

碲镉汞 APD 焦平面技术研究

李雄军¹, 张应旭¹, 陈 虢¹, 李立华¹, 赵 鹏¹, 杨振宇², 杨 东¹, 姜炜波¹,
杨鹏伟¹, 孔金丞¹, 赵 俊¹, 姬荣斌^{1*}

(1. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223;

2. 华中科技大学, 湖北武汉 430074)

摘要: 采用 LPE 生长的中波碲镉汞材料, 通过 B 离子注入 n-on-p 平面结技术制备了规模为 256×256, 像元中心距为 30 μm 的碲镉汞 APD 焦平面探测器芯片。在液氮温度下对其增益、暗电流以及过噪因子等性能参数进行了测试分析, 结果表明, 所制备的碲镉汞 APD 焦平面芯片在 -8.5 V 反偏下平均增益达到 166.8, 增益非均匀性为 3.33%; 在 0~-8.5 V 反向偏置下, APD 器件增益归一化暗电流为 $9.0 \times 10^{-14} \sim 1.6 \times 10^{-13}$ A, 过噪因子 F 介于 1.0~1.5 之间。此外, 还对碲镉汞 APD 焦平面进行了成像演示, 并获得了较好的成像效果。

关键词: 碲镉汞; APD; 增益; 暗电流; 过噪因子

中图分类号: TN215 文献标识码: A

Study on HgCdTe APD focal plane technology

LI Xiong-Jun¹, ZHANG Ying-Xu¹, CHEN Xiao¹, LI Li-Hua¹, ZHAO Peng¹, YANG Zhen-Yu²,
YANG Dong¹, JIANG Wei-bo¹, YANG Peng-wei¹, KONG Jin-Cheng¹, ZHAO Jun¹, JI Rong-Bin^{1*}

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

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A 256×256 HgCdTe APD hybrid focal plane array (FPA) with 30μm pixel pitch was prepared by B ion implantation n-on-p planar junction technology based on MW HgCdTe material grown by LPE. The performance parameters such as gain, dark current and noise factor were characterized and analyzed at liquid nitrogen temperature. The results show that the average gain of HgCdTe APD focal plane chip is 166.8 and the gain non-uniformity is 3.33% under -8.5V reverse bias; Under 0 ~ -8.5V reverse bias, the gain normalized dark current of APD device is $9.0 \times 10^{-14} \sim 1.6 \times 10^{-13}$ A, the noise factor F is between 1.0 and 1.5. In addition, the imaging demonstration of HgCdTe APD focal plane is carried out, and a good imaging effect is obtained.

Key words: HgCdTe, APD, gain, dark current, the noise factor

引言

主/被动双模成像技术利用宽视场下被动成像搜索和探测场景内的潜在目标, 然后再通过窄视场下主动成像对潜在目标进行识别和跟踪。传统的主/被动双模成像系统由宽视场被动热成像和脉冲激光照明窄视场主动成像两套独立的光电系统组成^[1], 即分别包含两个不同波段的探测器以及两套

分离的光学系统和信号处理系统。这就导致传统主/被动双模成像系统体积大、重量重、结构复杂以及成本较高; 此外, 在实际工作过程中被动成像和主动成像的光路对准显得尤为复杂和困难。

碲镉汞 APD 探测器可通过偏压调节实现常规的被动热成像和雪崩增益下的主动成像, 这将为实现采用单个焦平面探测器的自对准系统提供了可能。利用主/被动双模光学系统可方便实现被动成

收稿日期: 2022-03-01, 修回日期: 2022-08-26

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 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: lixiongjun666@126.com

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

Received date: 2022-03-01, Revised date: 2022-08-26

像和主动成像过程中的光路切换,可有效解决光路校准困难的问题。基于碲镉汞 APD 探测器的新型主/被动双模成像系统结构更简洁,体积、重量、功耗以及成本将更简化。此外,碲镉汞 APD 器件具有增益高、响应速度快以及过剩噪声低等特点,特别适用于快速成像、主/被动双模成像以及 3D 成像等应用,同时满足全天时与全天候工作的需求,因此国际上主要从事红外探测器研究和开发的机构均对碲镉汞 APD 器件开展了广泛地研究,并已获得了令人瞩目的技术进展。

