

文章编号 1004-924X(2019)04-0842-07

## 电容式环形微机电振动陀螺的设计

寇志伟<sup>1,2</sup>, 曹慧亮<sup>1</sup>, 石云波<sup>1</sup>, 张英杰<sup>1</sup>, 刘俊<sup>1\*</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 内蒙古工业大学 电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**针对环形振动陀螺结构对称、模态特性参数相同与抗干扰特性好的特点,提出了一种新型的电容式环形微机电振动陀螺。设计了 S 形弹性支撑梁形式的硅基环形振动陀螺敏感结构,并仿真分析了陀螺的工作模态与幅频响应特性。根据环形振动陀螺的动力学特性,研究了陀螺的机电接口形式与硅基电极的设置方法,建立了硅基电极的电学参数模型与陀螺的角速度敏感模型。基于深离子刻蚀技术设计了简单可行的传感器制备流程,并成功制备了陀螺的敏感结构。实验测试结果显示,该环形微机电振动陀螺驱动与检测模态的谐振频率分别为 9 028.86 Hz 与 9 036.15 Hz,品质因数分别为 25 051 与 25 026,标度因数为 0.589 7 mV/( $^{\circ}$ ·s<sup>-1</sup>)。实验结果验证了陀螺设计与研究方法的正确性,为高性能硅基微机电陀螺的研制提供了一种可行的方案。

**关键词:**微机电系统;环形微机电陀螺;敏感结构;电容电极;加工工艺

**中图分类号:**TP212;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192704.0842

## Development of capacitive MEMS vibrating ring gyroscope

KOU Zhi-wei<sup>1,2</sup>, CAO Hui-liang<sup>1</sup>, SHI Yun-bo<sup>1</sup>, ZHANG Ying-jie<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1\*</sup>

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory,  
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuj@seu.edu.cn

**Abstract:** A novel MEMS capacitive vibrating ring gyroscope was proposed in this paper based on the advantageous of the ring gyroscope: symmetric resonator, identical mode parameters and excellent anti-interference ability. The sensitive structure of silicon-based capacitive vibrating ring gyroscope with S-shaped elastic supporting beams was designed, and the operating mode and amplitude-frequency response characteristics of the gyroscope were simulated and analyzed. The electromechanical interface and the silicon electrodes setting of the gyroscope were studied, and the electrical parameter model of silicon-based electrodes and theoretical model of gyroscope angular velocity detection were established according to its dynamic characteristics. A simple and feasible

**收稿日期:**2018-09-11;**修订日期:**2018-10-16.

**基金项目:**国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(No. 51727808);国家自然科学基金资助项目(No. 51705477);山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(重点)(No. 2018-008);中北大学电子测试技术重点实验室开放基金资助项目(No. ZDSYSJ2015004);毁伤技术国防重点学科实验室开放基金资助项目(No. DXMBJJ2017-15)

processing flow of the gyroscope was prepared by using DRIE technology, and the gyroscope prototype was manufactured successfully. Test results show that the resonance frequency of the gyroscope are 9 028.86 Hz and 9 036.15 Hz with  $Q$ -factors of 25 051 and 25 026 in vacuum packaged, respectively, and the scale factor is  $0.5897 \text{ mV}/((^\circ) \cdot \text{s}^{-1})$ . The experimental results demonstrate the validity and feasibility of the proposed method, which provides an approach to the high-performance silicon-based MEMS gyroscope.

**Key words:** Micro-Electro-Mechanical System(MEMS); vibrating ring gyroscope; sensitive structure; capacitor electrode; manufacturing process

## 1 引言

微机电陀螺是应用微机械加工技术与微电子工艺制作的一种新型惯性传感器<sup>[1]</sup>,它具有体积小、功耗低、可靠性高、易于集成等特点,在消费电子、机器人控制、汽车导航、飞行器控制、导弹制导等领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。环形振动陀螺与半球振动陀螺类似,是固体波动陀螺的一种结构形式。固体波动陀螺是利用旋转的轴对称壳体中受激励驻波的惯性效应工作的<sup>[3]</sup>,其角度敏感元件一般为轴对称的壳体或环状结构,如半球形、圆柱形、圆盘形、钟形与环形等<sup>[1-5]</sup>。

