

文章编号 1004-924X(2016)02-0350-08

单晶硅各向异性湿法刻蚀的形貌控制

姚明秋^{1,2}, 唐彬², 苏伟²

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要:针对摆式微加速度计的制作,对利用两种添加剂共同修饰的 TMAH 刻蚀液的单晶硅湿法刻蚀技术及其相关刻蚀特性进行了研究。分析了两种添加剂之间的作用机理及对单晶硅湿法刻蚀的影响,选择合适的添加剂刻蚀液配比,实现了稳定的刻蚀形貌控制。通过两种添加剂的共同作用,获得了具有光滑刻蚀表面(粗糙度约为 1 nm)和良好凸角保护(凸角侧蚀比率小于 0.8)的刻蚀形貌。实验结果表明,在三重溶液(TMAH+Triton-X-100+IPA)下的刻蚀形貌具有明显优势。最后,基于添加剂对疏水性单晶硅材料的作用机理及表面张力调节,表面活性剂和酒精类添加剂之间的相互作用分析了刻蚀形貌发生变化的原因。以典型悬臂梁-质量块的制作为例,验证了采用该单晶硅刻蚀形貌控制方法可以获得微加速度计光滑的悬臂梁表面和无需凸角补偿的完整质量块。相比于其它制作工艺,该方法简单、易操作,有利于提高微电子器件的性能。

关键词:单晶硅;湿法刻蚀;形貌控制;三重溶液;表面粗糙度;凸角

中图分类号:TH703;TN305.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162402.0350

Morphologic control of wet anisotropic silicon etching

YAO Ming-qiu^{1,2}, TANG Bin¹, SU Wei¹

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)
* Corresponding author, E-mail: ivykaiser@163.com

Abstract: For fabrication of microaccelerometers with beam-mass structures, an anisotropic wet silicon etching technology based on ternary TMAH (tetramethyl ammonium hydroxide) solutions containing Triton and IPA was proposed and corresponding etching characteristics was investigated. The underlying mechanism between two kinds of additives (the Triton and IPA) and its effect on the wet silicon etching were analyzed. The appropriate ratio of additives was chosen to control the etching morphology. By a combined action of two kinds of additives, a mirror-like finish surface ($R_a \approx 1$ nm) and high reduction of undercutting (the ratio of undercut at the convex corner less than 0.8) were achieved synchronously. The experimental results show that the etched morphology has been dramatically improved by the ternary solutions. Furthermore, the reasons affecting the etched morphology were discussed, and the underlying mechanism on hydrophobic silicon surface, surface tension adjustment and

收稿日期:2015-08-20;修订日期:2015-09-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51305412);中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室研究基金资助项目(No. 2012CJMZZ00003)

the reciprocity between surfactant and alcohol were used to explain the new etched characteristics. Finally, by taking fabrication of a spring-mass structure for an example, the proposed method is verified by obtaining a very smooth cantilever and a complete mass structure without convex corner compensation. As compared to some other fabrication techniques, this method is very simple, easy to operate and useful in improving the quality of devices.

Key words: silicon; wet etching; morphological control; ternary solution; surface roughness; convex corner

1 引言

在微机电系统工艺中,依据单晶硅的各向异性刻蚀特性所发展起来的湿法刻蚀技术在制作微型器件,特别是惯性器件如加速度计的过程中发挥了巨大作用,内容涉及军事、民用等各个应用领域。与反应离子刻蚀(Reactive-Ion Etching, RIE)等干法刻蚀相比较,湿法刻蚀技术的刻蚀深度均一,三维结构丰富,生产效率高,工艺制作过程相对简单,且加工成本也更为低廉。

