

文章编号: 2095-4980(2020)03-0538-07

基于 HNA 溶液腐蚀的微半球谐振陀螺研究进展

郑显泽, 唐彬, 王月, 熊壮*

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 基于微电子机械系统(MEMS)加工技术的微半球谐振陀螺在吸收了传统半球陀螺全角测量优势的同时具有体积小, 质量轻, 成本低以及适合批量化生产的特点。在使用牺牲层法来制备微半球壳层结构的过程中, 如何在单晶硅上制作一个表面光滑的、结构整体对称性高的半球型模具对于半球谐振子的性能有决定性的影响。在 HNA(氢氟酸、硝酸、醋酸)各向同性腐蚀液制作微半球谐振子模具的原理基础上, 介绍基于 HNA 溶液各向同性腐蚀的微半球谐振陀螺研究进展, 指出了各向同性腐蚀工艺目前所面临的主要技术问题, 并对此提出了一些可能的解决途径。

关键词: 微半球谐振陀螺; 各向同性腐蚀; HNA 溶液; 单晶硅; 半球谐振子

中图分类号: TN305

献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019046

Research progress of micro-scale hemispherical resonator gyroscopes based on etching of HNA solution

ZHENG Xianze, TANG Bin, WANG Yue, XIONG Zhuang*

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The micro-scale hemispherical resonator gyroscopes based on Micro-Electro-Mechanical Systems(MEMS) manufacturing technology are characterized by small size, light weight, low cost and suitable for volume production while absorbing the advantages of full-angle measurement of traditional hemispherical resonator gyroscopes. In the process of fabricating hemispherical shell structure by sacrificial layer process, whether the molds of hemispherical resonator on single crystal silicon have smooth surface and structural symmetry has decisive influence on the performance of hemispherical resonator. In this paper, the principle of isotropic etching of HNA(Hydrofluoric, Nitric, Acetic) for making micro-scale hemispherical resonator molds is described. Then the research progress of micro-scale hemispherical resonator gyro based on isotropic etching of HNA solution is introduced. Finally, the main technical problems of isotropic etching process are pointed out, and some possible solutions are put forward.

Keywords: Micro Hemispherical Resonator Gyroscopes; isotropic etching; HNA solution; single crystal silicon; hemispherical shell resonators

半球谐振陀螺是一种由半球形谐振子、施力电极、检测电极共同构成的惯性传感器, 其工作原理是利用半球形谐振子唇缘径向驻波在哥式效应下的环向进动来检测物体的旋转^[1]。基于 MEMS 加工技术的微半球谐振陀螺作为传统半球谐振陀螺的一种拓展, 在吸收了传统半球谐振陀螺全角测量特点的同时具有体积小, 质量轻, 成本低以及适合批量化生产的特点^[2-4], 因此成为目前国内外微型陀螺仪研究的一个热点。在微半球谐振陀螺的制造工艺中, 最为核心的一个技术难点在于如何制造一个具有高几何对称性的微型化壳层结构作为半球形谐振子。现阶段世界各国对于微半球谐振陀螺中微半球壳层结构的制造技术主要分为两类: 第一类是利用微玻璃吹制技术来制备微壳层结构, 该方法主要通过微喷嘴设备对熔融玻璃材料施加气流, 使材料上下表面产生压力差, 促使熔融玻璃材料发生弯曲形变, 再将其冷却定型形成一个半球谐振子。用此方法制备的半球型微谐振子

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-03-12

基金项目: 中物院超精密加工技术重点实验室资助项目(ZM18005); 新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室开放基金资助项目

作者简介: 郑显泽(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 惯性器件。email:zxz1121@mail.ustc.edu.cn

*通信作者: 熊壮 email:xiong.zhuang@caep.cn

表面光滑，结构整体对称性高，但由于结构主体材料为玻璃类，加工工艺复杂，且陀螺的外围电极不能与谐振子一体成型，后期的器件装配以及真空封装都有一定的难度^[5-7]。第二类是使用 MEMS 表面牺牲层工艺来制备微壳层结构，该方法主要通过干法刻蚀或湿法腐蚀工艺在硅晶圆表面去除一部分材料使其生成一个半球型模具，在模具中加工一层薄层材料，再将该结构从硅中释放出来形成一个半球谐振子。用牺牲层工艺方案制作的半球谐振子半径从几十微米至几毫米，体积小，每一步的工艺流程都有较为成熟的 MEMS 加工技术实现，并且在制作半球谐振子的过程中可实现谐振子与外围信号处理电路的一体化集成^[8-10]。因此牺牲层法在生产成本和工艺稳定性方面相对于微玻璃吹制法有较大的优势。

