

文章编号: 1672-8785(2024)08-0018-06

铋化锑焦平面器件背面的湿法 腐蚀技术研究

米南阳 刘园园 李忠贺 吴 卿 赵建忠

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 湿法腐蚀可以有效地去除芯片在背减薄过程中因机械作用产生的损伤, 提升器件的量子效率。为了获得一种合适的湿法腐蚀方法, 研究了以氢氟酸、盐酸和乳酸为主的 3 种不同体系的酸性铋化锑腐蚀液。通过金相显微镜和原子力显微镜的表征结果选取最优的腐蚀液体系。在此基础上继续优化了氢氟酸腐蚀液的浓度和配比, 研究了腐蚀液的腐蚀速率和一致性。最后, 使用优化后的腐蚀液处理铋化锑芯片, 研究了该芯片在 77 K 温度下的性能。电平面结果显示, 该腐蚀液可以有效地去除芯片表面的损伤, 而且器件电压信号 V_s 达到 485 mV。湿法腐蚀技术成功应用于芯片背减薄后的表面处理, 对于铋化锑背面处理技术的研究有重要意义。

关键词: 铋化锑; 化学腐蚀; 背面处理

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.08.003

Study on Wet Etching Technology for the Back of InSb Focal Plane Devices

MI Nan-yang, LIU Yuan-yuan, LI Zhong-he, WU Qing, ZHAO Jian-zhong

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Wet etching can effectively remove the damage caused by mechanical effects during the back thinning process of chips, and improve the quantum efficiency of devices. In order to obtain a suitable wet etching method, three different acidic indium antimonide etching solutions were studied, mainly consisting of hydrofluoric acid, hydrochloric acid and lactic acid. The optimal etching solution system was selected based on the characterization results of metallographic microscopy and atomic force microscopy. On this basis, the concentration and ratio of hydrofluoric acid etching solution were further optimized, and the etching rate and consistency of the etching solution were studied. Finally, the optimized etching solution was used to treat the indium antimonide chip, and the performance of the chip at 77 K temperature was studied. The planar results show that the etching solution can effectively remove the damage on the chip surface, and the device voltage signal reaches 485 mV. The successful application of wet etching technology in surface treatment of chip back thinning has important significance for the research of indium antimonide back treatment technology.

Key words: InSb; chemical corrosion; back treatment

收稿日期: 2023-10-16

作者简介: 米南阳(1996-), 男, 河南人, 助理工程师, 主要从事红外探测器器件设计和工艺开发。

E-mail: nanyangmi@163.com

0 引言

作为常见的 III-V 族化合物半导体材料, 铟化钢凭借优良的物理性质, 被广泛应用于红外制导、手持式热像仪以及太空监控等领域。铟化钢焦平面阵列器件一般采用背照射的方式收集光能量, 多数光生载流子必须迁移一段距离才能达到 p-n 结附近被吸收, 同时光生载流子在材料内迁移的过程中会不可避免地因复合而损失。因此, 通过背面减薄工艺将铟化钢材料的厚度降低, 可以有效地提升器件的量子效率^[1]。铟化钢的电荷收集效率与 N 区厚度的关系如图 1 所示^[2]。

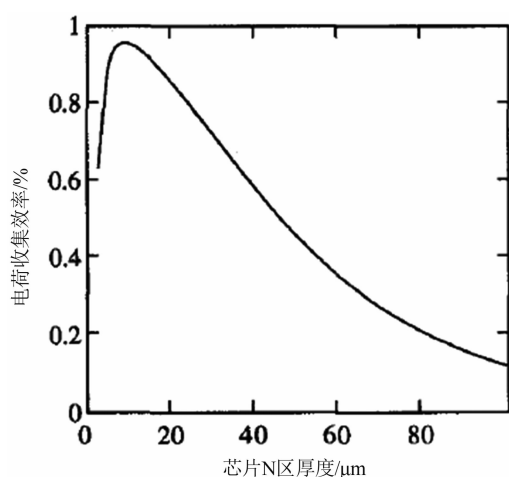


图 1 InSb 器件的电荷收集效率与 N 区厚度的关系曲线

常见的降低铟化钢器件背面厚度的技术有机械化学磨抛和金刚石单点切削两种。其中, 机械化学磨抛的原理是化学作用和物理作用耦合, 在一定的压力条件下, 铟化钢材料表面被摩擦而去除表面厚度。机械化学磨抛的优点在于芯片表面平整光滑, 平行度一般小于 $2\ \mu\text{m}$, 但是工艺技术难度较大。金刚石单点切削是利用高速旋转的金刚石刀片对铟化钢背面进行逐层减薄, 优点是面型质量高、工艺重复性好, 但是对设备要求较高。

