

# 石英半球型微谐振器的仿真与加工

邢亚亮,张卫平,唐健,孙殿竣,刘朝阳,欧彬

(上海交通大学 微纳电子学系 微米/纳米加工技术重点实验室,薄膜与微细技术教育部重点实验室,上海 200240)

**摘要:**该文对石英半球型微谐振器进行了模态仿真,分析了前十阶振型及适合陀螺工作的模态,讨论了谐振器壁厚变化对四波腹模态谐振频率的影响。利用吹玻璃法和湿法腐蚀制作了石英半球型微谐振器,跟踪不同的腐蚀速率得出湿法腐蚀可精确控制壁厚的结论。测试腐蚀后的谐振器表面粗糙度仅为 0.581 nm,保留了原子级别的光滑度。

**关键词:**石英半球型微谐振器;半球谐振陀螺;模态分析;湿法腐蚀

**中图分类号:** TN252; V241.5 **文献标识码:** A

## Simulation and Fabrication of Micro Silica Hemispherical Resonator

XING Yaliang, ZHANG Weiping, TANG Jian, SUN Dianjun, LIU Zhaoyang, OU Bin

(National Key Lab. of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication, Key Laboratory for Thin Film and Micro Fabrication of the Ministry of Education, Department of Micro-Nano Electronics, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In this paper, the modal simulation of the micro silica hemispherical resonator is carried out. The first ten modes and the appropriate mode for a gyroscope are analyzed. The influence of the wall thickness of the resonator on the resonant frequency of the 4-wave abdominal mode is discussed. A micro silica hemispherical resonator is fabricated by the glass blowing and wet etching process. It is concluded that the wet etching can accurately control the wall thickness by tracking different corrosion rates. The surface roughness of the resonator after corrosion is only 0.581 nm which retains the atomic level of smoothness.

**Key words:** micro silica hemispherical resonator; hemispherical resonator gyro; mode analysis; wet etching

### 0 引言

微型谐振器有很大的应用需求,包括信号处理、定时、频率控制及惯性检测<sup>[1]</sup>。本文将研究应用于半球微谐振陀螺仪的半球型微谐振器。陀螺仪是一种能够检测角速度或角度的惯性器件,广泛应用在航天、航空、航海、兵器及一些民用领域里。科学家们发现了上百种可以用来感测运动体相对于惯性空间旋转的物理现象,并据此研制了各种类型的陀螺,如机械陀螺仪、光学陀螺仪、核磁共振陀螺仪及冷原子陀螺仪等。哥氏振动陀螺是一种无转子陀螺,它用振动元件取代了传统陀螺的机械转子,用微幅振动取代了高速旋转,是一种新型的、极有发展潜力的惯性仪表。其中,半球型谐振器构成的半球谐振陀螺是目前精度最高的哥氏振动陀螺<sup>[2]</sup>,具有寿命长、

可靠性高,稳定性好,噪声低,分辨率高及功耗低等特点,还有抗核辐射和记忆功能。半球谐振陀螺仪在国外航天领域已得到成功应用,其独特的优点适合深空探测和载人航天等重要航天任务。

随着微机电系统(MEMS)的迅速发展,出现了一系列高可靠性、高稳定性的微传感器、微执行器等 MEMS 器件。微陀螺仪是 MEMS 器件中重要的一类器件。它的运用已从单纯的航空领域逐渐转向汽车、消费电子行业等低端市场,这意味着微陀螺仪除了传统意义上的高精度、高稳定性的要求,也可以向低精度商品化发展<sup>[3]</sup>。微型半球谐振陀螺具有体积小,质量小,易集成,可批量生产等优点,被国际惯性技术界认为是 21 世纪广泛用于航空、航天惯导系统中最理想的器件<sup>[4-5]</sup>,预期可广泛用于汽车、医疗、摄

收稿日期:2016-08-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61574093);航空基金资助项目(2013ZC57003)

作者简介:邢亚亮(1991-),女,江苏南通人,硕士生,主要从事石英半球型微谐振器的研究。通信作者:张卫平,教授,博导,主要从事微惯性技术的研究。E-mail:zwp37@163.com。

