

10 μm 像元间距 1024 \times 1024 中波红外 探测器研制进展

周立庆, 宁 提, 张 敏, 陈彦冠, 谢 珩, 付志凯
(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要:小像元红外探测器已成为红外探测器技术发展的重要方向,像元尺寸减小可提高红外成像系统的探测和识别距离,降低红外探测器成本,减小系统尺寸、质量和功耗等。本文介绍了国内外小像元红外探测器研制进展,重点介绍了中国电科十一所研制的 10 μm 像元间距 1024 \times 1024 规模小像元碲镉汞红外焦平面探测器组件。组件为 n-on-p 平面结构后截止波长 5 μm 、有效像元率达到 99 %、量子效率达到 60 %。

关键词:小像元;10 μm 像元间距;碲镉汞

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.04.001

Developments of 10 μm pixel pitch 1024 \times 1024 MW infrared detectors

ZHOU Li-qing, NING Ti, ZHANG Min, CHEN Yan-guan, XIE Heng, FU Zhi-kai
(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: Small pixel infrared detector has become an important direction of infrared detector technology development. The reduction of pixel size can improve the detection and recognition distance of infrared imaging system, reduce the cost of infrared detector, and reduce the size, weight and power consumption of the system. In this paper, the development progress of small pixel infrared detectors at home and abroad is introduced, focusing on 10 μm pixel pitch 1024 \times 1024 infrared focal plane detector developed by the 11th Research Institute of CETC. The 10 μm pitch FPA is n-on-p planar structure with a 5 μm cutoff wavelength, effective pixel rate of 99 % and quantum efficiency of 60 %.

Key words: small pixel; 10 μm pixel pitch; HgCdTe

1 引 言

红外探测器组件促进了红外技术应用的发展,促使红外武器装备性能大幅提高,广泛应用于侦察、监视、精确制导、搜索跟踪和光电对抗等军事系统,成为先进光电武器系统的重要组成部分,同时在驾驶辅助、消防、安保、安全生产等民用领域也有广泛应用前景。

在 19 世纪,红外探测器都是利用红外辐射的热效应对其进行探测,可统称为“热探测器”或者是“热敏型红外探测器”,进入 20 世纪后,热探测器有

了新发展。四十年代起,测温辐射计中的金属丝被电阻-温度系数更高的半导体薄片代替,形成热敏电阻型红外探测器。1947 年高莱发明了气动式红外探测器。五十年代,由温差电动势更大的半导体获得了灵敏度更高的温差电动型红外探测器。六十年代出现了利用铁电体的自发极化与温度相关的“热释电型红外探测器”。在五十年代末和六十年代初出现了 III-V 族 ($\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$), IV-VI 族 ($\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$), II-VI 族 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 的红外光电探测器,该类探测器是依赖材料内部电子直接吸收红外

