光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021101905

一种可见光波长拓展型 InGaAs 焦平面探测器

莫才平*，陈　扬，张圆圆，柳　聪，卢　杰，兰逸君，唐　艳

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 背照结构的 InGaAs 焦平面器件，受其衬底 InP 的阻挡，对可见光无响应。针对宽光谱探测的应用需求，研制了一种像元间距为 25 μm、阵列规模为 640×512 的 InGaAs 焦平面探测器。通过在倒焊互连工艺后，对器件进行干法、湿法相结合的减薄抛光工艺，所得探测器阵列（PDA）芯片最终保留厚度约 5 μm，实现了对 400～1 700 nm 光谱范围内可见光和短波红外光的同时响应，峰值探测率高于 8×10^{12} cm·$Hz^{1/2}$·W^{-1}，峰值外量子效率超过 85%，响应非均匀性优于 6%，器件成像效果良好。

关键词： InGaAs；可见-短波红外；阵列规模；焦平面

中图分类号：TN215　　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0795－04

640×512 InGaAs Focal Plane Arrays for Visible and SWIR Imaging

MO Caiping, CHEN Yang, ZHANG Yuanyuan, LIU Cong, LU Jie, LAN Yijun, TANG Yan

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: The back-lighting structure of InGaAs FPA is blocked by its InP substrate, thus it has no response to visible light. For wide spectral detection application requirements, an InGaAs FPA with the pitch of 25 μm and the array size of 640×512 has been developed. After the flip chip bonding process, the thinning polishing process combining with the dry and wet methods were performed on the chip, the photodiode array chip eventually retains a thickness of about 5 μm. The visible and SWIR response of 400～1 700 nm spectrum was realized, the peak quantum efficiency and detectivity exceed 85% and 8.0×10^{12} cm·$Hz^{1/2}$·W^{-1}, respectively, the non-uniformity of the FPA is less than 6% and the imaging effect of the device is good.

Key words: InGaAs; vis-SWIR; array size; FPA

0　引言

InGaAs 焦平面探测器是一种全固态混合集成式图像传感器，基于成熟的Ⅲ-Ⅴ族 InP/InGaAs 体系化合物半导体材料与工艺，器件具有灵敏度高、可室温工作、小型化、功耗低等特点。其作为新一代红外成像探测器，在侦察识别、微光夜视、光电对抗、防火消防、工业检测、机器视觉、生物医疗等军民用领域应用前景广阔。国外对 InGaAs 焦平面探测器的研究始于 20 世纪 90 年代初期。2003 年，美国 Indigo 公司在前期较为成熟的标准型 InGaAs 焦平面技术基础上，率先开展了可见光短波 320×256 元焦平面技术研究[1]。2005 年，美国 SUI 公司快速跟进 320×240，640×512 元两种规格的可见光短波 InGaAs 焦平面技术开发[2-3]，2008 年，又发布了 1 280×1 024 规格可见光短波 InGaAs 焦平面相机[4]，形成了全系规格的可见光短波焦平面产品研发能力。2020 年，日本 SONY 公司发布了 656×520，1 296×1 032 两款可见光短波 InGaAs 焦平面探测器，Cu-Cu 互连集成技术令其拥有业界最小的 5 μm 像素和可见光范围内最高的量子效率[5]。而国内对该技术的研究起步相对较晚，仅有几家科研院所从事该方面的相关研究。

标准 InGaAs 焦平面探测器的响应波段为

收稿日期：2021－10－19.

*通信作者：莫才平

900～1 700 nm，受限于材料特性，其对可见光无响应，无法感知大多数面向可见光识别的涂层、油墨文字、屏幕显示等重要的图像细节信息，在成像监测识别的实际应用中存在较大局限性。

针对上述问题，本文研制了一款具有可见光波长拓展特性的（25 μm 像元 640×512 元规格）InGaAs 焦平面探测器。补充了 InGaAs 焦平面探测器对可见光探测的功能。

1 器件结构设计

1.1 焦平面器件倒装焊结构

焦平面由 InGaAs 探测器阵列芯片（PDA）与读出电路（ROIC）芯片倒装互连而成，探测器阵列将光信号转换为电流信号，经互连 In 凸点传导至读出电路单元，由读出电路按确定的时序和模式完成信号处理与输出，其特点是：连线路径短，寄生阻抗低，且具有良好的电学特性和抗电磁干扰能力[6]。