影、电子消费等其他领域,具有广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。国外半球谐振陀螺已进入第三个研究阶段——深入研究阶段,旨在提高性能,减小体积及降低成本。在国内半球谐振陀螺仪的发展还处于起步阶段,目前,微型半球谐振陀螺的研究报道及参考文献均很少,因此,扎实做好关于半球微谐振陀螺的基础研究非常必要。半球型微谐振器是半球微谐振陀螺的关键部件,本文将着手研究石英半球型微谐振器的模态,结合高温压差法和湿法腐蚀制作半球谐振器,并对半球谐振器表面形貌进行测试。

### 1 半球型微谐振器的结构与材料

图1为一种半球型微谐振器结构示意图。半球型微谐振器包括半球壳和支撑杆,支撑杆用来约束和支撑半球壳。图中, $R$ 为半球壳中面半径, $r$ 为支撑杆半径, $h$ 为谐振器壁厚, $L$ 为支撑杆总长度。

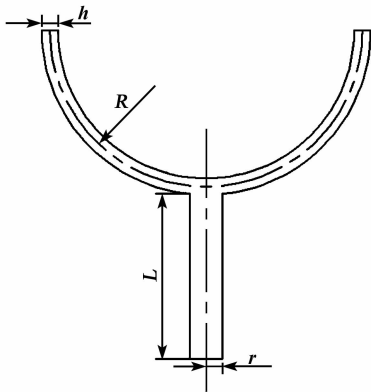


图1 半球型微谐振器结构示意图

半球微谐振陀螺的主体部分是半球型微谐振器,半球型微谐振器采用的材料必须是各向同性的,其次还要具有较高的品质因数( $Q$ )。另外,环境温度的改变将引起陀螺各零件几何尺寸和相互间几何位置的变化,从而导致陀螺产生温度附加误差。具体地说,当压缩以及拉伸的应力导致谐振器的材料内部产生加热及冷却时,可能出现热弹性阻尼。这将导致在谐振器的厚度上产生温度梯度,所导致的热流会耗散谐振器的机械能。热弹性阻尼影响着谐振器的 $Q$ 。低的热膨胀系数可以帮助降低谐振器的热弹性阻尼。熔融石英玻璃具有温度系数小和温度系数稳定,热膨胀系数低的特性<sup>[7]</sup>,是谐振器的理想材料。采用这种材料的谐振器具有稳定的振动频率,较短的延迟时间和较高的机械稳定性,另外,这种材料还有较低的热膨胀率和较大的内应力,这使谐振器能在较大的温度范围内工作,同时能降低维

持陀螺振动所需的能量损耗。

### 2 半球型微谐振器振动的模态分析

谐振器的物理、几何参数预设计值如表1所示。下面利用有限元分析软件COMSOL对谐振器进行模态分析。其中谐振器材料选择为熔融石英,其弹性模量 $E=74\ 000\ \text{MPa}$ ,密度 $\rho=2\ 200\ \text{kg/m}^3$ ,泊松比 $\nu=0.3$ 。半球型微谐振器有限元模型如图2所示。

表1 谐振器参数

$R/\text{mm}$	$r/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	$L/\text{mm}$
2	250	100	3
$E/\text{MPa}$	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	$\nu$	
74 000	2 200	0.3	