2004 年,英国 Selex 公司的 Ian Baker^[2-3]等基于液相外延(LPE)生长的碲镉汞薄膜,采用环孔工艺制备了像元中心距为 24 μm ,规模为 320×256 的 APD 焦平面探测器(名称为:SWIFT)。该器件 77 K 下截止波长为 4.6 μm , -7 V 偏压下器件增益接近 100,噪声等效光子数达到 10 个光子。他们使用该探测器搭建了用于远距离目标识别的激光门控成像系统,并开展了外场演示验证实验,达到了远目标识别的目的。随后, Ian Baker^[4]等研制了基于门控的后边沿实现 3D 成像的碲镉汞 APD 焦平面探测器(名称为:SWALLOW),并开展相关的实验室测试。

美国 DRS 的 Beck 等^[5]人于 2007 年研制了 40 μm 像元中心距, 128×128 阵列规模的碲镉汞 APD 焦平面探测器。80 K 工作温度下器件截止波长 5.0 μm ,反向偏置 -11 V 下器件增益达到 946,噪声等效光子数小于 1 个光子。基于不同的光学系统,他们搭建了主动门控成像系统,并对近处的车辆和水塔以及距离 8.9 km 的广播塔进行了成像演示。

法国 Sofradir 的 Eric de Borniol 等^[6-7]人研制了 30 μm 像元中心距, 320×256 阵列规模的碲镉汞 APD 焦平面探测器,80 K 下截止波长为 4.6 μm 。小偏压下该器件的 NETD 为 30 mK,有效像元率为 99.93%; -9 V 反偏下,焦平面器件平均增益 174,平均过噪因子 F 为 1.5。对于距离模式,在 -6 V 反偏(增益 $M=23$),景深 30 m 测试条件下,器件距离分辨率达到 15 cm。同时,他们也开展了 3D 成像演示,在中等能量脉冲激光照射下实现了较好的 3D 成像。此外, A. Kerlain 等^[8]人还实现了像元中心距为 15 μm ,规模为 384×288 的碲镉汞 APD 焦平面研制,并进行了雪崩增益状态下被动热成像演示。

近年来,国内的研究团队也开展了碲镉汞 APD 器件技术的研究^[9-10],但从器件规模和性能等方面

均与国外先进水平存在较大的差距。本文基于液相外延(LPE)生长的中波碲镉汞薄膜,采用 B 离子注入 n-on-p 平面结技术制备了像元中心距为 30 μm ,阵列规模为 256×256 的 APD 焦平面探测器芯片,并在液氮温度下对增益、暗电流以及过噪因子等器件性能指标进行了测试分析;此外,还对所研制的碲镉汞 APD 焦平面探测器芯片进行了初步地成像演示。

1 实验

1.1 器件制备

实验采用 LPE 生长的碲镉汞薄膜,材料 Cd 组分 $x \sim 0.302$,77 K 温度下对应的响应截止波长为 4.95 μm 。材料导电类型为 P 型,受主杂质为汞空位,空穴浓度 $2.5 \sim 5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。碲镉汞薄膜生长过程中采用低浓度铟掺杂作为材料的本底掺杂,铟的浓度为 $0.5 \sim 2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。通过 B 离子注入以及注入后的退火处理,使得离子注入产生的汞间隙原子向材料内部扩散的过程中与汞空位不断复合还原至轻掺杂的本底浓度,实现具有雪崩倍增功能的 N⁻层。然后,通过欧姆接触孔刻蚀和接触电极成型完成了碲镉汞 APD 探测器芯片的制备。焦平面单像元碲镉汞 APD 器件结构如图 1 所示。

