

## 碲镉汞雪崩焦平面器件

李浩<sup>1,2</sup>, 林春<sup>1,3\*</sup>, 周松敏<sup>1</sup>, 郭慧君<sup>1</sup>, 王溪<sup>1</sup>, 陈洪雷<sup>1</sup>, 魏彦锋<sup>1</sup>, 陈路<sup>1</sup>,  
丁瑞军<sup>1</sup>, 何力<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 上海科技大学, 上海 201210)

**摘要:** 碲镉汞雪崩光电二极管以其高增益、高灵敏度和高速探测的优点成为第 3 代红外光电探测器的重要发展方向之一。制备了截止波长 3.56  $\mu\text{m}$  的雪崩光电二极管焦平面器件, 面阵规模为 16 $\times$ 16。焦平面器件在 0~6 V 偏压下有效像元率大于 90%, 非均匀性小于 20%。6 V 偏压下 NEPh 约为 60, 过剩噪声因子为 1.2。

**关键词:** 碲镉汞; 雪崩光电二极管; 焦平面; 噪声等效光子数; 过剩噪声因子  
**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

## HgCdTe avalanche photodiode FPA

LI Hao<sup>1,2</sup>, LIN Chun<sup>1,3\*</sup>, ZHOU Song-Min<sup>1</sup>, GUO Hui-Jun<sup>1</sup>, WANG Xi<sup>1</sup>, CHEN Hong-Lei<sup>1</sup>, WEI Yan-Feng<sup>1</sup>, CHEN Lu<sup>1</sup>, DING Rui-Jun<sup>1</sup>, HE Li<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Material and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;  
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;  
3. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** HgCdTe APD is one of the developing trends of third generation inferred FPA detectors. In this paper, we report the result on a 16 $\times$ 16 arrays of HgCdTe avalanche photodiode with 3.56  $\mu\text{m}$  cut-off wavelength. The operability in gain exceeds 90% and relative gain dispersion is lower than 20%. NEPh is about 60 at 6 V bias with excess noise factor close to 1.2.

**Key words:** HgCdTe, APD, FPA, NEPh, excess noise factor.

**PACS:** 78. 55. Et, 85. 60. Gz

### 引言

自 1959 年被发现以来<sup>[1]</sup>, Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料对近六十年来红外探测技术的发展产生了重大的影响。其 Cd 组分 x 的变化不仅可以改变材料的截止波长, 更重要的是可以获得很大的电子-空穴离子化系数比<sup>[2-3]</sup>, 这使得 HgCdTe 材料是用于制备高增益、高灵敏度、高速探测且几乎没有过剩噪声<sup>[4-5]</sup>的雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 的理想材料。HgCdTe APD 焦平面器件不仅可以对弱信号进行探

测, 每个像元还可根据探测激光返回的时间计算出目标的距离, 从而获取目标的三维信息, 大大提高了目标的识别能力<sup>[6]</sup>。

早在 2004 年 Baker<sup>[7]</sup> 就使用 320 $\times$ 256 的 APD 焦平面器件进行了成像, 像元中心距 24  $\mu\text{m}$ , 噪声等效光子数只有 10。2010 年时 Rothman 团队<sup>[8-9]</sup> 报道的 320 $\times$ 256 焦平面器件有效像元率 >99.6%, 非均匀性 <10%, 3D 成像时分辨率达到 15 cm (时间分辨率 1ns)。之后他们又制备出中心距 15  $\mu\text{m}$  的 384 $\times$ 288

收稿日期: 2019-01-09, 修回日期: 2019-07-06

基金项目: 国家自然科学基金 (61705247)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61705247)

作者简介 (Biography): 李浩 (1991-), 江苏扬州人, 博士研究生, 从事红外碲镉汞器件的研究。Email: lihaozy@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): Email: chun\_lin@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2019-01-09, Revised date: 2019-07-06

焦平面器件, 7V 工作电压下增益达到 55, 有效像元率超过 99.7%, 非均匀性小于 4%.

国内顾仁杰与沈川<sup>[10]</sup>采用 MBE 生长的 HgCdTe 材料制备台面结构的 PIN 型 APD, 面阵规模达到 128×128, 但是仅报道了增益参数, 对焦平面性能并没有提及. 本文采用液相外延生长的 HgCdTe 材料制备出 16×16 小面阵焦平面器件, 并对其焦平面性能进行了测试, 这是国内首个关于碲镉汞雪崩焦平面器件性能的报道.

## 1 器件结构

离子束刻蚀 Hg 空位的 HgCdTe 材料过程中会形成 Hg 填隙原子并向材料内部扩散, 与汞空位复合使材料转变为剩余施主和 Hg 填隙原子占主导的 N 型<sup>[5]</sup>. 本文即采用离子束刻蚀工艺形成低掺杂的 N<sup>-</sup> 区, 结合离子注入制备平面 PIN 型 HgCdTe APD, 图 1 为焦平面器件的单个像元结构示意图.

