

文章编号 1004-924X(2019)06-1293-08

基于硅各向同性腐蚀工艺的 三维曲面壳体微谐振器制备技术

庄须叶*, 陈丙根, 李平华, 王新龙, 曹卫达, 丁景兵
(华东光电集成器件研究所, 安徽 蚌埠 233042)

摘要:轴对称 3D 曲面壳体谐振器具有自身对称性好、耐冲击能力强、可靠性高的特点,是应用最为广泛的谐振器之一,但因制备工艺涉及薄壳结构的曲面成形过程,属于 MEMS 3D 工艺,很难进行批量化制备。基于硅各向同性湿法技术对多晶硅 3D 曲面壳体谐振器的批量化制备工艺进行了实验研究。设计了脱模法制备多晶硅 3D 曲面壳体结构的工艺流程,实验优选体积比为 15 : 10 : 75 的醋酸、氢氟酸、硝酸的混合液各向同性腐蚀制备硅半球腔模具,利用自制的水浴设备和水平度可调夹具,对刻蚀液温度和扩散速度进行了有效控制,减弱了反应放热和硅基片放置不水平对硅半球腔圆度与粗糙度的影响。制备了直径为 0.8~1.3 mm 的多晶硅 3D 曲面壳体结构,测试对称性最好优于 0.4%,多晶硅 3D 曲面壳体结构的表面粗糙度优于 1 nm。在 0.2 Pa 的压强下,激光多普勒测试得到曲面壳体谐振器的谐振频率为 28 kHz, Q 值为 14 365,调节驱动电压和偏置电压可实现谐振器四波腹谐振模态的模式匹配,基频差趋于零。

关键词:微机电系统;3D 工艺;硅各向同性腐蚀;壳体谐振器;轴对称

中图分类号:TP212.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192706.1293

Fabrication of microscale axial symmetric three-dimensional curved shell resonators based on silicon isotropic wet etching

ZHUANG Xu-ye*, CHEN Bing-gen, LI Ping-hua, WANG Xin-long, CAO Wei-da, DING Jing-bing

(East China Institute of Photo-Electronic IC, Bengbu 233033, China)

* Corresponding author, E-mail: zxye8888@163.com

Abstract: Axial symmetric curved shell resonators are among the most-widely used resonators because of their high symmetry, robustness, and reliability. However, the fabrication of this kind of resonator is based on newly developed three-dimensional (3D) microelectromechanical system technologies, making it difficult to fabricate. Polysilicon shell resonator is suitable for batch fabrication owing to its compatibility with the materials and fabrication technologies used in the IC industry, which is of high value and should be studied thoroughly. A 3D polysilicon shell resonator with high symmetry was produced using silicon cave as its mold, and the fabrication process was designed and tested experimentally. The cave was formed by isotropic etching of silicon, using a mixture of HF/HNO₃/CH₃COOH with bulk ratio 15 : 10 : 75 as the etchant. The temperature of the etchant was controlled using a water bath to ensure that the speed of the etching does not change abruptly. The level of the wafer was maintained by a clamp with which the wafer's position could be

收稿日期:2018-12-18;修订日期:2019-02-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51875585)

adjusted freely. The abovementioned measures ensured that the silicon caves had good properties, especially the symmetry and roughness. Then, 3D polysilicon shells with diameters ranging from 0.8 to 1.3 mm were fabricated, with the smallest roundness less than 0.4%. The roughness of the shell was less than 1 nm. The resonant properties of the fabricated shells were investigated using noncontact characterization methods facilitated by a laser Doppler vibrometer. A mechanical quality (Q) of 14 365 at 28 kHz was obtained in vacuum with a pressure of 0.2 Pa. By adjusting the bias voltage and actuated voltage, the mode-matching situation was achieved, and the relative frequency mismatch between the two degenerate four-node wineglass modes was reduced to zero.

Key words: Micro-Electro-Mechanical System (MEMS); three-dimensional (3D) fabrication; silicon isotropic wet etching; shell resonators; axial symmetric

1 引言

基于微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 技术的谐振器在信号处理、授时、频率控制、滤波、医疗以及惯性制导领域有着广泛的应用,多种结构形式的谐振器相继被研发出来,包括梳齿谐振器、环形谐振器、盘形谐振器、半球形谐振器等。其中,半球形谐振器属于旋转轴对称的三维曲面壳体结构,具有自身对称性好、耐冲击能力强、可靠性高的特点,受到了国内外科研工作者的广泛青睐,多种材料、各种拓扑形态的 3D 曲面壳体结构的谐振器相继问世。

