

小型化铟化铟探测器制备

李海燕¹, 刘佳星¹, 杜红燕¹, 杜孟新²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所, 北京 100055)

摘要:随着红外探测技术的不断发展,市场对红外探测器提出了越来越多的要求,如高分辨率、高工作稳定性、低成本、小型化等,红外探测器光敏芯片的制备技术随之向大面阵、小间距方向不断探索。基于市场需求,本文从技术发展的角度,研究采用离子注入技术、干法刻蚀技术制备台面结型焦平面阵列,实现高性能、窄间距、小型化光敏芯片的制备,为未来高分辨率芯片的制备奠定技术基础。文章介绍了 $128 \times 128(15 \mu\text{m})$ 、 $128 \times 128(10 \mu\text{m})$ 两款器件的制备,两款器件中测 $I-V$ 性能良好,其中, $128 \times 128(15 \mu\text{m})$ 器件杜瓦封装组件后性能表现良好。

关键词:铟化铟;离子注入;干法刻蚀

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.017

The fabrication of miniaturization InSb detector

LI Hai-yan¹, LIU Jia-xing¹, DU Hong-yan¹, DU Meng-xin²

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. Instrumentation Technology and Economy Institute, Beijing 100055, China)

Abstract: With the continuous development of infrared detection technology, the market puts forwards more and more requirements to the infrared detectors, such as high resolution, high working stability, low cost, and miniaturization. So the technology for the fabrication of infrared detector photosensitive chip will be continuously explored in the direction of large array and small spacing. Based on the market demand, this paper, from the perspective of technology development, studies the use of ion implantation technology and dry etching technology to prepare the photosensitive chip, so as to achieve the preparation of high-performance, narrow spacing and miniaturized photosensitive chips, laying a technical foundation for the preparation of high-resolution chips in the future. This paper introduces the preparation of $128 \times 128(15 \mu\text{m})$ and $128 \times 128(10 \mu\text{m})$ devices. The $I-V$ tests of both devices are good, the performance of Dewar encapsulated component $128 \times 128(15 \mu\text{m})$ is good.

Keywords: InSb; ion implantation; dry etching

1 引言

铟化铟材料为 III-V 族二元化合物半导体材料,晶体结构为稳定的闪锌矿结构,因高量子效率、高载流子迁移率等材料属性,铟化铟成为中波红外探测器制备的首选材料。自 20 世纪六七十年代至本世纪初,铟化铟红外探测器历经单元、少元、多元线列的一代器件发展至面阵凝视、超大规模面阵,技

术逐渐成熟并进入大规模应用状态,基于铟化铟材料的红外探测器在中波波段表现出极高灵敏度、长期工作的性能稳定性以及高空间均匀性等特点,结合其良好的可生产性、低成本、高性价比等优点,铟化铟红外探测器具有良好的发展前景^[1]。

随着红外探测技术的不断成熟发展,探测器阵列规模越来越大,像元规格已由原来的 128×128 发

展到现在的 640×512 、 $2 \text{ k} \times 2 \text{ k}$ 乃至 $4 \text{ k} \times 4 \text{ k}$, 随着面阵规格提升, 配套杜瓦与制冷系统的规格也同步提升, 这与人们对探测器轻型化、小型化的配置需求相左, 为实现探测器芯片小型化、高密度高分辨率的制备, 小像元尺寸、窄像元间距面阵芯片的制备技术提上日程, 从国际主流厂商的产品参数来看, 探测器像元尺寸由 $50 \mu\text{m}$ 下降到 $30 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$, 以以色列 SCD 公司研制的一款型号为“Blackbird”的产品为例, 该产品为面阵规格 1920×1536 的锑化铟红外探测器, 像元中心间距仅为 $10 \mu\text{m}$ 。目前, 国际主流厂商 Raytheon、Sofradior、SCD 等公司探测器产品像元间距 $25 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 产品已实现批量化生产, 国内相关方面的研发一直处于落后状态, 发展缓慢。近几年, 随着国内红外焦平面探测器应用的增多及应用水平的提高, 市场对锑化铟焦平面探测器的需求不断增加, 本文在研究国外锑化铟产品发展路线的基础上, 基于锑化铟材料, 通过离子注入成结工艺、干法刻蚀工艺技术突破, 研究窄像元间距探测器的研制。

表 1 锑化铟探测器主要生产厂家及产品情况^[2]

Tab. 1 Main manufactures and products of InSb detector^[2]

