

# 小像元碲镉汞长波红外焦平面探测器

李雄军<sup>1,2</sup>, 刘艳珍<sup>1,2</sup>, 王世锦<sup>3</sup>, 李培源<sup>1</sup>, 李红福<sup>1</sup>, 梁艳<sup>1</sup>, 李根<sup>1</sup>, 浦恩昌<sup>1</sup>,  
赵鹏<sup>1,2</sup>, 姬荣斌<sup>1,2\*</sup>

(1. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223;

2. 红外探测全国重点实验室, 云南昆明 650223;

3. 陆军装备部驻重庆地区军事代表局驻昆明地区第一军代室, 云南昆明 650223)

**摘要:** 采用砷离子注入 p-on-n 平面结技术制备了长波碲镉汞 1024×768(10 $\mu$ m) 焦平面探测器组件, 77K 工作温度下器件后截止波长为 9.61 $\mu$ m。在半阱条件下对探测器组件的基本性能进行了测试, 结果表明器件黑体响应率非均匀性为 4.15%, 平均值 NETD 为 28.5mK, 有效像元率为 99.81%。在长波碲镉汞 1024×768(10 $\mu$ m) 焦平面探测器芯片组表面设计和制备了专用的金属微结构, 并对像元间串扰进行了表征分析, 结果显示器件串音为 12.3%, MTF 为 0.35。最后对探测器组件进行了室外场景和室内人物成像演示, 均显示出较好的成像效果。

**关键词:** 长波; p-on-n; 碲镉汞; 焦平面探测器; 小像元中心距

中图分类号: TN215

文献标识码: A

## Small pixel cadmium telluride mercury long wave infrared focal plane detector

LI Xiong-Jun<sup>1,2</sup>, LIU Yan-Zhen<sup>1,2</sup>, WANG Shi-Jin<sup>3</sup>, LI Pei-Yuan<sup>1</sup>, LI Hong-Fu<sup>1</sup>, LIANG Yan<sup>1</sup>, LI Gen<sup>1</sup>, PU En-Chang<sup>1</sup>, ZHAO Peng<sup>1,2</sup>, JI Rong-Bin<sup>1,2\*</sup>

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Kunming 650223, China;

3. No. 1 Military Representative Office in Kunming of Military Representative Bureau of Army Equipment Department in Chongqing, Kunming 650223, China)

**Abstract:** A long wave cadmium telluride mercury 1024×768(10 $\mu$ m) focal plane detector assembly was prepared by arsenic ion implantation p-on-n planar junction technology. The cutoff wavelength of the device is 9.61  $\mu$ m at 77K. The basic performance of the detector assembly was characterized under half well filling level condition, and the results showed that the non-uniformity of the responsivity was 4.15%, the average NETD was 28.5mK, and the operability was 99.81%. A dedicated metal micro-structure was designed and prepared on the surface of a LW MCT 1024×768 (10 $\mu$ m) focal plane detector chip set, and the crosstalk between pixels was characterized and analyzed. The results showed that device crosstalk was 12.3%, and the MTF was 0.35. Finally, imaging demonstrations of outdoor scene and indoor person were conducted with the detector assembly, both of which showed good imaging effect.

**Key words:** LWIR, p-on-n, HgCdTe, FPA, small pixel pitch

**PACS:** 07. 57. Kp, 78. 55. Et, 85. 60. Gz

## 引言

对于战术应用, 长波器件较中波器件具有如下

优势<sup>[1]</sup>: 1、在较低对比度场景中更好的成像能力; 2、对大气中的烟、尘及其它悬浮颗粒具有更好的穿透能力; 3、具有更短的积分时间, 可获得更高的帧频;

收稿日期: 2025-09-13, 录用日期: 2025-10-28

Received date: 2025-09-13,

基金项目: 云南省科技人才与平台计划项目(202105AD160047)

Foundation items: Supported by Yunnan Science and Technology Talents and Platform Plan Project(202105AD160047)

作者简介(Biography): 李雄军(1984-), 男, 白族, 云南大理人, 博士, 正高级工程师, 主要从事红外探测器材料与器件的研究. E-mail: lixiong-jun666@126.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: 790051959@qq.com