在使用牺牲层法制备微半球壳层结构的过程中，如何在单晶硅上制作一个表面光滑的、结构整体对称性高的半球型凹槽，对于半球谐振子的性能有决定性的影响。现阶段较为成熟的制作半球型凹槽的技术路线为基于 HNA 溶液(HF, HNO₃, CH₃COOH 混合溶液)的各向同性腐蚀法。HNA 溶液是一种广泛用于硅的各向同性腐蚀中的腐蚀液，该酸溶液对于硅的腐蚀速率与晶向无关。HNA 溶液腐蚀所获的半球型凹槽对称性高，表面光滑，且腐蚀过程操作简单，因此包括康奈尔大学、普渡大学、科罗拉多大学等多家机构都对基于 HNA 溶液腐蚀的半球型谐振子制作工艺进行了研究^[11-13]。

1 HNA 溶液与 Si 反应原理

HNA 溶液是湿法腐蚀中较为常用的各向同性腐蚀液，其与硅的反应中突出的一个特点为在各个晶向上的腐蚀速率相近。根据 Steinert 和 Acker 的研究^[14-16]，HNA 溶液对硅片的腐蚀由两步组成：第一步为硅的氧化过程，其反应式为： $\text{HNO}_3 + 3\text{Si} \rightarrow 3\text{SiO}_2 + 4\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$ ；第二步为硅氧化物的溶解过程，其反应式为： $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$ 。由此可得硅在 HNA 溶液体系中的总反应式为： $3\text{Si} + 4\text{HNO}_3 + 18\text{HF} \rightarrow 3\text{H}_2\text{SiF}_6 + 4\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$ 。

HNA 溶液各组分分配比与硅的腐蚀速率关系由 Hamzah 的研究可得图 1 所示的三角关系图^[17]。

根据以上反应关系式以及溶液各组分分配比与反应速率的关系图可知，在 HNA 溶液对硅的各向同性腐蚀过程中，HNO₃ 起到的作用是氧化 Si 原子，即带走 Si 原子的表层电子，之后失去电子的 Si 原子对溶液中的氟离子极为敏感，溶液中自由扩散的氟离子与 Si 离子结合生成 SiF₆²⁻^[14-16]，而溶液组分中的乙酸起到了稀释液的作用，可以降低硝酸在溶液中的电离程度以增强其氧化性^[18]。

Robbins 和 Schwartz 的研究从更为本质的层面揭示了 HNA 溶液对硅的各向同性腐蚀过程^[19-23]。当硝酸过量时，HNO₃ 与 Si 的氧化反应过程并非为各向同性，而是沿着 Si-Si 键方向上的各向异性氧化。但在通常用于各向同性腐蚀的 HNA 溶液配比中，往往 HNO₃ 占多数，HF 为少数，这样使大量 Si 的表层原子被氧化，但并没有充足的 F⁻ 离子与之结合形成 SiF₆²⁻，使硅原子脱离圆晶的表面，因此 Si 原子的腐蚀速率受 F⁻ 扩散过程的限制。F⁻ 离子在溶液中的扩散过程为各向同性扩散，当 F⁻ 离子各向同性自由扩散到圆晶表面时，导致圆晶表面的硅原子发生各向同性的脱落过程，即发生各向同性腐蚀。

除此之外，Bhave 等^[11]和 Bauhuber^[24]在 HNA 溶液硅腐蚀研究中发现，由于 HNA 溶液与 Si 的反应为自催化反应，腐蚀反应的速率会随实验的进行出现失控现象，从而影响半球模具的光滑度。新加坡微电子学研究所对 HNA 溶液与 Si 的失控反应的研究中^[25]认为，HNA 溶液与硅的失控反应是以硝酸和硝酸氧化物的平衡为基础。该腐蚀反应最初是由未解离的硝酸和硅触发的，生成的一氧化氮在溶液中与硝酸反应产生亚硝酸。在此体系中亚硝酸的产生是一个自催化反应过程，即溶液中一旦生成 HNO₂ 便会与 HNO₃ 进一步发生反应，生成更多的 HNO₂；溶液中的 HNO₂ 含量越高，HNO₂ 的生成速率越快，进而导致 HNA 溶液对 Si 的腐蚀速率过快，半球谐振子模具表面光滑度变差。

HNA 溶液对于单晶硅的各向同性腐蚀速率以及腐蚀形成的半球模具形貌高度依赖于溶液配比和对失控反应的抑制。现阶段各研究团队对于纯理论分析所获得的理想 HNA 溶液配比以及能有效抑制失控反应的方法并未

