

# 红外探测器组件的光串测试及模拟

汪 洋<sup>1,2</sup> 刘大福<sup>1</sup> 徐勤飞<sup>1</sup> 王妮丽<sup>1</sup> 李 雪<sup>1</sup> 龚海梅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**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),而探测器组件的光学串音是影响 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,采用扫描狭缝法测试不同结构红外探测器组件的线扩展函数(LSF)并建立相应模型进行模拟分析。理论模拟与实验结果一致,可以很好地解释叠层电极结构侧面的光响应产生的 LSF 展宽、左右不对称和次峰等现象,该结果为红外探测器组件杂光抑制设计提供了参考。

**关键词** 探测器; 光学串音; 线扩展函数; 空间分辨率; 扫出效应

**中图分类号** TN06 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0404001

## Measurement and Simulation of Optical Crosstalk of Infrared Detector Modules

Wang Yang<sup>1,2</sup> Liu Dafu<sup>1</sup> Xu Qinfei<sup>1</sup> Wang Nili<sup>1</sup> Li Xue<sup>1</sup> Gong Haimei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Infrared detector module is the key device of target detection and imaging system and its spatial resolution directly affects the imaging quality of detection system. When evaluating spatial resolution of detector modules, researchers usually adopt modulation transfer function (MTF), which is mainly influenced by the optical crosstalk of detector modules. The basic principle and configuration of infrared micron-spot test system, whose optical dispersion diameter is 30  $\mu\text{m}$  are introduced. The line spread function(LSF)of detectors with different structures is measured by the scanning slit technique, and a corresponding model is built for analysis. Theoretical analysis and numerical simulation agree well with the experimental results, demonstrating that the profile of overlap electric region is photosensitive, which is the main factor to cause widened LSF, asymmetry, secondary peak and so on. The result provides a reference for the design of infrared detector modules to suppress light stray.

**Key words** detectors; optical crosstalk; line spread function; spatial resolution; sweep out effect

**OCIS codes** 040.3060; 230.0040; 120.0280

## 1 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>。性能不断提高的红外探测器组件对探测系统的空间分辨率要求也越来越高。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 的因素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

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61376052)

作者简介: 汪 洋(1981—),男,博士研究生,副研究员,主要从事红外探测器组件测试和封装等方面的研究。

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

导师简介: 龚海梅(1965—),男,博士,研究员,主要从事航天遥感用红外光电探测器的应用等方面的研究。

E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

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,这些因素主要促使空间信息的分布发生变换<sup>[2]</sup>。探测器组件的光学串音与滤光片、光阑、探测器芯片结构以及放大器通道间的耦合等因素有关<sup>[3-5]</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。

对探测器组件的光学串音测量常用到小光点测试系统,通过准直光学系统和聚焦装置将小的目标(如狭缝、圆孔和刀口等)成像到探测器像元上,以亚像元步长移动光源或探测器进行边扫描边采集就可以获得探测器的线扩展函数(LSF),从而获得探测器组件的串音数据<sup>[6]</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 MTF 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>[7-9]</sup>。小光点测试系统的一个重要参数是系统对小光点的聚焦尺寸,法国 BIRD210 红外焦平面参数测试系统以黑体作为光源,红外小光点聚焦光斑直径(反射式)约为 50 μm<sup>[7]</sup>。美国陆军夜视和光电技术公司(NVEOD)以可调谐激光为光源,红外小光点聚焦光斑直径(透射式)约为 50 μm<sup>[8]</sup>。这些设备极为昂贵,国内研究机构很难承受。本文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,并用扫描狭缝法测试了不同结构长波红外光导探测器组件的 LSF,并建立理论模型进行仿真,最后对比分析了影响探测器组件光学串音的因素。

## 2 测试原理

探测器组件的光学串音测试是采用狭缝扫描法的小光点测试系统,该系统由 4 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(a)所示。黑体辐射经过调制盘调制,在物面处用狭缝限制尺寸,经过光学系统准直和聚焦,透过杜瓦窗口,在探测器上形成细亮线,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。