器件采用 Cd 组分 0.368 的 Hg 空位液相外延材料, 对应 77 K 下截止波长 3.53 μm, 材料厚度 11 μm, 汞空位浓度 1×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>. 离子束刻蚀形成的 N<sup>-</sup> 区厚度为 6 μm, 载流子浓度约为 1×10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>, N<sup>+</sup> 区通过后续的 B<sup>+</sup> 注入形成, 浓度约为 1×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>. 像元直径 20 μm, 焦平面规模 16×16, 像元中心距 150 μm.

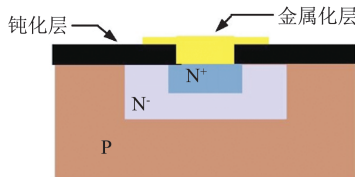


图 1 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of HgCdTe APD

## 2 器件性能

将器件封装于杜瓦中进行性能测试, 杜瓦采用液氮制冷到约 80K. 图 2 为焦平面器件的测试单元在不同偏压下的归一化光谱曲线, 器件实测截止波长为 3.56 μm, 并且在不同反向偏压下光谱响应稳定.

焦平面测试<sup>[9,11-12]</sup>时, 杜瓦加装 1.55 μm 窄带带通滤光片, 测量焦平面器件在不同偏压下的响应电压. 定义增益偏差介于平均计算值±50% 之间的像元为有效像元, 并以此计算焦平面器件的有效像元率和非均匀性.

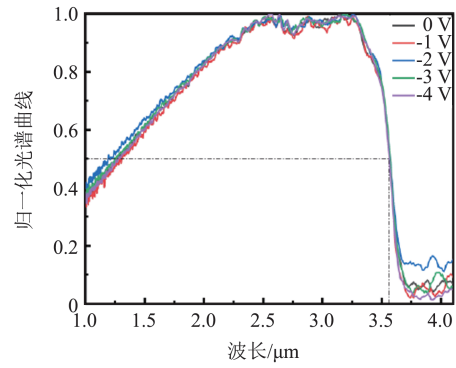


图 2 不同偏压下 HgCdTe APD 器件归一化光谱响应

Fig. 2 The normalized spectral response of HgCdTe APD with different bias

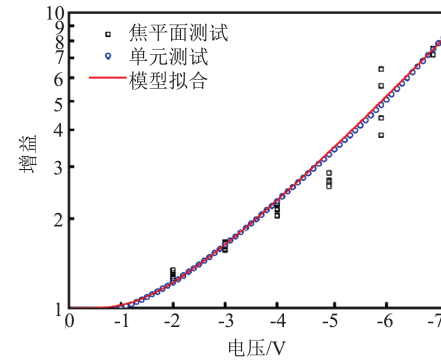


图 3 焦平面器件与单元器件增益对比

Fig. 3 Measured gain of FPA and unit cell

图 3 对比了单元器件测试与焦平面测试得到的增益, 焦平面测试的散点对应于面阵不同区域像元的结果, 可以看出单元器件测试与焦平面测试的结果基本一致, 器件在大约 1V 反偏时开始雪崩倍增, 随后出现良好的线性模式倍增区. 图中红线是用 Rothman 提出的模型<sup>[13]</sup>拟合.

$$M(V) = e^{a \cdot V} \cdot e^{-\frac{bw}{V}} \quad (1)$$

式中的  $a$  描述增益恒定的指数增加,  $b$  与增益的开启电压相关,  $w$  是耗尽区的宽度<sup>[14]</sup>. 拟合用的参数  $a=0.44V^{-1}$ ,  $bw=2.98V$ , 如图所示这个器件的增益曲线与模型能很好地吻合.

图 4 为焦平面器件所有 256 个像元在不同偏压下的增益分布图. 图 5 计算了焦平面器件在不同偏压下的有效像元率和非均匀性, 其有效像元率大于 90%, 非均匀性小于 20%.