4、不易受太阳反射及视场中高热物体的影响。但是长波器件由于较窄的禁带宽度,容易受到材料质量以及器件工艺的影响,器件研制和生产难度较大。

早期,法国 Sofradir<sup>[2]</sup>、德国 AIM<sup>[3]</sup> 等公司采用汞空位掺杂 n-on-p 技术实现了长波碲镉汞焦平面探测器的研制。由于该技术工艺简单成熟,器件性能稳定可靠而被法国 Sofradir、德国 AIM 以及国内相关研究机构多年以来用于碲镉汞探测器批量生产。然而,基于汞空位掺杂 n-on-p 技术制备的碲镉汞长波器件,其中汞空位在带隙内引入复合中心,降低少子寿命,使器件暗电流增加<sup>[4]</sup>,对器件的性能和使用产生了较大的限制。和汞空位掺杂 n-on-p 技术不同,非本征掺杂碲镉汞 n-on-p 技术不会在带隙中引入产生复合中心,可有效提高少子寿命,相应的长波器件暗电流较汞空位掺杂器件降低约 1 个数量级。因此, Sofradir<sup>[5]</sup> 和 AIM<sup>[3,6]</sup> 采用非本征掺杂 n-on-p 技术开展碲镉汞长波和甚长波器件的研制,并取得了较好的进展。为了进一步提高少子寿命,降低器件暗电流,需进一步降低非本征掺杂的浓度,但将 p 型载流子浓度高精度地降低至小于  $1.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  具有很大困难<sup>[7]</sup>。通过对碲镉汞进行精确地钢掺杂,可方便可控地实现 n 型载流子浓度低于  $1.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,有效提高少子寿命,相应长波碲镉汞 p-on-n 器件的暗电流较汞空位掺杂器件降低约 2 个数量级。同时,由于电子迁移率高使得器件串联电阻较小<sup>[8]</sup>。因此,美国 Raytheon<sup>[9-10]</sup> 以及 BAE<sup>[11]</sup> 等机构一直以来基于 p-on-n 技术开展长波碲镉汞探测器的研制。近十余年来, Sofradir<sup>[12-13]</sup> 和 AIM<sup>[14]</sup> 也开始转向 p-on-n 技术的研究,以提高器件性能和工作温度,并先后实现了长波碲镉汞  $640 \times 512 (15 \mu\text{m})$  焦平面探测器的研制。

为了提高系统成像分辨率,进一步增大探测器阵列规模和减小像元中心距已经成为红外探测器技术发展方向之一。从系统空间过采样的角度,奈奎斯特(Nyquist)频率采样相当于  $F\lambda/d=1$ <sup>[15]</sup>,当  $F$  数大于 2 时中波和长波器件像元中心距分别小于  $10 \mu\text{m}$  和  $12 \mu\text{m}$  即可达到空间过采样,并称之为小像元器件。然而像元间距的减小将引起由于光生载流子横向扩散导致的相邻像元之间的串扰增加,进而降低空间分辨率并影响系统性能<sup>[16-18]</sup>。针对小像元焦平面器件可能存在的像元间串扰问题,不同的研究团队<sup>[16-17,19-20]</sup> 采用不同的方法开展了相关的研

究工作。以色列 SCD 公司<sup>[16]</sup> 分别采用小光点和在芯片背面制备微结构结合面源黑体均匀照射的方式开展了 MTF 测试,并获得了相似的结果。法国 Sofradir 公司<sup>[17]</sup> 基于刀口法开展了不同像元尺寸和不同注入区面积的焦平面器件 MTF 测试分析。韩国 H. Hwang<sup>[19]</sup> 等采用斜边法对 MTF 进行了评估分析,实现方式较为简单。针对 MTF 的优化, Sofradir<sup>[17-18]</sup> 结合理论计算从吸收层厚度调节、注入区尺寸优化、台面隔离以及采用组分梯度变化的吸收层等开展了研究,并获得了较好的结果。