国家	厂商名称	探测器规格	像元间距/ μm	结区	成结方法
美国	Raytheon	2048×2048	15, 20, 25	平面/台面	体晶/注入
	Lockheed Martin	1024×1024	15, 25, 27	平面	体晶/注入
	CMC	1024×1024	15, 25	台面	体晶/扩散
	FLIR	1024×1025	15, 25	平面	体晶/注入
以色列	SCD	1920×1536	10, 15, 25	台面	体晶/MBE
英国	QinetiQ/Malvern/BAE	1024×768	15, 26	台面	体晶/MBE
法国	Sofradia	640×512	15, 25	平面	体晶/注入
俄罗斯	RD & P	384×288	15, 25	台面	体晶/注入

2 工艺设计

目前国内成熟的锑化铟红外探测器光敏芯片的制备工艺采用扩散工艺方式形成 PN 结结构, 通过腐蚀液湿法腐蚀的技术制备台面结型焦平面阵列, 研究国外主流厂商的产品研制技术路线, 对比目前国内成熟的产品生产技术路线, 出于提高器件性能与大面阵、窄间距焦平面阵列的研发目标, 本文研究在采用离子注入技术与干法刻蚀技术制备焦平面阵列。

2.1 离子注入技术

从成结工艺发展技术路线来看, 离子注入技术

是继扩散技术之后发展起来的一种高精度可控成结技术。

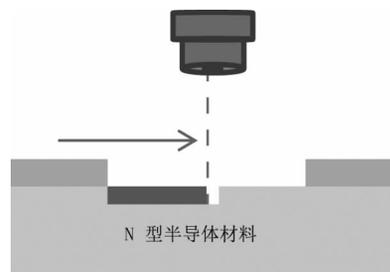


图 1 离子注入工艺原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ion implantation

离子注入工艺对注入杂质的高精度控制使其利于实现较大面积上薄而均匀的掺杂和更为理想的突变 PN 结, 引入较小的噪声电流, 实现高精度、高可重复性、高性能的材料掺杂^[3], 其精确设计与实现能力决定了器件 PN 结的光伏效能水平, 从源头决定了探测器最终的整体性能效果, 可自定义的掺杂设计使该工艺在器件性能提升、器件尺寸缩小方面起着至关重要的作用。离子注入技术之所以在国内没有全面推开使用在于其工艺实现难度高, 因此, 在国内目前锑化铟器件的研制中, 扩散技术仍为主流技术, 离子技术尚未达到批量化生产的技术水平。通过文献调研可制, 用于锑化铟成结注入的元素有镁、铍、镉、锌等, 注入元素质量大, 注入易形成多孔材料表面, 该表面很难用退火工艺进行弥补优化, 因此, 考虑到注入杂质质量越大, 注入损伤越严重, 越难消除, 本文研究采用原子质量最小的铍元素进行注入^[4-5]。

2.2 干法刻蚀技术

焦平面阵列分平面结结构、台面结结构, 当像元间距缩小到一定程度时, 平面结结构存在像元间信号串音的风险, 因此台面结结构是器件发展到一定程度时必要采用的结构方案。台面结型焦平面阵列的制备方法有湿法腐蚀技术、干法刻蚀技术, 湿法腐蚀技术目前应用成熟, 其特点是纵向腐蚀过程中伴随着严重的横向钻蚀, 在像元中心间距较大时, 该工艺方案尚可使用, 当像元中心间距缩小到一定程度时, 湿法腐蚀技术会造成像元的严重损失, 限制了小像元尺寸技术的发展, 此时, 就必须采用干法刻蚀技术。

刻蚀工艺可实现高精度、微尺寸的图形刻蚀, 其实现难点在于实现低粗糙度、低损伤的器件结构的制备, 本文研究采用感应耦合等离子体干法刻蚀设备进行 InSb 台面结型焦平面阵列的制备工艺, 实现小尺

寸、高占空比焦平面阵列的制备。铋化钢材料在刻蚀气体体系上有氯基刻蚀气体体系、甲基刻蚀气体体系、氯基甲基混合刻蚀气体体系,最后一种刻蚀气体体系气体种类最多,刻蚀参数调整难度最大;对比前两种刻蚀气体体系,氯基刻蚀气体体系刻蚀速率更高,考虑实验中器件性能差别不大,本文最终选取氯基刻蚀气体体系进行台面成型^[6-7]。