四甲基氢氧化铵(Tetramethylammonium Hydroxide, TMAH)是一种具有优良的刻蚀性能的各向异性刻蚀液,选择性好,低毒性、低污染,与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺相兼容,符合片上系统(System On A Chip, SOC)的发展趋势^[1]。TMAH正逐渐替代氢氧化钾(Potassium Hydroxide, KOH)和其他刻蚀液,成为实现微机电系统工艺中微三维结构的主要刻蚀液。为了改善单一TMAH刻蚀液的刻蚀特性开发新型微结构,科研人员提出并研究了一些方法,如金属杂质、添加剂(主要是表面活性剂类添加剂和酒精类添加剂)、超声波等。文献[2-3]探讨了ppb级的微量金属杂质对KOH湿法刻蚀的影响,发现Cu杂质会导致最大刻蚀速率晶面从 $\{210\}$ 附近移动到 $\{110\}$,但是刻蚀表面会变粗糙;文献[4-5]利用超声技术在KOH湿法刻蚀中得到了高品质表面质量的 $\{100\}$ 晶面。但添加金属会带入杂质,对刻蚀液造成污染,超声波会破坏器件结构。添加剂修饰的TMAH湿法刻蚀液能够同时改变刻蚀速率的各向异性 and 提高刻蚀表面质量^[6,7],为单晶硅湿法刻蚀技术的新发展提供了技术基础,近年来吸引了不少国内外科研人员从事在常用 $\{100\}$ 或 $\{110\}$ 面的添加剂修饰的湿法刻蚀特性的研究。

在TMAH刻蚀液中加入Triton X-100(曲拉通X-100)可以改变单晶硅的各向异性刻蚀特性,控制刻蚀形貌^[8,9];加入异丙醇等酒精类物质能够改变 $\{100\}$ 晶面和 $\{110\}$ 晶面的刻蚀速率比,并且能够改善晶面的表面粗糙度^[10]。以上研究在湿法刻蚀新特性方面取得了一些成功,但目前添加剂修饰的单晶硅湿法刻蚀存在较多问题,由于缺乏对添加剂作用的认识,还未能同时获得光滑的刻蚀表面和良好的凸角保护。然而,实际应用湿法刻蚀技术需要满足加工要求且需要稳定的刻蚀形貌。

本文以摆式微加速度计的制作为应用背景,对两种添加剂共同作用的TMAH湿法刻蚀技术进行研究,分析两种添加剂之间的作用机理及对单晶硅湿法刻蚀的影响,选择合适的添加剂刻蚀液配比,获得光滑的刻蚀表面的同时,在无凸角补偿的前提下具有较完整凸角形貌,实现了摆式微加速度计光滑悬臂梁和无凸角补偿完整质量块的加工。解决了由于粗糙悬臂梁带来的应力分布不均和需要精确计算的凸角补偿才能获得完整质量块的问题。

2 实验方法

以常用的4 int,电阻率为 $1\sim 10\ \Omega\cdot\text{cm}$,厚度为 $(400\pm 10)\ \mu\text{m}$ 的N型(100)单晶硅片为研究对象(因目前微器件加工中大部分以(100)硅片作为基底)。刻蚀液为25%(质量分数)的TMAH,相比于低浓度的TMAH,该浓度TMAH刻蚀液具有良好的刻蚀稳定性。添加剂主要包括表面活性剂和酒精类物质。考虑操作的简易和试剂低危害^[11],选取Triton X-100(分子式 $\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$, $n=9\sim 10$)作为非离子型表面活性剂代表,选取异丙醇IPA(isopropyl alcohol,分子式 $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)作为酒精类代表。样品刻

蚀完成经去离子水冲洗后,样品表面均无离子残留^[12]。

为了研究添加剂浓度对刻蚀特性的影响,选用 0.1%、0.25%、0.4% (v/v) 3 种不同浓度的 Triton-X-100 和 16%、26%、36% (v/v) 3 种不同浓度的 IPA 作为实验对象,刻蚀图形如图 1 所示。在刻蚀之前,硅片表面均采用热氧化方法生长 1 μm 厚的氧化硅作为掩膜,然后经光刻腐蚀去除硅片需要刻蚀区域表面的氧化硅。具体为先用掩膜 2 进行第一次光刻,去除一定厚度的氧化硅,再用掩膜 1 进行第二次光刻,将暴露的氧化硅全部去除。实验设备包括聚四氟乙烯圆形桶及与之配套的回流装置、温度计、恒温加热器(温度变化 $\pm 1^\circ\text{C}$),刻蚀过程中刻蚀液温度控制在(70 ± 1) $^\circ\text{C}$ 。回流装置用于保持刻蚀液的浓度。样品的刻蚀深度通过轮廓仪(KLA_Tencor Alphastep IQ)测试完成,表面粗糙度通过光学显微镜(OLYMPUS STM6)和扫描电子显微镜(FEI Quanta200)进行定性分析,通过原子力显微镜(NSK LTD SPA300HV)定量分析。液体表面张力通过表面张力测试系统(Krüess Easy-Dyne)完成。