除了像元串扰的影响,像元中心距的减小将对低缺陷密度材料生长、高均匀钢柱制备、高精度倒装互连以及大电荷容量读出电路设计等提出了更高的要求。Sofradir 的 N. Péré-Laperne<sup>[21]</sup> 在优化长波  $640 \times 512 (15 \mu\text{m})$  碲镉汞探测器性能的基础上设计并制备了像元中心距为  $10 \mu\text{m}$  的长波测试芯片。该小像元器件暗电流密度随工作温度的变化关系同  $15 \mu\text{m}$  像元中心距器件一致,且暗电流密度大小与  $15 \mu\text{m}$  像元中心距器件相当。L. Rubaldo<sup>[1]</sup> 则设计了不同的  $10 \mu\text{m}$  间距长波碲镉汞器件开展调制传递函数(MTF)评估,在奈奎斯特(Nyquist)空间频率下的 MTF 分别为 0.37 和 0.48。AIM 则先后实现了碲镉汞长波  $1280 \times 1024 (15 \mu\text{m})$  探测器<sup>[22]</sup> 和长波  $1280 \times 720 (12 \mu\text{m})$  探测器<sup>[23]</sup> 的研制,并提出了长波  $1024 \times 768 (10 \mu\text{m})$  碲镉汞探测器<sup>[24]</sup> 的研制计划。

本文基于液相外延(LPE)生长的长波碲镉汞材料,采用 As 离子注入 p-on-n 平面成结技术制备了像元中心距为  $10 \mu\text{m}$ ,阵列规模为  $1024 \times 768$  的长波碲镉汞焦平面探测器组件,并对其基本性能和像元间串扰开展了测试分析。

## 1 实验

### 1.1 探测器组件制备

实验基于 LPE 生长的 n 型长波碲镉汞材料,采用 As 离子注入以及注入后热处理实现了 p-on-n 器件制备。在读出电路上通过高均匀、小间距钢柱制备,并与小像元长波器件采用高精度倒装互连实现了长波  $1024 \times 768 (10 \mu\text{m})$  碲镉汞探测器芯片组的制备。为了提高芯片组的可靠性,将碲镉汞衬底完全去除并进行背增透膜层的沉积。将芯片组封装入金属杜瓦内,经高温排气后与制冷机耦合完成了探测器组件的制备,如图 1 所示。

### 1.2 读出电路设计

读出电路基于标准 CMOS  $0.18 \mu\text{m}$  工艺进行设



图1 长波碲镉汞1024×768(10 $\mu\text{m}$ )焦平面:探测器组件  
Fig. 1 LW MCT 1024×768 (10 $\mu\text{m}$ ) focal plane detector assembly

计和加工,注入级采用直接注入(DI)结构,工作模式为先积分后读出(ITR)。鉴于小间距读出电路像元面积的限制,为提高器件信/噪比,采用5V电源电压以及宽摆幅的列运放和输出运放结构,增加电压输出摆幅,使读出电路电荷处理能力达到 $7\text{Me}^-$ 。读出电路有8路输出通道,最高主时钟频率为10MHz。针对电源电压和输出通道的增加将导致读出电路功耗增大的问题,在设计过程中对模拟通路的功耗采取了严格的管控措施,包括优化运放尺寸和偏置电压结构,增加功耗外部可控端口等,最终实现读出电路功耗小于100mW。

### 1.3 串音及MTF测试用微结构制备

串音和MTF的常用测试方法主要有小光点法、刀口法以及基于微结构进行测试分析。小光点法和刀口法表征器件MTF特性要求相应的专用测试设备,且随着像元间距的减小,由于扫描光束光斑直径的衍射限制,像元的空间响应特性变得更难确定。本实验综合了文献[16]和[19]中采用的测试图形,通过在探测器芯片组表面制备金属微结构,利用特定区域的金属膜对红外辐射进行屏蔽的方式实现器件串音和MTF的测试和分析。测试过程无需专用设备,在面源黑体辐照下采用常规的红外焦平面探测器基本性能测试系统采集响应信号后进行数据处理即可完成MTF测试分析,具有操作简便的优势。具体金属微结构的制备过程如下:首先在长波1024×768(10 $\mu\text{m}$ )碲镉汞焦平面探测器芯片组表面依次沉积500Å Cr薄膜和1000Å Au薄膜,然后通过光刻的方式在复合金属膜上制备倾斜