该测试光学系统分为准直和聚焦两部分,准直部分采用离轴双反射镜结构,聚焦部分采用如图 1(b)所示的镜头设计,由 3 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。

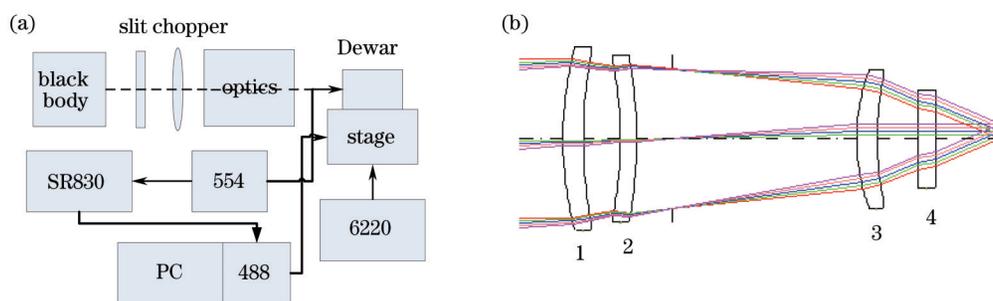


图 1 (a) 小光点测试系统框图; (b) 光学聚焦镜头光路图

Fig.1 (a) Schematic of micron-spot measurement system; (b) light path of optical focusing lens

表 1 光学聚焦镜头性能参数

Table 1 Parameters of optical focusing lens

Spectral range	$F\#$	Focal length	Field of view	Optical dispersion
8~13 μm	≤1.3	50 mm	5 mm×5 mm	30 μm

## 3 测试条件及样品

### 3.1 测试样品

测试样品为红外 HgCdTe 光导探测器组件,如图 2(a)所示,探测器组件由 4 个波段组成,分别为 8.0~9.0 μm

(D波段), 10.3~1.3  $\mu\text{m}$ (C波段), 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ (B波段), 13.2~13.8  $\mu\text{m}$ (A波段), 其中A波段器件为研究对象,探测器芯片通过低温胶固定于宝石基板上,4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2(b)所示,采用两种结构的器件,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>[10]</sup>,S2采用叠层设计的芯片结构,叠层电极为 29  $\mu\text{m}$ 和 58  $\mu\text{m}$ 。为了进一步验证小光点测试系统的 30  $\mu\text{m}$ 的狭缝设计宽度及光学系统 LSF,制作了 15  $\mu\text{m}$ ×2000  $\mu\text{m}$ 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2(a)一致,最后将探测器组件安装至测试杜瓦内低温工作。

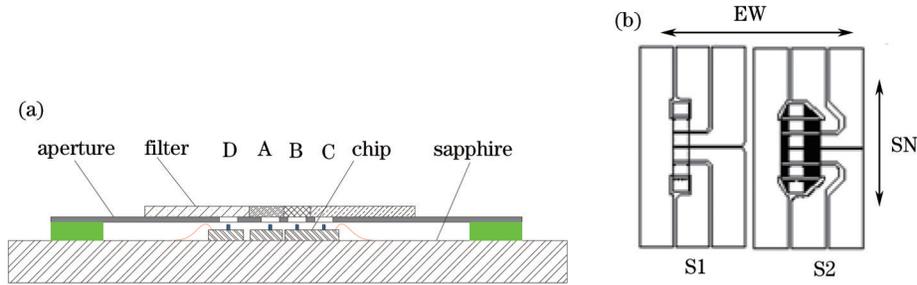


图 2 (a) 探测器组件结构; (b) 两种不同探测器芯片结构

Fig.2 (a) Structure of detector module; (b) two different structures of detector chips