除了在迁移过程中的复合, 少数载流子在器件表面也会出现复合。少数载流子的表面复合速率与器件量子效率的关系如图 2 所示^[2]。可以看出, 器件的量子效率受表面复

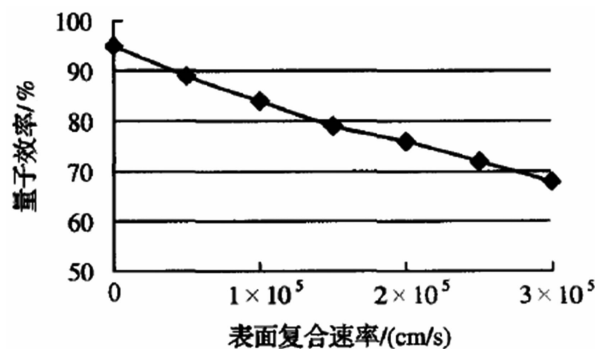


图 2 InSb 器件的量子效率与表面复合速率的关系曲线
合速率的影响很大。为了降低少数载流子在器件表面的复合, 提高量子效率, 当器件减薄完成后, 需要对背表面进行处理。处理的技术方式主要有化学湿法腐蚀以及生长减反膜。

在器件的背面减薄过程中, 不论是机械化学磨抛还是金刚石单点切削, 铟化钢材料表面都会因为物理作用而留下损伤。这些损伤会成为器件表面的复合中心, 导致光生载流子复合而降低器件的量子效率。在生产过程中发现, 因机械磨抛导致的典型损伤如图 3 所示。湿法腐蚀可以去除因磨抛或者切削留下的损伤, 减少复合中心。选择合适的腐蚀液可以保证器件表面的平整度, 控制腐蚀速率, 并且不引入新的缺陷^[3]。已报道的文献中, 有研究人员提及了机械化学磨抛后的化学腐蚀工艺, 但是从结果上来看湿法腐蚀工艺仍需要优化^[4]。



图 3 典型的器件表面损伤

为了解决在机械化学磨抛过程中芯片表面产生损伤的问题,本文对铟化铟器件背面的腐蚀液展开了研究,主要分析了不同腐蚀液体系对铟化铟的腐蚀效果以及腐蚀液的腐蚀速率和均一性。该研究结果对于铟化铟背减薄后的背面处理技术有重要的意义。

1 实验

本文以台面结构的 128×128 铟化铟焦平面红外探测器芯片为研究对象,器件的制作过程如下:采用直拉法获得铟化铟晶锭,对晶锭进行切割和抛光,获得铟化铟晶圆;经过热扩散工艺在铟化铟晶圆表面获得 p-n 结;铟化铟晶圆经过钝化、金属化工艺后,和 Si 读出电路倒装互连;采用机械化学磨抛的方法将倒装互连后的器件背表面铟化铟厚度降低至 $20 \sim 30 \mu\text{m}$;最后使用不同配比的化学腐蚀液对器件背表面进行腐蚀,以去除损伤层。

本文研究了 3 种化学腐蚀液体系:氢氟酸+过氧化氢腐蚀液、乳酸+硝酸腐蚀液以及盐酸+硝酸腐蚀液。首先将完成背面机械化学磨

抛的芯片分别在 3 种不同腐蚀液中腐蚀,使用金相显微镜、原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 等工具表征腐蚀后器件表面的平整度、缺陷等情况,然后选择其中一种腐蚀效果最优的腐蚀液。