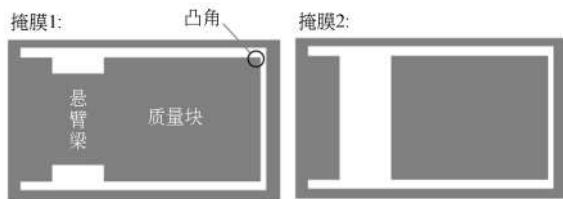


图 1 用于研究 TMAH 单晶硅湿法刻蚀技术的微加速度计掩膜图形示意图

Fig. 1 Schematic view of mask of microaccelerometer for the study of TMAH wet etch technology of silicon

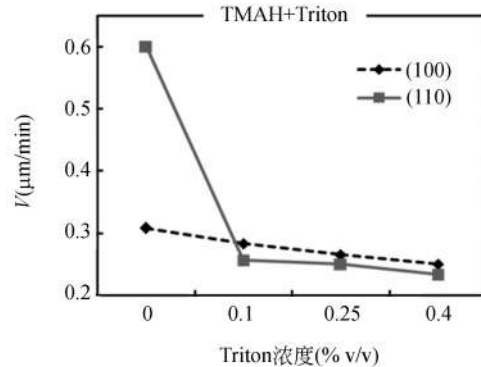
3 实验结果及分析

主要对刻蚀速率、悬臂梁刻蚀表面粗糙度和质量块凸角刻蚀形貌进行分析。

3.1 刻蚀速率

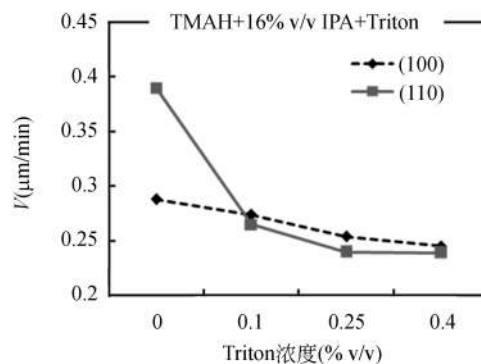
不同 TMAH + Triton X-100 + IPA 刻蚀液在 70 $^\circ\text{C}$ 时的刻蚀速率如图 2 所示,图中数值偏差均小于 0.03 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。从图 2(a)中可以看出,表面活性剂 Triton X-100 会明显降低(110)晶向的刻蚀速率。在表面活性剂修饰的 TMAH 溶液中,硅刻蚀表面会存在一单层活性剂分子,该单层

分子在一定程度上会阻止反应物到达硅表面,同时也会阻止生成物从硅表面移除,(110)晶面比(100)晶面具有较高的表面活性剂吸附能力^[13],



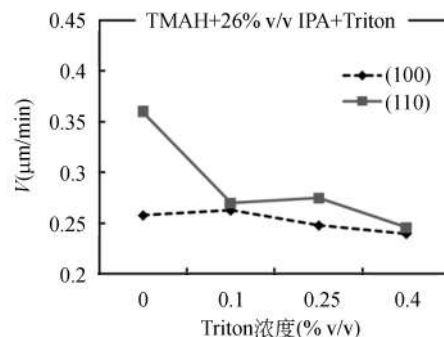
(a) TMAH + Triton X-100 溶液中的刻蚀速率

(a) Etch rate in TMAH with different concentration of Triton X-100



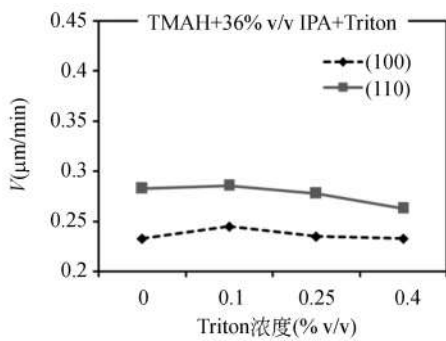
(b) TMAH + 16% (v/v) IPA + Triton X-100 溶液中的刻蚀速率

(b) Etch rate in TMAH + 16% (v/v) IPA with different concentration of Triton X-100



(c) TMAH + 26% (v/v) IPA + Triton X-100 溶液中的刻蚀速率

(c) Etch rate in TMAH + 26% (v/v) IPA with different concentration of Triton X-100