### 3.2 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,通过五维位移平台移动测试杜瓦位置,使探测器组件接收到最大的辐射信号,此时即光学系统的焦面位置,然后在一个方向从左往右以 1  $\mu\text{m}$ 步长移动测试杜瓦,边扫描边采集信号,将获得的数据归一化即为探测器组件的 LSF。探测器组件的 LSF 分为东西(EW)向和南北(SN)向。此时测试的 LSF 是光学系统的 LSF 和探测器组件的 LSF 的卷积,即

$$f_{\text{TLSF}} = f_{\text{SLSF}} * f_{\text{DLSF}} \quad (1)$$

## 4 结果与讨论

### 4.1 测试系统重复性及光学系统 LSF

为验证小光点测试系统的测试重复性和 30  $\mu\text{m}$ 聚焦后狭缝设计宽度,以及获得光学系统的 LSF,采用 15  $\mu\text{m}$ 宽的细长条光导探测器测试间隔时间较长的两次探测器 LSF。聚焦的细亮条方向与探测器平行,并且扫描方向为垂直细长条探测器,两次探测器 LSF 归一化后绘制于同一图像中,如图3(a)所示,其中T1和T2分别是第一次和第二次测试。两次测试的探测器 LSF 的半峰全宽(FWHM)为 22  $\mu\text{m}$ 左右,聚焦后狭缝宽度为

$$W_{\text{slit}} = 2H_{\text{FWHM}} - W_{\text{det}}, \quad (2)$$

其中  $W_{\text{slit}}$ 和  $W_{\text{det}}$ 分别为聚焦后狭缝宽度和细条形探测器宽度,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。为更进一步比较 15  $\mu\text{m}$ 细条形探测器对测试 LSF 的影响,将两次测试的探测器 LSF 按离散傅里叶变换获得 MTF,即

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-j2\pi kn/N), n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

15  $\mu\text{m}$ 细条形探测器 MTF 为

$$f_{\text{MTF}} = \sin(\pi df)/(\pi df). \quad (4)$$

其中  $d$ 为探测器 15  $\mu\text{m}$ 宽度, $f$ 为空间频率。如图3(b)所示为两次测试的探测器 MTF 和 15  $\mu\text{m}$ 细条形探测器 MTF,其中T3为 15  $\mu\text{m}$ 宽度探测器的 MTF 曲线,很明显 15  $\mu\text{m}$ 细条形探测器对测试的 LSF 的影响甚微,因此测试的 LSF 可默认为光学系统的 LSF,并且在特征频率 8.93 lp/ $\mu\text{m}$ 处测试系统的重复性小于 2%,对于

光学申音测试研究是满足要求的。

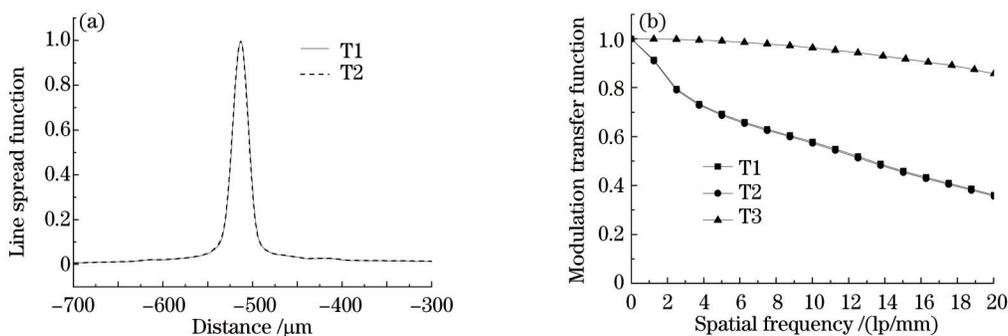


图3 (a) 探测器组件的两次 LSF 测试; (b) 经过傅里叶变换及 15 μm 探测器积分的 MTF

Fig.3 (a) Twice measured LSFs of dectors; (b) MTFs of (a) via Fourier transformation and that for the dector with 15 μm width via integration

### 4.2 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 4.1 节相同方法,聚焦细亮条方向与探测器敏感元排列方向一致,并且扫描方向为垂直于探测器敏感元排列方向,两元探测器采集的 LSF 归一化后绘制于同一图像中。图 4(a)为采用 S1 结构的探测器组件线扩展函数,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 4(b)为采用 S2 结构的探测器组件 LSF,与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。

