

InSb 红外焦平面阵列探测器湿法刻蚀

沈祥伟¹, 吕衍秋^{1,2}, 刘 炜¹, 曹先存^{1,2}, 何英杰¹

- (1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;
2. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 随着大规模 InSb 红外焦平面(FPA)器件的发展, 探测器制备的传统湿法刻蚀工艺已越来越难以满足新工艺要求。介绍了一种用于制备 InSb 红外焦平面探测器的新湿法刻蚀工艺: 使用适当比例的柠檬酸/H₂O₂ 系刻蚀剂代替现有乳酸/硝酸系刻蚀剂, 同时采用 N₂ 气泡搅拌刻蚀装置来辅助刻蚀。通过实验对比分析表明, 新刻蚀工艺可以很好地解决原湿法刻蚀横向刻蚀和下切效应, 提高了刻蚀均匀性和平整度, 减小了表面粗糙度, 并明显降低了 InSb 器件的漏电流, 提高了电性能。

关键词: InSb 焦平面阵列; 湿法刻蚀; 柠檬酸/H₂O₂ 系刻蚀剂; N₂ 搅拌

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2805-05

Wet etching of InSb IRFPA detectors

Shen Xiangwei¹, Lv Yanqiu^{1,2}, Liu Wei¹, Cao Xiancun^{1,2}, He Yingjie¹

- (1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471009, China)

Abstract: With the development of InSb large-scale Infrared Focal Plane Arrays (IRFPA), wet etching process has not met the new technological requirement of IRFPA. A novel wet etching process was expatiated with suitable ratio citric acid/H₂O₂ as etchant instead of lactic acid/nitric acid in being and assistant etching facility using N₂ agitation. The results from comparison and analysis of the experiment clearly indicate that the surface morphology etched by new process, compared with the conventional process, has less lateral etching and mesa trench, more surface uniformity and lower roughness. Otherwise, the electrical properties is improved with lower leak current.

Key words: InSb focal plane arrays; wet etching; citric acid/H₂O₂ etchant; N₂ agitation

收稿日期: 2014-01-10; 修订日期: 2014-02-14

基金项目: 中航工业集团公司技术创新基金(2011D01406)

作者简介: 沈祥伟(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外探测器技术方面的研究。Email: shenxw2008@sina.cn

0 引言

III-V 族半导体材料 InSb 具有较高的电子迁移率(最高约 $78\,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$)和较窄的禁带宽度(300 K 时约 0.17 eV)，基于 InSb 焦平面阵列探测器技术凭借其灵敏度高、工艺相对成熟、成本效益好等优点，在近 20 年以来取得了飞速发展^[1-4]。InSb 焦平面器件已大量应用于各种红外制导和热成像装置中；在民用方面，InSb 热成像技术也被广泛应用于医学、消防、工业监视及森林保护等多个领域。

湿法刻蚀相对于干法刻蚀具有操作简单、成本低、损伤小等优点，是制备台面结构 InSb 光电探测器芯片的关键工艺之一^[5-9]。刻蚀效果对探测器芯片性能有重要影响，因为刻蚀工艺决定了台阶的侧向尺寸和表面形貌，而台阶的尺寸结构和表面形貌直接影响着钝化效果，尤其对于窄禁带半导体材料，钝化层的优劣直接影响着光电二极管漏电流和阻抗的大小^[7]。

为了得到合适的刻蚀表面，国内外学者已研制了许多湿法刻蚀剂并对多种湿法刻蚀工艺进行了深入研究^[8-10]。目前，制备台阶型 InSb 光电探测器通常使用乳酸/硝酸系刻蚀剂。但随着焦平面阵列器件的发展，芯片总面积不断增加，单个像元尺寸和间距越来越小，现有的湿法刻蚀已越来越难以满足工艺要求，主要体现在横向钻蚀和下切效应严重，刻蚀表面的均匀性和重复性差，深刻蚀时表面粗糙度大，表面平整度差。这些问题会导致 InSb FPA 的填充因子降低，或不能满足芯片背减薄、去除损伤层等工艺的要求，从而最终影响探测器的电学及光学性能和产品的合格率。