刀口和周期性通孔光刻图形,最后采用离子束刻蚀的方式去除暴露的金属膜实现金属倾斜刀口和周期性通孔微结构,如图2所示。

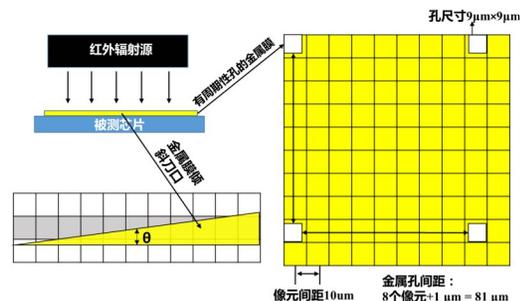


图2 金属倾斜刀口和周期性通孔微结构示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of metal inclined knife-edge and periodic through-hole micro-structure

### 1.4 器件测试

采用德国布鲁克V70傅里叶变换红外光谱仪对探测器组件进行光谱响应测试。随后分别对着20°C和35°C的面源黑体,调节积分时间至半阱状态对探测器组件的基本性能进行了测试。

对于所制备的带金属倾斜刀口和周期性通孔微结构的长波1024×768(10 $\mu\text{m}$ )碲镉汞焦平面探测器芯片组,则将其封装入液氮杜瓦,灌入液氮待温度平衡后分别对着20°C和35°C的面源黑体采集15°C温差所对应的器件响应信号值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 探测器组件光谱响应

图3为长波1024×768(10 $\mu\text{m}$ )碲镉汞焦平面探测器芯片组中心区域像元在77K工作温度下的归一化光谱响应特性。探测器组件前截止波长为7.37 $\mu\text{m}$ ,主要被低温滤光片所截取;后截止波长为9.61 $\mu\text{m}$ ,主要由光敏材料的组分决定。

### 2.2 探测器组件基本性能

长波1024×768(10 $\mu\text{m}$ )碲镉汞焦平面探测器组件F#为3,控温点为77K,20°C面源黑体照射下器件达到半阱工作条件所对应的积分时间为900 $\mu\text{s}$ 。图4为探测器组件响应信号灰度图,黑体响应率非均匀性为4.79%。图5为探测器组件NETD直方图,其分布呈现出较标准的高斯分布,平均NETD值为28.4mK,表现出了较高的热灵敏度。