3D 曲面壳体谐振器的制备工艺属于新兴的 MEMS 3D 曲面成形工艺,与传统 MEMS 加工工艺的差异性高、难度大。国际上各研究单位根据自身的技术特点,开发了各具特色的制备工艺,并加工出了形态各异的旋转轴对称的三维曲面壳体谐振器。按照成形工艺特点,谐振器结构可简单归纳为两大类:第一类,首先制备出一个旋转轴对称的三维曲面腔体结构,然后以该腔体结构为模具,在其腔体内沉积一层壳体材料的膜层,释放掉牺牲层,脱模得到 3D 曲面壳体结构,称为脱模法;第二类,首先将用于制备 3D 曲面壳体结构的材料固定在一个密封腔内,并保证材料的两侧有一个合适的气压差,然后在高温下将该材料软化,在气体压力和材料表面张力的共同作用下,在低压区域“吹”出一个旋转轴对称的 3D 曲面壳体结构,称为吹泡法^[1]。

吹泡法制备的旋转轴对称的 3D 曲面壳体结构具有表面粗糙度低、对称性好的优点,利用该方

法制备的融石英谐振器的 Q 值已经达到 980 多万^[2],但该工艺方法存在着深宽比受表面张力的约束不能太大,壳体厚度较大,且在不同纬度处的厚度不一致,工艺过程涉及高温过程 (800 ~ 1 800 °C),工艺条件控制困难,可选择材料相对有限等不足。

脱模法制备 3D 曲面壳体结构的表面粗糙度、对称性主要取决于模具的表面粗糙度和对称性,因凹形腔体结构的立体形貌与表面粗糙度很难控制,且不易检测,壳体结构的对称性和粗糙度一般较吹泡法差。但脱模法可以制备出厚度很薄 ($<1 \mu\text{m}$),且在不同纬度处厚度都均匀分布的壳体结构。可供选择的壳体材料种类较多,目前已经报道的材料有多晶硅^[3-5]、金刚石^[6]、二氧化硅^[7]以及金属等材质^[8]。脱模制备的壳体结构的深宽比不受表面张力的限制可以做的很大 (>1),利用不同形貌的模具还可制备出多种形貌结构的 3D 曲面壳体结构,如半球形、盆形、碗形、圆筒形等。因脱模法的加工工艺流程不涉及明火高温步骤,工艺过程的可控性强,加工工艺与传统 IC 工艺的兼容性较好,特别是硅材料的谐振器,利于用半导体加工工艺进行批量化制备,非常适合产业化发展。

本文基于脱模法的优势,研究利用脱模法批量化制备多晶硅材质的旋转轴对称 3D 曲面壳体谐振器的工艺方法,分析了影响硅半球腔模具制备质量的关键因素,并对制备的多晶硅 3D 曲面壳体结构的对称性(圆度)、粗糙度进行了测量,利用激光多普勒测振仪对多晶硅谐振器的谐振特性进行了测试,结果显示直径为 0.8 mm 的多晶硅谐振器 Q 值超过 10^4 ,利用电路调谐频差可以实现四波腹谐振模态的匹配,基频差趋于零。

2 工艺流程

脱模法制备多晶硅 3D 曲面壳体谐振器的工艺流程如图 1 所示。

(1)首先在硅基底上顺序沉积氧化硅和氮化硅作为各向同性腐蚀加工的掩膜层,如图 1(a)所示;

(2)然后光刻去掉光刻区域内的氧化硅和氮化硅,得到硅各向同性腐蚀窗口,如图 1(b)所示。

(3)利用硅的各向同性湿法腐蚀技术加工出硅半球腔结构,如图 1(c)所示;

(4)除掉氧化硅层和氮化硅层,在深腔内部利用 ICP 深硅刻蚀加工出锚点结构 1,如图 1(d)所示;

(5)在加工有锚点结构的半球腔内利用等离子体增强化学气相沉积法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)生长一层二氧化硅牺牲层,如图 1(e)所示;

(6)深腔光刻,去掉锚点结构 1 底部的二氧化硅牺牲层,得到锚点结构 2,如图 1(f)所示。锚点结构 1 和锚点结构 2 组成硅半球谐振器的锚点,谐振器通过锚点固定在硅基底上。

(7)在加工有锚点结构的基片上沉积多晶硅,用作 3D 曲面壳体的结构层, CMP 除掉腔体外的牺牲层和结构层,如图 1(g)所示;

(8)光刻胶保护硅半球腔表面,在深腔背面利用 ICP 刻蚀工艺刻蚀硅至氧化硅牺牲层,得到 3D 曲面电极结构^[6],如图 1(h)所示;

