

文章编号: 1001-9014(2008)04-0417-04

## 环孔工艺的碲镉汞长波红外 576 × 6 焦平面探测器组件

姚英<sup>1</sup>, 庄继胜<sup>1</sup>, 邹继鑫<sup>2</sup>, 姬荣斌<sup>1</sup>, 朱颖峰<sup>1</sup>, 陈晓屏<sup>1</sup>, 范宏波<sup>1</sup>, 蔡毅<sup>1</sup>

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 华东光电集成器件研究所, 安徽 蚌埠 233042)

**摘要:** 碲镉汞长波红外 576 × 6 焦平面探测器组件是高性能热像仪的核心组件. 本文中作者完成了碲镉汞长波红外 576 × 6 焦平面探测器组件的设计, 利用环孔技术制备出 576 × 6 焦平面探测器芯片, 经过杜瓦封装、配斯特林制冷机后成为实用的探测器组件. 性能参数测试表明: 典型的探测率达到  $1.79 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ , 非均匀性达到 14.6%, 盲元率达到 6.0%, 并完成探测器组件的实验室演示成像.

**关键词:** 环孔技术; 碲镉汞; 长波红外; 576 × 6 焦平面探测器组件

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

## HgCdTe LWIR 576 × 6 FPA PREPARED BY LOOPHOLE TECHNIQUE

YAO Ying<sup>1</sup>, ZHUANG Ji-Sheng<sup>1</sup>, ZOU Ji-Xin<sup>2</sup>, JI Rong-Bin<sup>1</sup>,  
ZHU Ying-Feng<sup>1</sup>, CHEN Xiao-Ping<sup>1</sup>, FAN Hong-Bo<sup>1</sup>, CAI Yi<sup>1</sup>

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

2. East China Institute of Photo-Electron IC, Bengbu 233042, China)

**Abstract:** HgCdTe long wave infrared (LWIR) 576 × 6 focal plane assembly (FPA) is a core assembly of high performance thermal imager. In this study, the design of HgCdTe LWIR 576 × 6 FPA was completed, and the 576 × 6 focal plane arrays were prepared with loophole technology. The integrative 576 × 6 FPA was obtained by packaged in Dewar/Stirling cooler assembly. Parameters measurements show that the typical detector average peak detectability is  $1.79 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ , the uniformity is 14.6%, and the died detective element is 6.0%. The thermal imaging of the 576 × 6 FPA has also been demonstrated in the laboratory.

**Key words:** loophole technique; HgCdTe; long wave infrared (LWIR); 576 × 6 focal plane assembly (FPA)

### 引言

第二代高性能热像仪的核心组件之一是长线条长波红外焦平面探测器组件, 其热灵敏度和空间分辨力制约着热像仪的性能, 热成像技术发展中的一个主要问题是如何协调和折中热灵敏度和空间分辨力的矛盾, 这既是目标探测和识别理论的客观反映, 又是提高热像仪性能的途径. 第一代热成像技术如此, 包括采用扫描和凝视技术的第二代热成像技术也不例外. 美国第二代高端热像仪采用碲镉汞长波红外 480 × 4/6 长线条焦平面探测器组件<sup>[1]</sup>. 英国第二代高端热像仪用碲镉汞长波红外 768 × 8 长线条

焦平面探测器组件<sup>[2,3]</sup>. 法国、德国研制的碲镉汞长波红外焦平面探测器有 480 × 4/6、576 × 4/6 等规格<sup>[4-7]</sup>.

碲镉汞焦平面探测器由碲镉汞探测元阵列与硅读出电路芯片互连而成, 目前实现两者互连的技术有倒装互连技术<sup>[4]</sup>和环孔互连技术<sup>[8]</sup>. 倒装互连是微电子技术中的高密度封装技术, 可实现将上述两个二维芯片集成为一个芯片组件; 环孔互连技术是半导体平面工艺中的多层电极引线立体互连技术, 通过垂直互连实现探测器阵列与读出电路芯片的立体互连. 当用离子束刻蚀 P 型碲镉汞互连环孔的同时, 汞原子内扩散与材料中剩余施主杂质的共同作

