

压力传感器湿法腐蚀敏感膜的工艺研究

闫施锦¹,王丙寅²,王志强²,雷程¹,冀鹏飞¹,邱海兵¹,谭秋林¹,梁庭¹

(1. 中北大学 动态测量技术国家重点实验室,山西 太原 030051;2. 内蒙动力机械研究所,内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:随着压力传感器的小型化和高频化发展,降低成本并提升制造工艺成为当前研究的关键。该文通过优化硅片湿法腐蚀工艺来降低压力传感器的制造成本,并使其性能更贴近设计要求。首先,深入研究了不同浓度TMAH(四甲基氢氧化铵)对硅片腐蚀效果的影响,通过优化腐蚀工艺条件,确定了在80℃下使用质量分数为25%的TMAH作为腐蚀液,最终成功获得了表面粗糙度仅为0.121 μm的低粗糙度硅片表面。然后利用有限元模拟技术,对比了质量分数为5% TMAH湿法腐蚀条件下的灵敏度(109.162 mV/MPa)与质量分数为25% TMAH湿法腐蚀条件下的灵敏度(103.276 mV/MPa),而后者更接近设计要求的灵敏度值(100 mV/MPa)。成功总结了高效的湿法腐蚀工艺,并基于该工艺设计了压力传感器的制造流程。预期该流程能以低成本生产出性能更贴近设计要求的压力传感器,为压力传感器的小型化和高频化发展提供了有力的技术支持。

关键词:压力传感器;湿法腐蚀;敏感膜;腐蚀形貌;粗糙度

中图分类号:TN305;TN43 **文献标识码:**A

Process Study of Wet Etching Sensitive Film for Pressure Sensors

YAN Shijin¹, WANG Bingyin², WANG Zhiqiang², LEI Cheng¹, JI Pengfei¹,
QIU Haibing¹, TAN Qiulin¹, LIANG Ting¹

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Inner Mongolia Power Machinery Research Institute, Hohhot 010010, China)

Abstract: With the miniaturization and increasing frequency of pressure sensors, it has become critical to develop low-cost manufacturing processes. By studying the effect of different concentrations of TMAH on wafer corrosion, the optimal process conditions were determined to be 80 °C with 25 wt% TMAH, achieving a low roughness surface of 0.121 μm. Finite element simulations indicate that the sensitivity under 25 wt% wet etching conditions (103.276 mV/MPa) is closer to the design value of sensitivity (100 mV/MPa) than that under 5 wt% TMAH wet etching (109.162 mV/MPa). An efficient wet etching process is summarized, based on which a pressure sensor manufacturing process was designed. This approach is expected to produce sensors that more closely meet design requirements at a lower cost.

Key words: pressure sensor; wet etching; sensitive film; etching morphology; roughness

0 引言

传感器作为一种精密装置或设备,其核心功能在于精准感知压力信号,并将此信号转化为可供后续处理或应用的输出电信号,广泛应用于工业生产、汽车安全、医疗诊断等领域^[1]。压阻式压力传感器具有灵敏度高、体积紧凑、制造流程简单及成本低等优点,是最常见且技术成熟的传感器类型。敏感膜作为其核心组件之一,直接决定了传感器的性能,其制作过程尤为关键,需借助精细的刻蚀技术

来实现^[2]。在敏感膜的制造过程中,背腔刻蚀技术起着至关重要的作用,该技术目前主要分为干法刻蚀与湿法腐蚀两类。在微加工领域,干法刻蚀因其高精度而得到认可,但存在成本高、均匀性差等缺点。湿法腐蚀技术具有成本效益高、均匀性好和选择性高的特点,已成为制造压力传感器背腔结构的关键工艺^[3]。在压力传感器制造过程中,敏感膜的厚度和表面粗糙度都会对薄膜的灵敏度和线性度产生影响^[4],因此,在制造压力传感器前需要进行硅

收稿日期:2024-08-26

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3209100);山西省重点研发计划(2023020302010)