从图 4 中可以发现, 大偏压下不同区域的像元的增益差异较大, 且有局部的周期性变化的规律. 由于增益计算是用大偏压下的响应电压除以

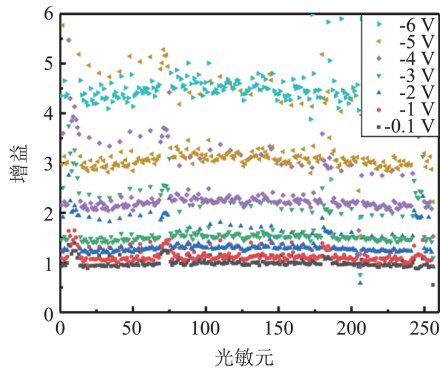


图4 不同偏压下像元增益分布图

Fig. 4 Measured gain of 256 pixels with different bias

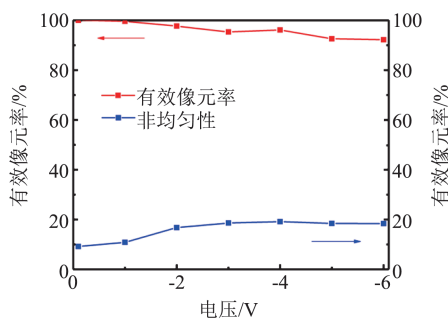


图5 不同偏压下焦平面器件有效像元率和非均匀性

Fig. 5 Operability in gain and gain dispersion with different bias

100 mV 下的响应电压,类似于归一化后的相对值,会掩盖掉部分数值信息,因此直接观察响应电压的测试结果可以更明显的发现其中7个像元为一组的周期性变化规律,图6是1-3V下部分像元的响应电压测试结果.另外图3和图5也反映出焦平面器件的非均匀性随着偏置电压的增大而增大.

分析版图后发现N区是16×16面阵分布,P区的金属接触是在面阵四周,导致面阵中心像元的P区

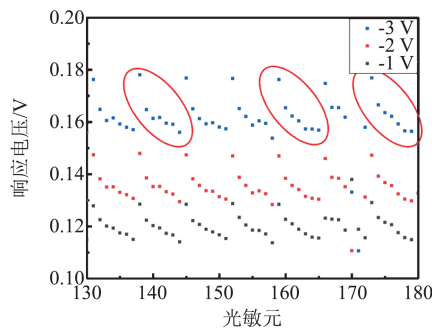


图6 1-3V下部分像元的响应电压分布图

Fig. 6 Response voltage of partial FPA at 1V to 3V reverse bias

体电阻相较边缘像元的更大.另外,器件的信号是通过与之倒焊的宝石片上的引线引出,引线中存在着7个一组的布局,且是由面阵中心部分往面阵边缘排布,即一组中的P区体电阻是逐渐变小的.较大的P区体电阻会导致给器件加偏置电压时P区的分压也较大,对于普通器件较小的工作电流来说这部分电压的变化值可以忽略,但是APD器件加大反偏之后电流值远大于常规器件,这时P区的分压则会显著影响到光敏元上实际加载的电压值,从而出现面阵边缘像元的电流大于面阵中心像元的电流值,并且这种差异会随着反向偏压的增大而愈加明显,严重影响焦平面器件的非均匀性.

由于实际器件中的P区电阻无法进行测量,为了验证猜想以3V下的测试结果进行近似的计算.根据器件使用的P型HgCdTe材料的载流子浓度和迁移率可计算出其电阻率为 $2.16 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ .7个一组的布局中相距较远的两个像元的P区体电阻的差异近似为两个像元间的P型HgCdTe的体电阻约为 $1.94 \times 10^5 \Omega$ .在单元测试中3V下单个像元的电流为 $8.72 \times 10^{-9} A$ ,考虑到焦平面测试中多个像元的电流会处于叠加状态如图7所示,因此在计算P区分压时取电流平均值后近似为3.5倍单个像元的电流,得到P区分压约为5.92 mV.单元测试中2.9V~3.1V的电流差异为 $0.483 \times 10^{-9} A$ ,因此P区5.92 mV的分压引起的像元间电流的差异约 $1.43 \times 10^{-11} A$ ,再依据焦平面测试时的电容和积分时间估算出这部分电流差异引起的电压差异约为0.02 V,与图6中差异基本一致.

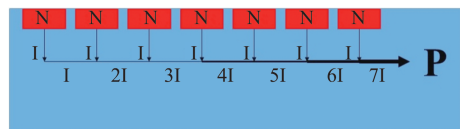


图7 焦平面器件中电流示意图

Fig. 7 Schematic illustration of current in FPA

噪声等效光子数 NEPh 定义为光子数的变化在探测器上引发的响应电压变化量与噪声电压相等时光子数的变化量<sup>[5]</sup>,即 NEPh 越小探测器的灵敏度越高.图8是器件的 NEPh 随偏压的关系图,在小电压下,器件增益比较小,NEPh 会受限于电路及整个测试系统的噪声水平;随着电压增大,输入的信号和噪声经器件雪崩倍增后逐渐掩盖掉测试系统噪声,因此此时的 NEPh 主要由器件本身性质决定<sup>[7]</sup>.

