

文章编号: 1672-8785(2020)03-0009-07

12 μm 像元间距 1280 \times 1024 碲镉汞 中波红外焦平面探测器的制备及性能研究

刘伟华 刘 帆 吴正虎 姚柏文 汪良衡
张冰洁 刘道进 周文洪

(武汉高德红外股份有限公司, 湖北武汉 430205)

摘 要: 武汉高德红外股份有限公司成功研制了像元尺寸为 12 μm \times 12 μm 的 1280 \times 1024 大面阵碲镉汞中波红外焦平面探测器。在优化提升材料性能的基础上, 突破了小像元钝化开孔、高密度小尺寸钢柱制备以及高精度大面阵倒焊等关键技术, 成功制备出了 1280 \times 1024@12 μm 碲镉汞中波红外焦平面芯片及组件。其盲元率小于 0.5%, 响应率非均匀性小于 5%。F2 探测器的平均噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)为 15 mK, 平均峰值探测率为 $6\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。F4 探测器的平均 NETD 为 18.5 mK, 平均峰值探测率为 $1.2\times 10^{12} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。另外还提出了一种不稳定像元测试方法, 即通过分析两点校正后的成像数据, 并利用模块中值和空域噪声的比较, 完成对红外图像中不稳定像元的检测和校正。结果表明, 校正后的红外成像画质良好, 在 120 K 时器件性能无明显降低。

关键词: 碲镉汞; 小像元; 百万像素; 盲元; 红外探测器

中图分类号: TN125 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.03.002

Study on Preparation and Performance of 1280 \times 1024@12 μm HgCdTe MWIR Focal Plane Detectors

LIU Wei-hua, LIU Fan, WU Zheng-hu, YAO Bai-wen, WANG Liang-heng,

ZHANG Bing-jie, LIU Dao-jin, ZHOU Wen-hong

(Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: Wuhan Guide Infrared Co., Ltd. has successfully developed a 1280 \times 1024 large-format HgCdTe mid-wave infrared focal plane detector with a pixel size of 12 μm \times 12 μm . On the basis of optimizing and improving the performance of materials, the key technologies such as passivation of small pixel, preparation of high-density and small-size indium column, and high-precision and large area array reverse welding have been broken through. The 1280 \times 1024@12 μm mid-wave HgCdTe infrared focal plane chips and components were successfully fabricated. The default pixel rate is less than 0.5%, and the non-uniformity of response rate is less than 5%. The average noise equivalent temperature difference (NETD) of F2 detector is 15 mK, and the

收稿日期: 2020-03-04

作者简介: 刘伟华(1983-), 男, 河南安阳人, 硕士, 主要从事制冷型红外探测器研发工作。

E-mail: hua294@163.com

average peak detection rate is $6 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. The average NETD of F4 detector is 18.5 mK, and the average peak detection rate is $1.2 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. In addition, a method for testing unstable pixels is proposed. By analyzing the image data after two-point correction and comparing the median value of the module with the spatial noise, the detection and correction of unstable pixels in infrared image are completed. After correction, the infrared imaging quality is good, and the performance of the device does not decrease obviously at 120 K.

Key words: HgCdTe; small pixel; mega pixels; bad pixel; infrared detector

0 引言

红外成像与探测系统具有环境适应性强、隐蔽性好、抗干扰能力强以及能在一定距离内识别伪装目标等优点, 目前已被广泛应用于各种高精尖武器装备中, 极大提升了军队的战斗力^[1-4]。随着红外成像武器装备的发展, 超长探测识别距离和超高分辨率探测已成为未来红外技术在军事领域中的发展趋势。其中, 红外焦平面探测器是红外技术的核心部件。国内外相关研究机构一直致力于发展体积小、重量轻、功耗低且具有超视距探测能力的小尺寸、大规模红外探测器^[5-9]。制冷凝视型红外焦平面技术一直向更大阵列规模、更小像元尺寸的方向发展。目前, 国外主要制冷红外探测器厂商均已推出了百万像素级(1k×1k及以上)大面阵红外焦平面探测器。其红外敏感材料大多选用碲镉汞(HgCdTe), 像元尺寸从15 μm减小到12 μm, 再到10 μm, 甚至8 μm^[10]。