按照GB/T 17444-2013有关盲元判定标准(即小于50%平均响应率或大于2倍平均噪声的像元定义为盲元),如图6所示为探测器组件的盲元分布

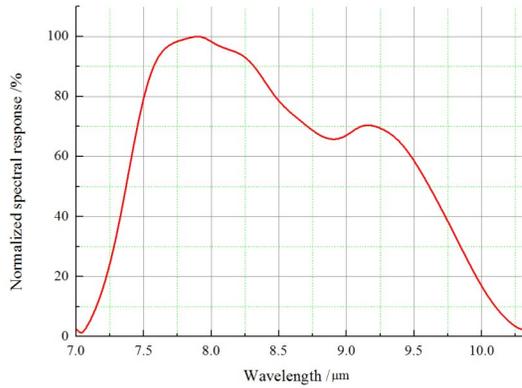


图3 77K下探测器组件归一化光谱响应

Fig. 3 The normalized spectral response of the detector assembly under 77K

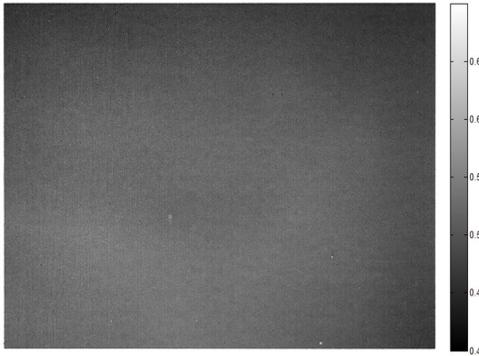


图4 77K下探测器组件响应信号灰度图

Fig. 4 Response signal grayscale diagram for the detector assembly under 77K

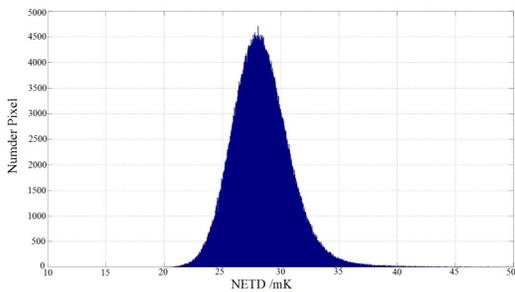


图5 77K下探测器组件NETD直方图

Fig. 5 NETD histogram for the detector assembly under 77K

图。该探测器组件有效像元率为99.81%，盲元较均匀地分散在整个焦平面内，且无较大的扎堆盲元簇，显示出了较好的器件性能。

### 2.3 焦平面器件串音

为了确定复合金属膜对红外辐射的屏蔽作用，开展了金属膜沉积前后碲镉汞薄膜红外透过率的测试。如图7所示，表明复合金属膜对红外辐射具有较好的阻挡效果，可有效避免因漏光导致的干扰

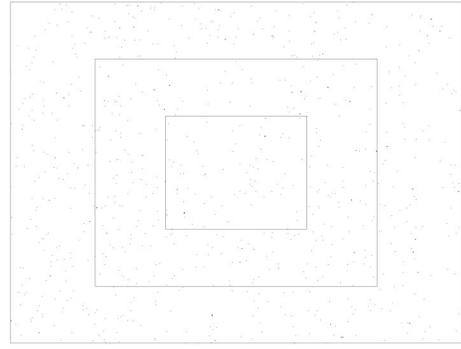


图6 77K下探测器组件盲元分布图

Fig. 6 Defects map of the detector assembly under 77K

问题。

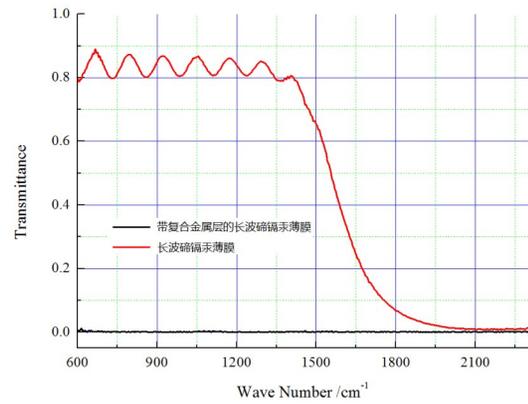


图7 室温下沉积金属膜前后的碲镉汞材料傅里叶红外光谱图

Fig. 7 FTIR spectra of MCT before and after deposition of metal film at room temperature

在长波1024×768(10μm)碲镉汞焦平面探测器芯片组表面制备了如图8所示的周期性通孔微结构，液氮制冷至77K采集15℃温差所对应的器件响应信号如图9所示。

理论上仅未被金属覆盖的通孔对应的像元有信号响应，但因小像元间距的器件存在一定的横向光生载流子扩散，导致其相邻像元也有信号输出。在响应信号图内找到中心像元上、下、左、右邻近像元信号大小接近的3×3矩阵，认为金属通孔正对着该矩阵中心像元，其输出信号为 $V_{LC}(i,j)$ 。根据GB/T 17444-2013关于串音的定义，按式(1)和式(2)计算该像元对相邻各像元的串音。

$$CT(i \pm 1, j) = \frac{V_{NB}(i \pm 1, j)}{V_{LC}(i, j)} \times 100\% \quad (1)$$

$$CT(i, j \pm 1) = \frac{V_{NB}(i, j \pm 1)}{V_{LC}(i, j)} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $V_{NB}(i \pm 1, j)$ 与 $V_{NB}(i, j \pm 1)$ 分别为金属通孔正对