用在互连环孔周围形成一个圆柱形 N-on-P 结<sup>[9]</sup>, 因此带来如下优点: 工艺和设备相对简单, 设备投入少; 探测元正面照射、无衬底吸收, 利用入射红外辐射能量较充分; 芯片组件可靠性高, 碲镉汞晶片通过粘接并金属化环孔列阵与读出电路互连, 能很好承受温度、机械应力; 对碲镉汞材料的要求较低, 在离子刻蚀过程中的汞原子内扩散具有微区提纯作用, 可将 P-N 结区内的杂质原子驱赶到其外部。

通过环孔工艺可研究如下问题: 离子刻蚀过程在 P 型碲镉汞晶体中形成 P-N 结的成结机理; 碲镉汞环孔 P-N 结物理模型和特性<sup>[10]</sup>; 将 N-on-P 结构的碲镉汞光伏探测器截止波长扩展到  $12.5\mu\text{m}$ ; 制作高密度大规模碲镉汞探测器组件芯片, 探测元的面密度在倒装工艺中取决于铜柱列阵制作工艺, 在环孔工艺中则取决于碲镉汞晶体少数载流子的扩散长度<sup>[11]</sup>。此外环孔工艺可实现直接将生长在读出电路晶圆上的光敏材料制作成探测器列阵并完成两者之间机、电、热的互连, 具有把“长材料、做器件”的传统探测器工艺发展成为新的“长器件”工艺的潜力, 因此在焦平面探测器领域有持续发展和应用的前景。美国 DRS 公司、英国 BAE 公司已用环孔工艺研制和生产了包括  $768 \times 8$  规格在内的碲镉汞长波红外焦平面探测器组件<sup>[1-3]</sup>。

国内采用倒装互连和环孔互连工艺研制碲镉汞长波红外  $576 \times 6$  长线列焦平面探测器组件 (以下简称  $576 \times 6$  探测器组件)。作者采用环孔工艺等研制成功  $576 \times 6$  探测器组件样品, 对环孔 P-N 结的成结机理、物理模型和器件特性进行研究、测试和实验室热成像演示。

## 1 $576 \times 6$ 探测器组件设计

根据热像仪要求<sup>[11]</sup>, 作者选择  $576 \times 6$  规格、探测元采用错位密排结构 (见图 1), 主要设计参数为

- (1) 探测元尺寸:  $\Phi 30\mu\text{m}$
- (2) 排列方式:  $(4 \times 144) \times 6$
- (3) 探测元间距:  $14\mu\text{m} / 43\mu\text{m}$  (垂直于扫描方向 / 扫描方向)

$576 \times 6$  探测器组件采用与  $288 \times 4$  探测器相同的工程化杜瓦与  $0.5\text{W}$  整体集成式斯特林制冷机。

通过电路建模、设计软件等完成  $576 \times 6$  CMOS 读出电路的设计与仿真, 其主要功能为: 任意像元剔除, 双向 TDI 扫描, 积分时间可调, 8 档输入积分电荷容量可调, 16 位 TDI 移位寄存器, 抗光晕功能和背景撤除功能。其设计和达到的主要性