为了很好地解决上述难题，文中介绍一种湿法刻蚀工艺：通过配制适当比例的柠檬酸/ H_2O_2 系刻蚀剂代替现有乳酸/硝酸系刻蚀剂，同时采用 N_2 搅拌刻蚀装置来减小横向刻蚀和下切效应，提高刻蚀均匀性和平整度，减小表面粗糙度。

1 实验方法

实验采用 n 型 InSb 衬底。芯片制备时，在 n 型衬底上通过扩散 Cd 得到 p 型层，利用光刻、湿法刻蚀工艺在 InSb 衬底上得到台阶型 pn 结，然后在台阶表面溅射钝化层并蒸镀金电极。图 1 为 InSb 台面结构的制备流程图。

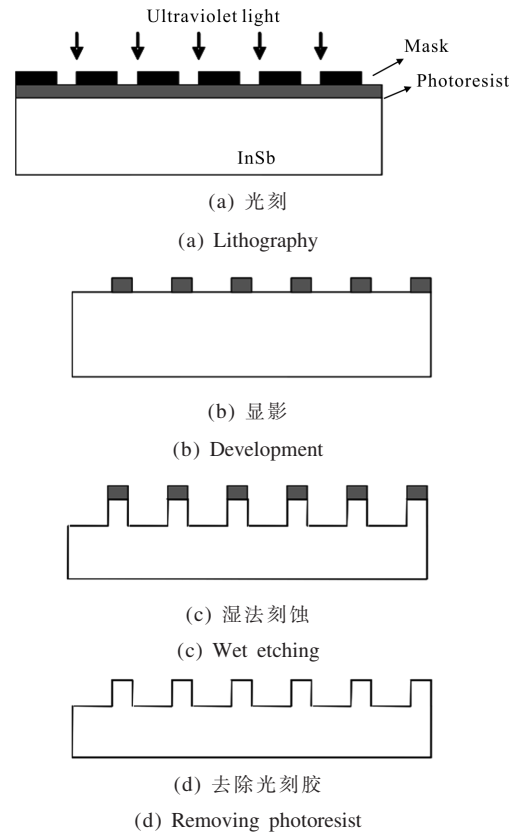


图 1 InSb 台面结构的制备流程图

Fig.1 Flow diagram of InSb mesa structure

在湿法刻蚀过程中，采用新的合适配比的柠檬酸/ H_2O_2 系刻蚀剂，用真空笔吸住 InSb 样片背面，并采用 N_2 气泡搅拌刻蚀装置作为新刻蚀工艺，代替现有的乳酸/硝酸系刻蚀工艺进行湿法刻蚀实验。 N_2 气泡搅拌刻蚀装置经刻蚀装置底部的通气管路充入氮气，并经带有孔径大小为 $\Phi=0.3\text{ mm}$ 的多孔薄膜产生大小均匀的氮气泡辅助刻蚀，从而达到提高刻蚀均匀性、减小刻蚀表面粗糙度的目的。整个刻蚀装置放在恒温槽中，使刻蚀剂温度保持在 30°C 。图 2 为湿法刻蚀示意图。实验结束后，借助台阶仪、体式显微镜、扫描电镜

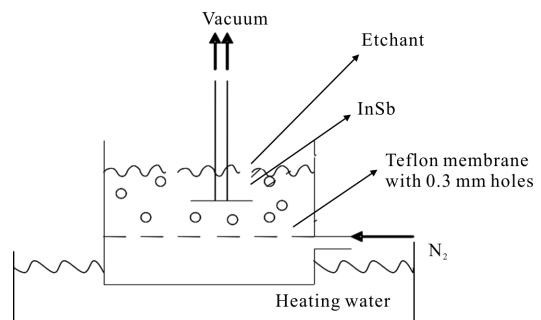


图 2 湿法刻蚀示意图

Fig.2 Schematic diagram of wet etching

(SEM)、探测器芯片测试系统等对柠檬酸/H₂O₂ 和乳酸/硝酸系刻蚀剂的刻蚀结果作对比分析。

2 实验结果与分析

2.1 表面形貌分析

经反复实验,确定了合适配比的柠檬酸/H₂O₂ 系刻蚀剂,得到的芯片刻蚀效果更佳。此时刻蚀图形线条清晰完整,横向钻蚀和下切效应得到很好的控制。表 1 是新刻蚀工艺与原刻蚀工艺刻蚀效果的对比结果。