3 实验及结果

取 N 型 <111> 面 InSb 晶片,经清洗、表面腐蚀后,表面生长一层掩膜材料用于将材料表面与外界环境隔离,采用离子注入工艺将掺杂元素 Be 注入 N 型 InSb 材料中,退火加热激活注入杂质、消除注入损伤,经表面处理后形成具有良好表面状态的 PN 结结构材料;材料表面制备刻蚀掩膜,采用 BCl₃/Ar 刻蚀气体体系组合进行干法刻蚀工艺形成台面结型焦平面阵列制备^[4];去除掩膜结构,进行表面处理后淀积钝化层结构,进行电极孔及电极制备,最终形成具有完整器件结构的台面结型焦平面阵列的光敏器件,工艺流程如图 2 所示。

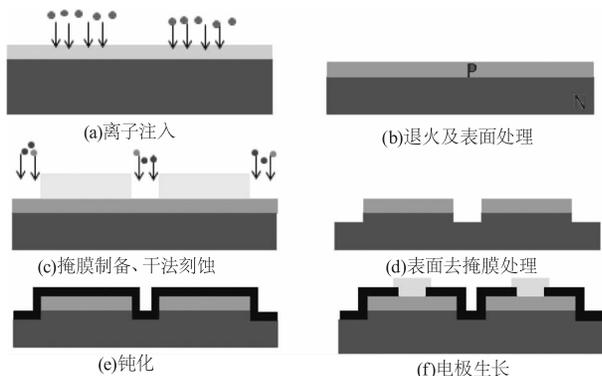


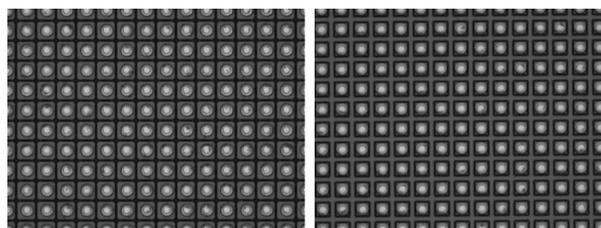
图 2 器件制备工艺流程

Fig. 2 Manufacturing process of device

设计 128×128 面阵规格、像元中心间距 $15 \mu\text{m}$ 、像元间距 $1 \mu\text{m}$ 的光敏芯片光刻版图,台面刻蚀后焦平面阵列形貌如图 3 (a) 所示,对比图 3 (b) 湿法腐蚀工艺效果,刻蚀工艺制备的焦平面阵列,像元间隙可缩小到 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,像元占空比可达到 70 % 左右,而相同光刻线宽的情况下腐蚀工艺制备的器件占空比约 42 %,像元占空比有明显提升,可明显提升组件的灵敏度与空间分辨率。

按图 2 描述工艺流程进行器件流片,对器件进行 $I-V$ 测试,测试结果如图 4 所示,开路电压 $65 \sim 75 \text{ mV}$,零偏电流 $7 \sim 10 \text{ nA}$,反偏电压测至 -1 V 时仍能保持很好的性能曲线。将光敏芯片与电路芯片

倒装互连、封装组件后进行测试,测试性能参数表 2 所示。组件参数性能表现良好。



(a) 刻蚀工艺制备台面结型效果图 (b) 腐蚀工艺制备台面结型效果图

图 3 焦平面阵列效果图

Fig. 3 Effect picture of focal plane array

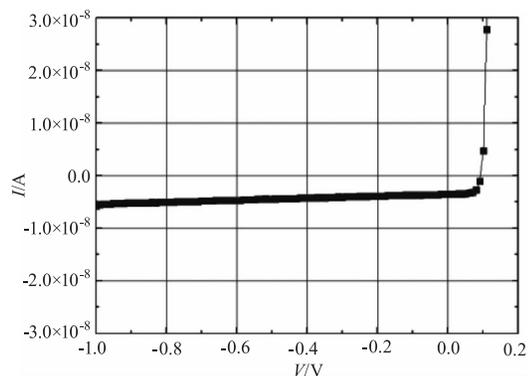


图 4 $128/15 \mu\text{m}$ 器件 $I-V$ 特性图

Fig. 4 $I-V$ characteristics of $128/15 \mu\text{m}$ device

表 2 $128/15 \mu\text{m}$ 组件测试结果

Tab. 2 the main performances of $128/15 \mu\text{m}$ FPAs

测试项	测试结果
峰值响应率	5.9×10^9
峰值探测率	1.48×10^{11}
盲元率/%	0.036
响应率不均匀性/%	5.6

在此基础上,设计 128×128 ($10 \mu\text{m}$)、像元间距 $1 \mu\text{m}$ 的光敏芯片光刻版图进行进一步的窄间距器件试制探索(器件形貌图如图 5 所示),从工艺实现角度来看,占空比可达 64 % 左右, $I-V$ 性能测试结果显示器件性能表现良好且稳定。