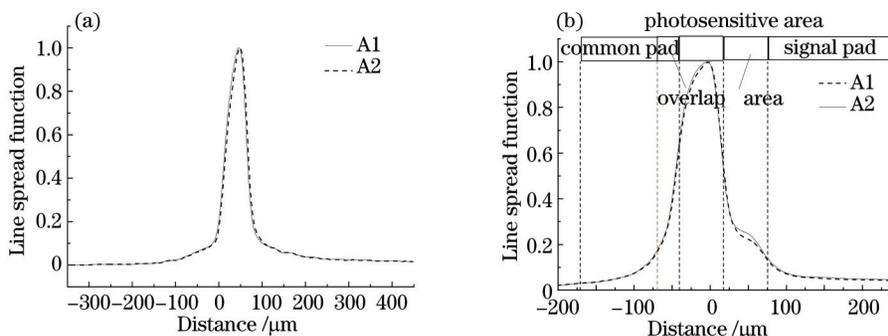


图 4 (a)S1 和(b)S2 结构的探测器组件 EW 方向的 LSF

Fig.4 LSFs of detectors with (a) S1 and (b) S2 structure in EW direction

为更清晰地描述 S2 叠层探测器组件 LSF 变差的机理,将 S2 叠层结构探测器组件 EW 方向扫描,如图 5(a)所示,分析得出,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,对于两边侧面无法阻挡,当细亮条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,这正是非光敏元区存在信号响应的原因,与图 4(b)所示的两边展宽和右边有一个缓变的台阶结果是一致的。基于叠层电极侧面响应机理,建立如图 5(b)的理论模型,其中侧面响应值大小与侧面的响应宽度成正比,光学系统的 LSF 采用 4.1 节测试所

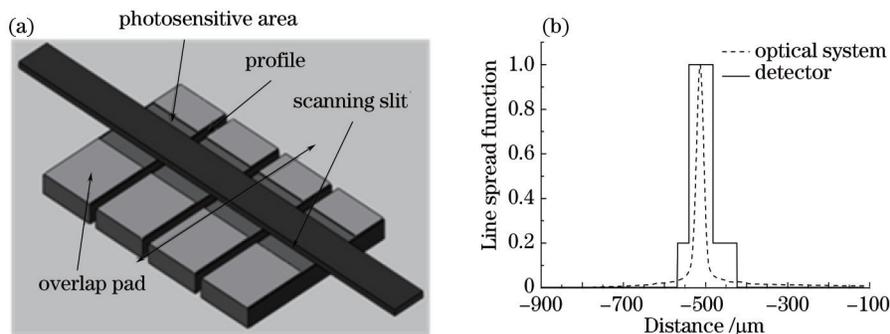


图 5 S2 结构的探测器组件 EW 方向(a)扫描示意图和(b)侧面响应模型

Fig.5 Schematic of (a) scanning and (b) profile photosensitive model of detector module with S2 structure in EW direction

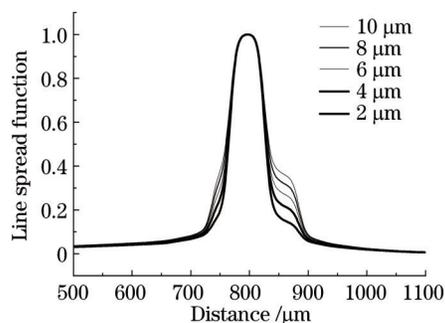


图 6 S2结构的探测器组件EW方向仿真LSF

Fig.6 Simulated LSF of detector module with S2 structure in EW direction

得的LSF,根据(1)式计算探测器组件各种侧面响应宽度(2~10 μm)的LSF,如图6所示,仿真的探测器组件LSF与测试的探测器组件LSF基本一致,两边展宽和右边有一个缓变的台阶,随着侧面响应宽度的增加,这两种现象越来越明显,通过对比仿真探测器组件和测试的探测器组件LSF,可以得出侧面响应宽度为4~5 μm。