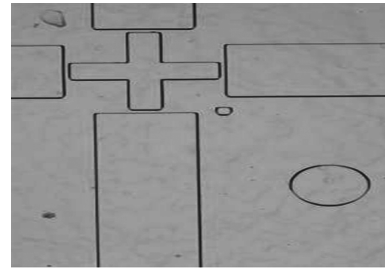
表 1 不同刻蚀工艺所得图形尺寸与掩模板图形尺寸对比

Tab.1 Comparison of pattern dimensions between mask and etched structures derived from different etching process

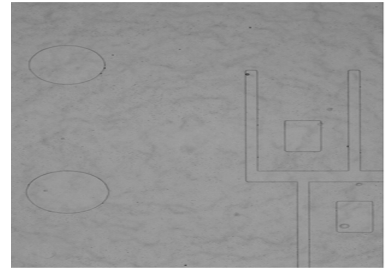
| Mask/ μm | Lactic acid/ nitric acid 6 min/ μm | Citric acid/ H ₂ O ₂ 6 min/ μm | Lactic acid/ nitric acid 12 min/ μm | Citric acid/ H ₂ O ₂ 12 min/ μm |
|---------------------|---|---|--|--|
| 20 | 30 | 22 | 35 | 26 |
| 60 | 70 | 65 | 72 | 66 |
| 70 | 80 | 72 | 85 | 76 |
| 150 | 160 | 155 | 165 | 157 |
| 200 | 170 | 202 | 210 | 204 |

从表1中可以看出,当掩模版图形尺寸分别为20、60、70、150、200 μm 时,用原刻蚀工艺湿法刻蚀6 min,图形横向钻蚀平均达10 μm ,而用新刻蚀工艺湿法刻蚀6 min,图形横向钻蚀平均为3.2 μm ;深刻蚀(刻蚀12 min)时,原刻蚀工艺图形横向钻蚀平均达13.4 μm ,新刻蚀工艺横向钻蚀平均为5.8 μm 。并且随着图形尺寸的减小,两种刻蚀工艺相对横向钻蚀量都不断增大,但相同图形尺寸时新刻蚀工艺相对横向钻蚀量远小于原刻蚀工艺。这是由于相对乳酸/硝酸系刻蚀剂,在柠檬酸/H₂O₂ 系刻蚀剂湿法刻蚀过程中速率限制机制起主导作用,刻蚀均匀性和重复性较好,横向钻蚀和下切效应不明显。

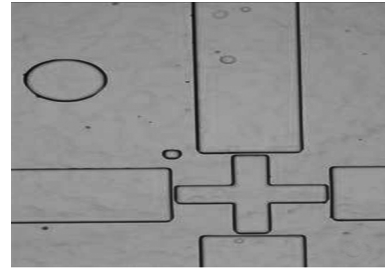
图3显示的是原刻蚀工艺与新刻蚀工艺分别湿法刻蚀InSb 6 min 和 12 min 时图形的显微形貌图。从图中可知,在湿法刻蚀相同时间时,新刻蚀工艺刻蚀得到的图形刻蚀图形边缘线条相对较细,说明刻蚀图形边缘陡直,横向钻蚀小,尤其是深刻蚀时效果更明显,这与表1结果一致。



(a) 原刻蚀工艺刻蚀 6 min
(a) Primary process with 6 min



(b) 新刻蚀工艺刻蚀 6 min
(b) New process with 6 min



(c) 原刻蚀工艺刻蚀 12 min
(c) Primary process with 12 min

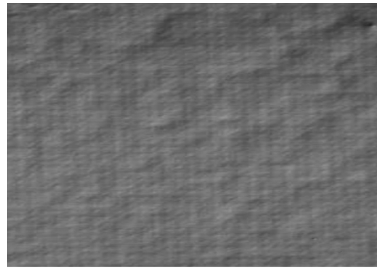


(d) 新刻蚀工艺刻蚀 12 min
(d) New process with 12 min

图3 原刻蚀工艺与新刻蚀工艺刻蚀图形显微形貌图
Fig.3 Microscopic morphology of primary etching process and new etching process with different time