辐射,不需要经过加热物体的中间过程,因而具有快速反应的特点,且其结构一般比较牢靠,因而一经发明就得到了应用及快速的发展^[1],而其中的碲镉汞

材料由于其带隙可调,且直接带间跃迁从而具有高响应的优点,使其成为红外探测器的首选材料,图1展示了红外光电探测器和系统的发展历程^[2]。

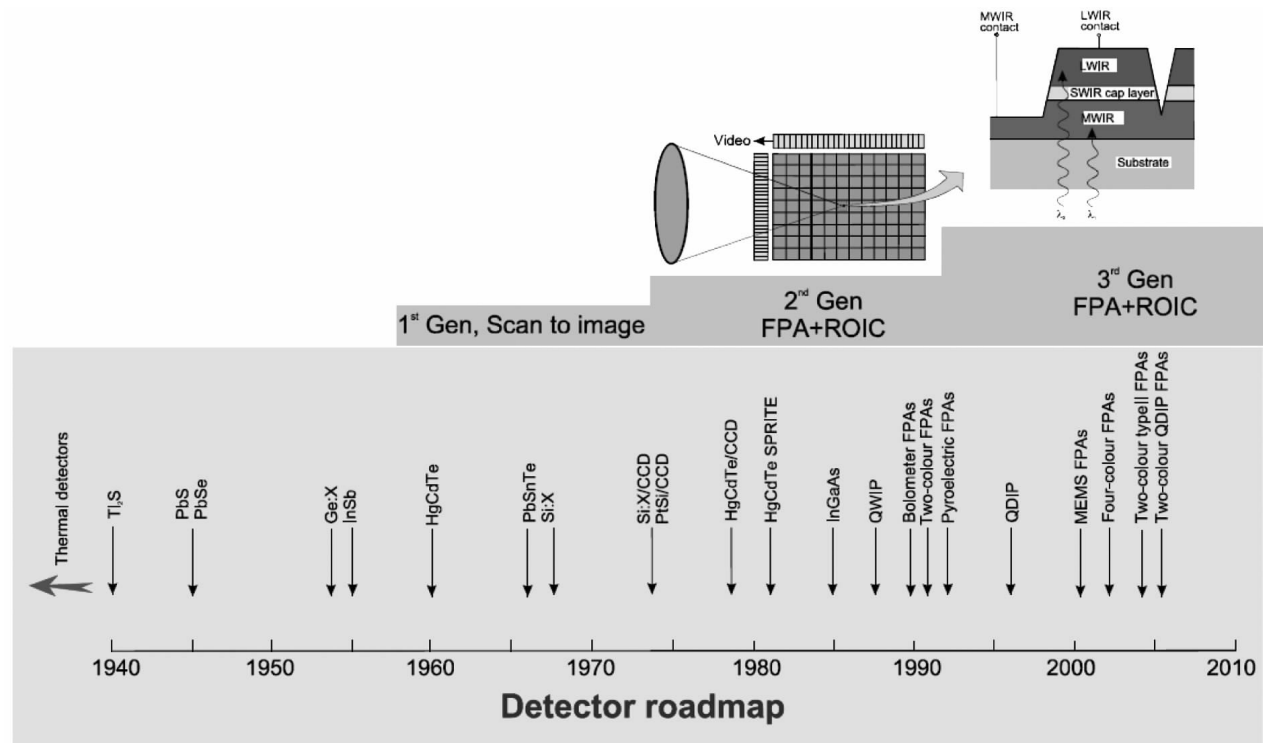


图1 红外光电探测器和系统的发展历程

Fig. 1 History of the development of infrared detectors and systems

碲镉汞红外焦平面探测器需封装于金属杜瓦内,使用制冷机将探测器芯片降温至工作温度,以降低暗电流、获得优异的光电探测性能,芯片尺寸决定了金属杜瓦及制冷机尺寸,芯片尺寸越大,系统尺寸、质量、功耗、成本等增加,一种有效的解决途径是减小像元尺寸。小像元尺寸主要是受两方面驱动,一方面空间分辨率提升,提高图像质量以及系统识别能力,图像质量取决于红外探测器空间分辨率,主要受像元尺寸以及数量影响,根据约翰逊判据(Johnson Criterion),对于目标探测,如果要保证50%的确信度,目标需要充满至少1个光敏元,识别需要至少充满4个光敏元,鉴定需要至少充满6.5个光敏元,如果要保证确信度达到95%,则对于目标探测,目标需要充满至少2个光敏元,识别需要至少充满8个光敏元,鉴定需要至少充满16个光敏元^[3],因此像元尺寸变小、阵列规模变大有助于提高图像质量;另一方面由于系统对SWaP(Size, Weight, Power)需求逐步提高,因此减小制冷机尺寸及功耗,有助于紧凑型红外探

测系统研发。

2 国内外小像元红外探测器研制进展

世界主要的红外探测器厂商均在加大小像元红外探测器研究,已形成多款小像元产品。

2.1 Sofradir公司10 μm像元间距FPA

2015年,法国Sofradir公司推出基于N on P HgCdTe同质结的10 μm像元间距1024 × 768(XGA)及1280 × 720(HD)阵列产品,命名为Daphnis。产品具体信息如图2所示。图3为Sofradir公司产品像元间距的发展史^[4]。