作者简介:闫施锦(1999-),女,河南省新乡市人,硕士生。

晶圆湿法腐蚀实验,探究压力传感器制作的最佳工艺条件。本文依据湿法腐蚀实验得到腐蚀参数,并设计了一款压力传感器芯片。

1 硅的湿法腐蚀实验

1.1 湿法腐蚀方法及其原理

硅的各向异性湿法腐蚀过程始于4个氢氧根离子(OH⁻)与硅表面原子的直接反应,促使电解液中4个电子被注入硅晶体内部。与氢氧根离子相关联的电子发生转移,迁移至硅表面悬键的特定状态,此过程是形成后续化学键的关键步骤。随着电子的转移,硅表面的未成对电子与羟基团(OH)结合形成稳定的硅氧键(Si—O)^[5]。由于悬键上的电子占据较高的能级,其在腐蚀反应过程中易受热激发而跃迁至硅的导带中。此电子激发现象进一步促进了腐蚀过程中相互作用机制,导带内的电子与溶液中H₂O分子发生反应。总之,硅的各向异性湿法腐蚀是一个复杂而精细的化学过程,涉及电子转移、化学键形成及气体释放等多个环节。

1.2 实验装置搭建

水浴锅是湿法腐蚀实验中关键设备。它配备有1个DF-101T集电式磁力搅拌器,控温精度为±1℃。图1为湿法腐蚀装置示意图。其运行机制包括使用安装在底部的加热元件将水加热至所需的设定点,再利用水的热容量和导热性来维持温度恒定。将定制的湿法腐蚀容器和自制夹具浸入水中,注入腐蚀液,溶液高度高于夹具中硅片所在位置,但不超过烧杯高度的1/2。

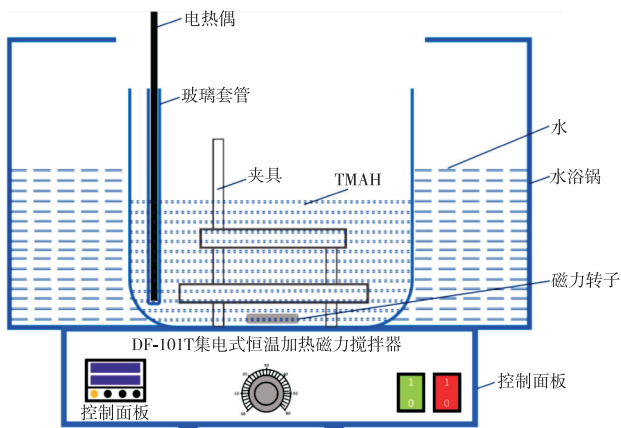


图1 湿法腐蚀装置示意图

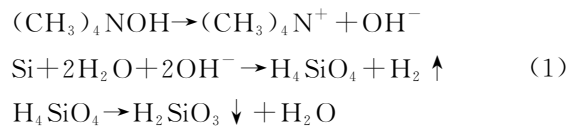
加热过程开始后,水温逐渐升高直至达到预设温度并持续稳定30 min;取出夹具,将晶片背面朝上放入湿腐蚀夹具的上层加持件中,启动转子开始

腐蚀。与热板加热方法相比,水浴环境能为湿法腐蚀提供温度控制,确保晶圆在溶液中均匀受热,最大限度地减少了环境变化对湿法腐蚀实验的影响,有助于获得理想的实验结果,对于实现研究目标和确保实验结果的可靠性至关重要。

1.3 腐蚀液的选择

在硅的各向异性湿法腐蚀中,常用的腐蚀剂是碱性溶液。这些溶液根据其化学性质分为两类:无机腐蚀剂和有机腐蚀剂。无机类包括氢氧化钾(KOH)、氢氧化钠(NaOH)、氢氧化锂(LiOH)、氢氧化铯(CsOH)和氢氧化铵(NH₄OH)。有机类包括乙基溴化吡啶(EPW)和四甲基氢氧化铵(TMAH)等。