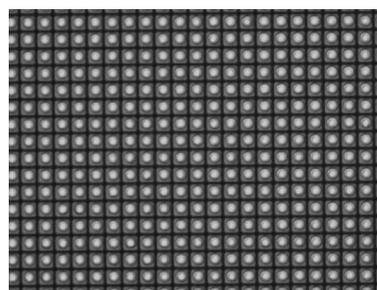
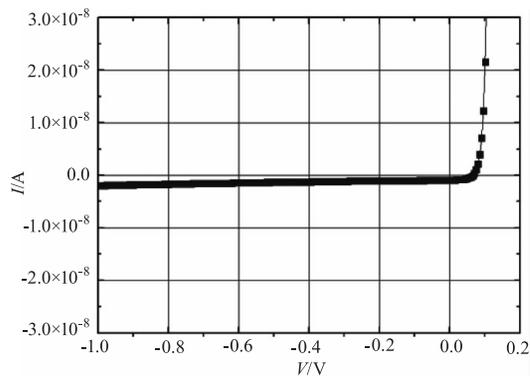


图 5 $128/10 \mu\text{m}$ 器件形貌图

Fig. 5 The morphology of $128/15 \mu\text{m}$ device

图6 128/10 μm 器件 $I-V$ 特性图Fig. 6 $I-V$ characteristics of 128/15 μm device

4 总 结

本文针对国外技术路线,研究采用离子注入技术、干法刻蚀技术,初步实现了 128×128 阵列规格 $15 \mu\text{m}$ 像元中心间距的碲化铟中波红外探测器的制备,并通过组件封装测试了器件性能,组件性能结果良好,在此基础上首次进行了 $128/10 \mu\text{m}$ 面阵规格光敏芯片性能的研制, $128/10 \mu\text{m}$ 器件同样表现出良好的性能特点,像元间距缩小至 $1 \mu\text{m}$,有效提高占空比。本文的研究内容初探离子注入技术、干法刻蚀技术的应用,为后续小型化、轻型化、高分辨率红外焦平面探测器的进一步研发与制备奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] ZHAO Jianzhong. Development situation and trend of InSb infrared focal plane array[J]. Infrared Technology, 2016, 38(11):905-913. (in Chinese)
赵建忠. InSb 焦平面探测器的发展现状与趋势[J]. 红外技术, 2016, 38(11):905-913.
- [2] MU Hongshan. Status and progress of InSb IRFPA detector [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(4):394-399. (in Chinese)
牟宏山. InSb 红外焦平面探测器现状与进展[J]. 激光与红外, 2016, 46(4):394-399.
- [3] DU Hongyan. PN junction in InSb by Be ion implantation [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(2):161-164. (in Chinese)
杜红燕. InSb 中 Be 离子注入成结研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(2):161-164.
- [4] ZHANG Guodong, SUN Weiguang, NI Yongping. Planar InSb photodiodes array chips fabricated by Mg ions implantation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(1):19-22. (in Chinese)
张国栋, 孙维国, 倪永平. Mg 离子注入成结制备 InSb 光电二极管阵列研究[J]. 激光与红外工程, 2005, 34(1):19-22.
- [5] LI Zhonghe, LI Haiyan, DU Hongyan, et al. Study of InSb IRFPA with planar PN junction [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(7):814-816. (in Chinese)
李忠贺, 李海燕, 杜红燕, 等. 平面 PN 结 InSb 红外焦平面探测器的研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(7):814-816.
- [6] TAN Zhen, KANG Zhe, LI Haiyan. Study of mesa etching for InSb infrared focal plane arrays[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(1):72-75. (in Chinese)
谭振, 亢喆, 李海燕. InSb 红外焦平面器件台面刻蚀工艺研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(1):72-75.
- [7] LI Haiyan, TAN Zhen, CHEN Huiqing, et al. The selection of Ar content in the dry etching of InSb material[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12):1503-1507. (in Chinese)
李海燕, 谭振, 陈慧卿, 等. Mg 离子注入成结制备 InSb 光电二极管阵列研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(12):1503-1507.