Daphnis组件采用液相外延碲镉汞中波材料、N-on-P型平面注入成结技术制备而成。在汞空位掺杂的P型材料上采用B离子注入技术,形成N + - P型二极管阵列。主要技术基础为碲镉汞液相外延材料生长技术、基于离子注入的平面探测器制备技术,平面技术的主要优点是工艺简单,易形成高质量的表面钝化膜层,且可精确控制PN结结深。在10 μm像元间距的情况下,注入尺寸以及互连可靠性变得更为关键。

Format	1280 × 720
Pixel pitch	10 μm × 10 μm
Detector spectral response	3.4 μm–4.9 μm
FPA operating temperature	110 K typical
ROIC architecture	Digital outputs; direct injection input circuit
Charge handling capacity	0.7 Me ⁻ , 2.2 Me ⁻ , 4.4 Me ⁻
Frame rate	Up to 100 Hz full frame rate
Mean NETD	20 mK (293 K, 50% well-fill, 100 Hz)
Array operability	99.8%
Non-uniformity	<2.5% RMS (σ/mean, 293 K uncorrected performance)
FOV	f/2; f/4
Cool-down time	5 min
Cooler dimensions (mm)	Ø 30.5 × L 82
IDCA height (optical axis, mm)	H < 123.5
Weight	<0.45 kg
Operating temperature	-40 °C / +71 °C
Will depend on mission profile	10000 h



Detector module in its Thales cryogenic RM2 configuration

图2 Daphnis 探测器杜瓦制冷组件(Sofradir 官网)

Fig. 2 Daphnis IRFPA detector Dewar

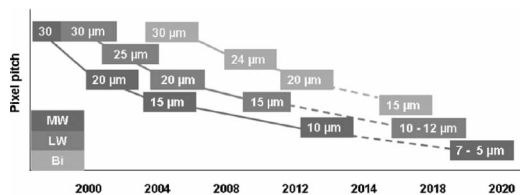


图3 Sofradir 公司像元间距发展史

Fig. 3 Development history of pixel size in Sofradir

2.2 Selex 公司的 8 μm 像元间距 HgCdTe FPA

英国 Selex ES 公司报道了像元间距为 8 μm 的中波 1280 × 1024 红外焦平面探测器组件如图 4 所示,该组件基于 MOVPE 工艺生长碲镉汞材料、台面工艺制备,通过衬底去除技术降低阵列像元间的串扰,应用于 Superhawk 系统,主要用于直升机导航、持续监控以及其他需要提高探测器识别距离的应用。

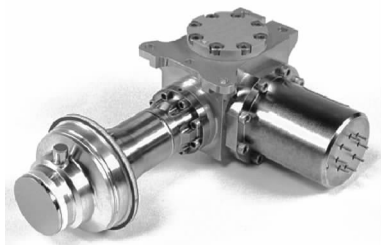


图4 SuperHawk™ IDCA 组件^[5]

Fig. 4 SuperHawk™ IDCA

图 5 为 Selex 公司 MWIR HgCdTe 阵列像元间距发展史。

2.3 DRS 公司 5 μm 像元间距 HgCdTe FPA

美国 DRS 公司的 HDVIP™ 像元结构将像元间距降到最小 5 μm。采用贯穿 HgCdTe 膜的通孔,向

下延伸至读出电路 (ROIC) 形成像元结构,将 p 型 HgCdTe 周围进行类型转变,在通道周围形成柱状 n 型区域,得到 N + /N/P 二极管,如图 6 所示。DARPA 联合 DRS 公司在“Lambda Scale”项目期间研发 5 μm 像元间距碲镉汞红外相机,采用 1280 × 720 元 FPA,如图 7 所示。

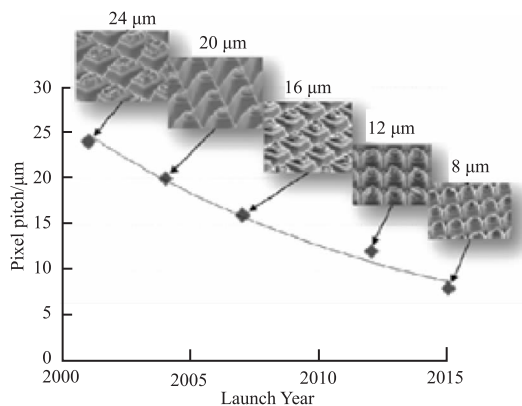


图5 Selex 公司 MWIR HgCdTe 像元间距发展史^[5]