在众多腐蚀剂中,KOH、EPW和TMAH的应用较为广泛。其中TMAH腐蚀剂具有不含可能损害电路结构中金属离子的特性。相较于KOH和EPW,TMAH不仅展现出无毒性的优势,还便于操作控制,且能生成极光滑的腐蚀表面,因此,实验最终选择TMAH作为主要的腐蚀剂。TMAH,化学式为(CH₃)₄NOH,是一种知名的有机强碱。硅和TMAH之间的整个化学反应为



1.4 腐蚀液浓度的选择

腐蚀液浓度对硅腐蚀的速率及形貌影响很大,腐蚀速率随着浓度的增加而减小。实验使用了5种浓度(质量分数)的TMAH:5%、10%、15%、20%和25%。图2为80℃水浴环境下,(100)晶向的硅晶片在不同浓度下表面的腐蚀速率分别为56.7 μm/h、49.9 μm/h、42.8 μm/h、35.5 μm/h、27.1 μm/h。

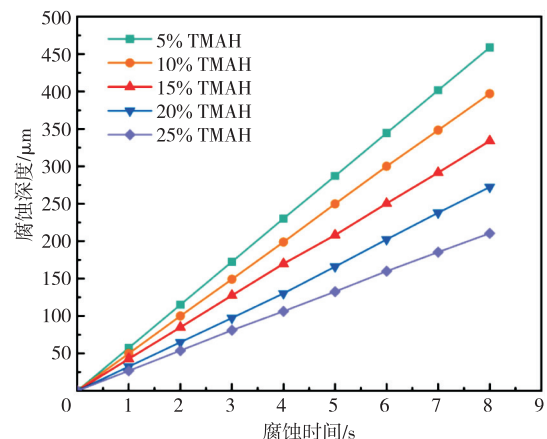


图2 不同浓度下腐蚀深度与时间的关系图

由图 2 可见,腐蚀速率随着 TMAH 浓度的增加而降低。其原因在于硅的各向异性湿法腐蚀过程中,腐蚀速率与腐蚀液中氢氧根离子(OH^-)的有效浓度及其与硅表面接触的机会密切相关。在 TMAH 腐蚀剂溶液中,随着溶液浓度的变化,氢氧根离子的浓度及其扩散行为会受到影响。在低质量分数的情况下,尽管氢氧根离子的绝对数量可能较少,但由于溶液较为稀释,这些离子能更有效地渗透到硅表面的微观结构中,促进腐蚀反应的进

行。在高质量分数时,氢氧根离子的总体数量增加,但溶液的浓度和离子间的相互作用可能增加,限制了氢氧根离子的扩散以及与硅表面的直接接触,导致腐蚀速率降低。

图 3 为不同浓度下硅(100)表面腐蚀形态的扫描电镜图像。图中,1-3 分别为整体俯视图、高倍俯视图和截面图。图 4 为采用白光干涉仪探测不同浓度下 Si(100)表面的粗糙度图。