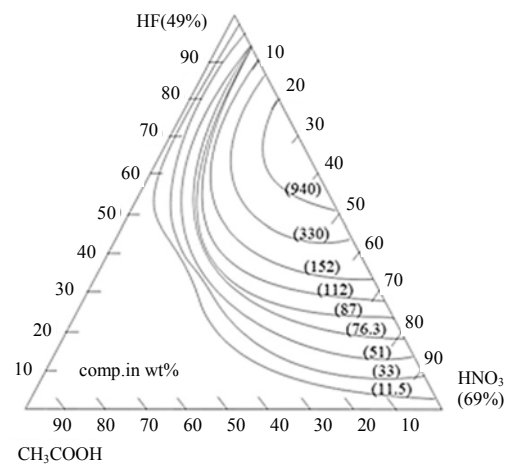


Fig.1 Etch triangle showing HNA etch rates of silicon
图 1 HNA 溶液对硅的腐蚀速率三角关系图

达成共识, 因此多家研究机构都在尝试通过具体的实验对以上问题进行探索。

2 基于 HNA 溶液各向同性腐蚀的半球谐振子模具制作工艺研究进展

为了实现在半球谐振子制作过程中模具的高整体结构对称性(小半径偏差)以及表面光滑度(表面粗糙度小), 多家实验室都对 HNA 溶液的 Si 各向同性腐蚀特性进行了深入研究。

2011 年, 康奈尔大学^[11]报道了(111)晶向和(100)晶向的单晶硅在 HNA 溶液中的各向同性腐蚀特性, 并对以 Si_3N_4 (180 nm)材料作为掩膜层实现单晶硅各向同性腐蚀的相关实验条件进行了研究。得到的实验结果显示, 在单晶硅晶向选择上, 圆形掩膜结构下(111)晶向单晶硅腐蚀得到的模具 X-Y 平面内半径偏差为 1.4%, (100)晶向半径偏差为 3.2%, (111)晶向单晶硅模具对称性明显高于(100)晶向; 在掩膜层开口大小为 20 μm 至 50 μm 的实验中发现, HNA 溶液与 Si 的反应速率明显随开口大小的增大而加快; 在溶液配比上, 增大硝酸和氢氟酸的比值, 会造成选择性腐蚀从而显著降低单晶硅模具的对称性。除此之外, 该实验室还通过实验发现, 搅拌可以有效增加半球模具 Z 轴方向上的腐蚀速率, 提高模具整体对称性, 结果如图 2 所示。

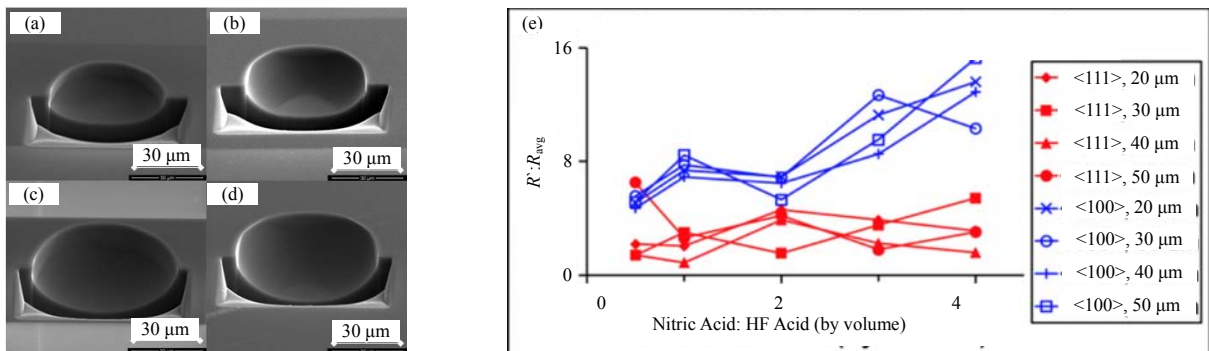


Fig.2 (a) SEM of the sample with the <100> wafer etched without agitation; (b) SEM of the sample with the <111> wafer etched without agitation; (c) SEM of the sample with the <100> wafer etched with agitation; (d) SEM of the sample with the <111> wafer etched with agitation; (e) effect of chemical ratio of etchant on preferential etching for samples without agitation^[11]

图 2 (a) <100>晶向硅无搅拌条件下腐蚀后电镜图; (b) <111>晶向硅无搅拌条件下腐蚀后电镜图; (c) <100>晶向硅有搅拌条件下腐蚀后电镜图; (d) <111>晶向硅有搅拌条件下腐蚀后电镜图; (e) 无搅拌条件下选择性腐蚀和溶液配比的关系图^[11]