Fig. 5 Development history of MWIR HgCdTe pixel pitch in Selex

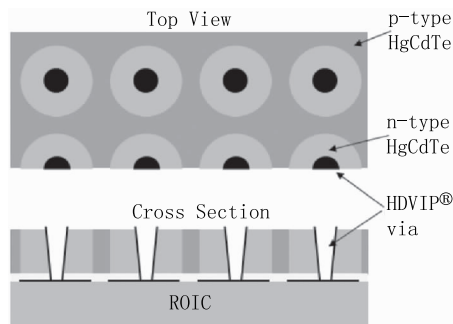


图6 环孔工艺示意图^[6]

Fig. 6 HDVIP technology diagram

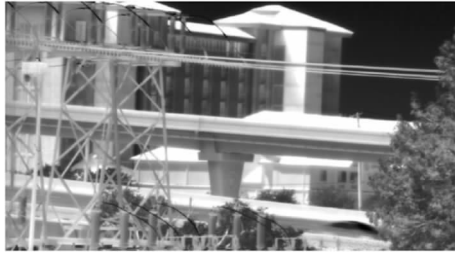


图 7 5 μm 像元间距 1280 × 720 元 HDVIP FPA 图像^[6]

Fig. 7 Image of 1280 × 720 HDVIP FPA with 5 μm pixel pitch

2.4 国内小像元碲镉汞红外探测器

中国电子科技集团公司第十一研究所(以下简称“中国电科十一所”)作为国内知名红外探测器组件研制单位,一直致力于减小红外探测器像元间距,如图 8 所示,满足红外探测系统应用需求。中国电科十一所于 2011 年成功研制出 15 μm 像元间距 1024 × 1024 中波碲镉汞探测器组件,成功应用于宇航、机载、安防监控等领域。2018 年成功突破多项 10 μm 像元间距红外探测器组件研制关键技术,研制出 10 μm 像元间距 1024 × 1024 规模小像元碲镉汞红外焦平面探测器组件,如图 9 所示。

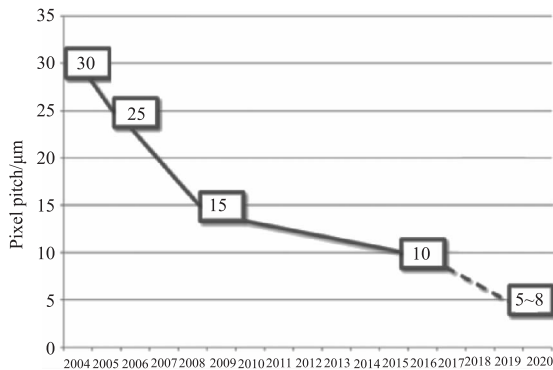
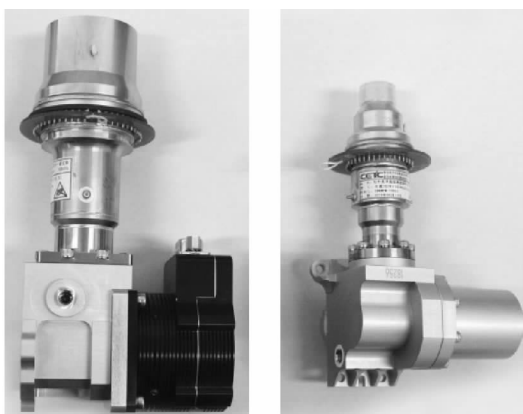


图 8 中国电科十一所研制像元间距发展趋势图

Fig. 8 Development trend of pixel size in 11th research institute of CETC



(a) 15 μm 1024 × 1024 组件 (b) 10 μm 1024 × 1024 组件

图 9 中国电科十一所组件照片

Fig. 9 FPA photo

3 探测器制备工艺难点

3.1 光敏元尺寸设计

离子注入尺寸设计是设计小像元碲镉汞红外焦平面探测器的关键。采用离子注入平面结方式获得 N 型区时,由于注入能量较高,易造成碲镉汞材料损伤,导致在原设计注入区外产生一定宽度的损伤层形成 n-区,若注入区尺寸过大将导致相邻光敏元 n-区距离变小,相邻光敏元串扰明显,注入区尺寸过小将导致信号变小,影响探测器探测能力。