(d) TMAH+36% (v/v) IPA + Triton X-100 溶液中的刻蚀速率

(d) Etch rate in TMAH + 36% (v/v) IPA with different concentration of Triton X-100

图 2 不同刻蚀液配比下不同晶面刻蚀速率

Fig. 2 Etch rate of different orientation of silicon in different etchants

(110)晶面的低反应物生成物搬运速率可能是导致其刻蚀速率显著降低的原因。在单晶硅各向异性湿法刻蚀中,异丙醇 IPA 具有与 Triton X-100 相似的作用,即 IPA 分子也会吸附在硅表面形成一层阻挡层^[14],从实验结果看出,IPA 同样会减小(110)晶向的刻蚀速率,但相比于 Triton X-100 其效果不明显,这可能是由于 IPA 比 Triton X-100 的分子链短,IPA 分子在硅表面形成的分子阻挡层厚度比 Triton X-100 小造成的。

3.2 刻蚀表面粗糙度

不同刻蚀液中(100)硅片的刻蚀表面粗糙度如图 3~4 所示,图 4 中数值偏差小于 1 nm。从图中可以看出,Triton X-100 会增大(100)硅片刻蚀表面的粗糙度,这主要因为 Triton X-100 会显著降低(110)晶面的刻蚀速率 $V_{(110)}$,而对(100)及其相邻晶面的影响不明显,导致(100)晶面的刻蚀速率 $V_{(100)}$ 大于 $V_{(110)}$ (如图 2(a)),随着刻蚀的进行,刻蚀表面会出现金字塔形状的小丘,且一旦形成很难去除。另一方面,氢气作为单晶硅刻蚀的生成物,由于表面活性剂层的存在,一些氢气气泡无法穿透活性剂层而滞留在刻蚀硅表面,较大的气泡极大可能会成为掩膜,随着刻蚀的进行同样会形成金字塔形状的小丘,进而刻蚀表面使粗糙度增加。而 IPA 会使(100)硅片的刻蚀表面非常光滑,由图 2 可知,当 IPA 加入 TMAH 中,一定程度上会减小 $V_{(110)}$ 的刻蚀速率,但 $V_{(110)}$ 一直保持大于 $V_{(100)}$,该现象有利于获得

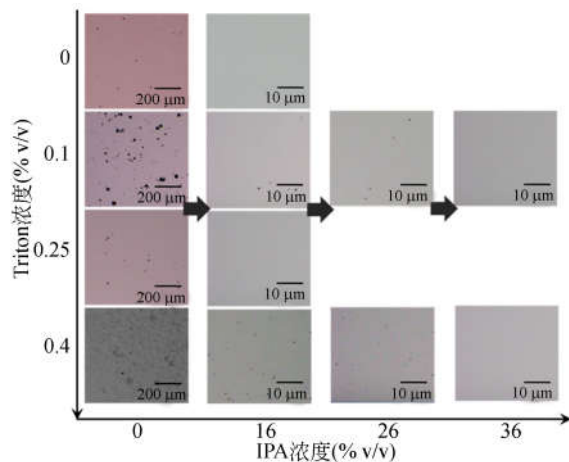


图 3 光学显微镜观察的不同刻蚀液配比下(100)硅片刻蚀表面形貌

Fig. 3 Optical microscope results of etched surface morphology of Si (100) in different etchants