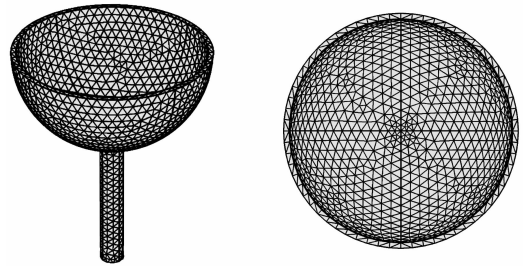


图2 半球型微谐振器有限元模型

半球型微谐振器前10阶的振型和频率如图3所示。 $m$ 为阶数,由图可知, $m=1,2$ 时振型是半球

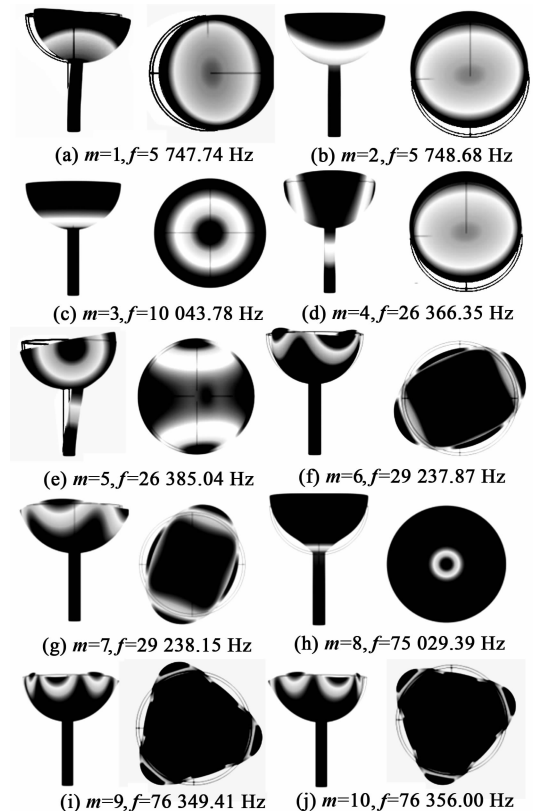


图3 半球型微谐振器  $m=1\sim 10$  的振型图

壳的二波腹振动。 $m=3$  时振型是半球壳绕支撑杆旋转。 $m=4,5$  时振型是半球壳和支撑杆同时发生二波腹振动。 $m=6,7$  时振型是半球壳产生的四波腹振动。 $m=8$  时振型是半球壳沿着支撑杆发生上、下振动。 $m=9,10$  时振型是半球壳的六波腹振动。谐振器环向波数越高,振型越复杂,谐振频率也更高,不利于谐振器的激振和信号检测与控制。环向波数为 2 的四波腹振型,其谐振频率远离相邻振型的谐振频率,适合选作陀螺仪的工作振型和检测振型<sup>[8]</sup>。

### 3 半球型微谐振器壁厚与谐振频率的关系

谐振器参数与谐振器各阶振型的谐振频率之间有一定的关系。另外,因半球型谐振器厚度和质量都不均匀等偏差,均会对陀螺仪的精度产生影响<sup>[9]</sup>。若要得到理想振型并减少其他振型对其的影响,则需要掌握谐振器参数与谐振频率之间的关系,从而合理地选择谐振器的参数。

下面将从半球型微谐振器的结构尺寸参数分析其与谐振器各阶振型谐振频率的关系,为谐振器结构参数的设计提供理论依据。为比较各结构尺寸的误差对于谐振频率的影响,采用 COMSOL 软件的参数化扫描工具,可以方便地使某一数值按特定的步长变化,并计算出对应的结果——谐振频率。