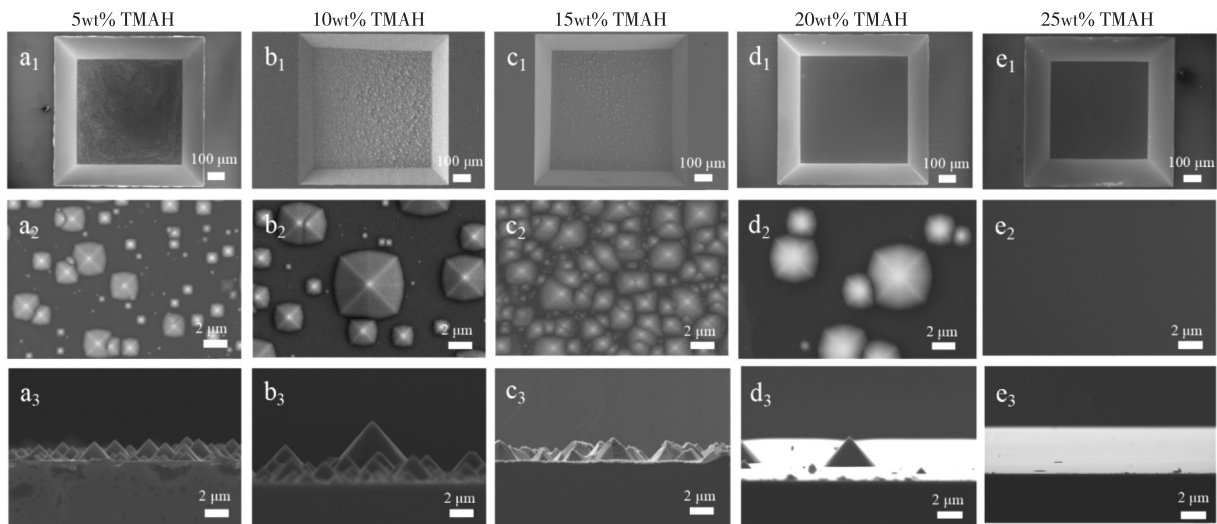


图 3 不同浓度的 TMAH 溶液对 Si(100)表面进行腐蚀后的电镜图

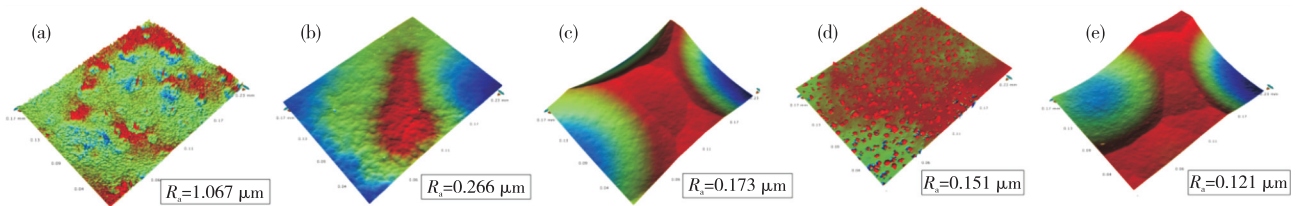


图 4 不同浓度的 TMAH 溶液对 Si(100)表面进行腐蚀后的白光干涉仪图

由图 3 可知,在质量分数为 5% TMAH 的最低浓度下,腐蚀表面出现许多小丘^[6]。Shen 等^[7]在腐蚀的(100)平面上也发现了类似的小丘。TMAH 与硅反应生成原硅酸(H_4SiO_4)和氢气(H_2),原硅酸不稳定且极易分解,进而分解成偏硅酸(H_2SiO_3)沉淀。硅片表面附着的沉淀物构成微掩膜,气泡则形成伪掩膜,两种现象导致硅片表面出现部分遮蔽。被这些微掩膜和伪掩膜覆盖的区域,刻蚀过程被阻断,而未被覆盖的区域则持续受到刻蚀作用。这种差异造成刻蚀速率的不一致性,最终在硅片表面形成了众多形态各异、类似金字塔的小丘状结构^[8]。实验可知,随着浓度的增加,这些小丘的密度逐渐减小,当浓度(质量分数)超过 20%时,表面变

得更光滑。当浓度(质量分数)为 25%时,表面无小丘,表现出最低的粗糙度。在 5 种实验浓度下测得的粗糙度值分别为 $1.067 \mu\text{m}$ 、 $0.266 \mu\text{m}$ 、 $0.173 \mu\text{m}$ 、 $0.151 \mu\text{m}$ 和 $0.121 \mu\text{m}$ 。由此可见,腐蚀液浓度越高,粗糙度越低,表面越光滑。相比之下,腐蚀液浓度越高,硅表面越光滑。质量分数为 25% TMAH 溶液的腐蚀速度虽然较慢,但粗糙度最低,有利于制作压力传感器的敏感膜。