我国对红外焦平面探测器的研究起步较晚, 基础较薄弱, 离国际先进水平还有较大的差距。为了推动我国大面阵红外焦平面探测器技术的发展, 突破高性能核心元器件产业化能力, 并缩短与国际高端红外技术领域的差距, 武汉高德红外股份有限公司(以下简称“高德红外”)在前期成功研发及量产320×256@30 μm、640×512@15 μm等碲镉汞中波红外探测器的基础上, 组建了1280×1024@12 μm中波红外焦平面组件研发团队, 并开展了相应关键技术的攻关工作。

1 百万像素级制冷中波红外焦平面组件的研制

在调研和对比了国外主要百万像素级制冷红外焦平面探测器产品及其工艺路线的基础上, 结合高德红外的现有技术和工艺基础^[11], 重点聚焦大面阵(百万像素级)与小像元的相关关键技术。所研制组件的主要技术指标见表1。

表1 1280×1024@12 μm碲镉汞红外焦平面探测器组件的主要性能指标

项目	主要技术要求
阵列规模	1280×1024
像元中心距	12 μm
光谱响应范围	3.7 μm~4.8 μm
盲元率	≤0.5%
响应率非均匀性	≤5%
平均噪声等效温差	25 mK (F/2、F/4)
F数	F/2、F/4
主频	20 MHz
功耗	≤15 W@20 °C±2 °C (稳定工作时)
	≤20 W@20 °C±2 °C (制冷时)
制冷启动时间	≤7 min (20 °C)
	≤10 min (71 °C)
组件重量	≤600 g

首先, 在晶格匹配的高质量碲锌镉衬底上采用富碲液相外延(Liquid Phase Epitaxy, LPE)技术生长中波碲镉汞薄膜材料, 其中Cd的组分范围为0.295~0.315。在碲镉汞薄膜经弱p型退火热处理后, 测得的液氮温度下的空穴浓度为 $3 \times 10^{15} \sim 9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、空穴迁移率为 $450 \sim 520 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其次, 通过硼离子注入形成pn结, 优化了表面钝化工艺(可降低暗电流密度), 突破了高密度小尺寸钢柱制备技术。基于高精度倒焊工艺, 获

得了面阵规格为 $1280 \times 1024 @ 12 \mu\text{m}$ 的碲镉汞中波红外焦平面芯片。

芯片测试采用红外焦平面测试系统。将初测合格的芯片真空封装到微型金属杜瓦内, 在高温排气后将其与高德红外自研的 RS058F 旋转式斯特林制冷机耦合, 最终制备成红外探测器组件。图 1 为 $1280 \times 1024 @ 12 \mu\text{m}$ 红外探测器组件的实物图。



图 1 $1280 \times 1024 @ 12 \mu\text{m}$ 探测器组件的实物图

2 结果与讨论

2.1 高质量碲镉汞外延生长

高德红外采用垂直液相外延法生长碲镉汞薄膜材料。与水平液相外延法相比, 用该方法生长的薄膜表面没有宏观的生长波纹。随着红外探测器面阵规模的增大和像元尺寸的减小, 对外延材料表面平整度及缺陷的要求更为严苛。一方面, 利用衬底平整度、外延回熔控制等技术优化了外延平整度; 另一方面, 在衬底

加工工艺中成功导入衬底热处理技术, 目前已将衬底第二相(沉淀相)的最大尺寸控制在 $10 \mu\text{m}$ 以内。通过有效控制衬底沉淀相的尺寸及密度, 显著提高了碲镉汞外延片的表面质量。图 2 所示为 $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 大尺寸碲镉汞外延片, 其组分均匀性可达 0.65% (9 点测试均方差), 在 $21 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ 有效区域内的表面平整度 R_t 小于 $1.5 \mu\text{m}$, 表面缺陷尺寸密度小于等于 20 cm^{-2} , 表面最大缺陷尺寸小于等于 $60 \mu\text{m}$ 。