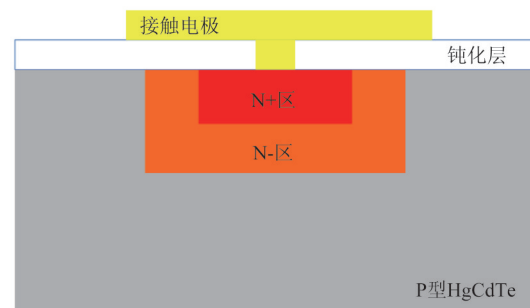


图1 单像元碲镉汞 APD 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single pixel HgCdTe APD device

将所制备的面阵规模 256×256,像元中心间距为 30 μm 的碲镉汞 APD 探测器芯片与专用的 APD 读出电路通过铟柱倒装互连实现了焦平面探测器芯片组。再对其进行下填胶、固化、背减薄去除衬底以及背增透膜沉积等完成了碲镉汞 APD 焦平面芯片的制备,芯片实物图如图 2 所示。

1.2 器件测试

将 256×256(30 μm)碲镉汞 APD 焦平面探测器芯片封装入中测杜瓦,冷屏 $F\#$ 数为 2,液氮制冷到约

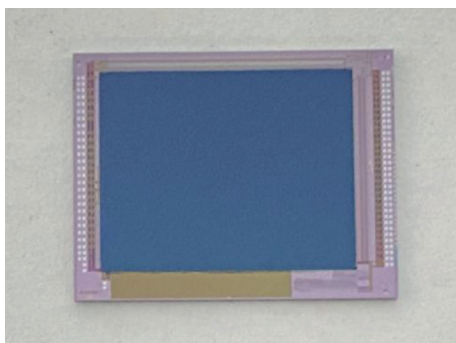


图2 碲镉汞 APD 焦平面芯片实物照片

Fig. 2 The photograph of HgCdTe APD focal plane chip

77 K 后分别对着 20 °C 和 35 °C 的面源黑体, 调节积分时间和探测器偏置对焦平面器件的基本性能进行了测试, 并对其雪崩增益 M 和过噪因子 F 进行了分析。此外, 在 0° 视场 (0FOV) 条件下对液氮温度碲镉汞 APD 焦平面器件的暗电流进行了测试分析。最后, 在不同条件下对 APD 焦平面器件进行了初步地成像演示。

2 结果与讨论

2.1 碲镉汞 APD 焦平面雪崩增益

在 20 °C 面源黑体辐照下, 调节探测器偏置的同时也调整积分时间使得势阱填充接近 50%。然后切换至 35 °C 面源黑体, 获得不同偏压下 APD 焦平面器件的响应信号值 $V_s(V)$ 。通过不同偏压下的单位积分时间下的信号电压与小偏压 (如: -50 mV) 下单位积分时间下的信号电压之比, 即可得到碲镉汞 APD 焦平面器件在不同偏置下的雪崩增益 $M(V)$ 。

$$M(V) = \frac{V_s(V)/T_{\text{int}}(V)}{V_s(V = -50 \text{ mV})/T_{\text{int}}(V = -50 \text{ mV})}, \quad (1)$$

其中, $T_{\text{int}}(V)$ 为不同偏压下焦平面器件的积分时间。

图 3 分别为 -5.6 V 和 -8.6 V 反向偏压下碲镉汞 APD 焦平面器件雪崩增益灰度图, 图 4 则为 -8.6 V 反偏下焦平面器件雪崩增益直方图。器件增益分布呈现正态分布, 雪崩增益均值为 166.8, 标准偏差 5.56, 增益非均匀性为 3.33%, 表现出较高的增益值和较好的均匀性。

图 5 为碲镉汞 APD 焦平面器件增益及其非均匀性随偏压的变化关系。器件增益随偏压指数增大, 呈现出较理想的雪崩倍增现象。相应的增益非均匀性随偏压也出现了增加的趋势。结合图 3 所示不同反偏下器件增益灰度图中左上角均表现出更高的增益, 且该增益差异随反偏增加而增大。因此, 增益非均匀性随偏压增加而增大的现象一方面可