2 压力传感器的粗糙度探究

2.1 压力传感器结构设计

压阻式压力传感器的工作原理核心在于其敏感膜在受压后发生形变,进而引发惠斯通电桥失

衡,从而改变输出信号,确保符合薄膜在较小挠度下的变形理论模型^[9]。为实现传感器输出的高度线性化,一般设定其最大允许形变量需维持在薄膜厚度的20%以内,此时薄膜只有弯曲,而无拉伸;为满足敏感膜抗过载的要求,需要敏感膜表面最大应力应小于硅破坏应力的1/5^[10],以及满足满量程输出原则。为保证芯片的电气连接不会因电流过大而造成损坏,经综合考虑,设计要求为

$$\omega_{\max} = \frac{0.0138Pa^4}{Eh^3} \leq \frac{h}{5} \quad (2)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{0.308Pa^2}{h^2} \leq \frac{\sigma_m}{n} \quad (3)$$

$$V_{\text{out}} = \frac{68.1 \times 10^{-11} Pa^{-1}(A-B)}{2 + 68.1 \times 10^{-11} Pa^{-1}(A+B)} V_{\text{in}} \quad (4)$$

式中: $E=170 \text{ GPa}$ 为硅的杨氏模量; n 为安全系数($n=5$); $\sigma_m=6 \text{ GPa}$ 为硅的断裂应力; A 和 B 分别为压敏电阻上平行和垂直于敏感膜片边缘的平均应力。取压力 $P=1 \text{ MPa}$,敏感膜边缘长度 $a=1000 \mu\text{m}$ 。将现有条件代入式(2)-(4),得到膜的最终厚度 $h > 42.99 \mu\text{m}$,考虑到工艺误差和限制,取 $h=50 \mu\text{m}$ 。

2.2 有限元模拟

在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 水浴下进行湿法腐蚀,在质量分数为25% TMAH 腐蚀液中会形成几乎平滑的表面;在质量分数为5% TMAH 腐蚀液中,敏感膜表面会生成空间位置不规则分布、高度 $10 \text{ nm} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 不等的金字塔状小丘。有限元模拟时,腐蚀形貌细节具有随机性,无法模拟出所有小丘分布的最真实情况,故现有研究在进行压力传感器力电耦合仿真时,均使用平滑理想的表面。图5为模拟质量分数分别为5% TMAH 与25% TMAH 两种腐蚀情况,用完全平滑的表面代表25% TMAH 腐蚀后的形貌;用底面有1/4面积的小丘代表5% TMAH 腐蚀后的形貌,极限模拟小丘分布不规则的情况,局部小丘导致局部敏感膜厚度增加。前者的最大应力为 100.293 MPa ;后者的最大应力为 173.273 MPa ,比前者高出 72.77% 。实验设计灵敏度为 100 mV/MPa ,前者的灵敏度为 103.276 mV/MPa ,后者的灵敏度为 109.162 mV/MPa 。由仿真结果可知,敏感膜表面平滑无小丘时,压力传感器灵敏度更接近设计值。