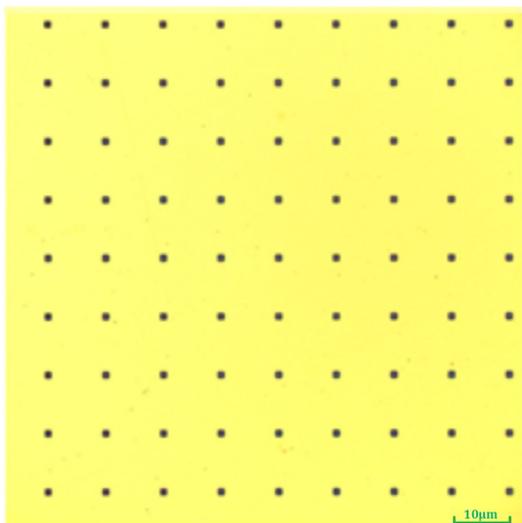


图8 芯片组表面周期性通孔金属微结构

Fig. 8 Periodic through-hole metal micro-structure on chip set surface

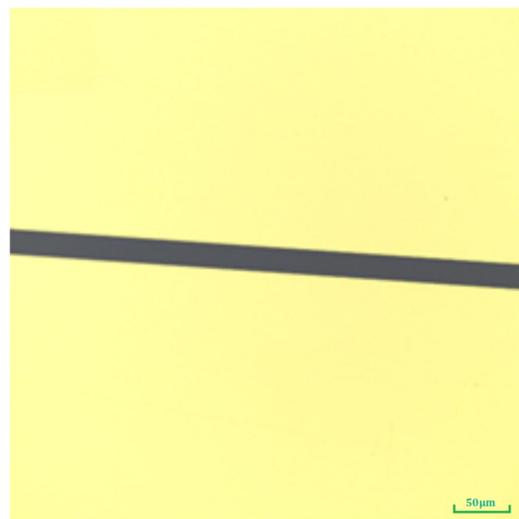


图10 芯片组表面倾斜刀口金属微结构

Fig. 10 Metal micro-structure of inclined knife- edge on chip set surface

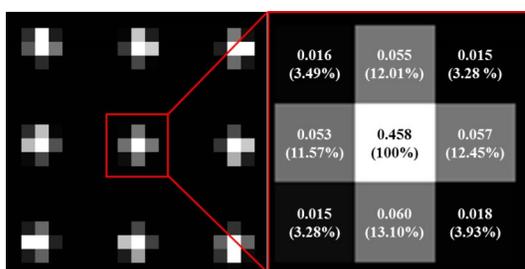


图9 带周期性通孔微结构的芯片组响应信号

Fig. 9 Response signal of chip set with periodic through-hole micro-structure

像元相邻上下左右四个像元的输出信号。根据式(3)计算得该像元对相邻像元的平均串音为12.3%。

$$CT(i,j) = \frac{1}{4} [CT(i+1,j) + CT(i-1,j) + CT(i,j+1) + CT(i,j-1)] \quad (3)$$

#### 2.4 焦平面器件MTF

图10为在长波1024×768(10μm)碲镉汞焦平面探测器芯片组表面制备倾斜刀口微结构。经测试,倾斜角 $\theta$ 为 $1.5^\circ$ ,刀口倾斜量 $d \cdot \tan\theta = 0.262\mu\text{m}$ 。结合图2所示,倾斜刀口图案实现了沿刀口边缘步进扫描,等效扫描步长为 $0.262\mu\text{m}$ 。通过提取倾斜刀口处像元输出信号绘制出边缘扩展函数(ESF)曲线,如图11所示。

对ESF曲线求导得到线扩展函数(LSF),再对LSF曲线作傅里叶变换处理得到焦平面器件的MTF。为降低求导过程中的噪声,在对ESF曲线求

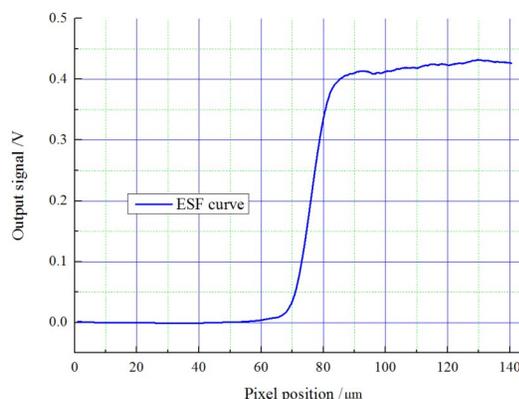


图11 倾斜刀口处像元的响应信号

Fig. 11 Response signal of pixel at the slanted edge

导前进行平滑处理。如图12和图13所示,在Nyquist空间频率下,所制备的长波1024×768(10μm)碲镉汞焦平面器件的MTF为0.35,与文献[1]中优化前的结果相当。结合测得的12.3%的串音结果,表明对于目前的材料参数和器件结构设计以及工艺状态下,像元间距缩小至10μm时,像元之间存在一定的串扰。这是由于p-on-n器件n型吸收层具有较高的少子寿命使得相应的少子扩散长度达到20~30μm,该数值已大于10μm的像元间距,因此光生载流子在像元之间将存在一定的横向扩散。后续将通过优化碲镉汞材料电学参数、器件吸收层厚度以及采用台面物理隔离等措施,抑制小像元器件串音,提高器件MTF。