### 4.3 探测器组件SN方向LSF

测试探测器组件SN方向的LSF与EW方向的测试方法相似,将狭缝方向改变90°,聚焦细亮条方向与探测器敏感元排列方向垂直,并且扫描方向与探测器敏感元排列方向一致,四元探测器采集的LSF归一化后绘制于同一图像中。图7(a)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,与实际光敏元尺寸相符。图7(b)为采用S2结构的探测器组件LSF,与探测器结构尺寸进行对应,可以看出LSF存在两边展宽和两个次峰,两个次峰对应位置为光敏元边缘,并且LSF的FWHM为71 μm左右。

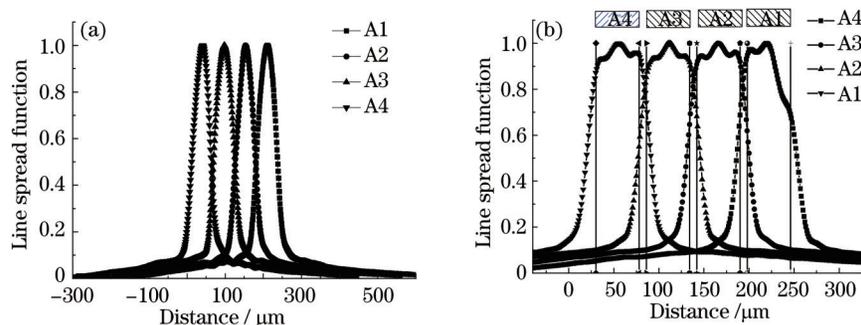


图 7 (a)S1和(b)S2结构的探测器组件SN方向的LSF

Fig.7 LSFs of detectors with (a) S1 and (b) S2 structures in SN direction

为更清晰地描述S2叠层探测器组件LSF变差的机理,将S2叠层结构探测器组件沿SN方向扫描,如图8(a)所示,与EW方向的LSF分析类似,当细亮条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,这正是非光敏元区存在信号响应的原因,并且有响应的探测器侧面

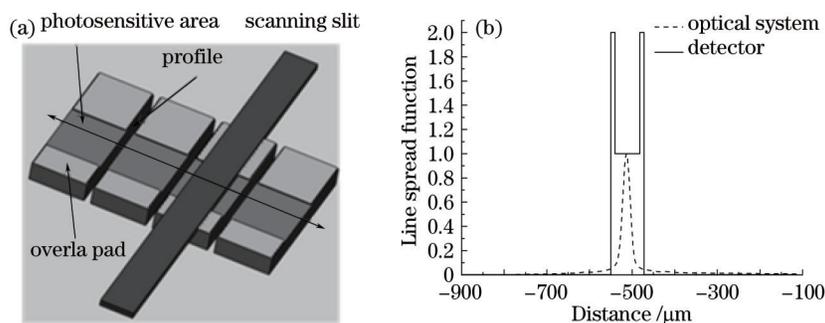


图 8 S2结构的探测器组件SN方向(a)扫描示意图和(b)侧面响应模型

Fig.8 (a) Schematic of scanning and (b) profile photosensitive model of detector module with S2 structure in SN direction

长度为光敏区长度的两倍,这与图7(b)所示的两边展宽和两个次峰的结果是一致的。基于叠层电极侧面响应机理,建立如图8(b)的理论模型,其中侧面响应值大小为光敏元正面的两倍,光学系统的LSF采用4.1节测试所得的LSF,根据(1)式计算探测器组件各种侧面响应宽度(3~10  $\mu\text{m}$ )的LSF,如图9所示,仿真的探测器组件LSF与测试的探测器组件LSF基本一致,存在两边展宽和两个次峰,随着侧面响应宽度的增加,这两种现象越来越明显,通过对比仿真探测器组件和测试的探测器组件LSF可以得出侧面响应宽度为4~5  $\mu\text{m}$ 。