2.2 高密度小尺寸钢柱阵列制备

高密度、小尺寸钢柱阵列制备技术是小像元芯片的关键技术与工艺瓶颈之一。具体工艺步骤包括光刻、镀膜和回流。在读出电路晶圆上采用自动对准曝光技术制备钢孔阵列, 其尺寸精度小于 $\pm 0.3 \mu\text{m}$, 图形均匀性小于 $\pm 5\%$ 。在原有镀膜工艺的基础上, 采用真空镀膜设备将真空度由 $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 提升至 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 获得了膜厚均匀性高、钢柱形貌均匀性好的高质量钢膜。在真空回流炉中, 对加工的面阵钢柱进行回流。通过优化打底层金属的形貌和回流参数, 最终制备出了高度一致、直径均匀性良好的钢球阵列(见图 3)。

2.3 芯片性能测试

图 4 所示为经优化离子注入工艺处理后光敏元大小为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的碲镉汞光电二极管器件在 77 K 温度下的 I-V 曲线和 R-V 曲线。可以看出, 该器件的 I-V 性能正常, 均匀性良好, 暗电流密度为 $4.84 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 相

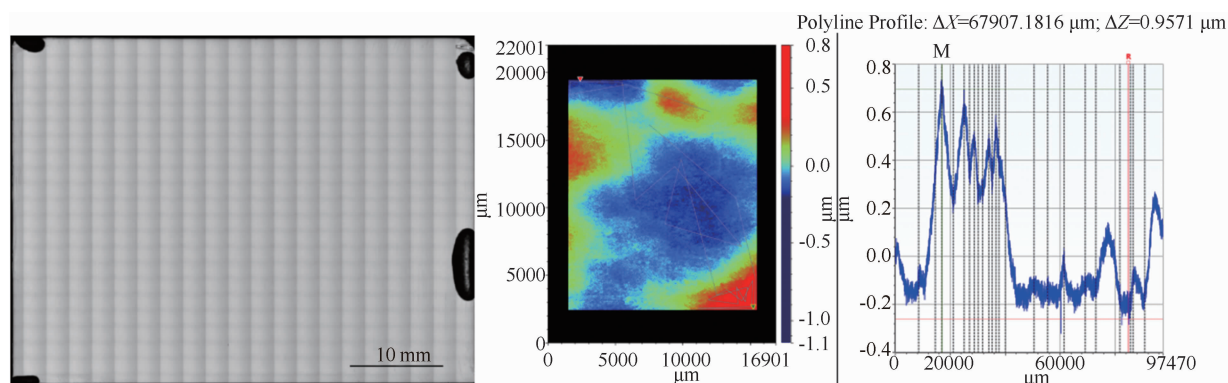


图 2 $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 碲镉汞外延片及其有效区域的平整度测试

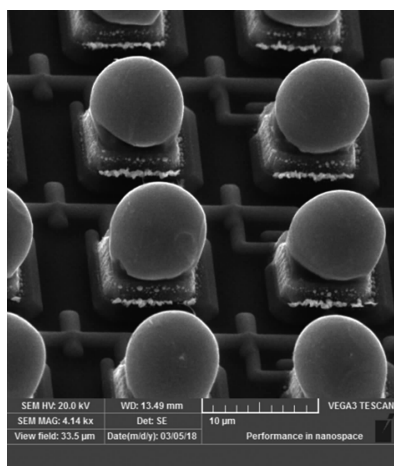


图3 高密度、小尺寸钢柱阵列

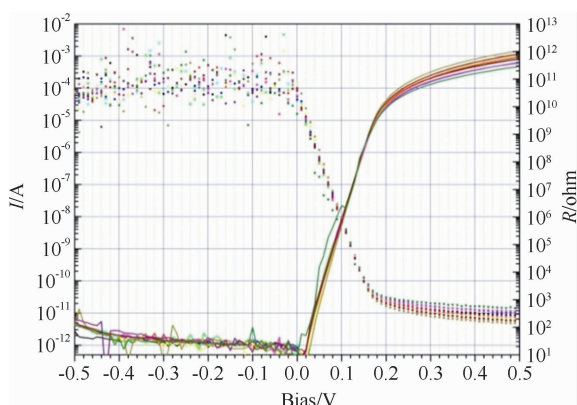


图4 HgCdTe 光电二极管的 I-V 曲线与 R-V 曲线。器件动态微分阻抗约为 $1.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。经多轮重复验证,在相同工艺条件下,器件 R_0A 离散较小,所得 R_0A 的相对最大值为 $9.8 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。上述结果也间接表明,碲镉汞外延薄膜材料具有较小的体缺陷密度,同时工艺重复性可控,器件的性能一致性良好。

2.4 组件性能测试

将初测合格的 $1280 \times 1024 @ 12 \mu\text{m}$ 中波红

外碲镉汞芯片封装,分别制备成 F 数为 2 和 4 的中波红外探测器组件,然后对其进行测试。测试条件为 50% 势阱填充,背景环境温度为 293 K。