探测器阵列芯片采用典型的 InGaAs/InP 双异质结 pin 型结构，如图 1 所示。基于平面结器件工艺，在外延材料生长中，InP 顶层调制为弱 n 型，结区由后续的 p 型扩散形成。

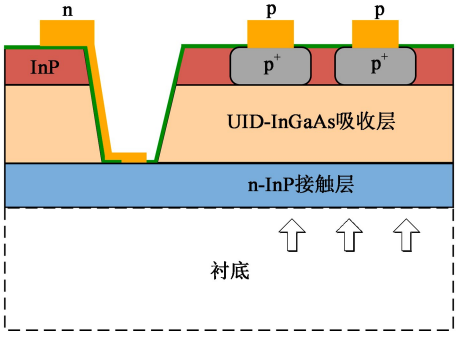


图 1 InGaAs 焦平面探测器阵列衬底移除结构示意

1.2 波长拓展-衬底移除

芯片与读出电路经过倒焊互连工艺后形成具有信号输出接口的倒装焊结构。随后进行背照式器件的波长拓展工艺。通过芯片级减薄抛光工艺，可移除芯片表面的 InP 衬底，避免衬底对可见光信号的吸收，实现多波段光谱的同时响应。

2 器件制作

2.1 器件铟柱互连工艺

在芯片与电路焊盘上通过蒸发、剥离工艺制备 UBM 金属层和 In 柱薄膜，经过高温处理，In 柱在 UBM 上收缩成球，完成对 In 柱凸点阵列的拔高整形。采用 1 μm 精度互连设备，进行对位互连，基于 In 凸点冷压互连工艺，解决了大面阵倒焊欠压与过压的问题，实现了高可靠性的焦平面芯片混成互连。图 2 所示为倒装焊后焦平面芯片的 X 射线透视图，互连对位准确，凸点形变一致性好。

InGaAs 焦平面器件与传统的 BGA 器件结构类似，但内部缝隙更加微小，需要用粘度较小的填充胶水[7]完成互连后再对倒焊器件进行填充加固，以获得可靠性良好的焦平面倒焊互连器件。

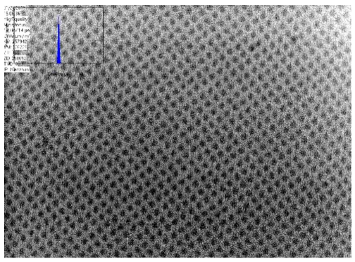


图 2 倒装互连后焦平面芯片的 X 射线透视

2.2 器件波长拓展工艺

具体工艺过程为：先通过减薄抛光工艺对衬底进行快速减薄，使其厚度控制在 100 μm 以内，再通过高选择比湿法腐蚀工艺完全去除 InP 衬底，并在 InP 公共 n 电极层实现厚度截止，最终保留厚度约 5 μm 的 PDA 芯片，即完成衬底移除工艺。

随后通过介质膜工艺，在芯片背面生长 SiN/SiO 复合介质膜，以提高芯片背面有源区对光子信号的吸收。所采用的复合膜在 400～1 700 nm 波长范围的透射仿真曲线如图 3。

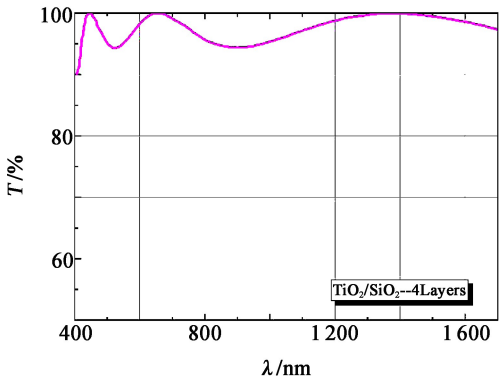


图 3 可见光短波红外增透膜透过率 T 仿真结果

3 可见光波长拓展性能参数

3.1 光谱响应范围

经过对器件背面 InP 衬底的加工处理后，最终实

现可见光(400～750 nm)、近红外(750～1 000 nm)、短波红外(1 000～1 700 nm)等多个波段范围的光信号响应。其光谱响应曲线如图 4。可见，原本无响应的 400～1 000 nm 波段，因探测器 InP 衬底完全剥离后，光子吸收损耗大大降低，器件可见光响应提升明显。具体而言，在可见光波长范围内，焦平面响应随波长缩短而下降，800 nm 波长处量子效率约为 70%，600 nm 波长处降至 50%。日本 SONY 公司开发的可见短波红外 InGaAs 焦平面在 800 nm 处的量子效率(η_{ex})高达 80%，600 nm 处也超过 60%[5]，器件与国外器件在性能上还存在一定差距。