2012 年, 犹他大学^[8-9]在使用 SiO_2 材料制作半球谐振的实验中报道了使用 LPCVD 工艺的 Si_3N_4 (500 nm)材料作为掩膜层的条件下, 对圆形开口的掩膜形状利用 HNA 溶液($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}=1:9:0$)进行直接湿法腐蚀制作半球模具的情况。与传统使用 HNA 溶液制作半球谐振子模具不同, 该试验组选择不在 HNA 溶液中加入乙酸作为溶剂, 而是直接使用富硝酸的 HF— HNO_3 溶液进行腐蚀。最终所制作的半球谐振子模具直径为 500 μm , 半径偏差小于 1%, 表面粗糙程度小于 5 nm, 半球谐振子外形及测量结果如图 3 所示。

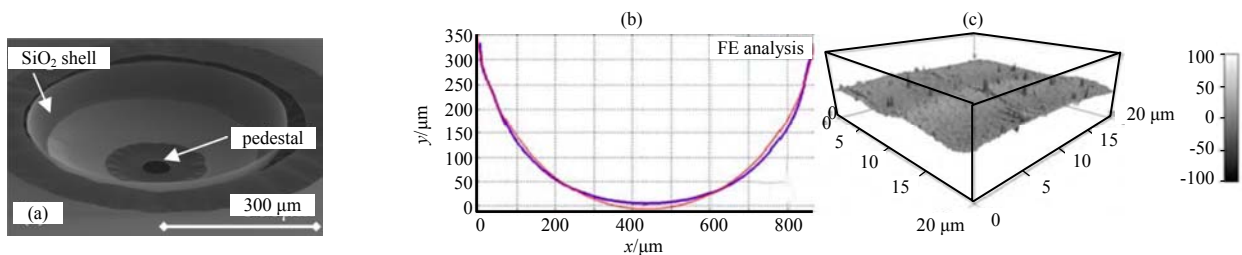


Fig.3 (a) SEM images of final device with hemispherical resonators shell and pedestal; (b) cross-section of hemisphere fit with a semi-circle with deviation less than 1% near the stem; (c) AFM scan of shell surface showing less than 5 nm rms roughness^[8]

图 3 (a) 带有基座和壳层结构的半球谐振子电镜图; (b) 模具径向横截面与半球的拟合误差小于 1%; (c) 原子力显微镜扫描壳层表面粗糙度小于 5 nm^[8]

2014 年, 科罗拉多大学^[13]在使用 Al_2O_3 原子层沉积技术制作半球谐振子的实验中报道了以 Cr/Au(20 nm/180 nm)材料为掩膜层的条件下, 利用 HNA 溶液($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}=2:7:1$)湿法腐蚀和 SF_6 等离子体干法刻蚀制作半球模具的情况。其实验结果显示, SF_6 等离子体干法刻蚀(111)晶向和(100)晶向的单晶硅所获得的模具在结构对称性和表面光滑度上都难以达到要求。室温条件下使用 HNA 溶液进行无搅拌的(111)单晶硅腐蚀所获得的半球谐振子模具的轮廓也未达到结构对称性的要求, 而是依赖于单晶硅的晶向呈六边形状。只有在 50 $^{\circ}\text{C}$ 的条

件下使用 HNA 溶液在轻微搅拌的情况下对(111)晶向的单晶硅进行腐蚀，获得了一个半径为 $57.4 \mu\text{m}$ 的半球，在椭圆拟合和圆形拟合下其半径最大误差分别为 $0.13 \mu\text{m}$ 和 $0.28 \mu\text{m}$ ，实验结果如图 4 所示。

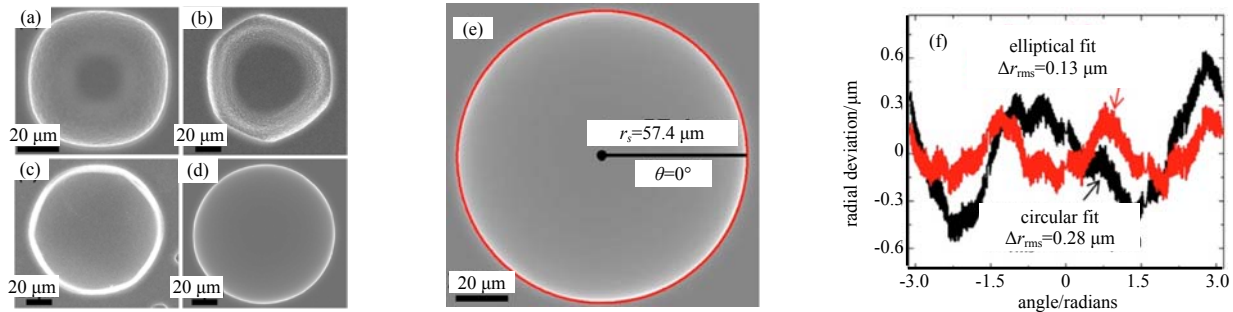


Fig.4 (a) SF6-etched mold in Si (100); (b) SF6-etched mold in Si (111); (c) HNA-etched mold in Si (111) at room temperature without agitation; (d) HNA-etched mold in Si (111) at 50°C with light agitation; (e) overhead SEM micrograph of a hemispherical mold with an overlaid fit to the mold's edge; (f) radial deviation of the fit assuming a circular mold or elliptical mold^[13]