#### 2.5 探测器组件成像演示

将长波1024×768(10μm)碲镉汞焦平面探测器

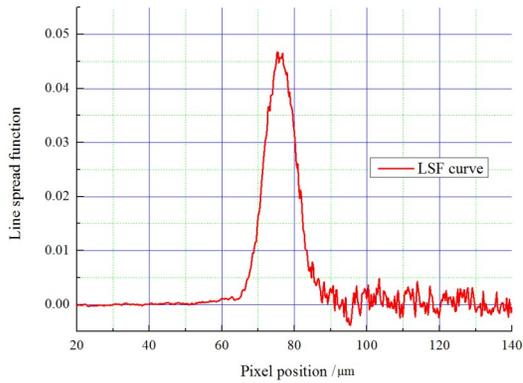
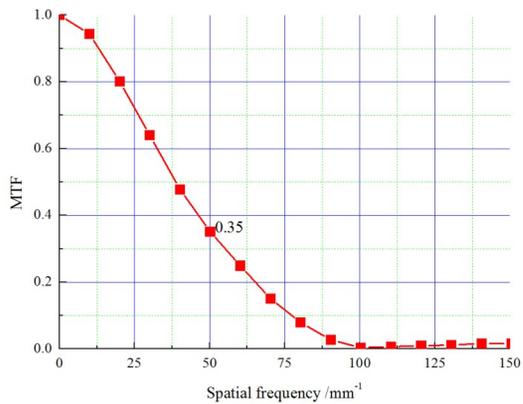


图 12 倾斜刀口处线扩展函数

Fig. 12 Line spread function at the slanted edge

图 13 长波碲镉汞 1024×768 (10 $\mu\text{m}$ ) 焦平面器件 MTF 测试结果Fig. 13 MTF test results of LW MCT 1024×768 (10 $\mu\text{m}$ ) focal plane device

组件匹配成像电路和红外光学镜头后,对室外场景和室内人物进行了成像演示,成像过程中经过了非均匀性校正和盲元替代处理。图 14(a)为宽视场下室外场景的成像截图,远处的云层和建筑物以及近处的建筑均得到了较好的体现。图 14(b)为窄视场下对室外场景的成像,清楚地显现出近处的建筑和树木。图 15 为室内人物的成像演示,人物发丝清晰可见,显示出较好的成像效果。

### 3 结论

本文基于 LPE 生长的长波碲镉汞材料,采用砷离子注入 p-on-n 平面结技术制备了长波 1024×768 (10 $\mu\text{m}$ ) 焦平面探测器组件。77K 工作温度下探测器组件的后截止波长为 9.61 $\mu\text{m}$ ,在 20 $^{\circ}\text{C}$  面源黑体照射下调节器件积分时间为 900 $\mu\text{s}$  达到半阱状态对探测器组件的基本性能进行了测试,测试结果显示器件黑体响应率非均匀性为 4.15%,平均 NETD 为 28.5mK,有效像元率为 99.81%。通过复合金属膜



(a)



(b)

图 14 不同视场下室外场景成像演示:(a)宽视场 (b)窄视场

Fig. 14 Imaging demonstration of outdoor scene in different fields of view:(a) Wide field of view, and (b) Narrow field of view

沉积、光刻以及离子束刻蚀等工艺在长波碲镉汞 1024×768 (10 $\mu\text{m}$ ) 焦平面探测器芯片组表面制备了专用的金属微结构,并对像元间串扰进行了表征分析,结果显示器件串音为 12.3%,MTF 为 0.35。最后对探测器组件进行了室外场景宽窄视场成像和室内人物成像演示,均显现出较好的成像效果。