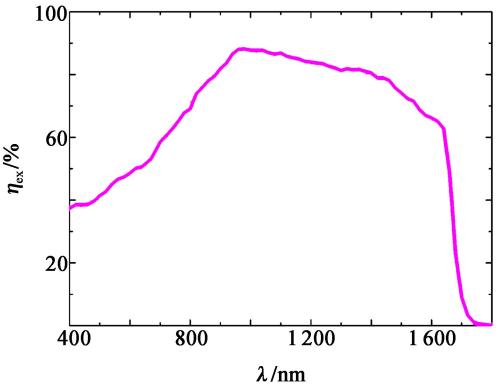


图 4　器件实测光谱曲线

经分析，可见光波段响应略显不足的原因有以下几方面：1)InP 下接触层偏厚，带隙吸收较为明显；2)n 型重掺杂的下接触层内光生少子扩散长度偏小，由于吸收系数与波长的相关性，短波长光子的近表吸收现象严重，导致光电收集效率偏低；3)在工艺试验中，宽谱增透膜的实际透过率与设计值之间有一定程度的偏离，存在进一步优化复合膜系的空间。

3.2　成像情况

为验证可见短波红外 640×512 元 InGaAs 焦平面的成像性能，开发了专用驱动电路，成像组件如图 5 所示。焦平面成像演示如图 6 所示，图像采用了疵点补偿与两点校正的处理算法。

由图 6 可见，所开发的可见短波红外 640×512 元 InGaAs 焦平面成像分辨率较高，兼具短波红外成像特征(透视、水吸收等)与可见光成像特性(车牌号码识别等)，成像效果良好。



图 5　可见短波 640×512 元 InGaAs 焦平面成像组件



(a)　短波红外成像特征　　(b)　可见光成像特征　　(c)　室外成像，25 f/s，低增益

图 6　可见短波红外 640×512 元 InGaAs 焦平面成像结果(f=300 mm)

3.3　峰值探测率

在室温工作环境下，可见短波焦平面的峰值探测率超过 8×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1} 水平(积分时间大于 13 ms，高增益)。由于面阵规模扩大，可见短波红外 640×512 元 InGaAs 焦平面的响应非均匀性约为 5%～6%，大于短波红外 320×256 元焦平面的典型非均匀性水平(3%～4%)。

4　结论

本文研制了一种可见光拓展型短波红外 25 μm 像元 640×512 规格 InGaAs 焦平面探测器，解决了 InGaAs 焦平面器件响应短波拓展的问题，成功研制出 640×512 元 InGaAs 可见短波红外焦平面。性能测试评价与成像验证结果表明，焦平面光谱响应范围由 900～1 700 nm 扩展到 400～1 700 nm，峰值探测率超过 8×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，峰值外量子效率超过 85%，成像效果良好。

参考文献：

[1]　Hoelter T R, Barton J B. Extended short wavelength spectral response from InGaAs focal plane arrays[J]. Proc. SPIE, 2003, 5074: 481.

[2] Martin T, Dixon P, Gagliardi M A, et al. 320×240 pixel InGaAs/InP focal plane array for short-wave infrared and visible light imaging[J]. Proc. SPIE, 2005, 5726: 85.

[3] Enriquez M D, Blessinger M A. Performance of high resolution visible-InGaAs imager for day/night vision[J]. Proc. SPIE, 2008, 6940: O-1-9.

[4] Martin T, Brubaker R, Dixon P, et al. 640×512 InGaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging[J]. Proc. SPIE, 2005, 5738: 12.