设计单独像元以及阵列化像元版图,如图 10 所示,调整阵列化像元间距,对单独像元以及阵列化像元的 I-V 特性进行对比,确定注入后扩散长度,进而确定最佳注入区尺寸。

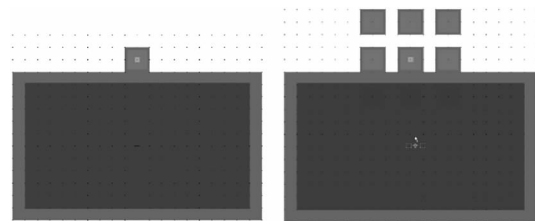


图 10 芯片注入区尺寸实验版图

Fig. 10 Layout of chip for ion implantation experiment

3.2 读出电路性能

像元尺寸缩小时,电路性能指标成为影响组件性能的关键因素,电荷存储容量必须足够大才能保证组件高性噪比、充分发挥小间距的优势,10 μm 与 15 μm 像元尺寸相比,电容面积减小 55%,导致电荷存储容量大幅度下降,借助于更先进的 0.18 μm 线宽硅 CMOS 工艺获得了高电荷存储容量,读出电路性能如表 1 所示。

表 1 15 μm 及 10 μm 读出电路性能对比

Tab. 1 The performance comparison of ROIC with 15 μm and 10 μm pixel pitch

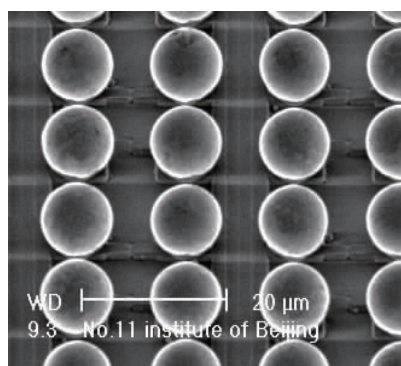
设计参数	15 μm 读出电路	10 μm 读出电路
工艺线宽/μm	0.35	0.18
像元尺寸/μm	15	10
阵列规模	1280 × 1024	1024 × 1024
电荷存储容量/Me ⁻	8	4.3
响应线性度/%	>99.8	>99.8
动态范围/dB	75	65
电路功耗/mW	150	130

3.3 互连工艺

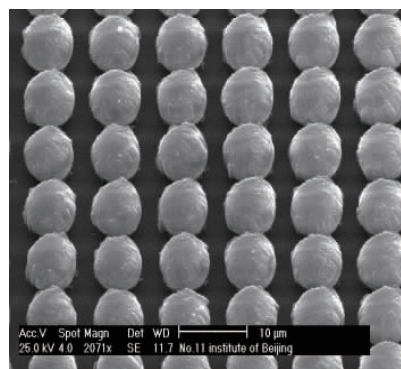
红外探测器通过钢柱采用倒装互连的方式将芯片与读出电路耦合,实现电学信号引出。像元尺寸变

小对探测器芯片混成互连是一项巨大挑战。像元变小后,互连耦合的 In 柱尺寸变小,15 μm 像元尺寸钢柱高度为 10 μm,10 μm 像元尺寸钢球高度仅为 3 ~ 4 μm,受光刻图形一致性以及钢柱生长工艺一致性的影响,钢球形貌一致性变差,极有可能导致互连失效。

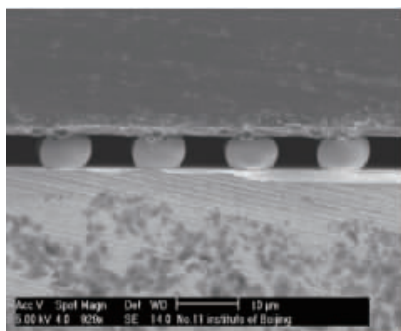
通过优化钢柱生长及钢柱剥离工艺,钢柱高度由 3 μm 提升至 5 μm,钢柱高度一致性获得较大提升,采用具备自动对准功能的倒装互连设备完成高精度互连,通过位于探测器芯片、读出电路上特定位置处的对准标记,实现高精度的自动对准,降低倒装焊接机激光调平对准时的误差,提高对准精度,从而提升互连导通率。图 11 为不同像元尺寸 In 柱形貌图及互连剖面图。



