

学术论文

旋转体自身驱动的硅微机械陀螺

张福学, 毛旭, 张伟

(北京信息工程学院传感技术研究中心 北京 100101)

[摘要] 报道了一种利用旋转体自身角速度作为驱动力, 通过各向异性刻蚀硅片制作的硅微机械陀螺。介绍了该陀螺敏感结构(硅摆)的设计、制作与封装工艺, 用仿真器测试了旋转体的角速率。模拟试验和性能测试表明, 该陀螺结构原理正确, 可用于敏感旋转体的偏航或俯仰角速度, 以及旋转体自身的角速度。

[关键词] 硅; 各向异性腐蚀; 角速度; 仿真器

[中图分类号] TP212.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)08-0023-05

1 前言

20世纪80年代后期以来, 硅微机械陀螺的发展非常迅速, 不同结构原理的硅微机械陀螺不断涌现^[1, 2]。这些陀螺的特点是本身既有驱动结构, 也有信号敏感结构, 故结构复杂, 制造成本高。

S. F. Konovalov^[3]报道过无驱动结构陀螺的结构原理和性能, 张福学等^[4]论述过该陀螺的动力学模型, 并给出动力学参数的计算机模拟。笔者在他们的工作基础上研究的硅微机械陀螺, 自身没有驱动结构, 它是利用旋转体自旋角速度作为驱动力, 从而简化了陀螺的结构, 降低了成本。

2 设计

2.1 结构设计

图1是利用旋转体自身角速度驱动的硅微机械陀螺的结构图, 其可通过各向异性刻蚀硅片来制作。4个电极和悬挂在弹性扭转梁上的硅摆片之间形成两对差动电容。坐标系 $oxyz$ 固定在陀螺的硅摆上, $\dot{\alpha}$ 是硅摆绕 oy 轴振动的角速度, ϕ 是载体的自旋角速度, Ω 是载体的俯仰或偏航角速度。陀螺固定于旋转体上, 当陀螺随着载体以 ϕ 的角速

度旋转的同时又以 Ω 角速度俯仰或偏航时, 硅摆受到周期性变化的哥氏力(哥氏力的频率是载体旋转的频率)作用, 使硅摆产生沿 oy 轴的角振动, 从而引起由硅摆和4个电极构成的两对差动电容(C_1 与 C_2 , C_3 与 C_4)的变化。如图2所示, 把电容变化信号转换成电压变化信号并放大, 便得到与输入角速度 Ω 成比例的调幅电压信号。

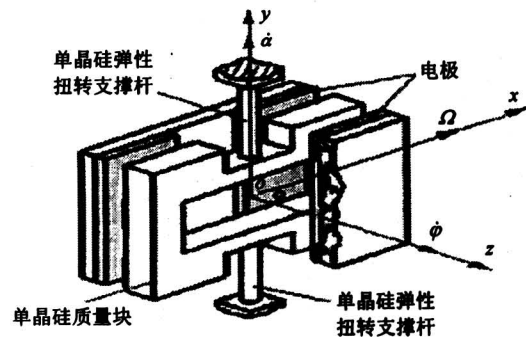


图1 微机械陀螺的结构示意图

Fig.1 The structure of micromachined gyroscope

图3是微机械陀螺的硅摆结构, a_0, a_1, a_2, a_3 是 x 方向尺寸, b_1, b_2, b_3 是 y 方向尺寸, h 是质量块厚度。

[收稿日期] 2005-11-22; 修回日期 2006-01-04

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(60472011); 北京市传感器重点实验室资助项目(4032010)