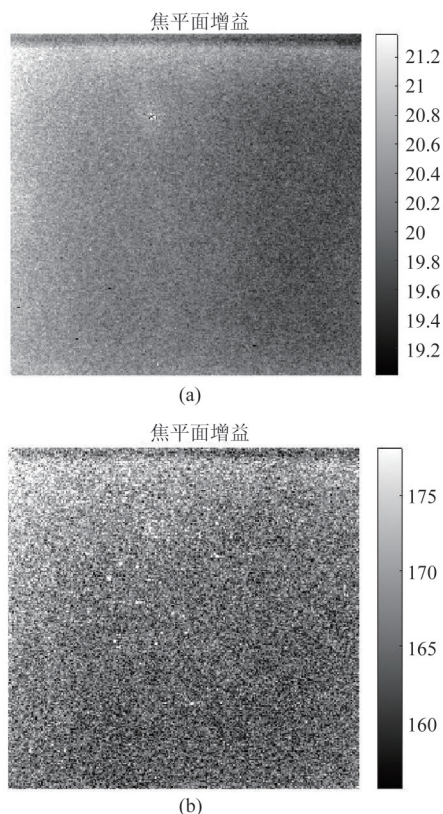
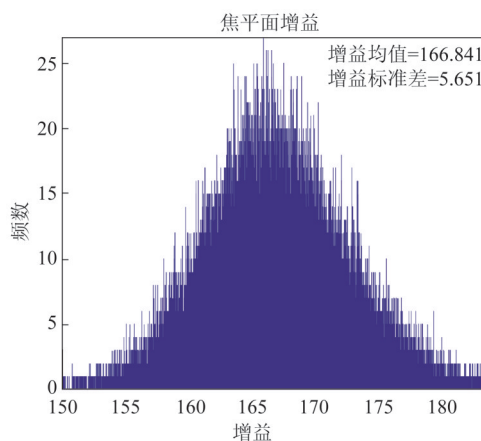
图3 不同反偏下碲镉汞 APD 焦平面增益灰度图 (a) $V_{\text{bias}} = -5.6 \text{ V}$, (b) $V_{\text{bias}} = -8.6 \text{ V}$ Fig. 3 2-dimensionnal map of gain for a HgCdTe APD focal plane under different reverse bias (a) $V_{\text{bias}} = -5.6 \text{ V}$, (b) $V_{\text{bias}} = -8.6 \text{ V}$ 

图4 -8.6 V 反偏下碲镉汞 APD 焦平面增益直方图

Fig. 4 Gain histogram for a HgCdTe APD focal plane under $V_{\text{bias}} = -8.6 \text{ V}$

能是由于材料组分存在一定偏差导致随偏压增加而引起增益偏差增大; 另一方面则可能是雪崩增益放大了原有的光学非均匀性, 使得增益非均匀性呈现增加的趋势。

2.2 碲镉汞 APD 焦平面暗电流

在 0° 视场 (0FOV) 条件下对封装入中测杜瓦的

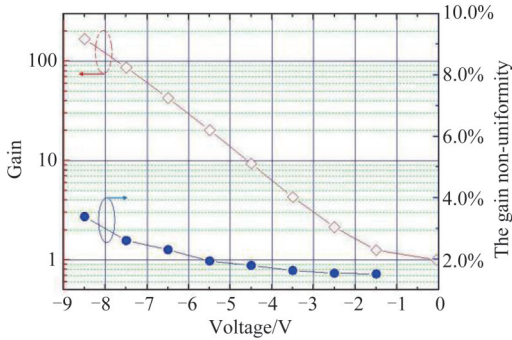


图5 77 K下碲镉汞APD焦平面增益及其非均匀性随偏压的变化关系

Fig. 5 Gain and its non-uniformity of a HgCdTe APD focal plane as a function of applied bias at 77 K

碲镉汞APD焦平面器件在液氮温度下进行了暗电流测试。图6和图7分别为-8.6 V反向偏压下碲镉汞APD焦平面器件暗电流灰度图和对应的直方图。器件平均暗电流为 2.69×10^{-11} A,标准偏差 3.18×10^{-12} A。