继续研究腐蚀液的浓度等因素对腐蚀速率和均一性的影响,最终确定一个最佳的腐蚀液配方。使用最佳配方对减薄后的铟化铟器件进行背表面的腐蚀处理。处理完成后将器件封装到杜瓦结构中,在 77 K 温度条件下进行光电性能测试(探测目标为 25°C 黑体)。

2 实验结果及分析

2.1 不同腐蚀液体系

3 块完成机械化学磨抛后的芯片,以上下晃动腐蚀的方法分别在氢氟酸+过氧化氢腐蚀液、乳酸+硝酸腐蚀液以及盐酸+硝酸腐蚀液中腐蚀 1 min。腐蚀完成后芯片表面冲水并使用氮气吹干。首先,使用金相显微镜在物镜放大 $10 \sim 20$ 倍以及偏光条件下观察腐蚀后芯片的表面情况。3 种腐蚀液的腐蚀结果如图 4 所示。

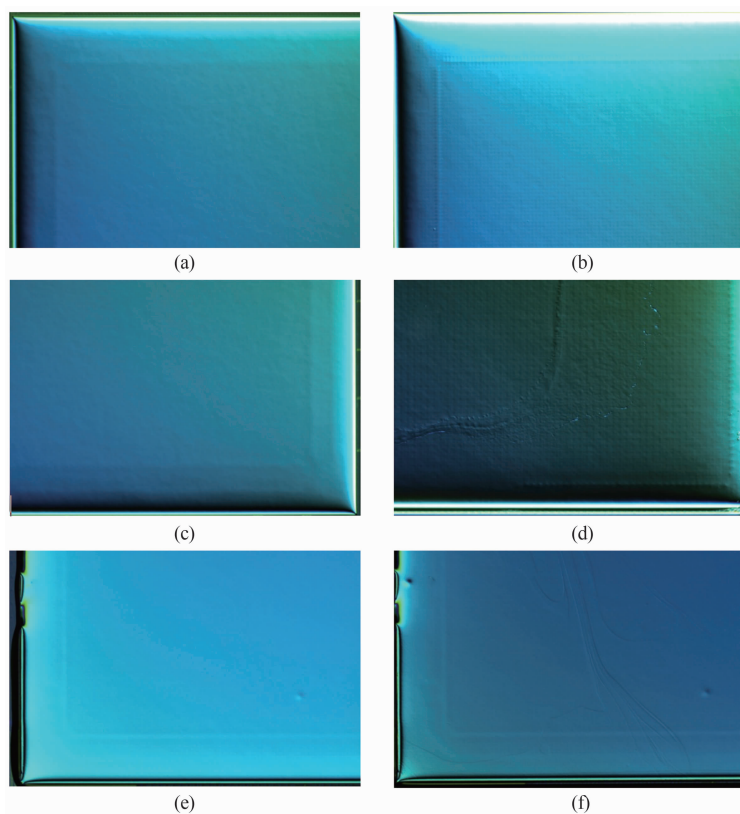


图 4 芯片在不同腐蚀液中腐蚀后的表面状态

图 4(a)和图 4(b)所示分别为芯片在氢氟酸+过氧化氢腐蚀液中腐蚀前后的表面情况。可以看出,芯片在完成机械化学磨抛后表面较为平整、光滑;使用氢氟酸+过氧化氢腐蚀液腐蚀 1 min 后,芯片表面仍保持平整、光滑,而且未新增明显的缺陷和损伤。

图 4(c)和图 4(d)所示分别为芯片在乳酸+硝酸腐蚀液中腐蚀前后的表面情况(腐蚀时间和腐蚀方式与第一种腐蚀液保持一致)。可以看出,芯片在腐蚀后表面明显凹凸不平,并且呈曲线连续分布在芯片表面。这说明芯片在乳酸+硝酸腐蚀液中腐蚀的表面均一性较差。此外,在乳酸+硝酸腐蚀液的作用下,芯片表面出现了亮白色的损伤。