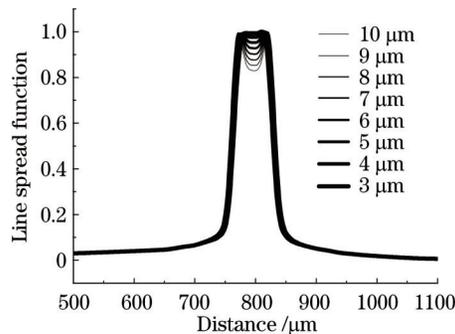


图9 探测器不同侧面响应宽度下的LSF

Fig.9 LSF of detector for different profile photosensitive width

## 5 结 论

首先采用15  $\mu\text{m}$ 宽的细条形光导探测器获得光学系统LSF,作为模拟仿真用的光学系统LSF,经过计算聚焦后狭缝宽度为29  $\mu\text{m}$ ,接近设计的30  $\mu\text{m}$ 聚焦狭缝尺寸,15  $\mu\text{m}$ 宽的细条形光导探测器组件MTF在特征频率8.93 lp/ $\mu\text{m}$ 处的不重复性小于2%。接着利用该套系统的扫描狭缝法测试了两种不同结构的红外HgCdTe光导探测器组件的EW方向和SN方向的LSF,常规的S1结构探测器组件EW方向和SN方向线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。基于叠层电极侧面响应机理,建立EW方向和SN方向相应理论模型,仿真的探测器组件LSF与测试的探测器组件LSF基本一致,通过对比仿真探测器组件和测试的探测器组件LSF可以得出侧面响应宽度为4~5  $\mu\text{m}$ 。实验结果对探测器组件设计和探测器整机系统有一定参考意义,但探测器组件杂光的产生机理有待更深入的研究。

## 参 考 文 献

- 1 A Rogalski. Infrared detectors: an overview[J]. *Infrared Phys Technol*, 2002, 43(3-5): 187-210.
- 2 Xu Zhonghua, Fang Jiexiong. Calculation from modulation transfer function curves of infrared focal plane arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 041101.  
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.
- 3 Wang Yang, Liu Dafu, Xu Qinfei, *et al.*. Study of crosstalk of infrared photoconductive detector assemblies[J]. *Infrared*, 2014, 35(7): 16-20.  
汪 洋, 刘大福, 徐勤飞, 等. 红外光导探测器组件的串音研究[J]. *红外*, 2014, 35(7): 16-20.
- 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.  
邱伟成, 王 睿, 许中杰, 等. PV型HgCdTe线阵探测器的光学串扰[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(10): 2325-2330.
- 5 L Martineau, L Rubaldo, F Chabuel, *et al.*. MTF optimization of MCT detectors[C]. *SPIE*, 2013, 8889: 88891B.
- 6 Xu Zhonghua, Fang Jiexiong. Modulation transfer function measurement of near infrared linear focal plane arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1204001.  
许中华, 方家熊. 近红外线列探测器传递函数测试系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1204001.
- 7 Liu Ziji, Jiang Yadong, Zhu Hongbin, *et al.*. Test system for infrared focal plane detectors based on PCIE[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(4): 255-258.

- 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.
- 8 K V Dang, C L Kauffman, Z I Derzko. Crosstalk measurement system and technique[P]. US5563409 [1996-10-08].
- 9 David R Hearn, Wu Sijin, *et al.*. Vacuum window optical power induced by temperature gradients[C]. SPIE, 1999, 3750: 297-308.
- 10 Yan Wenyun, Cheng Jin, Wu Sijin, *et al.*. The advanced LWIR detectors with overlap contacts[J]. Infrared Technology, 1998, 20(6): 12-16.
- 杨文运, 程 进, 吴思晋, 等. 采用叠盖电极的高性能光导 HgCdTe 红外探测器[J]. 红外技术, 1998, 20(6): 12-16.

栏目编辑: 刘丰瑞