[作者简介] 张福学(1939-), 男, 云南宣威市人, 北京信息工程学院教授, 博导

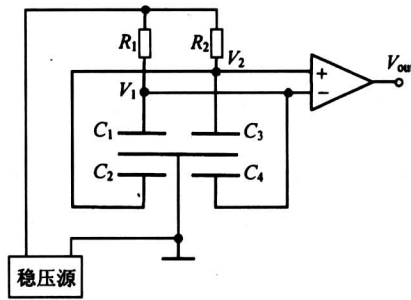


图 2 信号检测电路原理图

Fig.2 Principle of signal detecting circuit

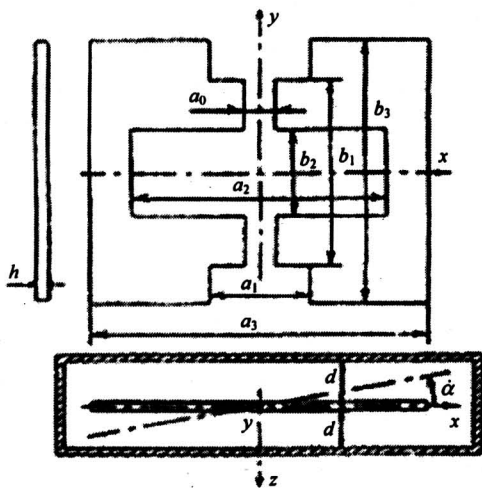


图 3 微机械陀螺的硅摆块结构

Fig.3 Structure of micromachined gyroscope's silicon pendulum

2.2 动力学方程

这种硅微机械陀螺的运动方程为^[4]

$$J_y \ddot{\alpha} + D\dot{\alpha} + [(J_z - J_x)\phi^2 + K_T]\alpha = (J_z + J_y - J_x)\Omega\phi \cos(\phi t) \quad (1)$$

式中 J_z, J_y, J_x 是敏感质量块在 ox, oy, oz 轴上的转动惯量, α 是硅摆绕 oy 轴振动的角速度二阶变量, K_T 是扭转刚度系数, D 是阻尼系数。

简化式 (1) 可得

$$\ddot{\alpha} + 2\xi\omega_0\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = f_0 \cos(\phi t) \quad (2)$$

式中

$$\omega_0^2 = [(J_z - J_x)\phi^2 + K_T]/J_y \quad (3)$$

$$\xi = D/2\omega_0 J_y =$$

$$D/2[(J_z - J_x)\phi^2 + K_T]^{1/2} J_y \quad (4)$$

$$f_0 = (J_z + J_y - J_x)\Omega\phi/J_y$$

其解为 $\alpha = Ae^{-\xi t} \cos((\omega_0^2 - \xi^2)^{1/2} t + \delta) + B\cos(\phi - \beta)$

$$\text{tg } \beta = 2n\phi/(\omega^2 - \phi^2)$$

式中 A 和 δ 是积分常数, 由运动的初始条件确定, B 是稳定振动的振幅; β 是相位差, 即角振动相位比驱动力落后的相位角; $n = \xi\omega_0$ 是阻尼因子。上式第一部分随振动时间增加而很快衰减; 第二部分由受迫作用力决定, 它的频率为受迫力的激振频率, 其振动振幅不仅和激振力有关, 还和激振频率及振动系统的参数 J_z, J_y, J_x, K_T, D 有关。方程的稳态解为

$$a = B\cos(\phi t - \beta) =$$

$$f_0 \cos(\phi t - \beta) / [(\omega_0^2 - \phi^2) + 4n^2\phi^2]^{1/2},$$

代入参数并化简可得

$$a = (J_z + J_y - J_x)\Omega\phi \cos(\phi t - \beta) / [[(J_z - J_x - J_y)\phi^2 + K_T]^2 + (D\phi)^2]^{1/2} \quad (5)$$

在方程式 (5) 中的频率只与 ϕ 有关, 输出的幅值不仅与输入角速度 Ω 有关, 还和载体旋转角速度 ϕ 有关。由此设计的信号检测电路包含频率信号检测和幅值信号检测电路, 由频率信号检测电路可以得出 ϕ , 将输出幅值和 ϕ 代入式 (5) 就可得出偏航或俯仰角速度 Ω 。

3 制作

3.1 敏感结构制作

在双面抛光硅片表面生长一层二氧化硅, 接着涂覆光刻胶, 之后利用接触式紫外曝光进行双面光刻, 将图形转移到硅片上。

利用硅各向异性腐蚀技术, 采用湿法刻蚀方法, “掩膜 - 无掩膜” 工艺, 在衬底上加工出硅摆结构。通过多次氧化、光刻与腐蚀后, 采用静电键合方法, 形成敏感结构。