(a) 15 μm 像元尺寸 In 柱形貌



(b) 10 μm 像元尺寸 In 柱形貌



(c) 10 μm 器件互连剖面图

图 11 不同像元尺寸 In 柱形貌图及互连剖面图

Fig. 11 The image of In bump for deferential pixel size and cross-section map of interconnection

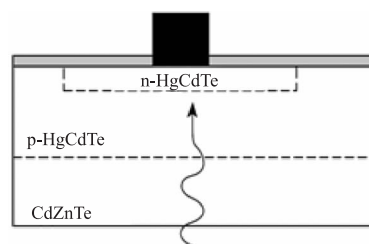
4 器件性能测试评价

中国电科十一所在碲镉汞衬底上通过液相外延技术生长高质量、低缺陷中波碲镉汞薄膜材料;用 CdTe/ZnS 复合膜系进行低漏电流表面钝化、B⁺ 离子注入成结、全干法低损伤刻蚀工艺制备碲镉汞红外焦平面探测器芯片;用钢柱通过倒装互连回流焊技术进行碲镉汞探测器芯片与硅读出电路互连耦合,形成探测器混成芯片;自主设计、制造高可靠性全金属微型杜瓦,封装混成芯片,形成探测器杜瓦组件。

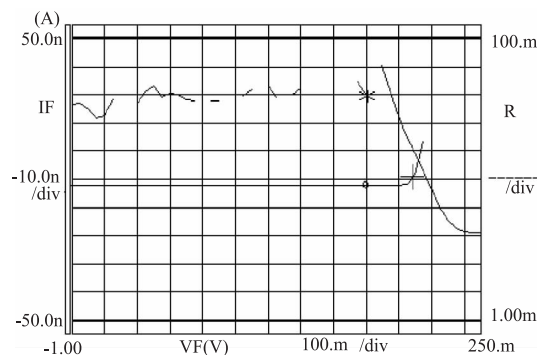
为降低暗电流,主要为了避免来自隧穿电流以及表面漏电的影响,优化 p 型载流子浓度约为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 并进行优质 CdTe/ZnS 钝化膜层生长,降低表面复合的影响。通过调节工艺气体配比、工作压力以及自偏压优化刻蚀工艺参数,保证接触孔刻蚀过程中等离子一致性;通过增加短时间预清洗工艺,除去被刻蚀芯片表面的微细颗粒物及其他工艺造成的残余物质,提高接触孔尺寸和深度的均匀性,提高器件性能。以下为 10 μm 像元间距 1024 × 1024 规模小像元碲镉汞红外焦平面探测器组件性能测试结果。

4.1 芯片电学性能测试

中国电科十一所采用液相外延技术生长碲镉汞薄膜材料、离子注入 n-on-p 平面同质结的方法(图 12 (a)),完成 10 μm 像元间距 1024 × 1024 中波碲镉汞红外焦平面探测器芯片研制,获得良好的 I-V 特性(图 12 (b))。



(a) 平面同质结示意图



(b) 10 μm 像元尺寸探测器 I-V 特性曲线

图 12 芯片结构示意图及 I-V 测试结果

Fig. 12 The structure of chip and I-V test result

4.2 组件性能测试

使用红外探测器性能测试系统对 $15\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 像元间距的 1024×1024 中波碲镉汞探测器微杜瓦组件进行性能测试,测试结果如表 2 所示。