[5] Manda S, Matsumoto R. High-definition visible-SWIR InGaAs image sensor using Cu-Cu bonding of Ⅲ-Ⅴ to silicon wafer[J]. Proc. IEEE, 2019: 978-1-7281-4032-2/19.

[6] 董绪丰，杜 林. 基于VB程序的自动化控制倒装焊技术[J]. 半导体光电，2015，36(2)：226-228，232.
Dong Xufeng, Du Lin. Automatization of flip chip bonding technology based on VB program [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(2): 226-228, 232.

[7] 董绪丰，李 政，王 艳. FPA探测器微细间隙填充工艺研究[J]. 半导体光电，2013，34(1)：103-105.
Dong Xufeng, Li Zheng, Wang Yan. Research on fine pitch underfill process of FPA ultraviolet detector[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(1): 103-105.

作者简介：

莫才平(1973—)，男，高级工程师，主要从事Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体光电子器件的研制。

(上接第783页)

[41] Tian W, Zhang H, Zhang X G, et al. A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes[J]. Optical Fiber Technol., 2016, 30: 184-189.

[42] Zhou G, Zhou G, Cheng C, et al. Design and analysis of a microstructure ring fiber for orbital angular momentum transmission[J]. IEEE Photonics J., 2017, 8(2): 1-12.

[43] Hu Z A, Huang Y Q, Luo A P, et al. Photonic crystal fiber for supporting 26 orbital angular momentum modes[J]. Opt. Express, 2016, 24(15): 17285-17291.

[44] Chen C, Zhou G, Zhou G, et al. A multi-orbital-angular-momentum multi-ring micro-structured fiber with ultra-high-density and low-level crosstalk[J]. Opt. Communications, 2016, 368: 27-33.

[45] Xu M, Zhou G, Chen C, et al. A novel micro-structured fiber for OAM mode and LP mode simultaneous transmission [J]. J. of Optics, 2018, 47(4): 428-436.

[46] Wang N, Xie J L, Jia Hongzhi, et al. A low confinement loss double-photonic crystal fibre over 850 nm bandwidth with 26 orbital angular momentum modes transmission[J]. J. of Modern Optics, 2018, 65(18): 2060-2066.

[47] Wang W, Wang N, Li K, et al. A novel dual guided modes regions photonic crystal fiber with low crosstalk supporting 56 OAM modes and 4 LP modes[J]. Optical Fiber Technol., 2020, 57: 102213.

[48] 白秀丽，陈鹤鸣，张凌菲. 轨道角动量模传输的圆环形光子晶体光纤[J]. 红外与激光工程，2019，48(2)：224-231.
Bai Xiuli, Chen Heming, Zhang Lingfei. Circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes transmission[J]. Infrared and Laser Engin., 2019, 48(2): 224-231.

[49] Bai X I, Chen H M, et al. Design of a circular photoniccrystal fiber with square air-holes for orbital angular momentum modes transmission [J]. Optik, 2018, 158: 1266-1274.

[50] 杨红红. 新型OAM光子晶体光纤的设计与性能分析[D]. 南京：南京邮电大学，2018.
Yang Honghong. Design and performance analysis of a novelphotonic crystal fiber for OAM mode transmission[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecom., 2018.

[51] 王 霏，肖平平. 具有混合形状空气孔的OAM传输光纤设计研究[J]. 光电子·激光，2020，31(3)：254-261.
Wang Fei, Xiao Pingping. Design and performance of fiber with hybrid shape air holes for OAM mode transmission[J]. J. of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(3): 254-261.

[52] 伍淑坚，杜 城，罗文勇，等. 环形纤芯结构光纤设计与制备技术研究[J]. 光通信研究，2020，4(4)：31-36，67.
Wu Shujian, Du Cheng, Luo Wenyong, et al. Research on design and fabrication technology of annular core structure fiber [J]. Study on Optical Commun., 2020, 4(4): 31-36, 67.

[53] Hassan M M, Kabir M A, Hossain M N, et al. Photonic crystal fiber for robust orbital angular momentum transmission: design and investigation [J]. Optical and Quantum Electron., 2020, 52(1): 1-14.

作者简介：

赵丽娟(1981—)，女，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感与光纤通信；

徐志钮(1979—)，男，博士，副教授，主要研究方向为分布式光纤传感器及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。