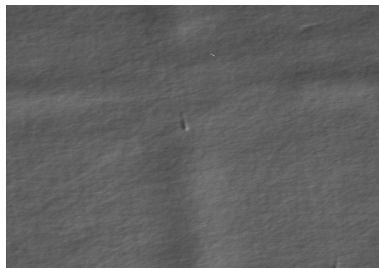
图4显示的是新刻蚀工艺与原刻蚀工艺深刻蚀InSb 芯片的显微形貌图。从图中可以看出,相比较原有的乳酸/硝酸系刻蚀工艺,深刻蚀时新刻蚀工艺刻蚀表面更均匀、平整,表面粗糙度变小。因为采用N₂

搅拌辅助刻蚀可以将刻蚀反应物随气泡带离刻蚀表面,使晶体表面刻蚀剂及时得到更新,进而达到均匀刻蚀效果,且此过程不会对刻蚀表面造成损伤。



(a) 原刻蚀工艺深刻蚀形貌图

(a) Primary process while deep etching



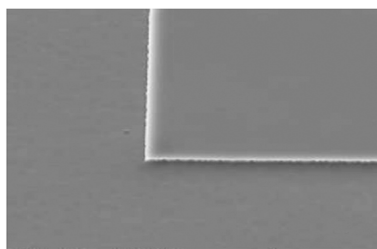
(b) 新刻蚀工艺深刻蚀形貌图

(b) New process while deep etching

图 4 新刻蚀工艺与原刻蚀工艺深刻蚀 InSb 显微形貌图

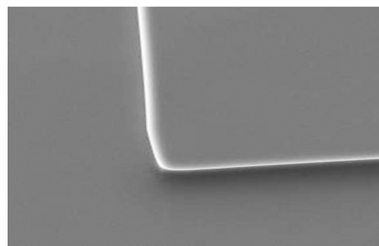
Fig.4 Microscopic morphology comparison of deep etching patterns between primary etching process and new etching process

图 5 为新刻蚀工艺与原刻蚀工艺刻蚀深度相近时的 SEM 形貌对比图。从图 5(a)和(b)中可以看出,



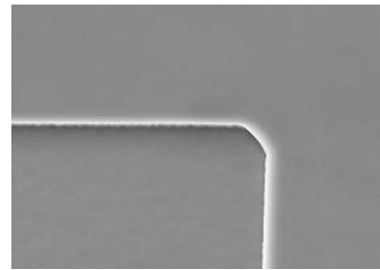
(a) 新刻蚀工艺刻蚀深度 1.95 μm

(a) Etching depth 1.95 μm by new process



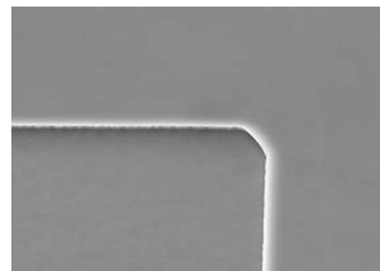
(b) 原刻蚀工艺刻蚀深度 1.93 μm

(b) Etching depth 1.93 μm by primary process



(c) 为新刻蚀工艺刻蚀深度 3.35 μm

(c) Etching depth 3.35 μm by new process



(d) 为原刻蚀工艺刻蚀深度 3.40 μm

(d) Etching depth 3.40 μm by primary process

图 5 新刻蚀工艺与原刻蚀工艺刻蚀图形 SEM 形貌图

Fig.5 SEM images of primary etching process and new etching process

新刻蚀工艺刻蚀图形线条清晰、陡直,棱角分明。从图 5(c)和(d)可以看出,新刻蚀工艺相对原刻蚀工艺刻蚀图形下切效应明显减小,刻蚀效果明显优于原刻蚀工艺,这对后续钝化工艺显得尤为重要。

2.2 电性能分析

在同一批 InSb 晶片中选取两片,分别采用新湿法刻蚀工艺和原湿法刻蚀工艺(其他工艺均相同)制备成红外探测器芯片,具体步骤是先湿法刻蚀制备台面结构,然后溅射 ZnS 钝化膜,最后蒸镀金电极。分别通过探测器芯片测试系统测试 I-V 特性,测试背景为液氮 77 K,测试结果如图 6 所示。从图中可