(9)除掉深腔面的光刻胶保护层,如图 1(i)所示;

(10)利用气态氢氟酸(Vapor Hydrogen Fluoride, VHF)工艺去除二氧化硅牺牲层得到独立的 3D 曲面壳体结构,如图 1(j)所示。

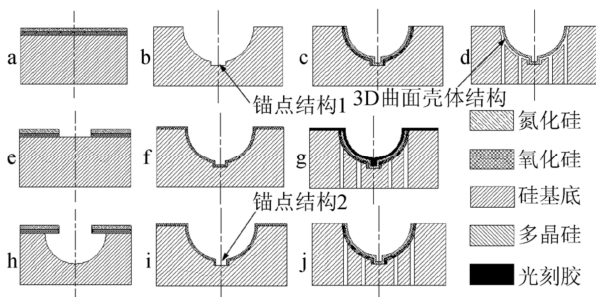


图 1 脱模法制备多晶硅 3D 曲面壳体结构的工艺流程

Fig. 1 Fabrication process of 3D curved polysilicon shell resonators

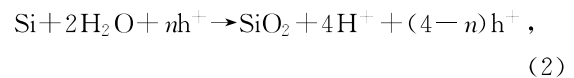
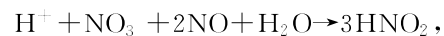
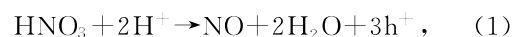
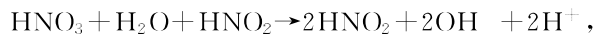
3 实验

由图 1 可见,脱模法制备 3D 曲面壳体结构的核心工艺是硅半球腔模具——硅 3D 曲面深腔结构的制备技术,其制备质量的好坏是 3D 曲面壳体结构质量优劣的决定性因素。多种硅半球腔制备方法相继被研发出来,包括 SF_6 各向同性刻蚀(乔治亚理工、康奈尔大学^[9-10])、电火花加工工艺(加州大学戴维斯分校和伯克利分校^[11])、微超声加工工艺(密歇根大学^[12])、湿法各向同性加工技术(犹他大学^[13]、查尔斯·斯塔克·德雷珀实验室等^[14])以及 ICP 刻蚀技术(加州大学伯克利分校^[6])等。因硅的湿法各向同性加工工艺具有成本低,不需要特殊加工设备的优点,更适合用于批量化生产,选择利用硅的湿法各向同性加工工艺制备硅半球腔结构。

3.1 实验原理

硅各向同性刻蚀液选择为硝酸、氢氟酸、醋酸混合液,混合液中硝酸的作用是利用自身的强氧化作用破坏掉硅的晶向结构形成氧化硅,氢氟酸起到腐蚀氧化硅的作用,醋酸起到缓和腐蚀过程的作用。

硝酸、氢氟酸、醋酸混合液中各组分的化学作用如下:



反应(1)是自催化过程, HNO_3 与 H^+ 相互作用,产生更多的空穴 h^+ ,随着空穴的注入,硅(反应(2))被氧化为 SiO_2 (氧化作用),然后 HF 腐蚀二氧化硅形成 H_2SiF_6 (反应(3),腐蚀作用),完成整个腐蚀过程。刻蚀液中的 CH_3COOH 可以约束 HNO_3 水解成为 NO_3^- 和 NO_2^- 的速度,在腐蚀过程中起到缓冲液的作用。因此硅的各向同性湿法腐蚀可以简单归纳为两步:第一步是氧化作用,在这一步中,硝酸将硅氧化成二氧化硅,破坏硅的晶体结构,消除了晶体的各向异性;第二步是利用 HF 对二氧化硅的腐蚀作用腐蚀掉硅表面形成的二氧化硅层,并将新鲜的硅暴露出来,暴露出来的

硅进而可以再与 HNO_3 作用而氧化。步骤一和步骤二交替循环推进,完成硅的各向同性湿法腐蚀。步骤一和步骤二之间的合理有效衔接对硅各向同性腐蚀的加工质量有着直接影响,而二者衔接的合理性主要取决于刻蚀液的配比。