图 4 (a) SF6 在(100)晶向硅上的腐蚀模具; (b) SF6 在(111)晶向硅上的腐蚀模具; (c) HNA 溶液在室温无搅拌条件下腐蚀(111)晶向硅形成的模具; (d) HNA 溶液在 50°C 轻微搅拌的条件下腐蚀(111)晶向硅形成的模具; (e) 半球模具轮廓的俯视电镜图; (f) 在椭圆拟合或圆形拟合下的半径误差^[13]

2013 年，加州大学戴维斯分校和加州大学伯克利分校^[26-27]合作开展半球谐振子制作工艺研究，不同于犹他大学和科罗拉多大学采用 HNA 溶液直接腐蚀半球谐振陀螺的工艺路线，他们先使用微电火花加工技术在 Cr/Au 掩膜层之下制作出一个大致形貌接近于半球的粗糙模具，再使用 HNA 溶液(HF:HNO₃:CH₃COOH=2:3:3)腐蚀 120 s 以提高模具的半球整体对称性和光洁度。采用该方法获得的半球谐振子模具直径为 1.1 mm，半径偏差低于 $6 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度小于 4 nm，半球谐振子结构原理图和实验结果如图 5 所示。

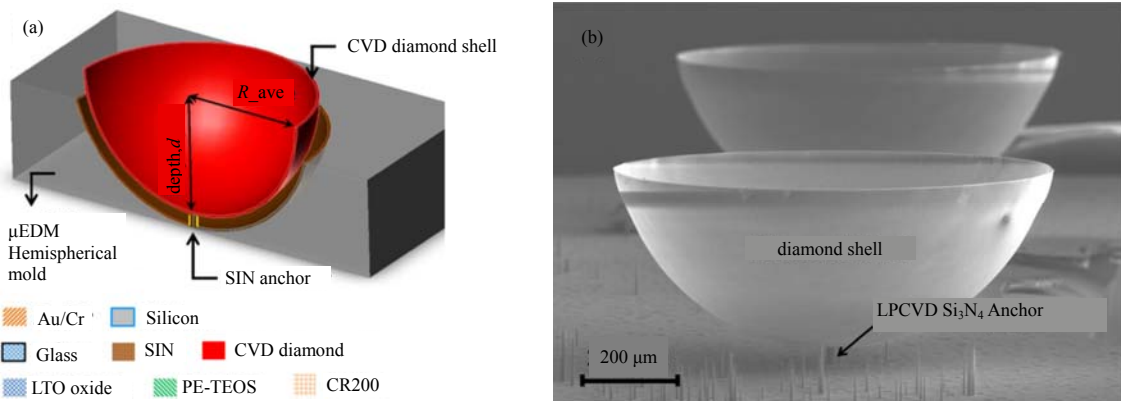


Fig.5 (a) structure of the hemispherical wineglass resonators; (b) SEM micrograph shows an array of released diamond shells attached to the silicon substrate with LPCVD Si₃N₄ anchors

图 5 (a) 半球谐振子结构原理图; (b) 连接在 LPCVD 工艺 Si₃N₄ 微锚上的金刚石半球谐振子阵列电镜图

2018 年，普渡大学^[12]相较于之前各实验室利用 HNA 溶液制作半球谐振子模具的传统实验路线，创新性提出了一种利用名为 Pop-up Rings 的动态掩膜结构制作大半径、高对称性半球谐振子模具的工艺路线，有效提高了半球模具的 Z 轴对称性。如图 6(a)所示，该实验的特点是利用按照特定规则分布的环形掩膜结构替代传统的圆形开口掩膜结构。在 HNA 溶液(HF:HNO₃:CH₃COOH=1:4:1)的腐蚀过程中，反应生成的气体会将环形掩膜层依次抬起，使得掩膜层的开口半径以及开口形状随腐蚀过程而逐步变化，达到对硅圆晶腐蚀过程中侧向和纵向腐蚀速率的严格控制。最终获得的半球谐振子 X-Y 半径为 $92 \mu\text{m}$ ，Z 半径为 $91 \mu\text{m}$ ，结构整体半径偏差小于 1.1%，实验结果如图 6 所示。