谐振器壁厚设计值为: $h=100\ \mu\text{m}$ ,当  $h$  发生变化,而其他参数不变时,谐振器四波腹振型的谐振频率如图 4 所示。

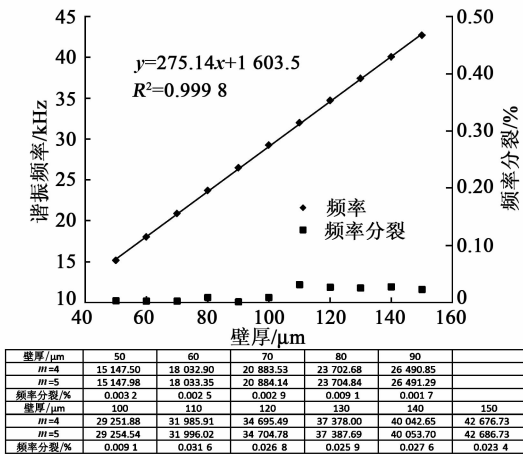


图 4 半球壳壁厚与谐振频率、频率分裂的关系

图 4 中, $m=4$  的谐振频率与壁厚成高度线性关系,拟合优度达 0.999 8。因此,随着半球壳壁厚的增加,四波腹振型的谐振频率线性增加,频率分裂均

小于 0.031 6%。谐振器壁厚对谐振频率产生较大影响,是半球型微谐振器结构设计中的关键参数。

### 4 石英半球型微谐振器的制作

石英三维微加工是 MEMS 工艺中的难题,通常采用高温压差法<sup>[10]</sup>和化学机械磨削加工法<sup>[11]</sup>。化学机械磨削加工法制造的石英玻璃表面较粗糙,且不能制造微型三维结构。采用高温压差法,石英的软化点为 1 750  $^{\circ}\text{C}$ ,与大多数 MEMS 工艺不兼容,难以通过集成微加工法得到石英微谐振器陀螺。采用组装方法制作石英微谐振器陀螺也有困难。高温压差法为一次成型,制作的石英泡壁厚难以控制,这要求针对每个石英泡设计合理尺寸的电极,失去了批量化加工的优势。本文结合高温压差法与湿法腐蚀工艺制作得到石英半球谐振器。湿法腐蚀因其低成本而应用较广泛。湿法腐蚀能够满足各向同性刻蚀的需求,且比干法刻蚀对器件表面的损伤小。

本文采用氢氧喷灯加热石英玻璃,基于高温压差法得到直径约为  $\varnothing 5\ \text{cm}$ ,壁厚数百微米的石英半球壳。利用氢氟酸缓冲液腐蚀石英半球壳得到壁厚精准的石英半球谐振器。其中,氢氟酸缓冲液为氢氟酸含量 6.6%和氯化氨含量 33.5%的混合溶液,氯化氨的作用是减缓氢氟酸腐蚀速率,改善器件表面形貌。为精确控制石英半球谐振器的壁厚,需要得到该氢氟酸缓冲液的腐蚀速率。我们记录了石英半球壳不同壁厚下的腐蚀速率,如图 5 所示。由图可知,壁厚约减小 15  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。减小量最大误差为 1.235  $\mu\text{m}/\text{h}$ ,平均误差约 20  $\text{nm}/\text{min}$ 。考虑到人工控制腐蚀时间的误差基本在 1 min 内,所以,腐蚀控制石英半球谐振器壁厚的误差仅为几十纳米,这对于数百微米乃至数十微米壁厚的石英半球谐振器都是一个极小量,几乎不影响后期设计电极部分。

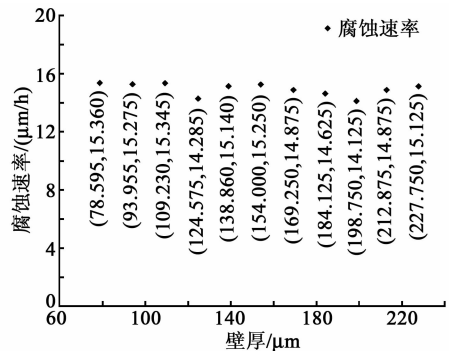


图 5 不同壁厚下的腐蚀速率

图 6 为综合利用高温压差法和湿法腐蚀得到的石英半球谐振器,直径为  $\varnothing 3\ 848\ \mu\text{m}$ ,壁厚为 152  $\mu\text{m}$ 。

对该方法制作的石英半球谐振器进行了表面形貌测试,如图7所示,腐蚀前表面粗糙度为0.537 nm,石英半球谐振器表面达到了原子级别的光滑度。腐蚀后的粗糙度为0.581 nm,氢氟酸缓冲液对石英半球谐振器表面形貌仅带来了很微小的损伤。