图 4(e)和图 4(f)所示分别为芯片在盐酸+硝酸腐蚀液中腐蚀前后的情况(腐蚀时间和腐

蚀方式保持一致)。可以看出,腐蚀后的芯片表面出现了多处明显的弧状凸起,说明在盐酸+硝酸腐蚀液中,芯片表面的一致性也较差。

为了进一步表征不同体系腐蚀液的腐蚀效果,使用 AFM 对上述 3 块芯片的表面进行粗糙度测试。为了避免台面结构应力导致的芯片形变,在粗糙度测试时选择芯片边缘位置,测量区域是边长为 $166\ \mu\text{m}$ 的正方形。图 5(a)所示为完成机械化学磨抛后芯片表面的粗糙度结果,图 5(b)~图 5(d)所示分别为芯片在氢氟酸+过氧化氢腐蚀液、乳酸+硝酸腐蚀液以及盐酸+硝酸腐蚀液中腐蚀 1 min 后的表面粗糙度结果。

芯片完成机械化学磨抛后的表面粗糙度 S_a 为 $1.247\ \text{nm}$ 。芯片在氢氟酸+过氧化氢腐蚀液中腐蚀 1 min 后表面粗糙度 S_a 变为 $1.090\ \text{nm}$,比完成机械化学磨抛后有一定程度的下