3.2 刻蚀液配比

硅片在 HF 、 HNO_3 和 CH_3COOH 混合液中的腐蚀速度和腐蚀效果与刻蚀液的配比密切相关。当刻蚀液的配比相当于化学反应当量时,腐蚀速度最快,但腐蚀过程太过剧烈,工艺过程可控性差、腐蚀效果差。为得到较好的腐蚀效果,应使刻蚀液中的硝酸处在过盈状态,即刻蚀液的氧化能力始终处于充足状态。相反,氢氟酸在混合液中属于临界状态,即二氧化硅的分解能力处在不足状态,氢氟酸在腐蚀速度的控制中占主导地位。此区域内配比的刻蚀液可以保证硅基底在腐蚀过程中得到充分的氧化,即硅基底的晶向能够被硝酸破坏掉,各向同性特性达到最佳。实验优选刻蚀液的配比如下:醋酸:氢氟酸:硝酸的体积比为 15:10:75。

3.3 物理模型及其控制措施

该浓度配比的刻蚀液在腐蚀硅的过程中,其物理作用模型可以简化为扩散模型^[15],即氢氟酸扩散到硅表面的速度快慢决定了刻蚀液刻蚀硅的速度大小。图 2 是刻蚀液腐蚀硅的物理模型示意图(彩图见期刊电子版),图中的蓝色斜线表示不同温度、浓度梯度下新鲜的刻蚀液扩展到硅表面的时间长短。

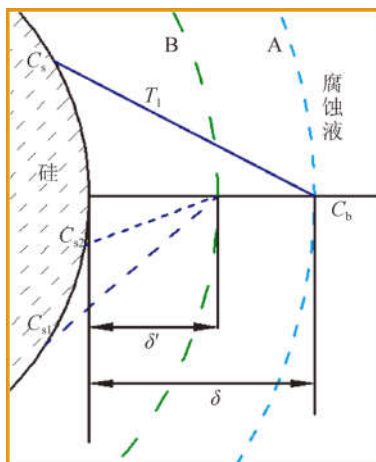


图 2 硅各向同性刻蚀液腐蚀过程的物理模型示意图

Fig. 2 Schematic representation of effects of temperature and churning on diffusion layer in silicon isotropic etchant

图 2 中 δ 是扩散层的厚度, C_b 是刻蚀液中氢氟酸的浓度,假设刻蚀液足够多,该浓度不随反应时间的改变而变化。 C_s 是硅腐蚀表面氢氟酸的浓度, T_1 是刻蚀液的初始温度。在腐蚀过程中因表面浓度 C_s 和体浓度 C_b 存在一个浓度梯度 $C_s - C_b$ ($C_b > C_s$),在该浓度梯度的影响下,体刻蚀液中的氢氟酸会向着硅表面扩散。

由公式(1)可知,在硅的各向同性化学反应过程中会产生气体,气体以气泡的形式从反应表面释放出时,会对刻蚀液产生一定的搅拌作用,在此作用下扩散层的厚度变为 δ' ($\delta' < \delta$),扩散层变薄,同时,质量传递阻抗变小。在扩散层变薄,浓度梯度变小的双重作用下,反应速度逐渐变快。

随着反应时间的增长,硅表面的温度 T_2 逐渐增大,温度越高,氢氟酸的质量传递阻抗越小,硅表面氢氟酸的浓度 C_{s1} 进一步变大,腐蚀速度过程变得更加剧烈。随着腐蚀反应时间的增长,反应放出的热量也越来越多,导致硅腐蚀的速度越来越快。同时,因反应放热产生的热源分布不均匀,在反应过程中,反应剧烈的地方反应速度增加得越来越快;而相对反应慢的地方,反应速度的增加也相对较慢。此外,该反应过程还是一个自催化过程,随着反应的进行,催化效果越来越明显,形成反应热点 C_{s2} 。随着时间的加长,在各综合因素的作用下,各点的反应速度差逐渐扩大,会形成崎岖不平的畸形表面,如图 3 所示。