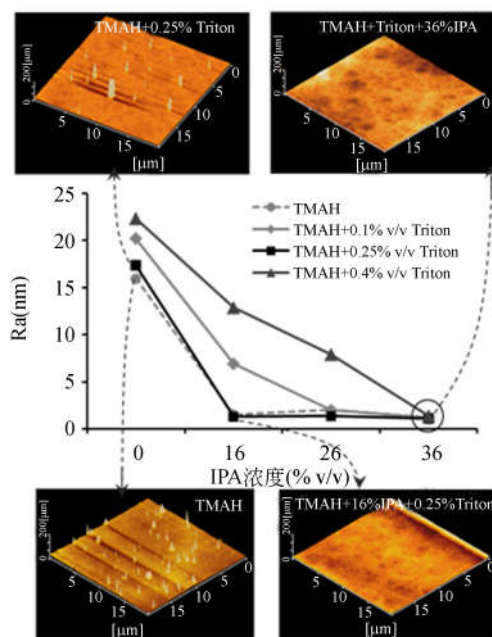


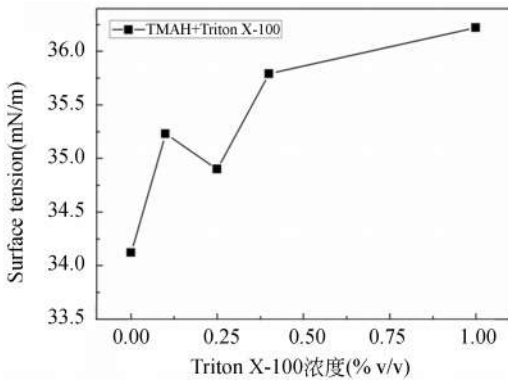
图 4 原子力显微镜观察的不同刻蚀液配比下(100)硅片的刻蚀表面粗糙度

Fig. 4 AFM results of etched surface roughness of Si (100) in different etchants

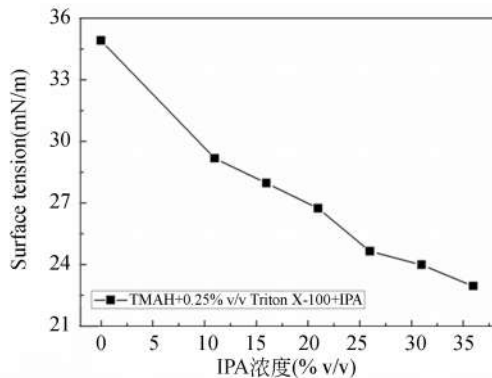
光滑的刻蚀表面。当 Triton X-100 和 IPA 同时加入 TMAH 中,随着 IPA 浓度的增加,(100)硅片刻蚀表面粗糙度逐渐减小,当 36% (v/v) IPA 加入 TMAH+Triton X-100 中,刻蚀表面均变得很光滑,同样在 TMAH + Triton X-100 + 36% (v/v) IPA 中仍然保持 $V_{(100)}$ 小于 $V_{(110)}$ (如图 2(d))。所以对于(100)硅片, $V_{(110)}/V_{(100)} > 1$

有利于获得光滑刻蚀表面。

另一方面,添加剂会改变刻蚀液 TMAH 的表面张力^[15]。其中,IPA 会显著减小 TMAH 的表面张力,随着 IPA 浓度的增加,表面张力逐渐减小^[16]。Triton X-100 使表面张力有小幅上升的趋势,如图 5 所示。从图中可看出,TMAH + 0.25% (v/v) Triton X-100 溶液的表面张力与纯 TMAH 相近,这可能是导致两种刻蚀液中获得相近刻蚀表面粗糙度的原因。而 TMAH + Triton X-100 中加入 IPA 后,表面张力明显减小,且随着 IPA 浓度的增加而减小。在 Triton X-100 和 IPA 同时作用的 TMAH 中最终获得光滑刻蚀表面。所以将刻蚀液表面张力调整到小于或等于 28 mN/m 可能有利于获得光滑的刻蚀表面。



(a) 不同浓度 Triton X-100 加入 25wt% TMAH 溶液的表面张力
(a) Surface tension of TMAH with or without different concentration of Triton X-100

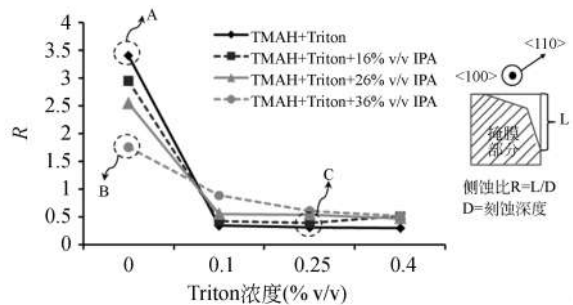


(b) 三种刻蚀液配比下的表面张力
(b) Surface tension of ternary solution

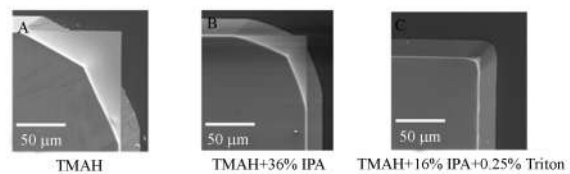
图 5 不同添加剂浓度对 TMAH 表面张力的影响
Fig. 5 Surface tension of TMAH solutions versus additive concentration

