 LSF 的 FWHM 为 71 μm 左右, 与 EW 方向的 LSF 一样, 由于叠层电极侧面存在光响应, 次峰对应的位置正好是狭缝光源照到叠层电极的侧面。

采用 S3 芯片结构优化叠层电极设计测试探测器组件 SN 方向的 LSF, 如图 11 所示, 探测器 LSF 两边对称, 不存在 S2 结构的两边次峰, 并且 LSF 的 FWHM 为 60 μm 左右, 叠层电极侧面光响应导致一定展宽。

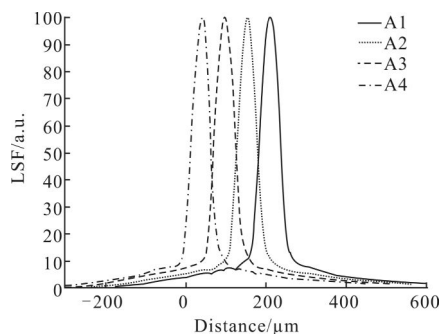


图 9 S1 结构的探测器组件 SN 方向的 LSF

Fig.9 LSF of S1 detector module in SN direction

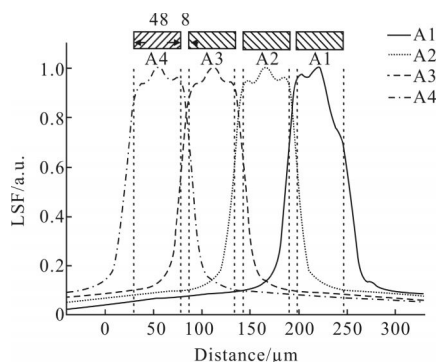


图 10 S2 结构的探测器组件 SN 方向的 LSF

Fig.10 LSF of S2 detector module in SN direction

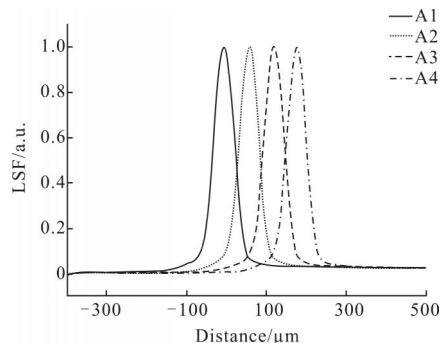


图 11 S3 结构的探测器组件 SN 方向的 LSF

Fig.11 LSF of S3 detector module in SN direction

## 4 结 论

文中采用小光点测试系统测试三种红外 HgCdTe 光导探测器芯片结构的组件的 EW 方向和 SN 方向 LSF, 常规的 S1 结构探测器组件 EW 方向

和 SN 方向 LSF 两边对称, 并与实际探测器组件尺寸相符。采用 S2 叠层电极结构探测器组件 EW 方向和 SN 方向 LSF 存在两边展宽, 其中 EW 方向有一个缓变台阶和 SN 方向有两个次峰, 经过分析得出这是由于叠层电极侧面光响应引起的, 响应值大小与侧面的高度、叠层电极的长度和探测器响应率直接相关。综合探测器的响应率和 LSF 的展宽问题, 采用 S3 结构优化叠层电极设计, 获得两边对称和展宽很小的探测器 LSF。文中的实验结果对探测器组件设计有一定参考意义, 但对于探测器光学串音产生机理有待于更深入的研究。

## 参 考 文 献:

- [1] A Rogalski. Infrared detectors: an overview [J]. *Infrared Phys Tech*, 2002, 43(3): 187-210.
- [2] Xu Zhonghua, Fang Jiexiong. Calculation from modulation transfer function curves of infrared focal plane arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48: 041101. (in Chinese)
- [3] Wang Yang, Liu Dafu, Xu Qinfei, et al. Study of crosstalk of infrared photoconductive detector Ass embles [J]. *Infrared*, 2014, 35(7): 16-20. (in Chinese)
- [4] Qiu Weicheng, Wang Rui, Xu Zhongjie, et al. Optical crosstalk of HgCdTe PV linear array detector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2325-2330. (in Chinese)
- [5] Liu Ziji, Jiang Yadong, Zhu Hongbin, et al. Test system for infrared focal plane detectors based on PCIE[J]. *The Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(4): 255-258. (in Chinese)
- [6] Dang K V, Kauffman C L, Derzko Z I. Crosstalk measurement system and technique. U S, 085563 [P].1996-10-409.
- [7] David R Hearn. Vacuum window optical power induced by temperature gradients [C]//SPIE, 1999, 37:297-308.
- [8] Yan Wenyun, Cheng Jin, Wu Sijin, et al. The advanced LWIR detectors with overlap contacts [J]. *Infrared Technology*, 1998, 20(6): 12-16. (in Chinese)