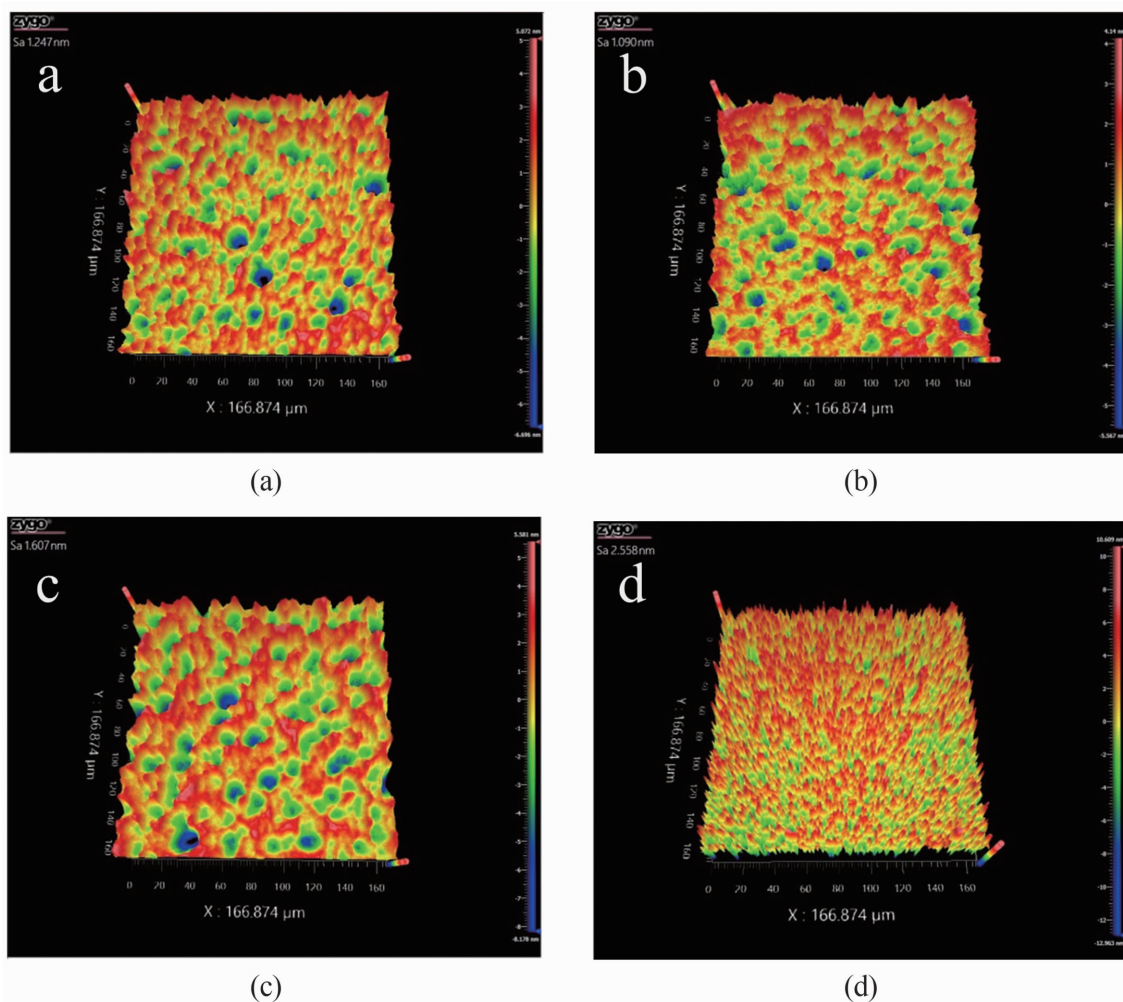


图 5 不同腐蚀液腐蚀后芯片表面的粗糙度

表 1 芯片腐蚀速率

点位	1	2	3	4	5	平均值
腐蚀速率/($\mu\text{m}/\text{s}$)	4.00	3.92	3.95	4.12	4.05	4.01

降,说明芯片在氢氟酸+过氧化氢腐蚀液中腐蚀后,可以获得平整、光滑的表面。芯片在乳酸+硝酸腐蚀液中腐蚀 1 min 后表面粗糙度 S_a 变为 1.607 nm,比腐蚀前明显增大。芯片在盐酸+硝酸腐蚀液中腐蚀 1 min 后表面粗糙度 S_a 为 2.558 nm,是 3 种腐蚀液中的最大值,说明使用该腐蚀液会导致芯片表面的平整度最差。AFM 测试结果与使用金相显微镜观察到的芯片表面情况相符合。

综合上述结果,芯片在氢氟酸+过氧化氢腐蚀液中的腐蚀效果最佳,腐蚀后表面粗糙度最低,说明表面平整光滑,并且未出现明显的表面缺陷、损伤等。

2.2 氢氟酸腐蚀液的速率及均一性

选定氢氟酸+过氧化氢腐蚀液后,进一步优化了腐蚀液的配比。将腐蚀液对铟化铟的腐蚀速率控制在合适区间内,既不影响工艺效率,也要确保腐蚀速率可控。选用一块完成机械化学磨抛的芯片,优化后在氢氟酸+过氧化氢腐蚀液中晃动腐蚀 1 min,测量并计算芯片腐蚀的速度以及腐蚀均一性。

在芯片的四周和中心选取 5 个点,分别测量各个点在腐蚀前后铟化铟的厚度,计算出优化后的氢氟酸+过氧化氢腐蚀液的腐蚀速率(结果见表 1)。铟化铟的厚度变化分别为 4.00 μm 、3.92 μm 、3.95 μm 、4.12 μm 和 4.05 μm 。优化的氢氟酸+过氧化氢腐蚀液对器件背面的平均腐蚀速率为 4.01 $\mu\text{m}/\text{min}$,腐蚀厚度的标准差为 0.071 μm 。以上结果说明优化后氢氟酸+过氧化氢腐蚀液对铟化铟器件的腐蚀速率可控,且腐蚀均一性较好。

2.3 结果分析

铟化铟的化学腐蚀从本质上包含两个主要过程:铟化铟的氧化以及氧化物在酸性溶液中的溶解^[5]。从以上实验结果可以发现,腐蚀液中氧化剂和酸的种类对铟化铟芯片的腐蚀效果

有决定性作用。平衡好氧化和溶解这两个过程,有助于获得光滑、平整的铟化铟表面^[6]。

以硝酸为氧化剂的腐蚀液,腐蚀后铟化铟均呈现出粗糙的表面。这可能是因为腐蚀液在与铟化铟反应时会放出大量的热,而硝酸不稳定,遇热时会分解出气体;这些气体可能会冲击或者附着在铟化铟的表面,扰乱铟化铟表面的化学反应过程,导致腐蚀后的芯片表面粗糙,并且伴有蚀坑和凸起^[7]。