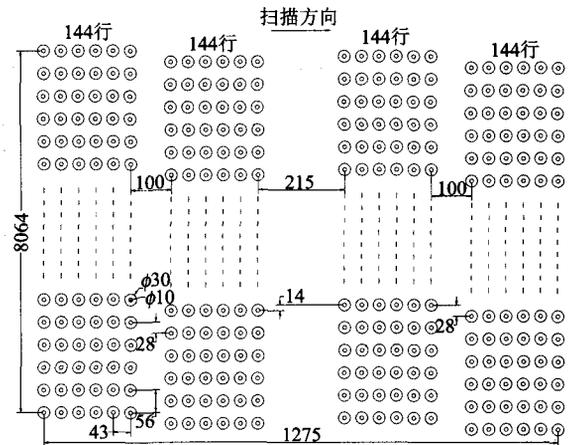


图 1  $576 \times 6$  探测器列阵结构

Fig. 1 The structure of  $576 \times 6$  detector array

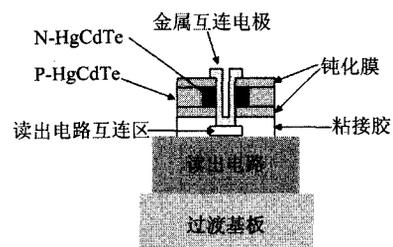


图 2 用环孔工艺制备的碲镉汞焦平面探测器示意图

Fig. 2 The diagram of a loop-hole HgCdTe FPA

能指标为

- (1) 输出动态范围:  $\geq 77\text{dB}$
- (2) 功耗:  $\leq 100\text{mW}$
- (3) 视频输出通道: 8

碲镉汞材料主要性能参数为

- (1) 组份及其非均匀性:  $(0.210 \sim 0.218) \pm 0.003\text{mole}$
- (2) 载流子浓度:  $(3 \sim 8) \times 10^{16}/\text{cm}^3$
- (3) 迁移率:  $\geq 400\text{cm}^2/\text{Vs}$

环孔工艺原理示意如图 2 所示。将碲镉汞晶片和读出电路划片成单个芯片, 把两者粘接为一体, 减薄碲镉汞芯片的厚度至  $10\mu\text{m}$ , 在碲镉汞晶片上制备  $576 \times 6$  环孔 N-on-P 探测器列阵的同时形成垂直互连环孔列阵, 将环孔列阵金属化后完成碲镉汞探测元列阵与读出电路芯片的垂直互连。

## 2 $576 \times 6$ 探测器实验结果

环孔碲镉汞长波红外探测器  $I-V$  特性和光谱响应如图 3 和图 4 所示,  $576 \times 6$  探测器芯片照片如图 5 所示,  $576 \times 6$  环孔列阵金属化的局部照片如图 6 所示。用波长  $900\text{nm}$ 、聚焦光斑为  $5\mu\text{m}$  的激光束扫

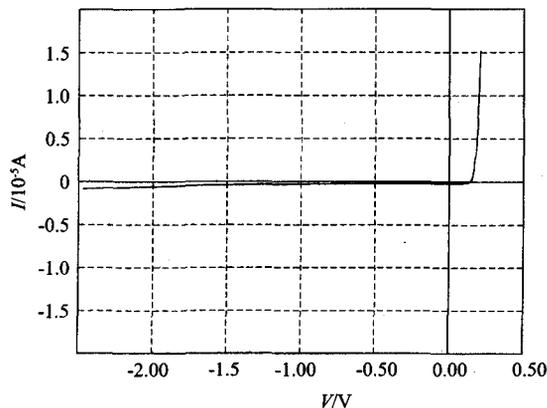


图 3 环孔工艺制备的长波红外碲镉汞探测器的 I-V 曲线  
Fig. 3 The I-V curve of a LWIR loophole HgCdTe detector

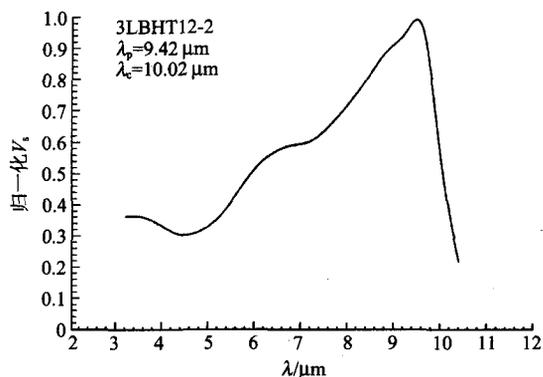


图 4 环孔工艺制备的长波红外碲镉汞探测器的光谱响应曲线  
Fig. 4 The spectrum response curve of a LWIR loophole HgCdTe detector

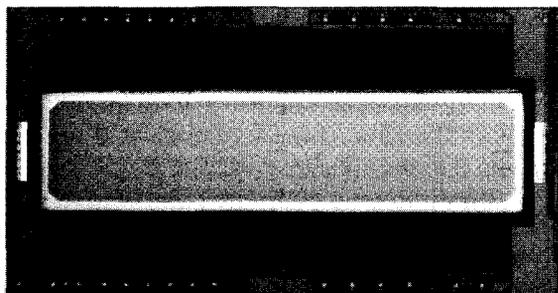


图 5 用环孔工艺研制的 576 × 6 碲镉汞焦平面探测器芯片照片  
Fig. 5 The photo of the 576 × 6 loophole HgCdTe FPA chip