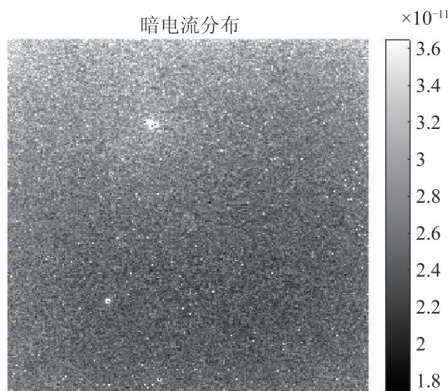


图6 -8.6 V反偏下碲镉汞APD焦平面暗电流灰度图

Fig. 6 2-dimensionnal map of dark current for a HgCdTe APD focal plane under $V_{bias} = -8.6$ V

图8为碲镉汞APD焦平面器件平均暗电流随偏压的变化关系,器件暗电流随偏压呈指数增大。

为了评估雪崩增益对暗电流的影响,将暗电流对增益进行归一化得到增益归一化暗电流(GNDC)。它是等效扩散输入电流的量度,也视为可被探测器放大的最小输入电流的估值。

$$GNDC = \frac{I_{dark}(V)}{M(V)} \quad , \quad (1)$$

其中, $I_{dark}(V)$ 为不同偏压下焦平面器件的平均暗电流。

图9为碲镉汞APD焦平面器件增益归一化暗电流随偏压的变化关系。器件GNDC在 $9.0 \times 10^{-14} \sim$

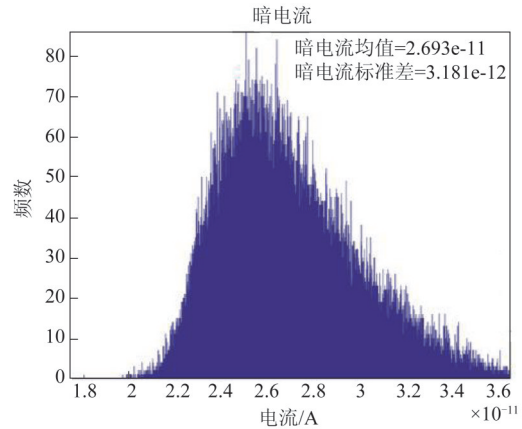


图7 -8.6 V反偏下碲镉汞APD焦平面暗电流直方图

Fig. 7 Dark current histogram for a HgCdTe APD focal plane under $V_{bias} = -8.6$ V

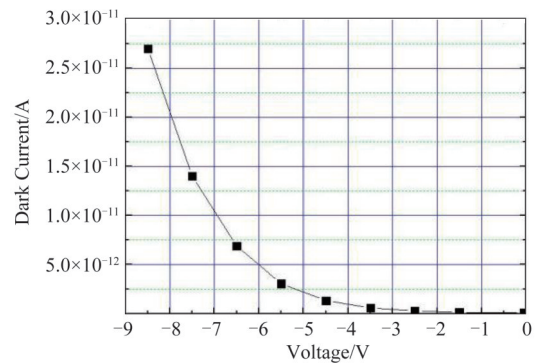


图8 77 K下碲镉汞APD焦平面暗电流随偏压的变化关系

Fig. 8 Dark current of a HgCdTe APD focal plane as a function of applied bias at 77 K

1.6×10^{-13} A 范围内,与法国CEA/LETI的J. Rothman^[11]报道结果相当,如图10所示,表现出了较好的器件性能。

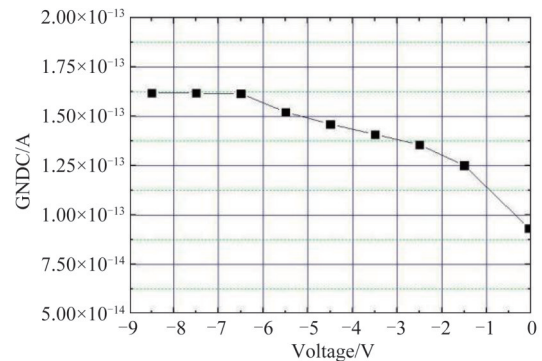


图9 77 K下碲镉汞APD焦平面增益归一化暗电流随偏压的变化关系

Fig. 9 Gain normalized dark current of a HgCdTe APD focal plane as a function of applied bias at 77 K