我们将响应电压 $V_{T1}(i,j)$ 超过平均响应电压 $\bar{V}_{T1} \pm 30\%$ 的像元、响应率 $R(i,j)$ 超过平均响应率 $\bar{R} \pm 30\%$ 的像元、 $NETD(i,j) > 50 \text{ mK}$ (F2) 或者 $NETD(i,j) > 75 \text{ mK}$ (F4) 的像元判定为盲元。

$$R(i,j) = \frac{V_S}{P \cdot (\cos\theta)^4} \quad (1)$$

$$NETD(i,j) = \frac{T_2 - T_1}{V_{S(i,j)} / V_{N(i,j)}} \quad (2)$$

其中,

$$P = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \cdot A_D}{4 \times (L/D)^2 + n} \quad (3)$$

$$V_S(i,j) = V_{T2}(i,j) - V_{T1}(i,j) \quad (4)$$

$$V_N(i,j) = \sqrt{\frac{1}{F-1} \sum_{f=1}^F \{ \bar{V}_{T1}[(i,j), T_0] - V_{T1}[(i,j), T_0, f] \}^2} \quad (5)$$

测试结果见表 2。可以看出, F2 组件的平均 NETD 约为 15 mK, F4 组件的平均 NETD 约为 18.5 mK; F2 探测器的平均峰值探测率为 $6 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, F4 探测器的平均峰值探测率为 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; 室温下的制冷启动时间均小于 6 min。该测试结果符合甚至远优于研制技术要求。图 5 所示为其中一支 F4 组件(编号 194810)的典型测试结果。表 3 列出了该组件的团簇

表 2 探测器组件的测试结果

组件编号	F 数	响应/V	噪声/mV	NETD/mK	盲元率/%	峰值探测率/ $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	制冷时间 (20°C)/s
194559	2	0.69	0.64	14.0	0.01	6.8×10^{11}	301
195023	2	0.67	0.65	14.5	0.02	6.51×10^{11}	317
195024	2	0.58	0.60	15.6	0.01	6.07×10^{11}	303
194810	4	0.54	0.69	19.2	0.01	1.17×10^{12}	315
194811	4	0.55	0.67	18.3	0.04	1.23×10^{12}	325
194922	4	0.57	0.68	18.1	0.01	1.25×10^{12}	345

