

文章编号:1001-5078(2025)03-0395-04

· 红外材料与器件 ·

p-on-n 型碲镉汞小间距探测器研究

王鑫,刘世光,张轶,赵旭豪,王娇
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:p-on-n 结构的碲镉汞红外探测器芯片的暗电流低、少子寿命长,是目前高性能红外探测器的主流发展方向,同时,为了满足未来红外探测器小型化的发展需求,本文主要针对 p-on-n 型长波 10 μm 像元间距 1280 \times 1024 探测器芯片进行了研究,采用了 p-on-n 异质结的技术路线,对小间距台面成型及钝化技术进行研究,通过 SEM 评价台面及钝化形貌,通过 CV 测试评价出钝化层质量,并进行了探测器的研制,采用半导体参数测试仪对芯片在 77 K 下进行 pn 结的 I-V 特性的评价,测试出 IV 特性曲线,并对芯片进行倒装互连电路进行了性能测试,获得了性能较好的探测器芯片。该研究对小间距长波 p-on-n 碲镉汞焦平面器件的制备具有重要意义。

关键词:碲镉汞;10 μm 间距;p-on-n;异质结

中图分类号:TN305 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.011

Study of p-on-n type HgCdTe little pixel detector

WANG Xin, LIU Shi-guang, ZHANG Yi, ZHAO Xu-hao, WANG Jiao
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015)

Abstract: HgCdTe p-on-n structure infrared detector has low dark current and long lifetime, which is the main development direction of high-performance infrared detectors at present. Meanwhile, in order to meet the development needs of future infrared detector miniaturization, this paper mainly studies p-on-n long-wave 10 micron pixel spacing 1280 \times 1024 detector. The p-on-n heterojunction technical route was adopted to study the forming and passivation technology of the small-pitch mesa. The mesa and passivation morphology were evaluated by SEM, the quality of the passivation layer was evaluated by CV test, and the detector was developed. The I-V characteristics of the pn junction of the detector were evaluated by a semiconductor parameter tester at 77K, and the IV characteristic was tested. The performance of the detector is tested by the test of the performance, and the detector with good performance is obtained. This study is of great significance for the preparation of small-pitch long-wave p-on-n infrared detector devices.

Keywords: HgCdTe; 10 μm pitch; p-on-n; heterojunction

1 引言

红外探测技术自从被发现以来,就被认识到其具有非常大的应用潜力^[1],红外探测技术在近年来取得了非常大的发展,目前,其广泛应用于防御、安全、环境监测、科学和空间应用等多个领域^[2-4]。目

前,制备碲镉汞红外探测器芯片有两种结构,n-on-p 结构和 p-on-n 结构,在 n-on-p 结构中,利用 Hg 原子空位来形成 P 型层,这种结构中的汞空位会引入 Shockley-Read 复合中心,会导致芯片暗电流增加,降低芯片性能;然而对于 p-on-n 结构,是以外掺杂

As 原子实现,以带间复合为主,因此可以获得较长的少数载流子寿命^[5],同时,相比 n-on-p 结构,p-on-n 结构容易获得低掺杂浓度的 N 型区,由于 N 区的多数载流子(电子)迁移率高,因此,p-on-n 结构的探测器的暗电流低,相比 n-on-p 结构有较大优势,基于 p-on-n 结构的独特优势,使得其在高温工作、小型化、甚长波探测器领域有很大的发展潜力^[6-7]。

p-on-n 型碲镉汞红外探测器有两种主要结构,一种是利用 As 注入工艺实现的平面结结构,另一种是利用垂直液相外延生长 As 掺杂 HgCdTe 的异质结工艺,相比 As 注入平面结结构,异质结结构的优势是可以在外延生长时实现 As 原子的 100% 激活,激活率高;并且异质结可以有效抑制随穿电流,从而降低器件的暗电流^[8]。因此,本文主要基于双层异质结结构开展 10 μm 小像元间距的碲镉汞红外探测器研究。

碲镉汞红外探测器常规工作温度为 77 K,需要将其封装在杜瓦内,并用制冷机对其进行降温。随着应用需求的提升,器件的阵列规模变大,保持像元尺寸不变会导致功耗加大、组件尺寸变大等问题,影响其在各个领域内的应用,随着应用中要求组件低重量、小尺寸、低功耗的需求,缩小像元尺寸成为探测器进一步发展的关键。