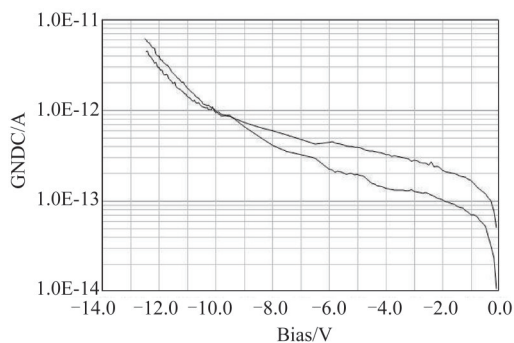


图10 CEA/LETI研制的碲镉汞APD器件增益归一化暗电流随偏压的变化关系

Fig. 10 Variation of gain normalized dark current with bias voltage of HgCdTe APD device developed by CEA/LETI

2.3 碲镉汞APD焦平面过噪因子

APD器件由于载流子在倍增区碰撞电离的随机性,使得增益随时间发生涨落,导致信号被雪崩放大的同时,器件信噪比也将出现一定程度恶化。过噪因子 F 定义为器件输入信/噪比和输出信/噪比的比值,是APD器件过剩噪声的度量。

$$F(V) = \frac{\text{SNR}_{\text{in}}(V)}{\text{SNR}_{\text{out}}(V)}, \quad (2)$$

其中, $\text{SNR}_{\text{in}}(V)$ 为雪崩倍增前器件的信/噪比, $\text{SNR}_{\text{out}}(V)$ 为倍增后器件的信/噪比。

扣除读出电路和测试系统的噪声,在相同测试系统带宽下测试和计算有/无增益状态下的器件信/噪比,即可获得APD器件的过噪因子。图11分别为-5.6 V和-8.6 V反向偏压下碲镉汞APD焦平面器件过噪因子灰度图。图12则为-8.6 V反偏下焦平面器件过噪因子直方图, F 均值为1.56。器件过噪因子因增益随机涨落引起,结合图3和图11器件 F 值及其分布与器件增益及其分布无直接联系。

图13为碲镉汞APD焦平面器件不同偏压下的过噪因子。 F 介于1.0~1.5之间,较好地表现出了碲镉汞APD器件因单载流子倍增机制而具有近无过剩噪声的优异性能。然而,所得到的 F 也存在随偏压增加而缓慢增大的趋势。这可能与现有的器件结构或目前的测试电路板在较高偏压下存在一定波动有关,后续将针对该现象进行进一步研究。

2.4 碲镉汞APD焦平面成像演示

对封装在液氮中测杜瓦的碲镉汞APD焦平面器件前置中波镜头后进行了初步成像演示。在小偏压下调节积分时间至约半阱,经过非均匀性校正和盲元替换,器件成像照片如图14所示。人脸处的手掌印清晰可见,显示出与常规中波红外探测器相