以氢氟酸为酸和双氧水为氧化剂的腐蚀液,腐蚀后芯片表面光滑平整。这是因为双氧水在与铟化铟反应时不产生气泡,芯片在腐蚀过程中可以保证表面的光滑平整。此外,氢氟酸为弱酸,在腐蚀液中加入适量的缓冲试剂,可以在反应过程中保持 F 离子和 H 离子浓度稳定,有助于更好地控制反应速率并且提高反应的一致性。因此,使用氢氟酸+过氧化氢腐蚀液可以获得更好的腐蚀表面。

2.4 器件性能测试

为了进一步验证腐蚀液的效果,选取一个完成机械化学磨抛的器件,使用优化后的氢氟酸+过氧化氢腐蚀液进行化学腐蚀,腐蚀的目标深度为 4 μm 。将腐蚀后的器件封装至杜瓦中进行性能测试。当测试目标为 25℃ 黑体时,器件输出的电平图如图 6 所示。

组件的性能参数如表 2 所示。在 77 K 温度条件下,经化学腐蚀得到的铟化铟探测器没有失效像元,器件的噪声等效温差(Noise-Equivalent Temperature Difference, NETD)为 28.558 K,电压信号 V_s 为 485 mV。

值得注意的是,经湿法腐蚀后,电平图中未发现类似图 1 中的损伤,说明在机械抛光过程中芯片表面产生的损伤被有效去除,使得器件在测试中表现出良好的成像效果。以上各项测试结果表明,用氢氟酸+过氧化氢腐蚀液腐蚀后的铟化铟器件具有良好的性能。

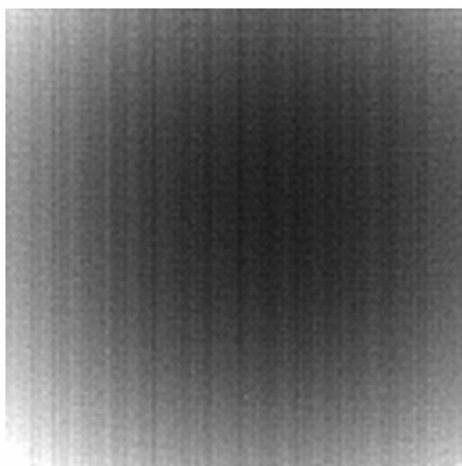


图 6 经化学腐蚀后器件的黑体成像图

表 2 组件性能参数

测试项	测试结果
盲元率	0%
电压信号 V_s	485 mV
NETD	28.558 mK
峰值响应率	5.57×10^9
响应率不均匀性	5.67%

3 结束语

通过实验研究可知, 氢氟酸+过氧化氢腐蚀液对锑化铟器件具有良好的化学腐蚀效果, 腐蚀后器件表面光滑、平整, 未出现新增损伤。使用优化后的氢氟酸+过氧化氢腐蚀液对机械化学磨抛后的芯片进行腐蚀处理。从黑体

成像图可以看到, 该腐蚀液可以有效地去除因磨抛产生的损伤, 表面一致性好。而且该器件的 NETD 和电压信号等参数结果均表现较好, 说明器件的电学性能优异。未来需要进一步研究氢氟酸腐蚀液的配比和浓度, 从而提高更大面阵芯片的腐蚀均一性, 促使湿法腐蚀技术适用于所有规格的芯片生产。

参考文献

- [1] 柏伟, 赵超, 龚志红. InSb 晶片的机械加工损伤层研究 [J]. 红外, 2017, 38(1): 6-11.
- [2] 孙维国, 黄水安. 空空导弹光电探测器设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 沈祥伟, 吕衍秋, 刘炜, 等. InSb 红外焦平面阵列探测器湿法刻蚀 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2805-2809.
- [4] 肖钰, 李家发, 王淑艳, 等. 锑化铟焦平面器件背面减薄后的表面处理方法研究 [J]. 红外, 2020, 41(6): 7-11.
- [5] 何英杰, 王海珍. 锑化铟的腐蚀特性研究 [J]. 红外技术, 2011, 33(6): 323-327.
- [6] 郭胜. InSb 探测器芯片表面处理工艺的研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2019.
- [7] 耿东锋, 王海珍, 李明华, 等. InSb 焦平面器件表面未处理技术研究 [J]. 红外技术, 2011, 33(2): 96-99.