描 576 × 6 探测器芯片、用芯片两侧的地电极收集被激发的感生电流,并用其调制显示器即得到其激光感生电流像,如图 7 所示。576 × 6 探测器组件测试参数如表 1 所列,576 × 6 探测器组件所成热图像如图 8 所示。

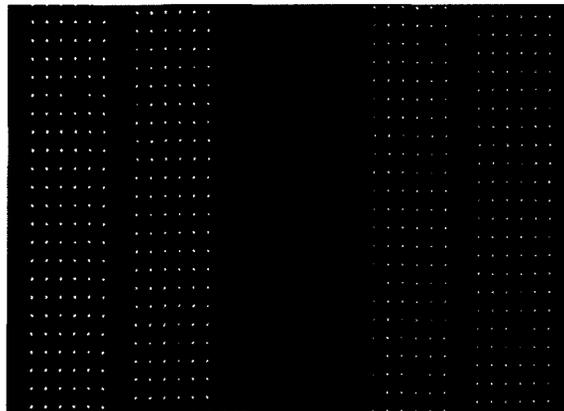


图 6 576 × 6 金属化环孔列阵的局部照片  
Fig. 6 The photo of a part of the metalized loophole 576 × 6 array

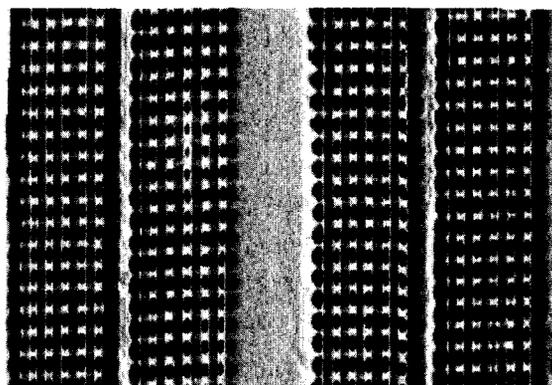


图 7 576 × 6 探测元阵列激光感生电流成像的局部照片  
Fig. 7 The part of a photo of laser beam induction current (LBIC) of 576 × 6 array

表 1 576 × 6 探测器芯片的主要性能参数

Table 1 The main performance of the 576 × 6 FPA

响应波段 (μm)	7.5 ~ 10.0
平均峰值响应率 (V/W)	1.90 × 10 <sup>8</sup>
平均峰值探测率 (cm Hz <sup>1/2</sup> /W)	1.79 × 10 <sup>11</sup>
响应率不均匀性 (%)	14.6
盲元率 (%)	6.0

### 3 分析与讨论

用环孔工艺研制的碲镉汞光伏探测器的 I-V 特性良好,典型 R<sub>0</sub>A 可达 20Ωcm<sup>2</sup> 以上,典型探测器的峰值波长 9.8μm,满足设计要求。因碲镉汞探测器阵列芯片上、下两个表面均需要钝化,良好的 I-V 特性反映了碲镉汞晶片的减薄、钝化和成结等关键工艺已达到研制出 576 × 6 探测器芯片的水平,作者甚至用碲镉汞体晶也制备出可进行热成像演示的 576 × 6 探测器。

用环孔工艺可制作出均匀、互连成功率很高的 576 × 6 环孔阵列。图 6 中的亮点是环孔阵列金属化

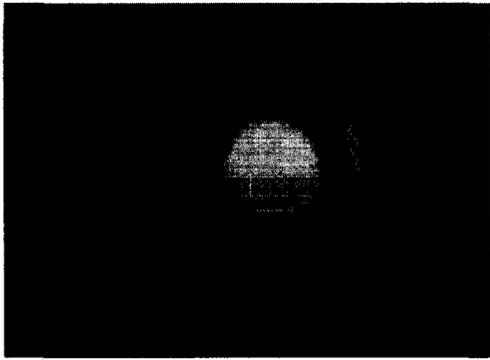


图8 576×6 焦平面探测器组件的原始热图像(未进行非均匀性校正)

Fig.8 The original thermal imaging of 576×6 FPA (no Non-Uniformity Correlation)

后的光反射.通过大量试验,作者实现了70%的576×6探测器芯片达到100%的互连.对576×6探测器进行了高低温贮存、高低温工作、温度循环、机械振动和冲击等环境试验证明环孔互连具有较高的热学及力学可靠性.