缩小像元尺寸可以使系统尺寸更小、重量更轻,提高系统紧凑度,从而减少红外光电系统重量,并且降低系统功耗,因此,小间距探测器芯片的研究变得越来越重要,本文针对这一发展方向,开展了 p-on-n 型 10 μm 像元间距,1280 × 1024 阵列规格的探测器芯片制备技术研究。

2 实验方案

在本文的研究过程中,材料使用的是在碲锌镉衬底材料上利用水平液相外延(LPE)技术生长的原位掺 In 的 N 型碲镉汞材料作为吸收层,截止波长约为 9.3 μm,载流子浓度是 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,之后通过垂直液相外延技术生长 P 型 Cap 层。完成材料生长后,需要通过台面成型技术实现 P 型 Cap 层的隔离,由于 HgCdTe 材料的特殊性质,干法刻蚀工艺会引起 P 型层损伤,造成芯片性能劣化,因此采用腐蚀工艺进行台面制备,重点针对腐蚀工艺中存在的侧向腐蚀问题进行研究,获得了高深宽比的 10 μm 间距的台面结构。

之后,对小间距台面器件的钝化工艺进行了研究,在本研究中,表面钝化是使用磁控溅射工艺进行,主要对生长时的功率、温度和压强进行研究,对不同工艺条件下的台面侧壁覆盖情况进行对比,通过 CV 测试对钝化层质量进行评价,最终获得了台面侧壁覆盖较好,并且固定电荷密度小的钝化条件。

后续,通过光刻、刻蚀、电极制备等工艺完成探测器芯片的研制,对芯片进行了 IV 测试进行评价,并且倒装互连电路后对芯片性能进行评价。

3 实验结果

3.1 小间距台面成型技术研究

由于刻蚀工艺会对碲镉汞材料造成较大的损伤,导致器件性能劣化,因此在异质结台面成型工艺中通常选用湿法腐蚀工艺,这种方法没有损伤,并且工艺简单,但腐蚀工艺的缺点是侧向腐蚀严重,导致深宽比小,深宽比通常为 1 : 2 左右(如图 1 所示),对于 10 μm 间距器件而言,由于台面深度要达到 4 μm 以上,才能保证将 P 型层完全隔离开,如此低的深宽比会导致台面过小,无法完成后续器件工艺制备。

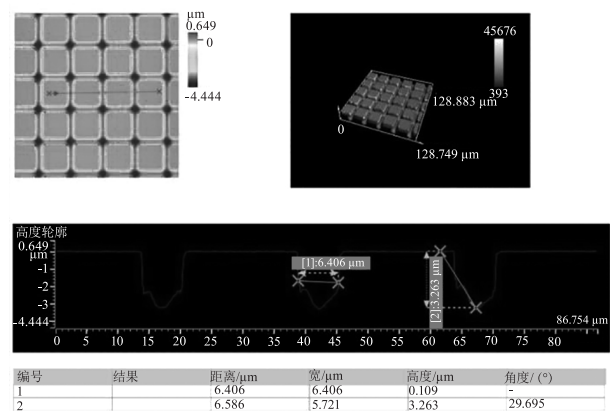


图 1 台面深宽比测试结果

Fig. 1 Test results of the depth to width ratio

为了完成 10 μm 间距台面的制备,开展了高深宽比台面制备技术的研究,通过实验发现,台面结构在光刻时光刻胶也会覆盖到侧壁上,基于此,开展了多次腐蚀工艺的研究,通过研究不同曝光、显影条件,对比侧壁的覆盖效果,针对 10 μm 像元间距的台面设计出了最优的光刻条件,通过多次光刻、腐蚀的方式既保证了所需的台面大小,又达到了所需的台面深度,减少第 1 次腐蚀的深度,控制侧向腐蚀,提高占空比,如图 2 所示。