环形振动陀螺的敏感元件为一个独立的整体圆环形结构,具有结构对称良好、工作模态特性一致等特点,同时对外围环境的随机振动和温度变化等因素的敏感度较低<sup>[3]</sup>,因此受到了国外惯性传感器研究单位的广泛关注。1995年,Putty首次提出了一种低成本的MEMS振动环形陀螺,主要应用于低性能场合<sup>[3]</sup>。2000年,Ayazi等基于MEMS工艺研制了单晶硅材料的第二代环形振动陀螺仪,其角度随机游走为 $0.05 (^\circ)/\text{h}^{1/2}$ <sup>[5]</sup>。2014年,Hu等设计了一种参数放大的MEMS环形陀螺,通过参数放大的方法提高了陀螺的灵敏度与信噪比。大西洋惯性公司基于环形敏感结构开发的高性能MEMS陀螺仪的性能已经达到惯导级别,并应用在飞行器及军事武器装备上。我国从21世纪初开始了环形振动陀螺的研制工作,中科院电子所提出了一种基于SOI(Silicon on Insulator)结构的电磁式环形振动陀螺,其固有模态频率裂解减小到 $10 \text{ Hz}$ <sup>[6]</sup>。国防科学技术大学设计了一种压电式金属环形振动陀螺,其品质因数为2 504,测量范围是 $\pm 300 (^\circ)/\text{s}$ <sup>[7]</sup>。由于起步较晚,目前国内环形微机电振动陀螺的研究尚

处于实验室研究阶段。

环形振动陀螺可以近似为一个准二维结构,应用现有的MEMS技术及集成电路工艺容易实现敏感元件的高精度加工与外围处理电路的单片集成,从而实现惯性器件的小型化与电子电路的高精度并行制造<sup>[8-9]</sup>。综上所述,MEMS环形振动陀螺在测量性能、高精度加工与惯性器件小型化方面具有突出的优势,基于MEMS技术研制环形振动陀螺具有重要的理论意义与工程应用价值,因此本文根据环形振动陀螺的工作原理与动力学特性,设计了一种全新的电容式环形微机电振动陀螺。

## 2 敏感结构设计仿真

本文设计了一种硅基电容式MEMS环形振动陀螺结构,该结构由一个中心锚点固定的环形谐振子、硅基电容电极、玻璃基底与金属引线组成,如图1所示。环形谐振子由一个悬浮的谐振圆环、8支全对称的S形弹性支撑梁与中心锚点构成。其中,谐振圆环由与中心锚点连接的S形弹性梁支撑,中心锚点与硅电极的下底面键合在玻璃基底上。玻璃基底的上表面设置有图形化金属引线,用于连接陀螺的外围测控电路。

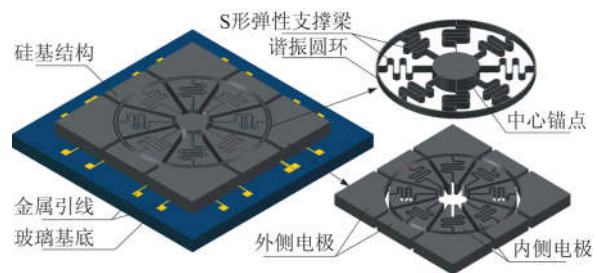


图1 MEMS环形振动陀螺的结构

Fig. 1 Composition of MEMS vibrating ring gyroscope

环形谐振子的几何结构如图 2 所示, 结构参数与材料参数如表 1 所示。该环形谐振子采用了 S 形弹性梁的全对称结构, 其设计思路与特点为: (1) 弹性梁采用圆滑的 S 形, 没有尖锐的直角设计, 残余应力对它的影响较小; (2) S 形弹性梁结构比较简单, 工艺实现相对容易, 因此陀螺的微机械结构受加工误差的影响较小; (3) 谐振子的 S 形弹性梁中心线与其固有模式的振动主轴重合, 可以有效地降低谐振结构的阻尼耦合误差与刚度耦合误差对工作模式的影响, 从结构设计角度提高陀螺精度。