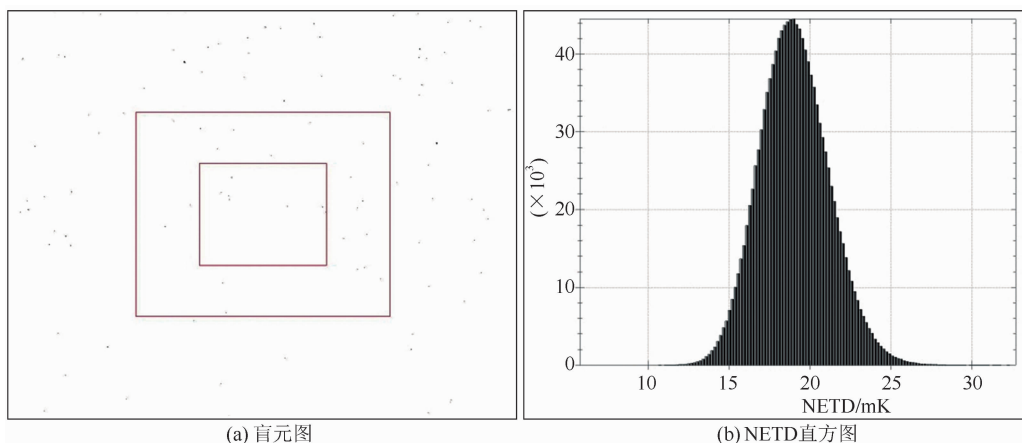


图 5 组件测试结果(编号 194810)

表 3 组件团簇分布(编号 194810)

团簇大小	640×512	
	区域内	区域外
7~12	0	3
13~35	0	0
36~45	0	0
>46	0	0

分布数据。可以看出, 盲元分布均匀, 甚至没有大于 13 点以上的团簇, 像素 NETD 集中分布在 15~20 mK。表 2 所示的测试结果基本达到了与法国 Sofradir、英国 Selex、美国 DRS 等公司类似货架产品相同或接近的技术水平, 初步表明高德红外已在大面阵小像元芯片及组件制备的关键技术上获得了重大突破。

对编号为 181530 的组件进行不同焦平面温度下的性能测试, 得到了图 6 所示的结果(测试条件及盲元标准同上)。可以看出, 当焦平面温度从 86 K 逐步提高到 120 K 时, 该组

件的平均 NETD 略有增加, 有效像元率缓慢下降, 整体上仍符合指标要求; 同时成像质量无明显变化。这初步表明该探测器可在不高于 120 K 的焦平面温度下稳定工作。

2.5 不稳定像元的检测

红外探测器经非均匀性校正后进行成像时, 除上述固定盲元外, 因其连续工作导致的温漂、环境温度的变化或者由开关机造成的红外焦平面应力变化, 都会在红外图像中逐渐体现, 且呈现为少量的明暗斑点(称为不稳定像元)。

非均匀性校正的公式可表示为

$$b = \frac{V_{T2}Y_{T1} - V_{T1}Y_{T2}}{V_{T2} - V_{T1}} \quad (6)$$

$$K = \frac{Y_{T2} - Y_{T1}}{V_{T2} - V_{T1}} \quad (7)$$

$$Y = KV + b \quad (8)$$

本文提出了一种不稳定像元测试方法, 即通过对两点校正后的成像数据进行分析, 并利

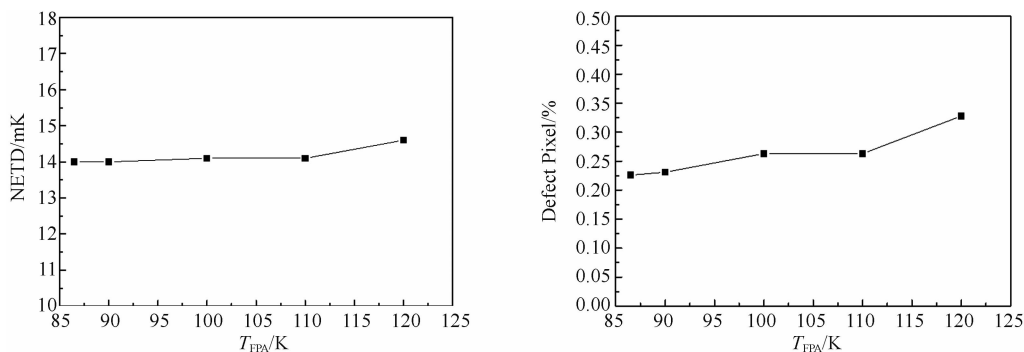


图 6 不同焦平面温度下的组件测试结果(编号 181530)