图 15 室内人物成像演示

Fig. 15 Imaging demonstration of indoor person

## References

- [1] Rubaldo L, Taalat R, Berthoz J, et al. Latest improvements on long wave p on n HgCdTe technology at Sofradir [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2017, 10177: 101771E-1-101771E-13.
- [2] Manissadjian A, Fillon P, Tribolet P, et al. Sofradir IR detectors for LW applications [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2004, 5251: 45-55.
- [3] Ziegler J, Eich D, Hanna S, et al. Recent results of 2-dimensional LW- and VLW-HgCdTe IR FPAs at AIM [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2010, 7660: 766038-1-766038-10.
- [4] Kinch M A, Aqariden F, Chandra D, et al. Minority carrier lifetime in p-HgCdTe [J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(6): 880-884.
- [5] Leroy C, Chorier P, Destefanis G. LWIR and VLWIR MCT technologies and detectors development at Sofradir for space applications [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2012, 8353: 835320-1-835320-11.
- [6] Wollrab R, Bauer A, Bitterlich H, et al. Planar n-on-p HgCdTe FPAs for LWIR and VLWIR applications [J]. Journal of Electronic Materials, 2011, 40(8): 1618-1623.
- [7] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. Small pixel pitch MCT IR-modules [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2016, 9819: 98191Y-1-98191Y-18.
- [8] Gravrand O, Mollard L, Largeron C, et al. Study of LWIR and VLWIR focal plane array developments comparison between p-on-n and different n-on-p technologies on LPE HgCdTe [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(8): 1733-1740.
- [9] Bangs J, Gerrish A, Stevens A, et al. Advancements in HgCdTe VLWIR materials [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2005, 5783: 223-230.
- [10] Bornfreund R, Rosbeck J P, Thai Y N, et al. High-performance LWIR MBE-grown HgCdTe/Si focal plane arrays [J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(8): 1085-1091.
- [11] Parodos T, Fitzgerald E A, Caster A, et al. Effect of dislocations on VLWIR HgCdTe photodiodes [J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(5): 1068-1076.
- [12] Mollard L, Destefanis G, Baier N, et al. Planar p-on-n HgCdTe FPAs by arsenic ion implantation [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(8): 1805-1813.
- [13] Mollard L, Destefanis G, Bourgeois G, et al. Status of p-on-n arsenic-implanted HgCdTe technologies [J]. Journal of Electronic Materials, 2011, 40(8): 1830-1839.
- [14] Breiter R, Figgemeier H, Lutz H, et al. Improved MCT LWIR modules for demanding imaging applications [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2015, 9451: 945128-1-945128-11.
- [15] Chen B L, Li X Y. Infrared imaging detectors for space application [M]. Beijing: Science Press, 2016. (陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器) [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [16] Shtrichman I, Fishman T, Mizrahi U, et al. Spatial resolution of SCD's InSb 2D detector arrays [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2007, 6542: 65423M-1-65423M-11.
- [17] Martineau L, Rubaldo L, Chabuel F, et al. MTF optimization of MCT detectors [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2013, 88899: 88891B-1-88891B-10.
- [18] Gravrand O, Baier N, Ferron A, et al. MTF issues in small-pixel-pitch planar quantum IR detectors [J]. Journal of Electronic Materials, 2014, 43(6): 3025-3032.
- [19] Hwang H, Choi Y W, Kwak S, et al. MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2008, 7109: 710905-1-710905-9.
- [20] Zhang Y X, Li P Y, Si Y, et al. MTF testing of infrared focal plane array based on microstructures [J]. Infrared Technology, 2024, 46(7): 821-825. (张应旭, 李培源, 司洋, 等. 基于微结构的红外焦平面芯片 MTF 测试 [J]. 红外技术), 2024, 46(7): 821-825.
- [21] Péré-Laperne N, Taalat R, Berthoz J, et al. Improvements of long wave p on n HgCdTe infrared technology [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2016, 9933: 99330H-1-99330H-11.
- [22] Ziegler J, Bitterlich H, Breiter R, et al. Large-format MWIR and LWIR detectors at AIM [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2013, 8704: 87042L-1-87042L-11.
- [23] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. Towards ultra-small pixel pitch cooled MW and LW IR-modules [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2018, 10624: 106240B-1-106240B-16.
- [24] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. Improved high performance MCT MWIR and LWIR modules [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2019, 11002: 1100216-1-1100216-13.