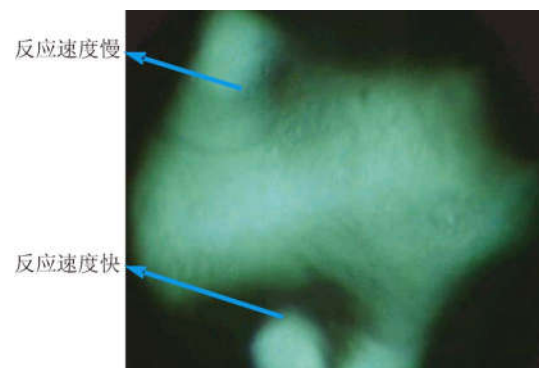


图 3 硅各向同性腐蚀速度不均匀造成的腐蚀面畸变

Fig. 3 Distorted surface profile of silicon cave due to uneven etching speed

当硅基片放置不平时,在重力的作用下氢氟酸扩散到硅表面的速度会产生较大的差异,进而导致硅基片各处的反应速度不同,破坏腐蚀的

均匀性。图 4 是因硅片放置不水平而产生的腐蚀不均匀现象,腐蚀表面成一定的缓坡形状。

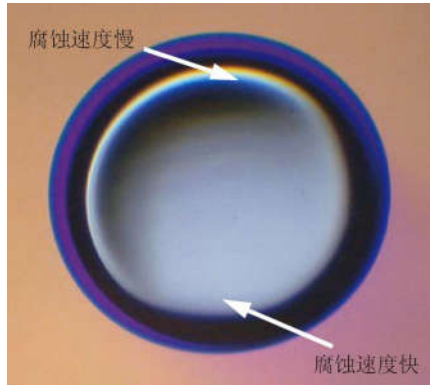


图 4 硅片放置不水平而导致腐蚀面成缓坡形状

Fig. 4 Photograph of a cave with slope shape profile for silicon placing out-of-level

为获得高质量的半球腔体结构,必须精确控制刻蚀液温度和硅片在刻蚀液中的水平度,消除反应放热和重力不均匀对反应速度造成的不利影响。实验采用两种措施:第一,利用水浴控温措施,将整个反应容器浸泡在循环的冷却水中,确保反应产生的热量可及时散去,维持刻蚀液场内的温度平衡,即硅表面的温度恒定,不产生温度突变点;第二,利用水平度可自由调整的夹具,保证硅片在整个腐蚀过程中始终处于同一水平面,可控制刻蚀液扩散到硅片上各点处的质量阻尼均匀,腐蚀速度均一,获得表面质量好的硅半球深腔结构,如图 5 所示。

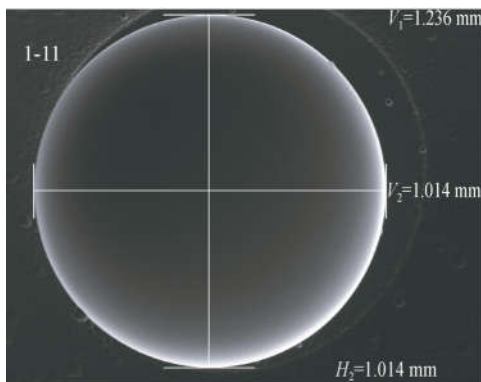


图 5 硅各向同性湿法腐蚀工艺制备的硅半球深腔 SEM 照片
Fig. 5 SEM image of finished silicon cave fabricated using silicon isotropic wet etching

完成硅半球腔制备后,根据图 1 所示的工艺流程依次加工锚点结构、沉积多晶硅、刻蚀电极和释放孔结构^[6],VHF 释放后即可得到多晶硅 3D 曲面壳体结构,如图 6 所示。

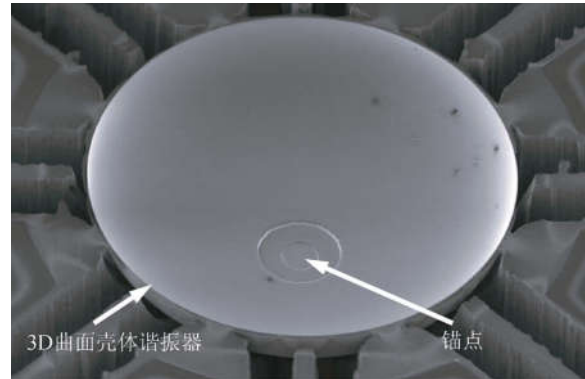


图 6 多晶硅 3D 曲面壳体结构的 SEM 照片

Fig. 6 SEM image of 3D curved polysilicon shell resonator

4 实验结果与讨论

4.1 几何形貌测试

多晶硅 3D 曲面壳体结构的圆度(对称性)和表面粗糙度是制约谐振器频率裂解大小和 Q 值高低的关键因素,而多晶硅壳体结构的形貌质量主要取决于其模具的形貌特征,实验对硅半球腔结构的圆度和表面粗糙度进行了测试。

4.1.1 圆度测试

制备后的 3D 曲面壳体结构很脆弱,在测量时极易损坏。通过模具的几何形貌来反映曲面壳体结构的几何形貌是国际上较为通用的方法。为充分验证制备的多晶硅 3D 曲面壳体结构的对称性,利用实验室自制的圆度测试设备对硅片上不同位置处的硅半球腔结构的圆度进行了测试,深腔圆度普遍在 0.5% 左右,最好的优于 0.4%,如表 1 所示。国际上硅半球腔的圆度普遍在 1% 左右,最好的优于 0.5%,其中乔治亚理工制备的谐振器圆度为 0.66%,数字除噪后为 0.44%^[9],加州大学制备的谐振器的圆度为 1.2%^[11],犹它大学制备的谐振器圆度为 1%^[17]。