如表 1 所示，除上述直接利用 HNA 溶液腐蚀形成半球谐振子模具的实验之外，也有大量利用 HNA 溶液腐蚀单晶硅制作其他微尺度器件的实验，对提高半球模具的结构对称性和光滑度具有借鉴意义。其中，法国 FEMTO-ST 研究所^[28]利用 HNA 溶液各向同性腐蚀特性制作半球型微透镜的实验中，对 HNA 溶液腐蚀单晶硅的结构对称性进行了深入探索；韩国三星公司和庆北大学^[29]使用 HNA 溶液腐蚀单晶硅制作半球电润湿透镜的实验中，研究了多种掩膜材料的耐腐蚀特性；德国雷根斯堡应用科学大学^[24]在单晶硅上制作微光学沟道的研究中，对提升 HNA 溶液腐蚀单晶硅表面粗糙度的条件以及抑制失控反应的方法进行了探索；犹他大学^[30]和马来

西亚国民大学^[17]在使用 HNA 溶液腐蚀制备高深宽比微探针实验中, 同样对硅腐蚀的表面光滑度进行了研究。

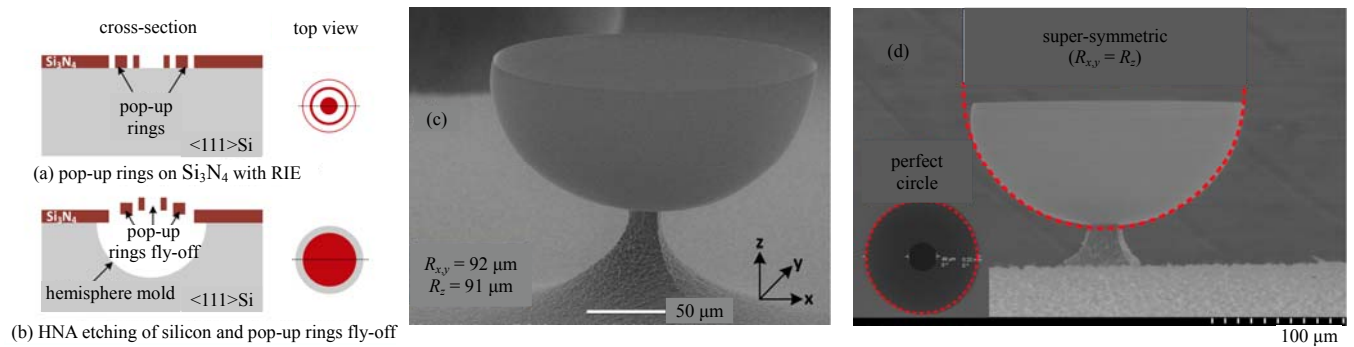


Fig.6 (a) pop-up rings on Si_3N_4 with RIE; (b) HNA etching of silicon and pop-up rings fly-off; (c) SEM pictures of HSRs fabricated with the pop-up rings mask; (d) SiO_2 hemispherical shell with diameters of $180 \mu\text{m}$, demonstrating a 3D symmetry of 99%^[12]

图 6 (a) 活性离子刻蚀工艺在 Si_3N_4 上制作 pop-up rings; (b) HNA 溶液腐蚀硅并将 pop-up rings 抬升; (c) 由 pop-up rings 方法制作的半球谐振子电镜图片; (d) SiO_2 材料制作的半球壳层直径为 $180 \mu\text{m}$, 三维对称性达到 99%^[12]

表 1 基于 HNA 的半球谐振陀螺对称性对比

Table1 Contrast of structural symmetry of μHRGs based on HNA solution

	Cornell university	university of Utah	university of Colorado	university of California, Davis and Berkeley	Purdue university
radius of molds/ μm	30	250	57.4	550	92
deviation of radius/%	1.4	<1	<0.48	<1.1	<1.1
roughness/nm	-	<5	-	<4	-

3 主要问题及其可能的解决途径

利用 HNA 溶液的各向同性腐蚀特性制作微半球模具的技术关键点在于半球模具的整体结构对称性以及表面光洁度。虽然多家机构现阶段已经在实验室中制作出一些较为优质的半球谐振子, 但在实用化过程中依旧存在一些工艺技术问题有待解决。

1) HNA 溶液对单晶硅的腐蚀速率高度依赖于掩膜材料溶液配比、温度和搅拌方式等条件, 而现阶段各实验室对最为理想的实验条件并未达成共识。可用于批量化制作半球谐振子模具的腐蚀条件还需进一步探索。