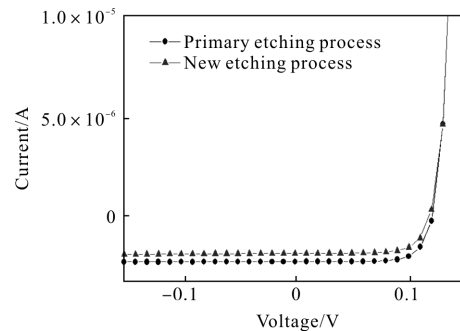


图 6 新刻蚀工艺与原刻蚀工艺制备 InSb 器件 I-V 特性分析

Fig.6 I-V characteristic analysis of InSb device prepared using different etching process

知,柠檬酸/ H_2O_2 系刻蚀工艺所得探测器芯片暗电流明显小于乳酸/硝酸系刻蚀工艺,柠檬酸/ H_2O_2 系刻蚀工艺漏电比为1.01,明显优于原刻蚀工艺的1.06。这可能是由于新刻蚀工艺减小了刻蚀台阶的下切效应和表面粗糙度,可以更容易获得均匀、连续的ZnS钝化膜层,起到很好的保护和钝化作用,进而降低了像元p-n结的漏电流。

3 结论

文中通过采取柠檬酸/ H_2O_2 系刻蚀剂代替现有乳酸/硝酸系刻蚀剂、氮气搅拌辅助刻蚀等措施,优化现有InSb FPA探测器湿法刻蚀工艺,使湿法刻蚀InSb晶片时横向刻蚀和下切效应大大减小,并降低了InSb器件的漏电流,提高了电性能,尤其在深刻蚀时,刻蚀均匀性和平整度得到很好的改善,减小了表面粗糙度,能够满足探测器芯片制备过程中像元加工精度、均匀性以及去除损伤层等要求,为今后InSb FPA探测器进一步研制提供了实用的参考价值。

参考文献:

- [1] Kim Y H, Lee J Y, Noh Y G, et al. Effect of two-step growth on the heteroepitaxial growth of InSb thin film on Si (001) substrate: A transmission electron microscopy study [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(031919): 1-3.
- [2] Rotelante R. Why the IR detector market is in flux [J]. *Laser Focus World*, 1999, 35: 65-68.
- [3] Chen Boliang, Sun Weiguo, Liang Pingzhi, et al. Development and applications of staring InSb for focal plane array assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(5): 419-423. (in Chinese)
陈伯良, 孙维国, 梁平治, 等. InSb 凝视红外焦平面组件研制和应用[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(5): 419-423.
- [4] Ashley T, Burke T M, Emeny M T, et al. Epitaxial InSb for elevated temperature operation of large IR focal plane arrays [C]//SPIE, 2003, 5074: 95-102.
- [5] GadelRab S M, Miri A M, Chamberlain S G. A comparison of the performance and reliability of wet-etched and dry-etched α -Si: HTFT's [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, 45(2): 560-563.
- [6] Porkolab G A, Chen Y J, Merritt S A, et al. Wet-chemistry surface treatment for dark-current reduction that preserves lateral dimensions of reactive ion etched $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ p-i-n diode photodetectors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(4): 490-492.
- [7] Chang Kow-Ming, Luo Jiunn-Jye, Chiang Cheng-Der, et al. Wet etching characterization of InSb for thermal imaging applications [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(3A): 1477-482.
- [8] Ilan Bloom, Yael Nemirovsky. Bulk lifetime determination of etch-thinned InSb wafers for two-dimensional infrared focal plane array [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1992, 40(2): 809-812.
- [9] Wei Shuling, Ying Jiongming. Wet etching of InSb for focal plane arrays [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(9): 899-901. (in Chinese)
韦书领, 应明炯. InSb 晶片湿法化学刻蚀研究 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(9): 899-901.
- [10] Chen Huijuan, Guo Jie, Ding Jiaxin, et al. Study of mesa etching for a InAs/GaSb superlattice infrared detector [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2008, 45(5): 298-301. (in Chinese)
陈慧娟, 郭杰, 丁嘉欣, 等. InAs/GaSb 超晶格红外探测器台面湿法腐蚀研究 [J]. *微纳电子技术*, 2008, 45(5): 298-301.