表 1 硅半球腔圆度测试结果

Tab. 1 Roundness of silicon caves versus their locations in wafer

测试值	平均值	测试图样
序号	圆度	
1	0.003 9	
2	0.004 1	
3	0.005 1	
4	0.003 7	
5	0.004 2	
6	0.004 7	
7	0.004 3	

4.1.2 粗糙度测试

利用白光干涉仪(英国 Zygo, NewView 7300)测试硅基片上硅半球腔结构的粗糙度,在每个深腔结构的上下左右 4 个侧壁上各测试一次,取算术平均值作为深腔结构的粗糙度。每个测试区域尺寸是 $70\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,测量时去除 4 阶面形。

图 7 是测量得到的各硅半球腔结构的粗糙度(彩图见期刊电子版),由图可见,深腔的平均粗糙度集中位于 $0.5\sim 1\ \text{nm}$,绝大多数硅半球腔的粗糙度都优于 $1\ \text{nm}$,但存在几个粗糙度异常的硅半球腔。观察发现这些深腔结构都处于硅基片的边缘处(图 7 中的红色方块所示)。在硅基片加工时,硅片边缘是镊子夹持部位,边缘附近的深腔结构很易被镊子划伤或污染,因此导致图形变形,测量数据异常,此部分数据在进行数据处理时可视为粗大误差。

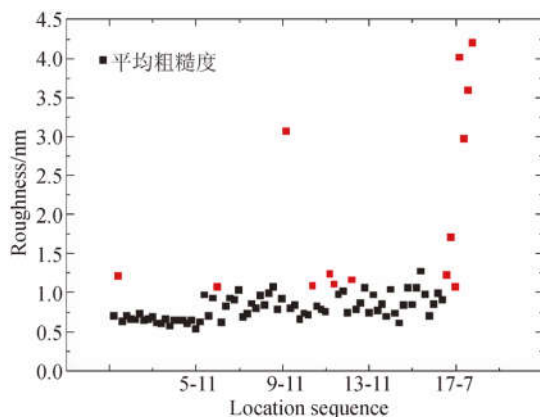


图 7 硅片上各深腔结构的糙度值

Fig. 7 Roughness of silicon caves verse their locations

为进一步提高数值分析的准确性,去掉硅基片最外围一圈的半球腔,得到的粗糙度统计频谱如图 8 所示,粗糙度的平均值为 $0.8\ \text{nm}$,分布区间集中在 $0.6\sim 0.85\ \text{nm}$ 。

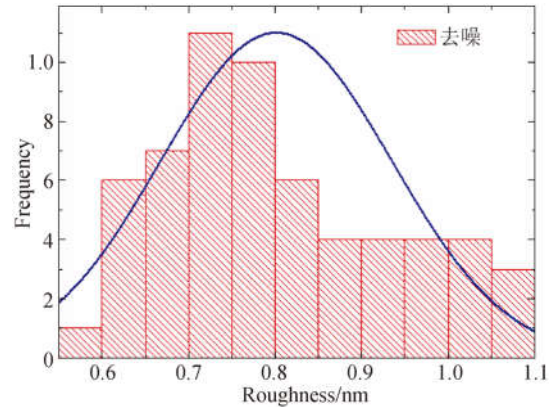


图 8 硅半球腔粗糙度的统计频谱(去掉基片边缘的深腔)

Fig. 8 Statistic analysis of silicon caves' roughness in a wafer without those on wafer's edge

4.2 谐振特性测量

3D 曲面壳体结构谐振特性的激光多普勒测试系统如图 9 所示。将制备好的谐振壳体结构(直径为 $0.8\ \text{mm}$,壳体厚度为 $1.8\ \mu\text{m}$)封装在陶瓷管壳内,固定在激光多普勒测振仪(德国 Polytec, MSA-500)的真空腔室内,抽真空,利用导线加电驱动谐振壳体启振,利用激光测试谐振壳体的振动信息。