表 2 小像元碲镉汞红外焦平面探测器组件测试结果

Tab. 2 The test result of small pixel size IRFPA

序号	测试参数	$15\ \mu\text{m}$ 中波碲镉汞 红外探测器	$10\ \mu\text{m}$ 中波碲镉汞 红外探测器
1	阵列规模	1280×1024	1024×1024
2	像元尺寸/ μm	15×15	10×10
3	响应波段/ μm	$3.7 \sim 4.8$	$3 \sim 5$
4	F 数	$F/4, F/5.5$	$F/4$
5	响应率不均匀性/%	≤ 8	≤ 5
6	有效像元率/%	≥ 99.5	≥ 99.5
7	NETD/mK	≤ 25	≤ 25
8	量子效率/%	≥ 60	≥ 60
9	平均峰值响应率/ ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	$\geq 4\text{E}11$	$\geq 6\text{E}11$
10	组件质量/g	≤ 800	≤ 400
11	功耗	$\leq 20\text{W}$ @ 常温稳态	$\leq 6\text{W}$ @ 常温稳态

开展 $15\ \mu\text{m}$ 及 $10\ \mu\text{m}$ 像元间距中波碲镉汞红外焦平面组件实验室成像演示验证,成像结果如图 13 所示, $10\ \mu\text{m}$ 像元间距红外焦平面探测器组件人物头发、面部特征等清晰可见,细节更为突出,识别度更高,相比 $15\ \mu\text{m}$ 像元间距红外焦平面探测器组件成像效果更加优异。

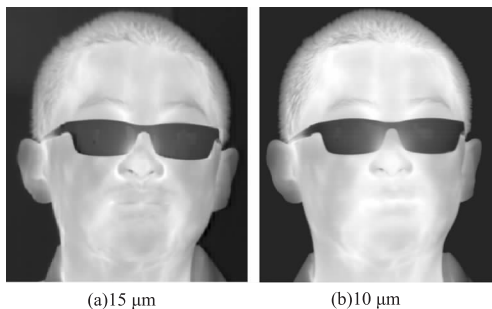


图 13 $15\ \mu\text{m}$ 及 $10\ \mu\text{m}$ 像元间距中波碲镉汞红外焦平面组件成像图
Fig. 13 The image of $15\ \mu\text{m}$ and $10\ \mu\text{m}$ pixel MW HgCdTe IRFPA

5 总结及展望

随着红外探测系统轻量化、小型化、低功耗等需求增长,红外探测器正朝小像元方向发展,本文介绍了国内外小像元红外探测器研制进展。中国电科十一所作为国内知名红外探测器组件研制单位成功突破了多项小像元探测器研制关键技术,成功研制出像元间距 $10\ \mu\text{m}$ 百万像素中波碲镉汞红外焦平面组件,截止波长 $5\ \mu\text{m}$ 、有效像元率达到 99% 、量子效率达到 60% 。与 $15\ \mu\text{m}$ 像元间距中波碲镉汞红外焦平面组件相比重量降低 50% 、功耗降低 70% 、组件尺寸减小 40% 以上,且组件性能相当。

目前红外探测器像元间距已经缩小至 $10\ \mu\text{m}$ 以内,未来红外探测器尺寸仍将持续缩小,对读出电路设计、互连耦合等工艺提出新的挑战,或许美国 DRS 公司的 HDVIP™ 工艺将成为未来小像元红外探测器的主流技术路线。中国电科十一所将继续推动小像元红外探测器研制,满足红外探测系统 SWaP 应用需求。

参考文献:

- [1] Guoqing Xu. Study on HgCdTe loop-hole photodiodes [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2015. (in Chinese)
Guoqing Xu, et al. HgCdTe 环孔探测器的研究 [D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2015.
- [2] A Rogalski. Recent progress in infrared detector technologies [J]. Infrared Physics and Technology, 2011, 54: 136 - 154.
- [3] Johnson John. Analysis of image forming systems [C] // Proceeding of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1958, 513 (513): 761.
- [4] Alain Manissadjian, et al. 2012 improved IR detectors to swap heavy systems for SWaP [C] // SPIE Defense, Security, and Sensing, 2012.
- [5] H Lutz, R Breiter, et al. 2016 Small pixel pitch MCT IR-modules [C] // Spie Defense + Security, 2016.
- [6] Armstrong J M, Skokan M R, Kinch M A, et al. 2014 HDVIP five micron pitch HgCdTe focal plane arrays [C] // Spie Defense + Security, 2014.