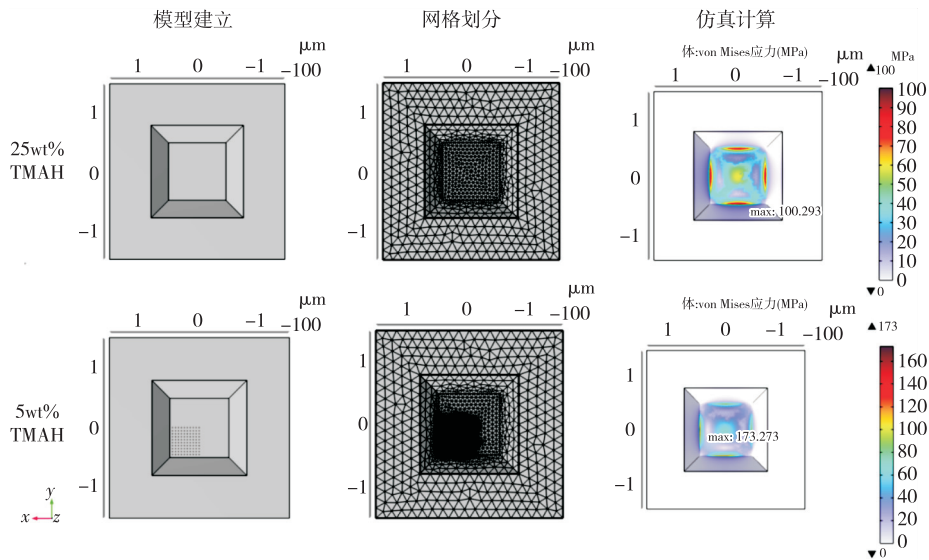


图5 对有无小丘的敏感膜的有限元模拟

图6为压力传感器制造工艺流程。实验使用4英寸($1 \text{ in}=2.54 \text{ cm}$)双面抛光N型硅,晶向为 $\langle 100 \rangle$,电阻率为 $2 \sim 4 \Omega \cdot \text{cm}$,厚度为 $430 \mu\text{m}$ 。在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下用3#液(H_2SO_4 和 H_2O_2 以体积比3:1混合)处理15 min。然后在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 水浴中用1#液($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 、 H_2O_2 和 H_2O 的混合物,体积比为1:2:7)冲洗5 min。通过低压化学气相沉积

(LPCVD)在晶片表面沉积 300 nm 的氧化硅和 300 nm 的氮化硅。再在晶圆正面旋涂光刻胶AZ6130进行光刻开孔,通过反应离子刻蚀(RIE)去除开孔部分的氮化硅、氧化硅。通过离子注入形成电阻和欧姆接触区。用丙酮、乙醇对硅片分别超声5 min以去除光刻胶,用去离子水进行冲洗,并用氮气吹干。

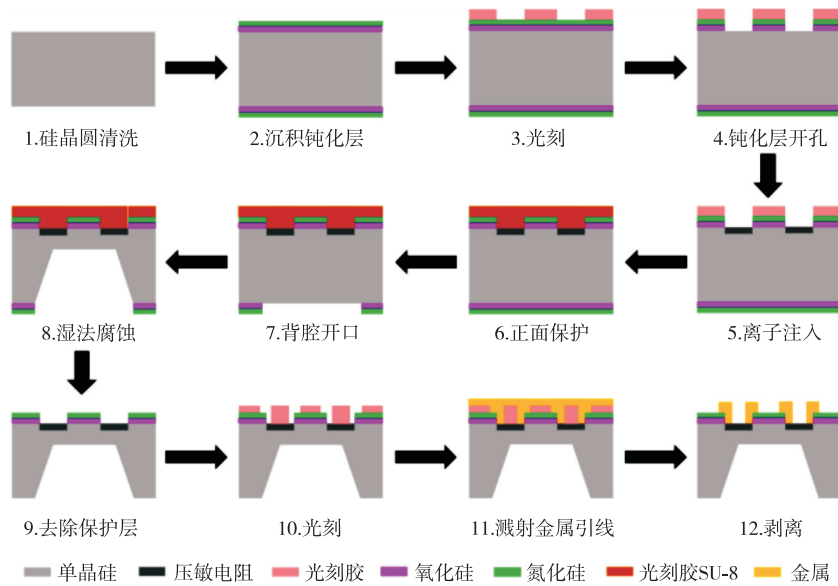


图 6 压力传感器制造工艺流程

将具有耐高温、耐腐蚀特性的光刻胶 SU-8 旋涂到正面结构上,100 °C 后烘 0.5 h,关闭热板使光刻胶 SU-8 温度随热板一起降至室温从而固化。在确认晶片表面无杂质后,采用光刻技术在晶片背面开孔。首先在晶片上涂抹六甲基二硅氧烷(HMDS),然后在烘箱中 130 °C 烘烤,进而增强光刻胶与晶片表面的附着力。再以转速 1 000 r/min 将光刻胶 AZ6130 旋涂到晶片背面的氮化硅层上,整平后预烘烤 1 min,使用 EVG610 光刻系统进行光刻,曝光剂量为 160 mJ/cm²。显影剂采用质量分数为 25% TMAH 溶液与去离子水按体积比 1:8 进行稀释,显影过程持续约 65 s。显影后,在 120 °C 下烘干 15 min,以去除残留水分。最后用 RIE 去除图案化的氮化硅和氧化硅层。晶圆经过 RIE 腐蚀后,在 40 °C 水浴中用缓冲氧化物腐蚀(BOE)溶液冲洗 2 s,以去除腐蚀窗口上残留的氧化硅膜。将硅片放入准备好的夹具中,在 80 °C 水浴环境下,采用质量分数为 25% TMAH 进行湿法腐蚀,14 h 后取出硅片。采用 RIE 去除背面的氮化硅、氧化硅,采用丙酮浸泡去除正面光刻胶 SU-8,采用去离子水对其清洗并使用氮气吹干。