硅摆制作工艺如图 4 所示。

- 1) 硅片清洗;
- 2) 第一次双面氧化, 见图 4a;
- 3) 第一次双面光刻、腐蚀, 形成硅摆初步形状, 见图 4b;
- 4) 第二次双面光刻、腐蚀, 形成梁和阻尼孔区, 见图 4c;
- 5) 第二次双面氧化;
- 6) 第三次双面光刻、腐蚀, 见图 4d;
- 7) 第四次双面光刻、腐蚀, 见图 4e;
- 8) 去除氧化层, 见图 4f;
- 9) 引线键合焊盘处溅射铜。

微晶玻璃电极板制作工艺如图 5 所示:

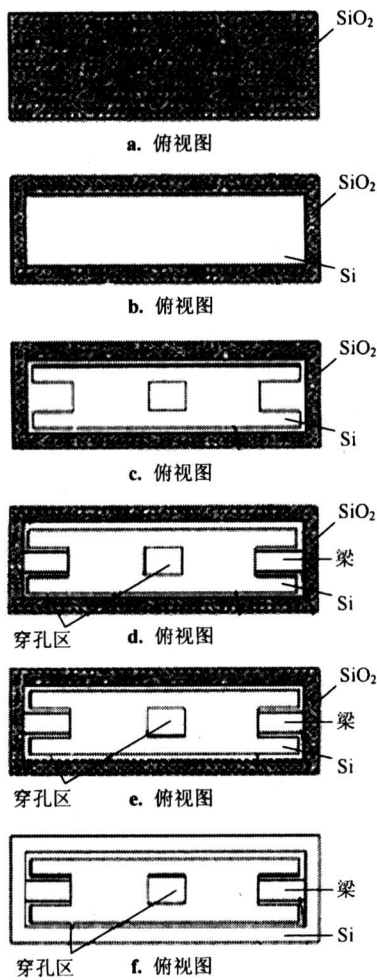


图 4 硅摆制作工艺流程

Fig.4 Fabrication process of silicon pendulum

- 1) 分别将两片玻璃研磨形成槽, 见图 5a;
- 2) 溅射铜 2~3 μm, 见图 5b。

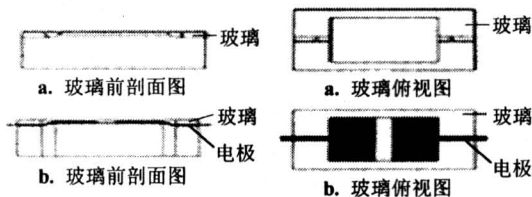


图 5 微晶玻璃电极制作工艺流程

Fig.5 Fabrication process of crystal glass electrode

3.2 硅摆的封装

用键合工艺对硅摆和微晶玻璃电极进行键合工艺封装, 然后用金属外壳进行密封封装。封装工艺如下:

- 1) 对硅摆和玻璃电极键合;
- 2) 将敏感元件粘接到金属底座上;

- 3) 连接导线;
- 4) 充氮气并用盖密封;
- 5) 检漏;
- 6) 测量静态电容。

对经过以上封装后敏感元件进行静态电容检测, 硅摆的静态电容值如表 1 所示。

表 1 封装后敏感元件的静态电容值

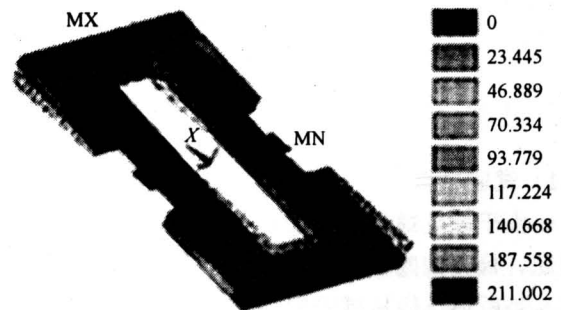
Table 1 Capacitance of the device after packing silicon pendulum