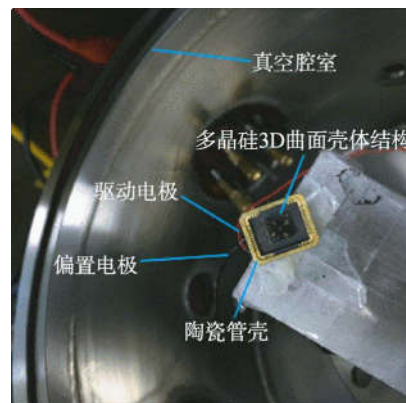


图 9 多晶硅 3D 曲面壳体结构测试系统照片

Fig. 9 Experimental setup for characterization of polysilicon shell resonator

图 10 是在真空度为 $0.9\ \text{Pa}$ 的条件下,采用 $1\ \text{V}$ 偏置电压, $1\ \text{V}$ 交流激励电压驱动 3D 曲面壳

体结构谐振后测量得到的谐振频谱。由图 10 可见,在频率 28 014 Hz 处,谐振器的相变为 360° ,此时谐振器达到了 mode-matching(模式匹配)状态,多晶硅 3D 曲面壳体结构的基频差趋于零,说明制备的谐振器具有很好的对称性,谐振器 Q 值为 9 340。

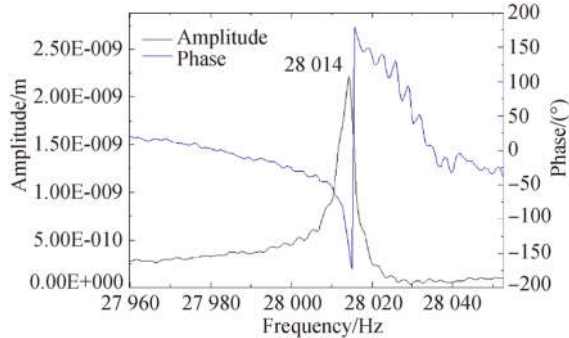


图 10 多晶硅谐振壳体结构的谐振频谱曲线

Fig. 10 Frequency response of shell resonator with diameter of 0.8 mm

图 11 是真空中度为 0.9 Pa,偏置电压为 1 V 时,分别用 1 V 和 5 V 的交流驱动电压驱动谐振器谐振后测试得到的振动谱线。由图可见,当谐振器的驱动电压由 1 V 升高至 5 V 时,谐振器的振动幅度升高至原来的 3 倍。此时,谐振器的四波腹谐振频率裂解为 28 012.21 Hz 和 28 014.65 Hz,振幅分别为 6.36×10^{-9} m 和 5.43×10^{-9} m,频差为 2.44 Hz, $\Delta f/f_{n=2} = 0.009\%$ 。频率为 28 014.65 Hz 时,带宽为 2.45 Hz, Q 值为 11 435;频率为 28 012.21 Hz 时,带宽为 1.95 Hz, Q 值为 14 365。美国乔治亚理工大学研制的同等结构的多晶硅壳体结构的 Q 值最高为 9 500^[10]。多晶硅 3D 曲面壳体结构的高 Q 值特性表明,实验制备的 3D 壳体结构具有很高的质量,表面粗糙度和锚点损耗都很小。

参考文献:

- [1] 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): 772-780.
WANG H B, LIN B T, MEI S, et al.. Research development of micro hemispherical resonator gyro (μ HRG) technology [J]. *Micronanoelectronic Technolog*, 2017(5): 772-780. (in Chinese)
- [2] SINGH S, NAGOURNEY T, CHO J Y, et al..

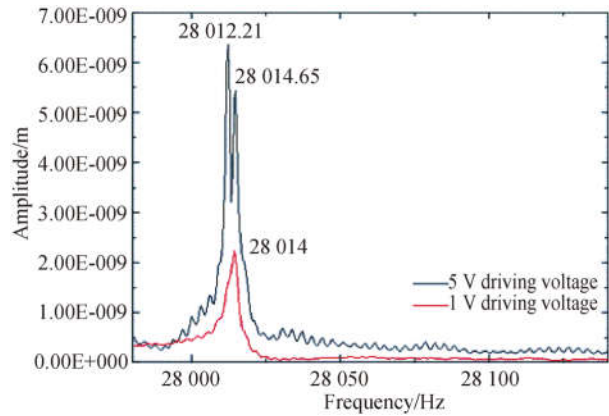


图 11 不同驱动电压下多晶硅谐振壳体结构的谐振谱线

Fig. 11 Frequency response of 1.8 mm diameter resonator driven at different voltages