在晶圆正面喷涂光刻胶 AZ6130 进行光刻开孔,在正面溅射金属引线及焊盘,通过剥离工艺去除光刻胶及多余金属,并对溅射后的金属进行退火^[11]。

3 结束语

为了提高压力传感器的尺寸精度,建立了更为精确的腐蚀深度与时间的对应关系。在此基础上深入探索了一种能实现平滑敏感膜的湿法腐蚀制造工艺及其专用设备。采用扫描电子显微镜与白光干涉仪作为关键表征手段,对湿法腐蚀处理后的表面形貌及其粗糙度进行详尽的测量与分析。通过敏感膜表面形貌及粗糙度的对比,确定湿法腐蚀最佳工艺参数:80 °C 水浴下,用质量分数为 25% TMAH 腐蚀,此时形貌最好,表面平滑无小丘,粗糙度达到 0.121 μm。在此湿法腐蚀条件下设计了一款压阻式硅压力传感器。经过有限元仿真分析得出压力传感器敏感膜的粗糙度越小,敏感膜厚度均匀性越好,应力分布越均匀。压力传感器敏感膜的厚度与形貌对其灵敏度至关重要,后续将通过进一步深入研究腐蚀机理与工艺优化,实现腐蚀过程的高度精确化,从而推动压力传感器向更高精度的方向发展。

参考文献:

- [1] PHAM A D, NGUYEN T K, LE H H, et al. An efficient design of the piezoresistive pressure sensor applied for micro aerial vehicle [J]. The International Journal of Integrated Engineering, 2023, 15(1): 35-44.
- [2] MA Y, LEI C, LIANG T, et al. Design and fabrication of a tiny micro-pressure sensor with improved lin-

- earity and sensitivity [J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(5): 055018.
- [3] PINTO R M R, GUND V, CALAZA C, et al. Piezoelectric aluminum nitride thin-films: A review of wet and dry etching techniques [J]. *Microelectronic Engineering*, 2022, 257:111753.
- [4] SHAO Z, WU Y, WANG S, et al. All-sapphire-based fiber-optic pressure sensor for high-temperature applications based on wet etching [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3):4139-4146.
- [5] GUPTA A, PAL P, SHARMA C S. Surface texturing of silicon {100} in an extremely low concentration TMAH for minimized reflectivity [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2019, 8(10):622-628.
- [6] MRAZKOVA Z, SOBKOWICZ I P, FOLDYNA M, et al. Optical properties and performance of pyramidal texture silicon heterojunction solar cells: Key role of vertex angles, *Progress in Photovoltaics* [J]. *Research and Applications*, 2018, 26(6): 369-376.
- [7] SHEN J, CHEN Y, ZHANG F, et al. Morphological and crystallographic evolution of patterned silicon substrate etched in TMAH solutions [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 496:143720.
- [8] PAL P, SWARNALATHA V, RAO A V N, et al. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: A review [J]. *Micro and Nano Systems Letters*, 2021, 9(1):4.
- [9] PALIWAL S, YENUGANTI S. Design and simulation of digital output MEMS pressure sensor [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45(8): 6661-6673.
- [10] SAN H, ZHANG H, ZHANG Q, et al. Silicon-glass-based single piezoresistive pressure sensors for harsh environment applications [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(7):075020.
- [11] 刘润鹏, 雷程, 梁庭, 等. MEMS 高温压力传感器耐高温引线结构优化 [J]. *压电与声光*, 2024, 46(3):386-391.
- LIU Runpeng, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Optimization of high-temperature-resistant lead structure for MEMS high-temperature pressure sensors [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2024, 46(3):386-391.