图2 多次腐蚀台面示意图

Fig. 2 Diagram of multiple corrosion

利用此工艺制备出的台面深宽比可达到 1 : 1 以上,台面宽度可达 7 μm 以上,实现较大的占空比,测试结果如图 3 所示。

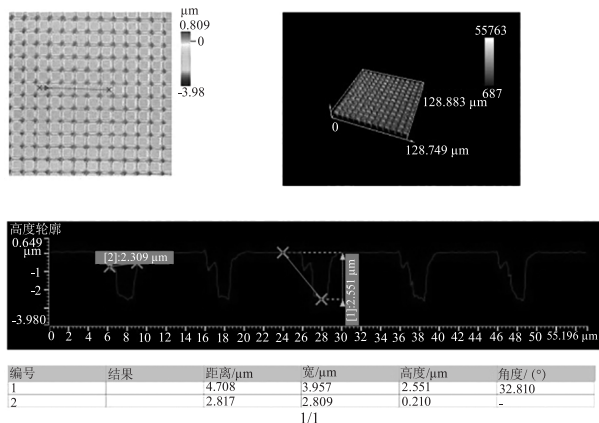


图3 多次腐蚀台面深宽比测试结果

Fig. 3 Test results of the depth to width ratio for multiple corrosion

3.2 小间距台面钝化退火技术研究

台面结构的侧壁钝化是影响台面型器件的主要因素之一,台面的侧壁覆盖情况会直接影响钝化效果,为获得最佳的钝化效果,对用磁控溅射生长钝化层时的功率、温度和压强进行了研究,对不同生长条件生长的样品的表面以及侧壁钝化的钝化层覆盖情况进行了测试,最终确定出最佳的生长工艺,此时获得了较好的台面侧壁覆盖状态,SEM 图如图 4 所示。

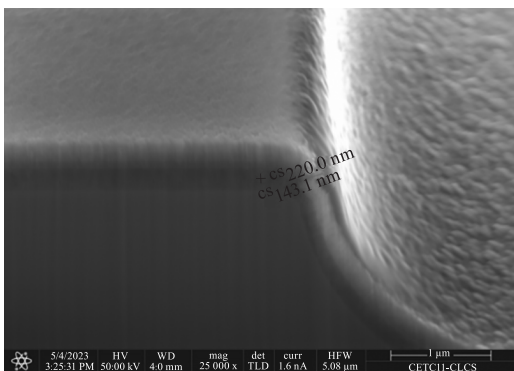


图4 钝化层表面及侧壁 SEM 图

Fig. 4 SEM images of surface and side wall of passivation layer

之后,为了对钝化层的质量进行分析,将样品制备成 MIS 结构,并进行了 CV 测试,通过 CV 测试方法测试出芯片的固定电荷密度, CV 测试结果如图 5 所示。

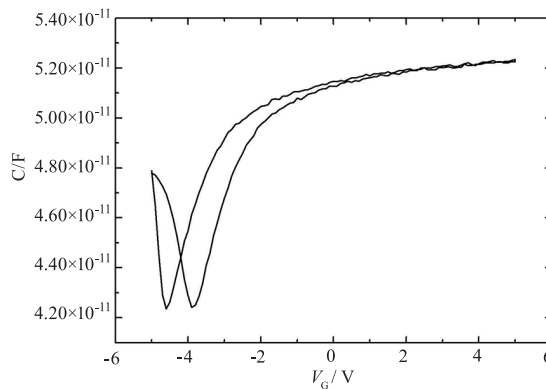


图5 CV 测试结果图

Fig. 5 Result of CV test

通过计算,钝化层的固定电荷密度低于 $3 \times 10^{11}/\text{cm}^2$,钝化层质量较好。

3.3 10 μm 间距 LW1280 × 1024 探测器性能测试

完成钝化层制备后,后续通过光刻、刻蚀等工艺完成接触孔成型、电极成型等步骤,完成 10 μm 像元中心间距的 LW1280 × 1024 探测器的制备,之后,将制备好的器件放置在低温探针系统中,并通过液氮制冷到 77 K 温度,使用半导体参数测试设备进行 77 K 温度下的器件的伏安特性测试。测试结果如下图所示,探测器的 IV 测试结果较好。