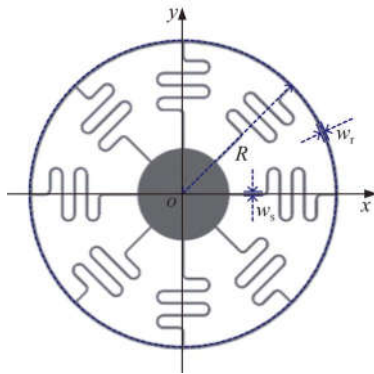


图 2 环形谐振子的几何结构

Fig. 2 Geometric structure of ring resonator

环形振动陀螺的工作模式一般为波数  $n=2$  的面内椭圆形振动形式, 该形式有两种主振动模式, 分别用作陀螺的驱动模式与检测模式<sup>[3]</sup>, 如图 3 所示。对于谐振结构完全对称的环形振动陀螺, 这两种主振动模式的振动波腹是严格互补的<sup>[5,9]</sup>, 即两种主振动模式的振动主轴(波腹轴)之间的夹角是  $45^\circ$ 。

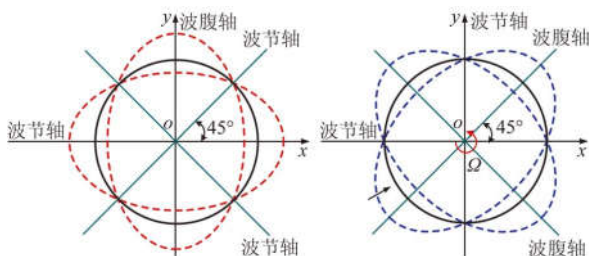


图 3 环形振动陀螺的基础工作模式

Fig. 3 Basic modes of vibrating ring gyroscope

根据表 1 的参数在有限元软件 ANSYS 中建立单晶硅环形谐振子的有限元模型, 约束环形谐

振子中心锚点与玻璃基底键合处的位移, 划分网格后分别在其驱动与检测主轴方向施加  $0.2 \mu\text{N}$  的静电力, 在  $0 \sim 10 \text{ kHz}$  的频率区间进行幅频响应分析与模态分析, 结果分别如图 4 和图 5 所示。

表 1 环形谐振子的设计参数

Tab. 1 Design parameters of ring resonator

参数	数值/ $\mu\text{m}$	参数	数值
圆环半径 R	3 000	材料密度	$2\ 330 \text{ kg/m}^3$
圆环宽度 $w_r$	50	泊松比	0.28
S 梁宽度 $w_s$	30	弹性模量	$1.69 \times 10^{11} \text{ Pa}$