2) 对于大开口半径($>50 \mu\text{m}$)掩膜形状的腐蚀, 由于掩膜层下方侧向腐蚀现象的存在, 以及纵向腐蚀速率受腐蚀凹槽深度的限制, 在实际制作过程中会出现半球模具腐蚀深度过浅的情况, 使半球模具更接近于椭球状。过浅的半球会使制作出的半球谐振子抗垂直方向加速度干扰能力减弱^[12], 可以通过适当的搅拌或使用动态掩膜等手段增加半球模具制作过程中的纵向腐蚀速率。

3) HNA 溶液与单晶硅反应的过程中会有气泡生成, 有一部分气泡会附着在硅的表面, 使得半球模具的表面光滑度降低, 可通过水浴加热或搅拌等方式来减少气泡的附着。

4) 由于 HNA 溶液与单晶硅的反应为自催化放热反应, 亚硝酸的积累以及溶液温度的升高都将使得反应过程有可能出现失控反应, 使半球模具表面粗糙且各向同性特征减弱, 可以在腐蚀反应过程中适时更换反应溶液, 避免亚硝酸的积累和溶液温度的持续升高。

5) 在用于半球模具制作的富硝酸 HNA 溶液配比上, 低 HF 比例的 HNA 溶液与单晶硅反应产生的模具表面光滑, 但反应速率较慢, 需要长时间腐蚀才能使半球成型; 高 HF 比例的 HNA 溶液与单晶硅反应速率较快, 但生成的模具表面粗糙。在制作过程中可以先使用高 HF 比例的 HNA 溶液腐蚀出半球模具的大致形貌, 再使用低 HF 比例的 HNA 溶液对模具表面进行腐蚀, 使其更加光滑。

4 结论

微半球谐振陀螺作为传统半球谐振陀螺与 MEMS 技术的结合, 由于其体积小, 功耗低, 成本低等特点具有广阔的应用前景。其核心部件的半球谐振子制作过程中需要极高的结构对称性和表面光滑度的半球模具, 而 HNA 各向同性腐蚀溶液由于其操作简单, 成本低, 腐蚀一致性高等特点成为半球谐振子模具制造中的主流工艺。越来越多的国内外研究团队投入到 HNA 溶液的硅腐蚀工艺研究中, 使微半球模具制造技术快速提升, 为微半球谐振陀螺实用化工程产品的开发和应用奠定坚实的基础^[31]。