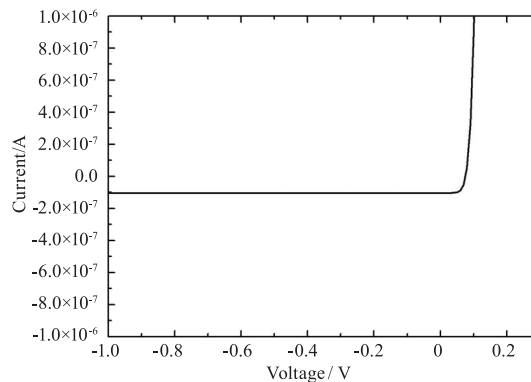


图6 IV 测试结果图

Fig. 6 Result of IV test

之后,将探测器芯片与读出电路进行了互连,并封装到杜瓦结构内进行了测试,探测器组件图如图 7 所示。

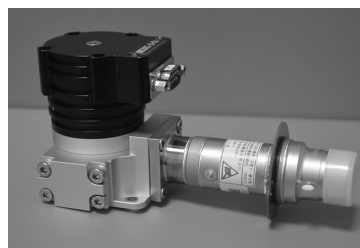


图7 探测器组件图

Fig. 7 Detector picture

经测试,芯片的盲元率低于 0.5%,后截止波长是 9.1,探测器性能较好,如图 8、9 所示。



图 8 探测器测试盲元图

Fig. 8 Test of detector bad pixel

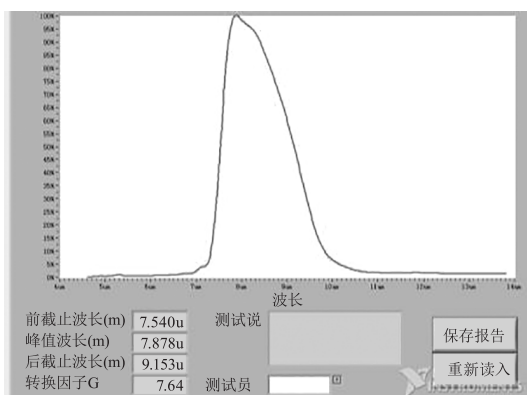


图 9 探测器测试光谱图

Fig. 9 Test of detector spectrum

4 总 结

本文主要针对 p-on-n 型长波 10 μm 像元间距 1280 \times 1024 探测器芯片的制备进行了研究,采用了 p-on-n 异质结技术路线,针对小间距台面制备技术的难点进行研究,完成了高占空比的 10 μm 间距台面器件制备,之后对台面钝化技术进行了研究,获得了较好的表面及侧壁钝化形貌,在此基础上,进行了 LW 1280 \times 1024 探测器的研制,利用半导体参数测

试仪对探测器芯片在 77K 下进行 pn 结的 I-V 特性的测试,测试出芯片有较好的 IV 特性,并通过倒装互连电路测试出混成芯片的性能,探测器盲元率低于 0.5%,性能较好。

参考文献:

- [1] Rogalski A. History of infrared detectors [J]. Opto-Electron. Rev, 2012, (3): 279 - 308.
- [2] Mollard L, Destefanis G, Rothman J, et al. HgCdTe FPAs made by arsenic ion implantation [J]. Infrared Technology and Applications, 2008, 6940: 69400F1 - 10.
- [3] Vilela M F, Hogan J, Fennell B T, et al. Infinite-melt vertical liquid-phase epitaxy of HgCdTe from Hg solution: From VLWIR to SWIR [J]. Journal of Electronic Materials, 2022, 51: 4731 - 4741.
- [4] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. Appl. Phys., 2009, 105: 091101.
- [5] Xiong Bojun, Li Lihua, et al. As ion implantation technology for LWIR HgCdTe Infrared Detector [J]. Infrared Technology, 2022, 44(2): 129 - 133. (in Chinese)
熊伯俊, 李立华, 等. As 注入长波碲镉汞红外探测器工艺研究 [J]. 红外技术, 2022, 44(2): 129 - 133.
- [6] LEI W, Antoszewski J, Faraone L. Progress, challenges and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors [J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4): 041303.
- [7] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review [J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(4): 046501.
- [8] Hess G T, Sanders T J. HgCdTe double-layer heterojunction detector device [J]. SPIE, 2000, 4028: 353 - 364.