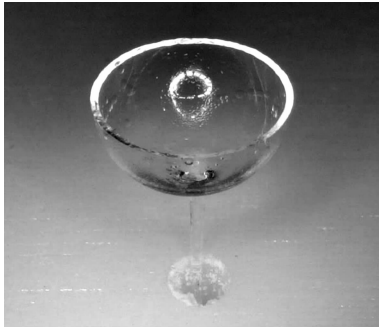


图6 石英半球谐振器

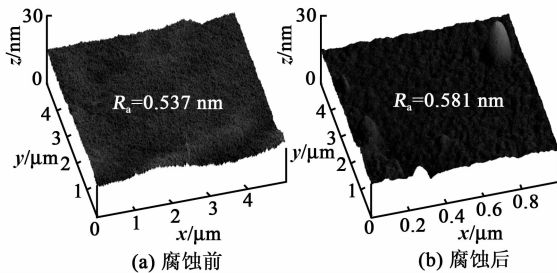


图7 石英半球谐振器腐蚀前、后的粗糙度

## 5 结束语

根据仿真分析的结构尺寸与谐振频率的关系,总结结构参数选取方法:随着半球壳壁厚的增加,谐振器刚度和谐振频率均增加,从而使谐振器不易激振。从激振的角度考虑,希望半球壳壁厚小。当半球壳壁厚减小时,制造上所造成的非轴对称影响越显著,会导致测量误差增加。综合考虑,这里选择壁厚为100  $\mu\text{m}$ 。在工艺方面,综合利用高温压差法和湿法腐蚀制作了半球谐振器,通过控制腐蚀时间可以精确控制谐振器壁厚。腐蚀前谐振器表面粗糙度为0.537 nm,腐蚀后的粗糙度为0.581 nm,因此,氢氟酸缓冲液对石英半球谐振器表面形貌的损伤很微小。总之,采用湿法腐蚀控制石英半球谐振器的壁厚是一个成本低,简单易行,误差极小的方法,此方法适合批量生产石英半球型微谐振器。

## 参考文献:

[1] LAWRENCE E M, SPELLER K E, YU D. MEMS characterization using laser Doppler vibrometry[C]// S. I.; Micromachining and Microfabrication, International Society for Optics and Photonics, 2003: 51-62.

[2] 吴俊伟. 惯性技术基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2002.

[3] 成宇翔, 张卫平, 陈文元, 等. MEMS微陀螺仪研究进展[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(5): 277-285. CHENG Yuxiang, ZHANG Weiping, CHEN Wenyuan, et al. Research and development of MEMS micro-gyroscope [J]. Micronanoelectronic Technology, 2011, 48(5): 277-285.

[4] 吕志清. 半球谐振陀螺(HRG)信号处理技术[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(3): 58-61. LV Zhiqing. Signal processing technology for hemispherical resonator gyro (HRG)[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2000, 8(3): 58-61.

[5] FENG Z C, GORE K. Dynamic characteristics of vibratory gyroscopes[J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4(1): 80-84.

[6] LIU K, ZHANG W, CHEN W, et al. The development of micro-gyroscope technology[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2009, 19(11): 113001-113029.

[7] SENKAL D, AHAMED M J, ASKARI S, et al. 1 Million Q-factor demonstrated on micro-glassblown fused silica wineglass resonators with out-of-plane electrostatic transduction [C]//Hilton Head Island: South Carolina, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop, 2014.

[8] 高胜利. 半球谐振陀螺的分析与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2008.

[9] 陈雪, 任顺清, 赵洪波, 等. 半球谐振子薄壁厚度不均匀性对陀螺精度的影响[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(3): 29-33. CHEN Xue, REN Shunqing, ZHAO Hongbo, et al. Effect of inhomogeneity of the hemispherical resonator thickness on the hemispherical resonator gyro precision [J]. Aerospace Contrd and Application, 2009, 35(3): 29-33.

[10] CHO J, YAN J, GREGORY J A, et al. High-Q fused silica birdbath and hemispherical 3-D resonators made by blow torch molding[C]//Taipei, Taiwan: Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2013 IEEE 26th International Conference on IEEE, 2013: 177-180.

[11] 仇中军, 周立波, 房丰洲, 等. 石英玻璃的化学机械磨削加工[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1554-1561. CHOU Zhongjun, ZHOU Libo, FANG Fengzhou, et al. Chemical mechanical grinding on quartz glass[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1554-1561.