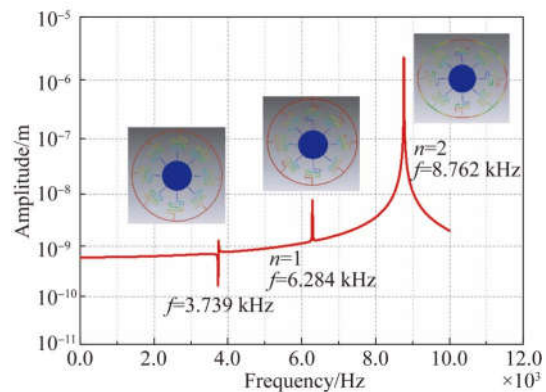


图 4 驱动模式的频率特性

Fig. 4 Frequency response of drive mode

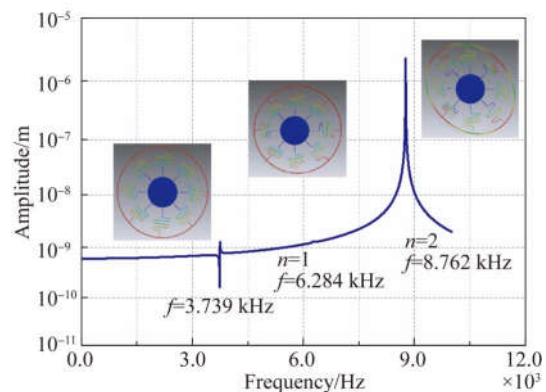


图 5 检测模式的频率特性

Fig. 5 Frequency response of sense mode

由图可知, 环形谐振子低阶面内的振动模式为波数  $n=1$  或  $n=2$  的模式, 其中  $n=1$  的振动模式为沿着 X 方向或 Y 方向的平移模式 ( $6.284 \text{ kHz}$ );  $n=2$  的振动模式为正交的挠曲模式, 固有频率为  $8.762 \text{ kHz}$ , 可以作为陀螺的工作模式。工作模

态与邻近干扰模态的最小频差为 2.478 kHz,说明该环形陀螺结构具有较好的抗干扰性。模态仿真表明,该环形振动陀螺的敏感结构设计合理,可以有效避免环境振动干扰,也能够实现工作模式的固有频率匹配。

### 3 机电接口设计与工作原理

陀螺的电极是敏感结构与外围电路的接口,直接决定着陀螺的工作状态与性能参数<sup>[10 11]</sup>。该陀螺在谐振圆环两侧沿圆周方向设置了 16 个对称的弧形电极  $E_1 \sim E_{16}$ ,如图 6 所示。其中  $\varphi_c$  为电容电极的夹角(电极角度), $\theta_{ci}$  为电极主轴角度。谐振圆环与外侧电极  $E_1 \sim E_8$  构成了 8 个静态电容相等的电容器  $C_{m1} \sim C_{m8}$ ,其中  $C_{m1}$  与  $C_{m5}$ ,  $C_{m3}$  与  $C_{m7}$  用于产生静电力与静电力反馈,形成驱动模态闭环; $C_{m2}$  与  $C_{m6}$ ,  $C_{m4}$  与  $C_{m8}$  用于圆环谐振位移的检测与反馈,形成检测模态控制闭环。振动圆环与内侧电极  $E_9 \sim E_{16}$  构成了 8 个静态电容相等的电容器  $C_{ai9} \sim C_{ai16}$ ,用于陀螺的正交控制及静电刚度调谐等。

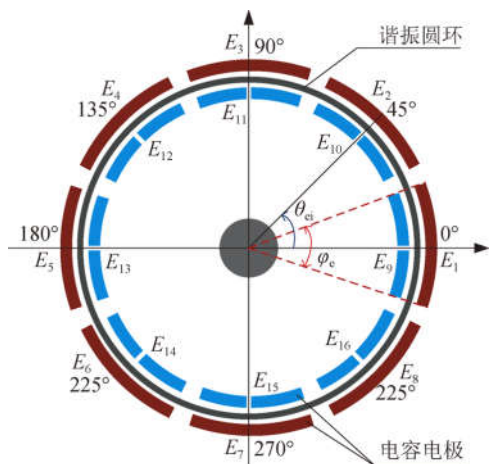


图 6 环形振动陀螺的电极设置

Fig. 6 Electrode setting of vibrating ring gyroscope

根据环形振动陀螺的动力学原理,当环形谐振子在静止状态时,各组电极电容等效为静止的平板电容器;当环形谐振子工作时,谐振环的振动引起电极电容极板距离的变化。由于环形谐振子的振动位移比较微小,因此环形电容可以等效为变极距的平板电容器,如图 7 所示。

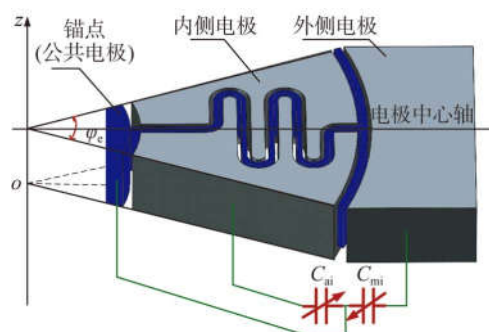


图 7 环形振动陀螺的电极电容

Fig. 7 Capacitor electrodes of vibrating ring gyroscope

设弧形电容电极的面积微元  $dA = hRd\theta$ , 则外侧电容  $C_{mi}$  和内侧电容  $C_{ai}$  可以表示为:

$$C_{mi} = \int \frac{\epsilon}{x_0 - \Delta x} dA = \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} \frac{\epsilon h}{x_0 - \Delta x} R d\theta, \quad (1)$$

$$C_{ai} = \int \frac{\epsilon}{x_0 + \Delta x} dA = \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} \frac{\epsilon h}{x_0 + \Delta x} R d\theta, \quad (2)$$

其中: $\epsilon$  为陀螺腔内的介电常数; $x_0$  为硅基电容静态极距; $\Delta x$  为电容间距变化量; $h, R$  分别为环形谐振结构的高度与半径; $\theta_{ci}, \varphi_c$  分别为电极中心轴与电极的角度。将式(1)和式(2)在  $\Delta x$  处泰勒展开得到:

$$C_{mi} \approx \eta_1 \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} d\theta + \eta_2 \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} \Delta x d\theta + \eta_3 \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} (\Delta x)^2 d\theta, \quad (3)$$

$$C_{ai} \approx \eta_4 \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} d\theta - \eta_5 \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} \Delta x d\theta + \eta_6 \int_{\theta_{ci} - \frac{\varphi_c}{2}}^{\theta_{ci} + \frac{\varphi_c}{2}} (\Delta x)^2 d\theta, \quad (4)$$

其中  $\eta_1, \eta_2$  与  $\eta_4$  为弧形电极的电容常数,且:

$$\eta_1 = \frac{\epsilon_0 h R}{x_0}, \eta_2 = \frac{\epsilon_0 h R}{x_0^2}, \eta_3 = \frac{\epsilon_0 h R}{x_0^3}. \quad (5)$$

设陀螺驱动电极的直流驱动电压为  $U_D$ , 交流驱动电压  $u_i = U_d \sin(\omega, t)$ , 则驱动电容产生的静电力  $f_1(t)$  为:

$$f_1(t) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} C_m u_{if}^2 \right) = \frac{1}{2} u_{if}^2 \frac{dC_m}{dx}. \quad (6)$$

其中  $u_{if}$  为直流驱动电压  $U_D$  与交流驱动电压  $u_i$  的叠加。将式(5)代入式(6), 略去直流项与二倍频项, 得到基频项的静电驱动力为:

$$f_1(t) = \frac{\epsilon h R}{x_0^2} \sin \varphi_c U_D U_d \sin \omega, t = A_F \sin \omega, t, \quad (7)$$

其中  $A_F$  为驱动力的幅值。

在陀螺的驱动电极上施加频率为  $\omega_0$  的驱动力  $f_1(t)$  时,激励环形谐振子驱动模态弯曲振动,其受迫振动方程为:

$$m\ddot{q}_1(t) + c_1\dot{q}_1(t) + k_1q_1(t) = A_F \sin \omega_0 t, \quad (8)$$

其中:  $m, c_1, k_1, q_1$  分别为驱动模态的等效质量、阻尼系数、刚度系数与广义位移。

求解微分方程,得到驱动模态的广义位移为:

$$q_1(t) = A_1 \cos \omega_0 t = \frac{Q_{n1} A_F}{k_1} \cos \omega_0 t, \quad (9)$$

其中:  $A_1$  为驱动模态的位移幅值;  $Q_{n1}$  为驱动模态的品质因数。

当有垂直于环形谐振子振动平面的角速度  $\Omega_z$  输入时,敏感模态被激发。敏感模态的振动可以表示为:

$$m\ddot{q}_2(t) + c_2\dot{q}_2(t) + k_2q_2(t) = f_c(t), \quad (10)$$

$$f_c(t) = 4\lambda_{\text{vg}} m \Omega_z \dot{q}_1, \quad (11)$$

其中:  $c_2, k_2, q_2$  分别为检测模态的阻尼系数、刚度系数与广义位移;  $f_c(t)$  为驱动加速度产生的科氏惯性力;  $\lambda_{\text{vg}}$  为环形振动陀螺的角增益。则检测模态的广义位移稳态解为:

$$q_2(t) = 4\lambda_{\text{vg}} A_1 \frac{Q_{n2}}{\omega_0} \cdot \Omega_z \cos \omega_0 t, \quad (12)$$