在激光感生电流图像中,一个灰度代表一个感生电流值.灰度大对应感生电流强度大,反之亦然.当激光束扫描576×6探测器芯片无光敏元的碲镉汞晶片部分,从芯片的两个地电极测量感生电流.因晶体内部均匀、无内建电场,所以两个电极之间无感生电流输出,对应这些部分的感生电流图像呈均匀且无对比度的灰色.当激光束扫描到576×6探测器芯片光敏元列阵时,每个探测元形成灰度均匀、但对比度不同的一对半圆图像.这是其P-N结内建电场对感生电流作用的结果:当感生电流方向与内建电场一致时,两个地电极之间测量到较强的电流,故对应部分的图像灰度深,反之则浅.在探测器列阵边缘,感生电流的路径短、电流复合小,因此其图像比中间部分的灰度深.激光束扫描测试结果表明:好的576×6探测器芯片其探测元对激光束的光电响应大且均匀,P-N结的感生电流图像对称、边界清晰且不相交.这一中间测试结果从探测器组件的参数测试和整机的热成像中得到进一步印证.

#### 4 结语

综上所述,用环孔工艺制作的长波红外碲镉汞探测器典型 $R_0 A$ 大于 $20\Omega\text{cm}^2$ ,截止波长大于 $9.8\mu\text{m}$ ,具有满足研制576×6探测器组件的性能.

采用环孔工艺可以实现大部分576×6探测器芯片组件100%互连.激光感生电流成像技术作为576×6探测器芯片组件中间过程测试手段,芯片的感生电流图像可以半定量对576×6探测器芯片进行性能评估.组件参数测试和成像演示表明:用环孔工艺制作的576×6探测器组件性能达到了热像仪和组件总体设计的第一个目标.

**致谢** 作者衷心地感谢昆明物理研究所红外探测器材料、杜瓦、制冷机、热像仪项目组的全体同志所做出的贡献,感谢华东光电技术研究所读出电路项目组为读出电路做出的贡献,特别感谢本所红外焦平面探测器研究室的全体同志长期辛勤的工作和努力.

#### REFERENCES

- [1] Michael A Kinch. HDVIP™ FPA technology at DRS [J]. *SPIE*, 2001, **4369**:566—578.
- [2] Baker I M, Maxey C D. Summary of HgCdTe 2D array technology in the U. K [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6):682—689.
- [3] Stewart Crawford, John Mc Donald, Adrian Glass, et al. SXGA resolution IR sensor; STAIRS C [J]. *SPIE*, 2002, **4719**:156—166.
- [4] Philippe Tribolet, Philippe chorier, Alain Manissadjian, et al. High Performance infrared detectors at sofradir [J]. *SPIE*, 2000, **4028**:438—456.
- [5] Jean Pierre Chatard. Sofradir second-generation IRFPA technology: recent development [J]. *SPIE*, 1994, **2269**:418—425.
- [6] Jean Pierre Chatard. Sofradir MCT IRFPA new development [J]. *SPIE*, 1995, **2552**:767—789.
- [7] Rainer Damkoehler, Kurt Eberhardt, Reinhard Oelmaier, et al. High performance linear detector modules [J]. *SPIE*, 2000, **4028**:192—200.
- [8] Baker I M. Infrared Radiation Imaging Devices and Methods for Their Manufacture [P]. US Patent, 4521798, 1982.
- [9] YAO Ying. Mechanism analysis of P-HgCdTe ion milling junction [J]. *Infrared Technology* (姚英. P型HgCdTe离子刻蚀P-N结成结机理分析. *红外技术*), 2007, **29**(2):71—75.
- [10] QUAN Zhi-Jue, LI Zhi-Feng, LU Wei, et al. Parameters extraction from the dark current characteristics of long-wavelength HgCdTe photodiode [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (全知觉,李志峰,陆卫,等. 光伏型碲镉汞长波探测器暗电流特性的参数提取研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2):92—96.
- [11] ZHOU Li-Wei, LIU Yu-Yan. *The Target Detecting and Distinguishing* [M]. Beijing: Institute of Technology Press (周立伟,刘玉岩. *目标探测与识别*,北京:北京理工大学出版社), 2002:121—178.