参考文献：

- [1] 王旭. 半球谐振陀螺误差建模补偿与力平衡控制方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012. (WANG Xu. Error modeling compensation and forces to rebalance control methods study for hemispherical resonators gyro[D]. Changsha, Hunan, China: National University of Defense Technology, 2012.)
- [2] 易剑, 江南, 庄须叶, 等. MEMS 固体波动陀螺谐振子现状及发展[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(10): 738-745. (YI Jian, JIANG Nan, ZHUANG Xuye, et al. Status and development of MEMS solid wave gyroscope resonators[J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(10): 738-745.)
- [3] 权海洋, 杨栓虎, 陈效真, 等. 高端 MEMS 固体波动陀螺的发展与应用[J]. 导航与控制, 2017, 16(6): 76-85. (QUAN Haiyang, YANG Shuanhu, CHEN Xiaozhen, et al. Development and application of advanced MEMS solid wave gyroscope[J]. Navigation and Control, 2017, 16(6): 76-85.)
- [4] 汪红兵, 林丙涛, 梅松, 等. 微半球谐振陀螺技术研究进展[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(11): 47-55. (WANG Hongbing, LIN Bingtao, MEI Song, et al. Research development of micro Hemispherical Resonator Gyro(μ HRG) technology[J]. Micronanoelectronic Technology, 2017, 54(11): 47-55.)
- [5] NAGOURNEY T, CHO J Y, DARVISHIAN A, et al. Effect of metal annealing on the Q-factor of metal-coated fused silica micro shell resonators[C]// IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems. Hapuna Beach, HI, USA: IEEE, 2015: 13-17.
- [6] CHO J Y, YAN J, GREGORY J A, et al. 3-dimensional blow torch-molding of fused silica microstructures[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22(6): 1276-1284.
- [7] BOYD C, WOO J K, CHO J Y, et al. Effect of drive-axis displacement on MEMS birdbath resonator gyroscope performance[C]// 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems(INERTIAL). Kauai, HI, USA: IEEE, 2017: 1-2.
- [8] PAI P, CHOWDHURY F K, MASTRANGELO C H, et al. MEMS-based hemispherical resonator gyroscopes[C]// 2012 IEEE SENSORS. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [9] PAI P, CHOWDHURY F K, POURZAND H, et al. Fabrication and testing of hemispherical MEMS wineglass resonators[C]// IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2015: 677-680.
- [10] VAFANEJAD A, KIM E S. Effect of diaphragm perforation on quality factor of hemispherical resonator gyroscope[C]// Transducers-International Conference on Solid-state Sensors. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2015: 27-30.
- [11] FEGELY L C, HUTCHISON D N, BHAVE S A. Isotropic etching of 111 SCS for wafer-scale manufacturing of perfectly hemispherical silicon molds[C]// Solid-state Sensors, Actuators & Microsystems Conference. Beijing: IEEE, 2011: 2295-2298.
- [12] MUSTAFA M T, SEN D, AJAY B, et al. Acceleration insensitive hemispherical shell resonators using pop-up rings[C]// IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Belfast, UK: IEEE, 2018: 956-959.
- [13] GRAY J M, HOULTON J P, GERTSCH J C, et al. Hemispherical micro-resonators from atomic layer deposition[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(12): 125028-125037.
- [14] STEINERT M, ACKER J, OSWALD S, et al. Study on the mechanism of silicon etching in HNO_3 -rich HF/HNO_3 mixtures[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2007, 111(5): 2133-2140.
- [15] STEINERT M, ACKER J, MATTHIAS K, et al. Reactive species generated during wet chemical etching of silicon in HF/HNO_3 mixtures[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(23): 11377-11381.
- [16] STEINERT M, ACKER J, WETZIG K. New aspects on the reduction of nitric acid during wet chemical etching of silicon in concentrated HF/HNO_3 mixtures[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(36): 14139-14144.
- [17] HAMZAH A A, YEOP MAJLIS B, YUNAS J, et al. Optimization of HNA etching parameters to produce high aspect ratio solid silicon microneedles[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2012, 22(9): 95017-95026.
- [18] TURNER D R. On the mechanism of chemically etching germanium and silicon[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1960, 107(10): 810-816.
- [19] SCHWARTZ B, ROBBINS H. Chemical etching of silicon I—the system HF, HNO_3 and H_2O [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1959, 106(6): 505-508.
- [20] SCHWARTZ B, ROBBINS H. Chemical etching of silicon II—the system $\text{HF}, \text{HNO}_3, \text{H}_2\text{O}$ and $\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1960, 107(2): 108-111.
- [21] SCHWARTZ B, ROBBINS H. Chemical etching of silicon III—a temperature study in the acid system[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1961, 108(4): 365-372.
- [22] SCHWARTZ B, ROBBINS H. Chemical etching of silicon IV—etching technology[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1976, 123(11): 1903-1909.

- [23] SCHWARTZ B,ROBBINS H. Chemical etching of Germanium in solutions of HF,HNO₃,H₂O, and HC₂H₃O₂[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1964,111(2):196–201.
- [24] BAUHUBER M,MIKRIEVSKIJ A,LECHNER A. Isotropic wet chemical etching of deep channels with optical surface quality in silicon with HNA based etching solutions[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2013,16(6):1428–1433.
- [25] HUI W C. How to prevent a runaway chemical reaction in the isotropic etching of silicon with HF/HNO₃/CH₃COOH or HNA solution[J]. Proceedings of SPIE, 2004(5276):270–279.
- [26] HEIDARI A,CHAN M L,YANG H A,et al. Hemispherical wineglass resonators fabricated from the microcrystalline diamond[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013,23(12):125016-1–8.
- [27] HEIDARI A,CHAN M L,YANG H A,et al. Micromachined polycrystalline diamond hemispherical shell resonators[C]// IEEE 2013 Transducers & Eurosensors XXVII. Barcelona, Spain:IEEE, 2013:2415–2418.
- [28] ALBERO J,NIERADKO L,GORECKI C,et al. Fabrication of spherical microlenses by a combination of isotropic wet etching of silicon and molding techniques[J]. Optics Express, 2009,17(8):6283–6292.
- [29] LEE J K,CHOI J C,JANG W L,et al. Electrowetting lens employing hemispherical cavity formed by hydrofluoric acid, nitric acid, and acetic acid etching of silicon[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012,51(6):06FL05-1–7.
- [30] NEGI S,BHANDARI R,SOLZBACHER F. Novel isotropic and anisotropic etching of MEMS structures by controlling the dynamics of the etchant[C]// 2011 16th International Solid–State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. Beijing: IEEE, 2011:2362–2365.
- [31] 苏菲,尚德重,汪建波,等. 基于陀螺仪和加速度计的帆船运动姿态测量[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2): 183–189. (SU Fei,SHANG Dezhong,WANG Jianbo,et al. A measurement method of sailing attitude based on MEMS gyroscope and accelerometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):183–189.)