用模块中值和空域噪声的比较,完成对红外图像中不稳定像元的检测和校正。计算方法如下:首先计算 5×5 模块的中值 Y_{med} ,然后计算待测点 Y 与中值的差值;若差值大于3倍空域噪声 Y_N ,则判定该点为盲元。通过逐点判断,形成整幅图像的不稳定像元列表。用公式可表示为

$$Y_{med} = \text{median}(Y, 5\times 5) \quad (9)$$

$$Y_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (Y(i,j) - \bar{Y})^2}{5\times 5}} \quad (10)$$

$$|Y - Y_{med}| > 3Y_N \quad (11)$$

组件(编号 194810)的盲元共占 208 个像素。采用上述方法计算后,不稳定像元为 1629 个。图 7 所示为其盲元图与不稳定像元图的对比。在经盲元校正后的红外图像中,随着连续工作或者环境温度的变化,仍会出现少量明暗闪烁的斑点。而通过增加对不稳定像元的检测及校正,则能有效避免此类盲元的漏检错检,同时还可提高红外图像的质量。

2.6 成像效果演示

采用自研的 $1280\times 1024@12\ \mu\text{m}$ 红外探测器机芯(见图 8),分别装配焦距为 240 mm 和 40 mm 的镜头,对室外远景和室内近景进行了成像效果演示。图 9 为经上述盲元及不稳定像元校正后的图像。可以看出,图像清晰细腻。

$1280\times 1024@12\ \mu\text{m}$ 探测器的像素值达到 130 万,图像分辨率高,对目标细节的分辨能力更强,探测距离也更远。与常规 $640\times 512@$

$15\ \mu\text{m}$ 中波红外探测器相比,在同样的光学系统条件下, $1280\times 1024@12\ \mu\text{m}$ 探测器的空间视场角增大了 1.6 倍,探测识别距离提高了 20%以上。

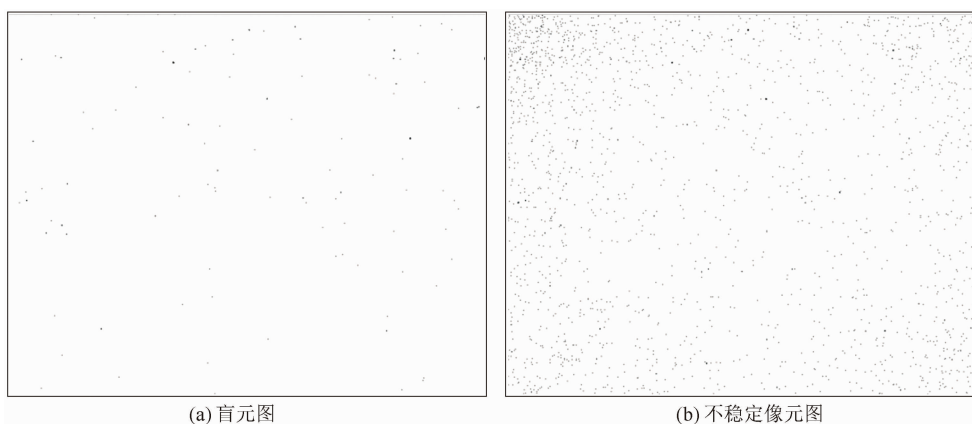
目前,国内百万级像素的中波红外探测器仍然以 $15\ \mu\text{m}$ 像元尺寸为主。与同等面阵规模的 1280×1024 探测器相比, $12\ \mu\text{m}$ 比 $15\ \mu\text{m}$ 减小了 20%。因此在相同视场角条件下,光学系统可以大幅缩小;探测器的重量也下降较多,实际组件的重量仅为 580 g 左右;同时制冷时间、制冷功耗和可靠性等技术指标更优。