3.3 凸角

不同刻蚀液下的质量块部分凸角侧蚀比率如图 6(a)所示,其数值偏差小于 0.02,凸角侧蚀比为凸角侧蚀边长 L 与刻蚀深度 D 的比值,图 6(a)所示。典型的几种刻蚀液下的凸角刻蚀形貌扫描电镜结果如图 6(b)所示,结果显示,在 Triton X-100 和 IPA 同时作用的 TMAH 中均能良好保护凸角 ($R < 0.8$)。对于单一添加剂, Triton X-100 修饰的 TMAH 溶液可以有效保护以 (100) 硅片为刻蚀对象的凸角形貌。因为 (110) 及其相邻晶面具有较强的活性剂吸附能力,导致 (110) 及其相邻晶面的刻蚀速率显著降低, (331) 或 (441) 作为 (110) 相邻晶面,其刻蚀速率大大降低,形成凸角边墙,最终减小凸角下切程度。IPA 作为一种酒精类添加剂在凸角保护方面效果不明显。主要是 IPA 在一定程度上也会降低 (110) 及其相邻晶面的刻蚀速率,随着 IPA 浓度的增加 (110) 晶面添加剂吸附分子层达到饱和,吸附分子层的厚度比 Triton X-100 形成的分子层厚度小,凸角侧蚀形貌改善不明显。TMAH + Triton X-100 + IPA 刻蚀液中, Triton X-100 与 IPA 之间会相互影响, IPA 加入含 Triton X-100 的溶液后,大部分



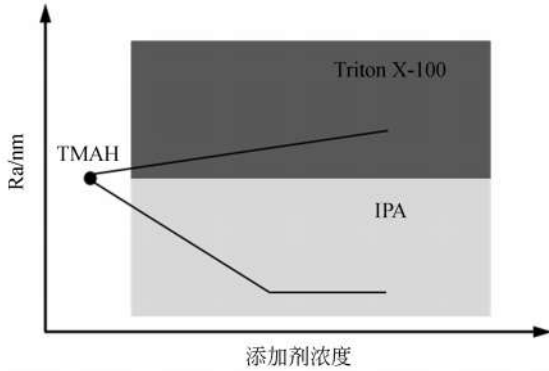
(a) 不同刻蚀液配比下(100)硅片的凸角侧蚀比率
(a) Undercut ratio at convex corner of Si (100) in different etchants



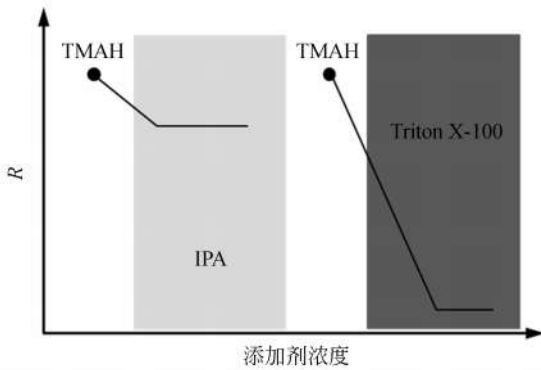
(b) 三种刻蚀液下凸角侧蚀对比扫描电镜照片
(b) Contrast of SEM results between samples A, B and C

图 6 不同刻蚀液配比下(100)硅片的凸角侧蚀
Fig. 6 Undercut at convex corner of Si (100) in different etchants

酒精分子会进入胶束之间,导致胶束变小,当足够的 IPA 加入后,胶束会完全分解,硅表面的 Triton X-100 分子层厚度减小,介于单一添加剂 Triton X-100 和 IPA 之间,导致新刻蚀形貌的出现,其结果是同时获得光滑刻蚀表面和非常小的凸角侧蚀。



(a) 添加剂修饰的 TMAH 单晶硅刻蚀表面粗糙度
(a) Etched surface roughness of Silicon in addition modified TMAH



(b) 添加剂修饰的 TMAH 单晶硅凸角侧蚀比
(b) Undercut ratio at convex corner of Silicon in addition modified TMAH

图 7 添加剂修饰的 TMAH 单晶硅湿法刻蚀模型
Fig. 7 Model of silicon wet etching in addition modified TMAH solution