5 结 论

本文设计了脱模法制备轴对称 3D 曲面壳体结构的制备工艺流程,并实验制备出多晶硅轴对称的 3D 曲面壳体结构。对 3D 曲面结构的核形成形工艺,即硅半球腔制备工艺进行了讨论和分析,利用体积比为 15 : 10 : 75 的醋酸、氢氟酸、硝酸混合液各向同性湿法腐蚀硅制备了硅半球腔模具,利用自制的水浴设备和水平度可调的夹具,实现了对刻蚀液温度 (T_1 和 T_2) 和扩散速度 (δ 和 C_s) 的有效控制,减弱了反应放热和硅基片放置不水平对硅半球腔圆度与粗糙度的影响,制备了直径为 0.8~1.3 mm 的多晶硅 3D 曲面壳体结构,测试对称性最好优于 0.4%,普遍好于国际上其他科研单位制备的硅半球腔。3D 曲面壳体结构的表面粗糙度优于 1 nm,激光多普勒测试 3D 曲面壳体结构的 Q 值高达 14 365,调节驱动电压和偏置电压可实现谐振器四波腹谐振模态的模式匹配,基频差趋于零。

- Design and fabrication of high-Q birdbath resonator for MEMS gyroscopes [C]. *IEEE PLANS 2018, Monterey, USA*, 2018:15-19.
- [3] ZHUANG X Y, CHEN B G, WANG X L, et al.. Microsacle polysilicon hemispherical shell resonating gyroscopes with integrated three-dimensional curved electrodes [J]. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, 986: 012022.
- [4] ZHUANG L Y, WANG X L, LI P H, et al.. Fab-

- rication of 3D spherical electrodes of MEMs hemispherical gyros [J]. *Micro-Nano Technology*, 2017, XVII-XVIII: 230-235.
- [5] SHAO P, C L M, GAO X, *et al.*. A polysilicon micro-hemispherical resonating gyroscope [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(4): 762-764.
- [6] DAISUKE S, AMIR HEIDARI C Y, NAJAR H, *et al.*. Microcrystalline diamond cylindrical resonators with quality-factor up to 0.5 million [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108: 051904.
- [7] SHAO P, GAO X, AYAZI F. Wineglass-on-a-chip [C]. *Proceedings of the Solid State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop (Hilton Head 2012), Hilton Head Island, CA, USA*, 2012: 3-7.
- [8] NISHANTH MEHANATHAN V T, SHAO P, SORENSON L, *et al.*. Invar-36 micro hemispherical shell resonators [C]. *IEEE MEMS 2014, San Francisco, USA*, 2014:40-43.
- [9] SORENSON X G, AYAZI F. 3-D micromachined hemispherical shell resonators with integrated capacitive transducers [C]. *IEEE MEMS 2012, Pairs, France*, 2012: 677-680.
- [10] PENG SHAO V T, MAYBERRY C L, AYAZI F. A 3D-HARPSS polysilicon microhemispherical shell resonating gyroscope: design, fabrication, and characterization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9): 4974-4985.
- [11] HEIDARI M-L C, YANG H A, JARAMILLO G, *et al.*. Micromachined polycrystalline diamond hemispherical shell resonators [J]. *IEEE Transducer 2013, Barcelona, SPAIN*, 2013:2415-2418.
- [12] LI T, VISVANATHAN K, GIANCHANDANI Y B. A batch-mode micromachining process for spherical structures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(2): 025002.
- [13] PRADEEP P, CHOWDHURY F K, POURZAND H, *et al.*. Fabrication and testing of hemispherical MEMS wineglass resonators [C]. *IEEE MEMS 2013, Taipei*, 2013: 677-680.
- [14] JONATHAN J, BERNSTEIN M G B, JOSEPH M B. High Q diamond hemispherical resonators: fabrication and energy loss mechanisms [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2015 (25): 085006.
- [15] LIU ZH G, AN J, WANG J Q, *et al.*. Silicon etching in HF/HNO₃/NH₃ · H₂O/H₂O system [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007, 154(1): D21-D29.
- [16] 庄须叶, 喻磊, 王新龙, 等. MEMS 硅半球陀螺球面电极成形工艺 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2746-2752.
- ZHUANG X Y, YU L, WANG X L, *et al.*. Development of spherical capacitive electrodes of MEMS silicon hemispherical gyros [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2746-2752. (in Chinese)
- [17] PAI F K C, CARLOS H, MASTRANGELO, *et al.*. MEMS-based hemispherical resonator gyroscopes [C]. *IEEE MEMS 2012, Pairs, France*, 2012: 978-1-4577-1767.

作者简介:



庄须叶(1981—),男,山东日照人,研究员,2004年于西南石油大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事MEMS技术的研究。E-mail: zxye8888@163.com



陈丙根(1974—),男,安徽望江人,高级工程师,1997年于安徽大学获得学士学位,主要从MEMS、EMCCD和LTCC等技术的研究。E-mail: cbg214@163.com