图 8 $1280\times 1024@12\ \mu\text{m}$ 探测器机芯

3 结论

高德红外在碲镉汞红外敏感材料上采用 n-on-p 结构,并通过攻关大面阵、小像元相关关键技术,成功制备出了像元尺寸为 $12\ \mu\text{m}\times 12\ \mu\text{m}$ 的 1280×1024 元中波红外焦平面探测器。对小批量试制的不同 F 数组件的性能进行了测试。结果表明,其性能指标完全满足研制



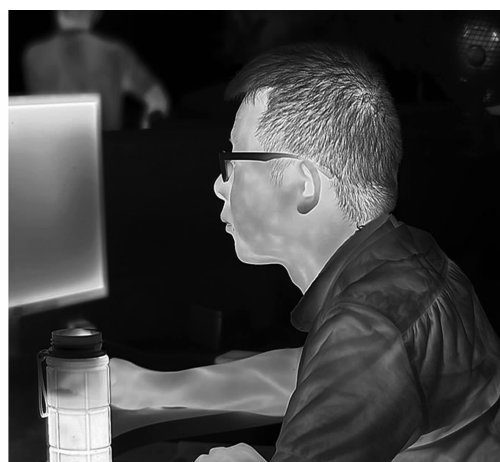
(a) 盲元图

(b) 不稳定像元图

图 7 盲元与不稳定像元的对比图(编号 194810)



(a) 室外远景



(b) 室内近景

图 9 1280×1024@12 μm 探测器机芯的成像图

技术指标的要求。同时变温测试结果表明,当焦平面温度从 86 K 提高到 120 K 后,组件性能无明显下降。经盲元及不稳定像元检测与校正后,成像效果清晰细腻。目前高德红外已具备小批量生产能力。通过该产品的研制,我们实现了在大面阵、小像元红外焦平面技术上的重大突破,建立并形成了完整的百万像素级红外焦平面组件研发与制造平台,为下一步大批量稳定生产奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] Rogalski A. Infrared Detectors: Status and Trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27** (2): 59–210.
- [2] Martyniuk P, Antoszewski J, Martyniuk M, et al. New Concepts in Infrared Photodetector Designs [J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, **1** (4): 041102.
- [3] 蔡毅, 胡旭. 红外成像寻的用红外探测器现状和发展趋势 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35** (1): 7–11.
- [4] 李彦波, 刘超, 张杨, 等. 碲化物超晶格红外探测器的研究进展 [J]. *固体电子学研究与进展*, 2010, **30**(1): 11–17.
- [5] Bensussan P, Tribolet P, Gérard D, et al. Fifty Years of Successful MCT Research and Production in France [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 72982N.
- [6] Horn S, Norton P, Cincotta T, et al. Challenges for Third-Generation Cooled Imagers [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 44–51.
- [7] Reddy M, Peterson J M, Vang T, et al. Molecular Beam Epitaxy Growth of HgCdTe on Large-Area Si and CdZnTe Substrates [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1706–1716.
- [8] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-Generation Infrared Photodetector Arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105** (9): 091101.
- [9] Nicolas P L, Laurent R, Alexandre K, et al. 10 μm Pitch Design of HgCdTe Diode Array in Sofradir [C]. *SPIE*, 2015, **9370**: 937022.
- [10] Liu M, Wang C, Zhou L Q. Development of Small Pixel HgCdTe Infrared Detectors [J]. *Chinese Physics B*, 2019, **28**(3): 17–25.
- [11] 杨朝臣, 张冰洁, 杜宇, 等. 碲镉汞高温中波红外探测器的制备研究 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(2): 78–82.