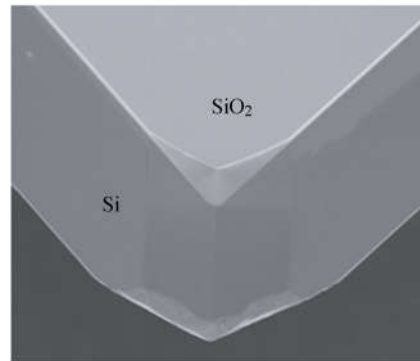
综上,建立了简单的单晶硅湿法刻蚀模型(如图 7 所示),TMAH 单晶硅湿法刻蚀可以通过添加 IPA 以减小刻蚀表面粗糙度;添加 Triton X-100 以减小凸角侧蚀;同时添加 IPA 和 Triton X-100 并控制各组分的配比可以同时优化刻蚀表面粗糙度和凸角侧蚀。该两种添加剂共同修饰的 TMAH 单晶硅湿法刻蚀技术在微结构研制过程中具有重要的应用前景^[17],如使用添加剂修饰的 TMAH 湿法刻蚀技术能够减小电容式微加速度

计的极板质量块的凸角侧蚀^[18]。

以悬臂梁结构微加速度计的制作为例,通过应用 IPA 和 Triton X-100 共同修饰的 TMAH 单晶硅湿法刻蚀获得高刻蚀表面光滑度,且无掩膜补偿的完整质量块敏感结构。因 IPA 浓度越大,凸角侧蚀约大,同时考虑刻蚀表面粗糙度和凸角侧蚀,最终选择的刻蚀液为 25% (质量分数) TMAH+0.25% (v/v) Triton X-100 + 16% (v/v) IPA。通过光学显微镜观察的悬臂梁-质量块结构阵列如图 8(a)所示,扫描电子显微镜观察的质量块凸角形貌如图 8(b)所示。



(a) 硅基悬臂梁-质量块结构阵列
(a) Fabricated silicon wafer with arrayed spring-mass unit



(b) 制作的质量块凸角结构
(b) Fabricated convex corner of mass structure.

图 8 硅基悬臂梁-质量块结构

Fig. 8 Fabricated silicon wafer with spring-mass structure

4 结 论

本文对 Triton X-100 和 IPA 修饰的 25% (质量分数) TMAH 溶液在 70 °C 下对 (100) 硅片的刻

蚀特性进行了研究。利用 Triton X-100 修饰的 TMAH 刻蚀技术可以有效保护以(100)硅片为刻蚀对象的凸角,无需进行凸角补偿,但同时会增加刻蚀表面粗糙度。IPA 能显著减小刻蚀表面粗糙度,最终形成光滑的刻蚀表面,但在凸角保护方面效果不明显。两种添加剂共同修饰的湿法刻蚀下,不同添加剂分子之间会相互影响,从而展现出新的刻蚀特性。IPA 分子会减小 Triton X-100 分子在单晶硅表面吸附层的厚度,导致 $V(110)$ 有小幅度的提升,使 $V(110)/V(100)$ 大于 1(如一定浓度下, Triton X-100 中 $V(110)/V(100)=0.94$; IPA 中 $V(110)/V(100)=1.35$; Triton X-100+IPA 中 $V(110)/V(100)=1.06$),得到光滑的刻蚀表面。另一方面,两种添加剂共同作用的

TMAH 可以将溶液表面张力调整到一个合适值(约 28 mN/m)以利于刻蚀表面变光滑。另外,两种添加剂共同作用时 $V(110)=0.25 \mu\text{m}/\text{min}$ 小于单一 IPA 作用时的 $V(110)=0.39 \mu\text{m}/\text{min}$ 同时又略大于单一 Triton X-100 作用时 $V(110)=0.24 \mu\text{m}/\text{min}$,所以仍能保证很小的凸角侧蚀比率(R 最小为 0.35)。两种添加剂共同修饰的 TMAH 湿法刻蚀技术可以获得极小的刻蚀表面粗糙度($R_a \approx 1 \text{ nm}$)和较小的凸角侧蚀比率(<0.8)。另外,添加剂修饰的 TMAH 湿法刻蚀技术在各种微机电器件的研制中具有重要的应用前景,尤其是在制作与 CMOS 兼容的 MEMS 器件方面具有极大的潜力。

参考文献:

- [1] DUTTA S, IMRAN M, KUMAR P, PAL R, *et al.*. Comparison of etch characteristics of KOH, TMAH and EDP for bulk micromachining of silicon (110) [J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17 (10-11): 1621-1628.
- [2] TANAKA H, CHENG D, SHIKIDA M, *et al.*. Characterization of anisotropic wet etching properties of single crystal silicon: Effects of ppb-level of Cu and Pb in KOH solution [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 128 (1): 125-131.
- [3] TANAKA H, CHENG D, SHIKIDA M, SATO K. Effect of magnesium in KOH solution on the anisotropic wet etching of silicon [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 134 (2): 465-470.
- [4] 曾毅波, 王凌云, 谷丹丹, 等. 超声技术在硅湿法腐蚀中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 166-171.
- [5] ZENG Y B, WANG L Y, GU D D, *et al.*. Application of ultrasonic technology to wet etching of silicon [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 166-171. (in chinese)
- [6] 杨增涛, 冷俊林, 梅勇, 等. 硅各向异性浅槽腐蚀实验研究 [J]. *压电与声光*, 2011, (4), 513-516.
- [7] YANG Z T, LENG J L, MEI Y, *et al.*. The experimental study on anisotropic etching of silicon shallow trends [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2011, (4), 513-516. (in chinese)
- [8] MACKAY R E, LIONIS N, LE H R. 3D surface topography and reflectivity of anisotropic etched silicon micromirrors for BioMEMS [J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17 (12): 1763-1770.
- [9] JUN K H, KIM B J, KIM J S. Effect of additives on the anisotropic etching of silicon by using a TMAH based solution [J]. *Electronic Materials Letters*, 2015, 11(5): 871-880.
- [10] PAL P, GOSALVEZ M A, SATO K. Etched profile control in anisotropic etching of silicon by TMAH+Triton [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22: 065013.
- [11] ROLA K P, ZUBEL I. Application of triton X-100 surfactant for silicon anisotropic etching in KOH-based solutions [J]. *Materials science-poland*, 2013, 31(4): 525-530.
- [12] ZUBEL I, KRAMKOWSKA M, ROLA K P. Silicon anisotropic etching in TMAH solutions containing alcohol and surfactant additives [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 178: 126-135.
- [13] CHENG D, GOSALVEZ M A, HORI T, *et al.*. Improvement in smoothness of anisotropically etched silicon surfaces: effects of surfactant and TMAH concentrations [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 125: 415-421.
- [14] YANG C, YANG C, CHEN P. Study on anisotropic silicon etching characteristics in various surfactant-added tetramethyl ammonium hydroxide water solutions [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15: 2028-2037.
- [15] TANG B, PAL P, GOSALVEZ M A, *et al.*. Ellipsometry study of the adsorbed surfactant thick-

- ness on Si{110} and Si{100} and the effect of pre-adsorbed surfactant layer on etching characteristics in TMAH[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009,156: 334-341.
- [14] ZUBEL I, ROLA K, KRAMKOWSKA M. The effect of isopropyl alcohol concentration on the etching process of Si-substrates in KOH solutions [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 171: 436-445.
- [15] BROCKMEIER A, RODRIGUEZ F J SANTOS, HARRISON M, *et al.*. Surface tension and its role for vertical wet etching of silicon[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(12): 125012.
- [16] KRAMKOWSKA M, ZUBEL I. Silicon anisotropic etching in KOH and TMAH with modified surface tension [J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1: 774-777.
- [17] TANG B, SATO K, GOSALVEZ M A. Sharp silicon tips with different aspect ratios in wet etching/DRIE and surfactant-modified TMAH etching [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 188: 220-229.
- [18] TANG B, SATO K, XI S W, *et al.*. Process development of an all-silicon capacitive accelerometer with a highly symmetrical spring-mass structure etched in TMAH + Triton-X-100 [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 217: 105-110.

作者简介:



姚明秋(1985—),女,河北衡水人,博士研究生,2009年于河北科技大学获得硕士学位,主要从事微电子机械系统(MEMS)方面的研究。E-mail: ivykaiser@163.com

导师简介:



苏伟(1964—),男,四川射洪人,博士,研究员,博士生导师,1986年于国防科技大学获得学士学位,1989年于中国工程物理研究院获得硕士学位,2001年于北京理工大学获得博士学位,主要从事微电子机械系统(MEMS)、太赫兹技术及惯导技术方面的研究。E-mail: john4546@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)