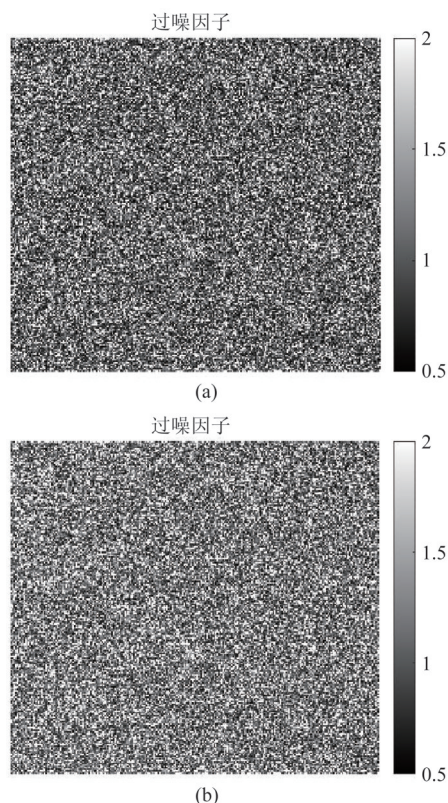


图11 不同反偏下碲镉汞APD焦平面过噪因子灰度图(a) $V_{\text{bias}}=-5.6$ V,(b) $V_{\text{bias}}=-8.6$ V

Fig. 11 2-dimensionnal map of the noise factor for a HgCdTe APD focal plane under different reverse bias (a) $V_{\text{bias}}=-5.6$ V, (b) $V_{\text{bias}}=-8.6$ V

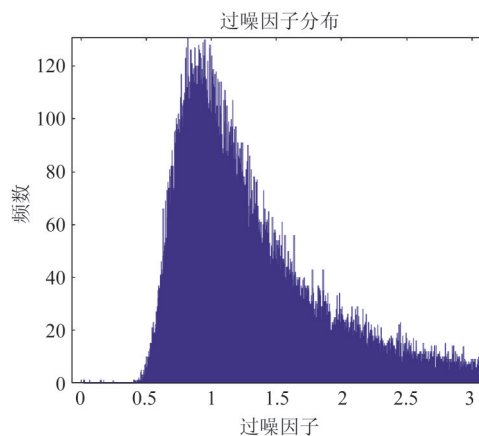


图12 -8.6 V反偏下碲镉汞APD焦平面过噪因子直方图

Fig. 12 The noise factor histogram for a HgCdTe APD focal plane under $V_{\text{bias}}=-8.6$ V

当的成像效果。

通过调节器件的偏压可方便改变器件的增益。在相同的短积分时间20 μs 下,雪崩增益分别为1和19的器件成像照片如图15所示。在相同积分时间下,信号的雪崩增益放大过程显著提升了器件的成

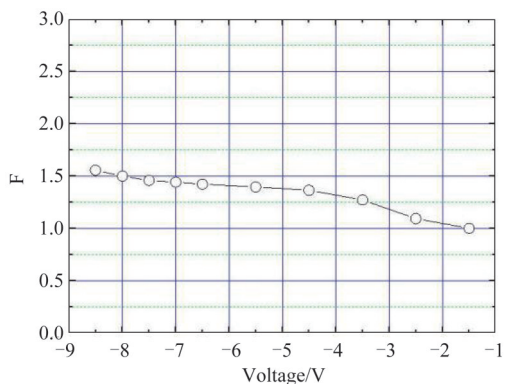


图 13 77 K 下碲镉汞 APD 焦平面过噪因子随偏压变化关系
Fig. 13 The noise factor of HgCdTe APD as a function of applied bias at 77 K

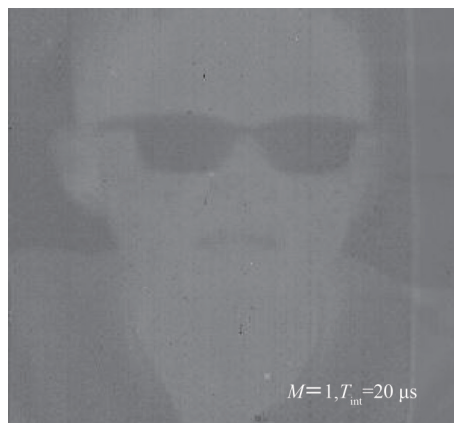


图 14 碲镉汞 APD 焦平面在 -50 mV 反偏下成像演示
Fig. 14 Imaging demonstration of a HgCdTe APD focal plane under $V_{\text{bias}} = -50$ mV