器件的增益归一化暗电流密度 GNDCD (Gain

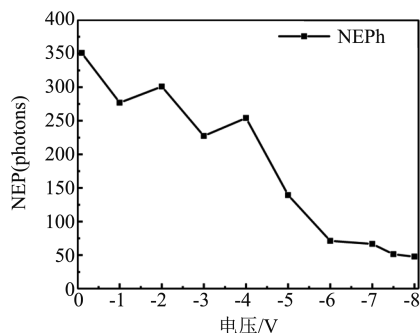


图8 不同偏压下 NEPh

Fig. 8 NEPh at different reverse bias

Normalized Dark Current Density) 如图 9 所示, APD 器件内部暗电流也会随雪崩效应出现倍增, 因此归一化后能够反映器件实际的暗电流变化水平, 在 6 V 以下器件状态稳定, GNDCD 缓慢增加, 从 8 V 开始由于器件隧穿电流的增加其暗电流也迅速增大. 过剩噪声因子 F 也表现出相同的趋势, 小偏压下约为 1.2, 而 8 V 时由于隧穿电流的增大导致计算得到的 F 远高于正常值.

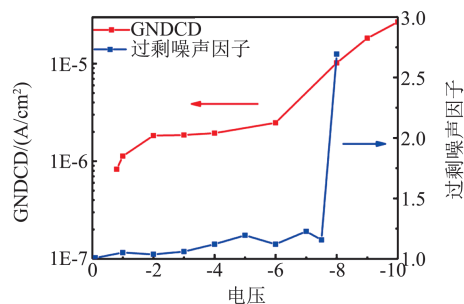


图9 不同偏压下的GNDCD和过剩噪声因子

Fig. 9 GNDCD and excess noise factor with different bias

### 3 结论

利用截止波长  $3.56 \mu\text{m}$  的 HgCdTe 材料制备了平面 PIN 型  $16 \times 16$  小面阵 APD 焦平面器件, 并于国内首次报道了 HgCdTe 线性模式 APD 焦平面器件的性能. 器件在 0–6 V 偏压下有效像元率大于 90%, 非均匀性小于 20%, 6 V 时 NEPh 约为 60, 过剩噪声因子 1.2. 测试过程中发现, 面阵器件像元与 P 区电极间距离的差异会导致大反偏下像元实际加载的电压不一致, 从而导致整个焦平面器件响应的不均匀, 后期需要重新设计器件结构来解决这个问题.

### 参考文献

[1] Lawson W D, Nielsen S, Putley E H, et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe–CdTe.

*Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 1959, **9** (3) : 325–329.

[2] Beck J D, Wan C F, Kinch M A. MWIR HgCdTe avalanche photodiodes. *Proc Spie*, 2001, 4454.

[3] Perrais G, Gravrand O, Baylet J, et al. Gain and dark current characteristics of planar HgCdTe avalanche photodiodes. *Journal of electronic materials*, 2007, **36** (8) : 963–970.

[4] LI Hai-Bin. Study on preparation technologies of HgCdTe electron avalanche photodetectors [D]. Shanghai Institute of Technical Physics. (李海滨. 碲镉汞电子雪崩光电探测器制备技术研究. 上海技术物理研究所). 2011.

[5] YANG Jian-Rong. Physics and technology of HgCdTe materials [M]. *National Defense Industry Press*. (杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术. 国防工业出版社), 2012

[6] Jack M D, Maurice J. Halmos, Terence J. de Lyon, et al. *Advances in linear and area HgCdTe APD arrays for eyesafe LADAR sensors. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2001:198–211.

[7] Baker I M, Duncan S S, Copley J W. A low-noise laser-gated imaging system for long-range target identification. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2004, **5406**:133–144.

[8] Rothman J, Gravrand O, Mollard L, et al. HgCdTe APD-focal plane array development at DEFIR. *Proc Spie*, 2010, **7834**(1):783400–783400–8.

[9] Kerlain A, Rubaldo L, Decaens G, et al. Performance of Mid-Wave Infrared HgCdTe e-Avalanche Photodiodes. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10):2943–2948.

[10] GU Ren-Jie, SHEN Chuan, WANG Wei-Wiang, et al. MBE growth HgCdTe avalanche photodiode based on PIN structure [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (顾仁杰, 沈川, 王伟强, 等. MBE 生长的 PIN 结构碲镉汞红外雪崩光电二极管. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(2): 136–140.

[11] GB/T 17444–2013, Measuring methods for parameters of infrared focal plane arrays. (红外焦平面阵列特性参数测试方法).

[12] YD/T83–1996, Measuring methods for avalanche photodiodes. (雪崩光电二极管检测方法).

[13] Rothman, Johan, Mollard, et al. History-Dependent Impact Ionization Theory Applied to HgCdTe e-APDs. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8):1757–1768.

[14] Sieck A, Benecke M, Eich D, et al. Short-Wave Infrared HgCdTe Electron Avalanche Photodiodes for Gated Viewing. *Journal of Electronic Materials*, 2018, **47**(10):5705–5714.