其中  $Q_{n2}$  为检测模态的品质因数。因此对于确定的陀螺敏感结构,检测模态的稳态位移与输入角速率幅值  $\Omega_z$  及驱动位移  $A_1$  成正比。

根据式(3)与式(12)可以得到检测电容  $C_{\text{si}}$  与检测位移的关系式,略去高阶非线性项,得到:

$$C_{\text{si}} = \frac{\epsilon_0 h R}{d_0} \theta_e + \frac{\epsilon_0 h R}{d_0^2} \sin(\theta_e) \cdot q_2. \quad (13)$$

因此,当环形振动陀螺的结构参数与工作状态确定时,其输入角速度  $\Omega_z$  与检测模态的位移成比例,通过检测电容的变化值即可解算输入角速度。

#### 4 敏感结构的制备

本文设计的环形振动陀螺敏感结构的深宽比较大,而且对 S 形弹性梁与硅基电容电极的垂直度要求较高,因此设计了基于深反应离子刻蚀 (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) 的 SOG (Silicon on Glass) 工艺制备流程,如图 8 所示。该流程主要包含以下 6 个步骤:

(1)玻璃基底加工。选取厚度为  $500 \mu\text{m}$  的 Pyrex7740 玻璃晶圆,使用 AZ5214 光刻胶涂胶光刻,利用其反转特性显影后溅射铝  $100 \text{ nm}$  并

剥离,在玻璃晶圆上形成图形化金属引线。

(2)硅晶圆背腔刻蚀。使用厚度为  $300 \mu\text{m}$  的重掺杂单晶硅片,应用 AZ4620 光刻胶涂胶光刻,显影后在硅晶圆背腔 DRIE,刻蚀深度为  $40 \mu\text{m}$ ,形成键合锚点与硅电极。

(3)溅射保护层。在硅晶圆的背腔刻蚀面溅射  $300 \text{ nm}$  厚的非金属保护层。

(4)阳极键合与等离子体增强化学气相沉积法 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)。硅晶圆与玻璃基底阳极键合,并且将硅晶圆机械磨抛  $100 \mu\text{m}$ 。然后应用 PECVD 工艺在硅面生长  $2 \mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  层。

(5)释放谐振结构。应用电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀  $\text{SiO}_2$  层,形成掩膜。然后硅晶圆 DRIE 刻蚀,刻蚀深度为  $160 \mu\text{m}$ ,形成可动结构与分离电极。

(6)去除保护层。去除步骤(3)溅射的非金属保护层并清洗刻蚀残留物,完成传感器的结构制备。制备的陀螺结构的扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 检测照片如图 9 所示。