像效果。

3 结论

本文采用 LPE 生长的中波碲镉汞材料,通过 B 离子注入 n-on-p 平面结工艺制备了碲镉汞 APD 探测器芯片,并与专用的 APD 读出电路倒装互连实现了碲镉汞 APD 焦平面芯片的制备。将 APD 芯片封装入中测杜瓦,在液氮温度下对其增益、暗电流以及过噪因子等性能参数进行了测试分析,结果表明,所制备的碲镉汞 APD 焦平面芯片在 -8.5 V 反偏下平均增益达到 166.8,增益非均匀性为 3.33%;在 0~-8.5 V 反向偏置下,APD 器件增益归一化暗电流为 $9.0 \times 10^{-14} \sim 1.6 \times 10^{-13}$ A,过噪因子 F 介于 1.0~1.5 之间。此外,对碲镉汞 APD 焦平面进行了成像演示,在低偏压下成像效果与常规器件类似,均具有较佳的成像效果;在相同短积分时间下,信号的雪



(a)



(b)

图 15 20 μs 积分时间下不增益状态碲镉汞 APD 焦平面成像演示 (a) $M=1, T_{\text{int}}=20 \mu\text{s}$, (b) $M=19, T_{\text{int}}=20 \mu\text{s}$

Fig. 15 Imaging demonstration of a HgCdTe APD focal plane under different gain with $T_{\text{int}}=20 \mu\text{s}$ (a) $M=1, T_{\text{int}}=20 \mu\text{s}$, (b) $M=19, T_{\text{int}}=20 \mu\text{s}$

崩增益放大过程显著提升了器件的成像效果。

References

- [1] Capper P, Garland J. Mercury cadmium telluride: growth, properties and applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011, 493-512.
- [2] Ian Baker, Stuart Duncan, Jeremy Copley. A low noise, laser-gated imaging system for long range target identification [J] // *Proc. of SPIE*, 2004, **5406**: 133-144.
- [3] Baker I, Thorne P, Henderson J, et al. Advanced multifunctional detectors for laser-gated imaging applications [C] // *Proc. of SPIE*, 2006, **6206**: 620608-1- 620608-10.
- [4] Baker I, Owton D, Trundle K, et al. Advanced infrared detectors for multimode active and passive imaging applications [J] // *Proc. of SPIE*, 2008, **6940**: 69402L-1- 69402L-11.
- [5] Beck J, Woodall M, Scritchfield R, et al. Gated IR Imaging with 128x128 HgCdTe Electron Avalanche Photodiode FPA [J] // *Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: 654217-1- 654217-18.
- [6] de Borniol E, Guellec F, Rothman J, et al. HgCdTe-based

- APD focal plane array for 2D and 3D active imaging: first results on a 320×256 with 30 μm pitch demonstrator [J] // *Proc. of SPIE*, 2010, 7660:76603D-1-76603D-9.
- [7] de Borniol E, Rothman J, Guellec F, *et al.* Active three-dimensional and thermal imaging with a 30-μm pitch 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(6):061305-1-061305-6.
- [8] Kerlain A, Bonnouvier G, Rubaldo L, *et al.* Performance of mid-wave infrared HgCdTe e-avalanche photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10):2943-2948.
- [9] LI Hao, LIN Chun, ZHOU Song-Min, *et al.* HgCdTe avalanche photodiode FPA [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (李浩, 林春, 周松敏, 等。碲镉汞雪崩焦平面器件。红外与毫米波学报), 2019, **38**(5):587-590.
- [10] LI Xiong-Jun, HAN Fu-Zhong, LI Li-Hua, *et al.* Gain characteristics of MW HgCdTe avalanche photodiodes [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (李雄军, 韩福忠, 李立华, 等。中波碲镉汞雪崩光电二极管(APD)增益特性。红外与毫米波学报), 2019, **38**(2):175-181.
- [11] Rothman J, Perrais G, Gravrand O, *et al.* High performance characteristics in pin MW HgCdTe e-APDs [J] // *Proc. of SPIE*, 2007, **6542**:654219-1-654219-10.