差动电容	C_1	C_2	C_3	C_4
电容值/pF	29.7	33.9	26.1	31.1

4 模拟测试

4.1 模态分析

输入单晶硅结构尺寸和相应的材料常数, 赋给 45 号体单元。对支撑梁以 hex, sweeping 方式划分网格, 对振动质量以 tet free 方式划分网格, 在两支支撑梁端面加全方位位移约束。经过求解和后处理, 得到 3 个模态, 第一模态的共振频率为 197.34 Hz, 如图 6 所示, 第二、第三模态的频率分别为 1 806 Hz 和 2 292 Hz, 可不予考虑。



Ansys 5.60, APR 20 2003 10:50:34,
Nodal Solution, Step = 1, Sub = 1, Freq = 197.33 Hz,
Usun (AVG), Rsys = 0, PowerGraphics, Efacet = 1,
Avers = Mat, DMX = 211.002, SMX = 211.002

图 6 有限元模态分析

Fig.6 FEA analysis about module

4.2 频响分析

通过动力学参数计算可得^[4]

$$K_T \gg (J_z - J_x)\dot{\varphi}^2 \quad (6)$$

故式 (1) 可简化为

$$J_z \ddot{\alpha} + D\dot{\alpha} + K_T \alpha = (J_z + J_y - J_x)\Omega\dot{\varphi} \cos(\varphi t) \quad (7)$$

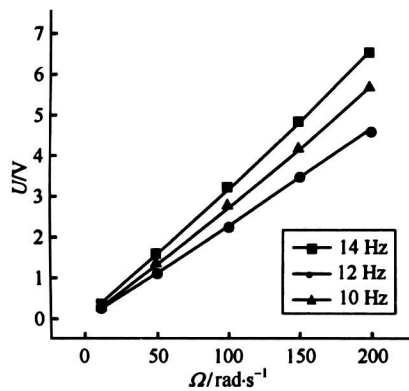


图 10 陀螺输入角速度与输出电压的关系

Fig.10 The characteristic of input & output of the gyroscope

6 结论

1) 利用各向异性刻蚀硅片技术能制作出无驱动结构的硅微机械陀螺，这种陀螺结构简单，成本低；

2) 无驱动结构的硅微机械陀螺不仅能敏感载体的俯仰或偏航角速度 Ω ，还能同时敏感载体自身的旋转角速度 ϕ ，这种功能是一般微机械陀螺所

没有的。

3) 陀螺的比例系数随旋转速率 ϕ 不同而不同，这可以通过软件进行补偿。

参考文献

- [1] Mochida Y, Tamura M, Ohwada K. A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for the drive and detection modes [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 80: 170 ~ 178
- [2] Li Zhihong, Yang Zhenchuan, Xiao Zhixiong, et al. A bulk micromachined vibratory lateral gyroscope fabricated with wafer bonding and deep trench etching [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 83: 24 ~ 29
- [3] Konovalov S F, Kuleshov A V, Podtchezertsev V P, et al. Vibrating angular rate sensor [A]. *Integrated Navigation Systems Proceedings of 10th International Conference* [C]. St Petersburg, 2003. 107 ~ 117
- [4] Zhang Fuxue, Wang Hongwei, Zhang Wei, et al. A silicon micromachined gyroscope driven by the rotating carrier's angle velocity [A]. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Information Acquisition* [C]. Hong Kong and Macau, China, 2005. 128 ~ 133

Si Micromachined Gyroscope Driven by the Rotating Carrier

Zhang Fuxue, Mao Xu, Zhang Wei

(Sensor Research Center, Beijing Information Technology Institute, Beijing 100101, China)

[Abstract] This paper reported a silicon micromachined gyroscope that is driven by the rotating carrier's angular velocity. The silicon chip was manufactured by anisotropy etching. The design, fabrication and packing of the sensing element were introduced. The angular velocity of the rotating carrier was measured by emulator. The simulation experiment and performance test have certificated that the principle of the gyroscope is correct and the gyroscope can be used to sense yawing or pitching angular velocity of the rotating carrier, and the angular velocity of the rotating carrier itself.

[Key words] Si; anisotropy etching; angular velocity; emulator