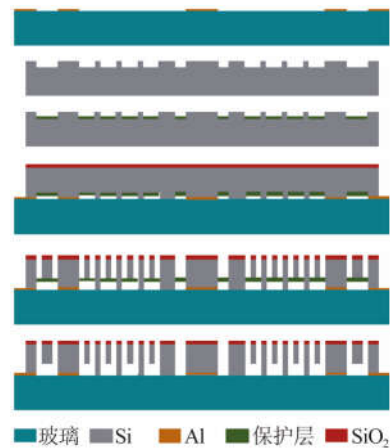


图 8 环形振动陀螺的制备流程

Fig. 8 Fabrication process of vibrating ring gyroscope

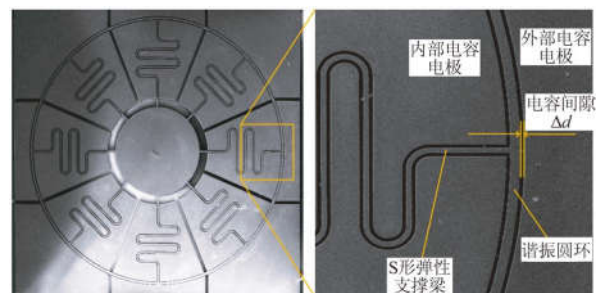


图 9 环形振动陀螺的电镜照片

Fig. 9 SEM images of fabricated vibrating ring gyroscope

### 5 实 验

首先对真空封装的环形振动陀螺表头进行模态响应测试,原理如图 10 所示。函数信号发生器输出的扫频信号一路输入到测试电路板的驱动信号输入测试端,另一路输入到混合信号示波器观察;测试电路板的驱动信号反馈端输出两路信号,其中一路输入到数字万用表读取输出电压数值,另一路输出到混合信号示波器观察。

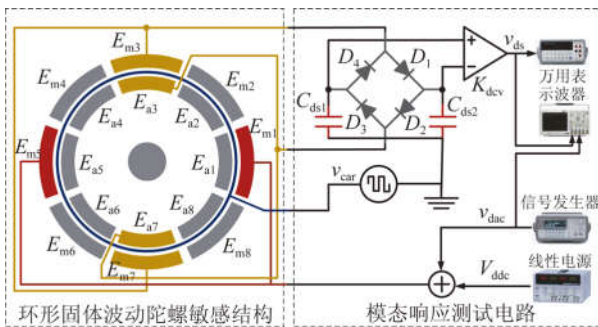


图 10 环形振动陀螺的模式响应测试

Fig. 10 Mode response test of vibrating ring gyroscope

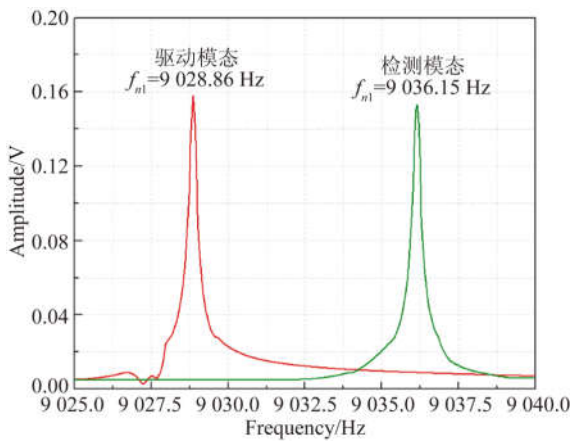


图 11 环形振动陀螺的模式响应曲线

Fig. 11 Mode response curves of vibrating ring gyroscope

测试结果如图 11 所示,由图表明该环形振动陀螺驱动与检测模式的谐振频率为 9 028.86 Hz 与 9 036.15 Hz,对应的品质因数分别为 25 051 与 25 026。

#### 参考文献:

[1] XIA D Z, YU C, KONG L. The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology [J]. *Sensors*, 2014, 14: 1394-1473.

将含有测试电路的环形振动陀螺样机固定在高精度转台上,设置转台的输入速率分别为 0, ±0.1, ±0.2, ±0.5, ±1, ±2, ±5, ±10, ±20, ±50 和 ±100 (°)/s,测试陀螺的输出电压,然后应用最小二乘法进行线性拟合得到陀螺的输入输出关系曲线,如图 12 所示。

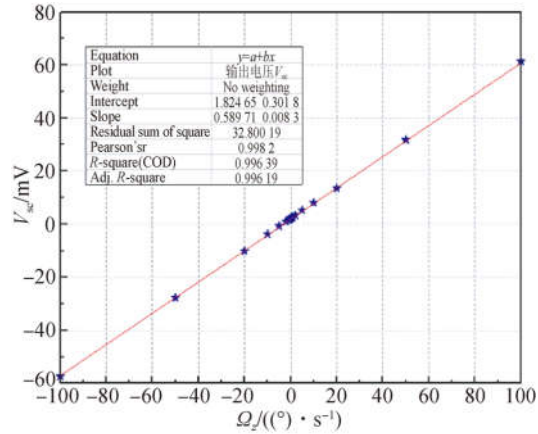


图 12 环形振动陀螺标度因数测试曲线

Fig. 12 Scale factor test curve of vibrating ring gyroscope

因此,研制的环形振动陀螺的输入角速度与输出电压的关系为:

$$V_s = k\Omega + V_{s0} = 0.589 7\Omega + 1.824 7. \quad (14)$$

### 6 结 论

本文提出了一种新型的硅基电容式 MEMS 环形振动陀螺,主要研究了其结构设计、机电接口的电学模型与角速度敏感的理论模型,以及制备流程。在室温下测试得到陀螺的谐振频率 (9 028.86 Hz 与 9 036.15 Hz) 与设计频率 (8.762 kHz) 的最大误差为 3.03%,陀螺工作模式的品质因数分别为 25 051 与 25 026;在 ±100 (°)/s 的动态范围内陀螺的标度因数为 0.589 7 mV/(°·s<sup>-1</sup>)。实验测试结果验证了该电容式 MEMS 环形振动陀螺设计与研究方法是合理可行的。

[2] HU Z X, GALLACHER B J, BURDESS J S, et al.. A systematic approach for precision electrostatic mode tuning of a MEMS gyroscope [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2014, 24(12): 125003.

- [3] PUTTY M W. *A Micromachined Vibrating Ring Gyroscope*[D]. Michigan: University of Michigan, 1995.
- [4] ZAMAN M F, SHARMA A, AYAZI F. The resonating star gyroscope: a novel multiple-shell silicon gyroscope with sub-5 deg/hr Allan deviation bias instability [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(6):616-624.
- [5] AYAZI F, NAJAFI K. High aspect-ratio polysilicon micromachining technology [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2000, 87(1-2):46-51.
- [6] LIU J L, CHEN D Y, WANG J B. Fabrication and test of an electromagnetic vibrating ring gyroscope based on SOI wafer [J]. *Journal of Electronics*, 2014, 31(2):168-173.
- [7] ZHOU X, WU Y L, WU X Z, *et al.*. A novel ring vibrating gyroscope based on side piezo-electrodes [J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23:555-561.
- [8] 李建华, 徐立新, 付博, 等. 电容式 MEMS 环形振动陀螺结构设计及加工 [J]. *中国惯性技术学报*, 2017, 25(2):240-243.  
LI J H, XU L X, FU B, *et al.*. Structure design and processing of capacitive MEMS vibrating ring gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(2):240-243. (in Chinese)
- [9] HU Z, GALLACHER B. Control and damping imperfection compensation for a rate integrating MEMS gyroscope [C]. *Inertial Sensors and Systems Symposium. IEEE*, 2015:1-15.
- [10] 陈志勇, 宋霖, 张嵘, 等. 高 Q 值微机电陀螺的快速起振控制 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5):1070-1077.  
CHEN ZH Y, SONG L, ZHANG R, *et al.*. Rapid start-up control of high Q-factor MEMS gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5):1070-1077. (in Chinese)
- [11] 刘益芳, 陈丹儿, 戴婷婷. 无源 MEMS 压力开关的设计与制备 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5):1133-1139.  
LIU Y F, CHEN D E, DAI T T. Design and fabrication of passive mems pressure switch [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5):1133-1139. (in Chinese)
- [12] 孙玉洁, 段俊萍, 王雄师, 等. 多孔耦合型太赫兹波导定向耦合器的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1):255-261.  
SUN Y J, DUAN J P, WANG X SH, *et al.*. Design of multi-hole terahertz waveguide directional couplers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1):255-261. (in Chinese)

#### 作者简介:



寇志伟(1984—),男,内蒙古乌兰察布人,博士研究生,2006年、2012年于内蒙古工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事 MEMS 惯性传感器方面的研究。E-mail:kouzhiwei@imut.edu.cn

#### 导师简介:



刘俊(1968—),男,内蒙古乌兰察布人,教授,博士生导师,1990年于太原机械学院获得学士学位,1998年、2001年于北京理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微纳机电系统,惯性器件与导航,动态测试等方面的研究。E-mail:liuj@seu.edu.cn