

一种新颖的四梁式压电薄膜微型陀螺^{*}

马 薇¹, 李世玮², 虞吉林¹

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026; 2. 香港科技大学机械工程系, 香港九龙清水湾)

摘要: 利用压电陶瓷的特性, 采用 IC 兼容的技术, 设计并制造了一种新颖的压电薄膜微型陀螺. 在 Pt/Ti/SiO₂/Si 基底上以 sol-gel 技术铺设了高质量的压电陶瓷薄膜. 基于压电反效应, 微型陀螺在其谐振频率上被 0.3 V 的交流信号驱动. 由其压电正效应, 可检测到与转动角速度成正比的输出信号. 本文介绍了该微型陀螺的设计原理. 实验结果证实了理论预测.

关键词: 压电效应; 科里奥利力; 微机械制造; IC 兼容技术; 微型陀螺

中图分类号: TH824.3, TN40

文献标识码: A

1 简介

角速度是涉及运动控制的众多需要测量的物理量中重要的一种, 所以对测量角速度的传感器的研究一直是人们感兴趣的课题之一. 众所周知, 陀螺就是测量角速度的一种传感器. 传统的陀螺, 一般都体积庞大, 价格昂贵. 因此, 几十年来, 人们不断地致力于体积小、价格低的陀螺的研制和开发. 随着微电子技术的发展, 许多传感器的尺寸都被缩小到毫米乃至微米量级, 并以 IC 技术制作到硅片上. 微米量级陀螺的研制更是一个具有挑战性的课题并拥有良好的市场前景.

近几年来, 微型陀螺的研制取得了一定的进展^[1~4]. 然而, 所报道的微型陀螺大多以静电力作为驱动力来驱动结构的振动, 并以随之出现的科里奥利效应来测量角速度, 它们需要很高的 DC 驱动电压, 其测量效果也不能满足各种需求.

Hansjoachim 于 1990 年利用压电陶瓷的特性研制出一种结构非常简单的板型陀螺^[5], 由压电陶瓷块在电场作用下产生的剪应力致使结构振动以测量角速度. 这种设计大大简化了结构和测量装置, 降低了封装成本. 美中不足的是, 它的输出信号电压非常微弱.

本文推出一种新型的四梁式微型陀螺. 结构以 IC 兼容的技术制作在硅片上, 总面积为 2.7 mm × 2.7 mm. 四梁以 Pt/Ti/SiO₂/Si 为衬底^[6], 以 sol-gel 技术^[7]铺以高质量的压电陶瓷薄膜. 借助压电的正效应, 当对压电薄膜以结构的谐振频率加以 0.3 V 的交流电场时, 结构被激振, 振动的结构在转动坐标系中产生的科氏力由压电的反效应转变为输出电压, 该电压与转动角速度成正比. 本文简述了四梁式微型压电陀螺的设计思想, 制作过程及测量结果. 所

* 收稿日期: 1999-08-02

作者简介: 马薇, 女, 1969 年 11 月生, 讲师.

制作出的微型陀螺谐振频率为 73.48 kHz, 在角速度测量范围为 150 °/sec 内其灵敏度为 30.8 μV · V⁻¹ · (°/sec)⁻¹.

2 设计原理

四梁式微型压电陀螺结构顶视图如图 1 所示. 中心为一上大下小的倒四棱台形的质量

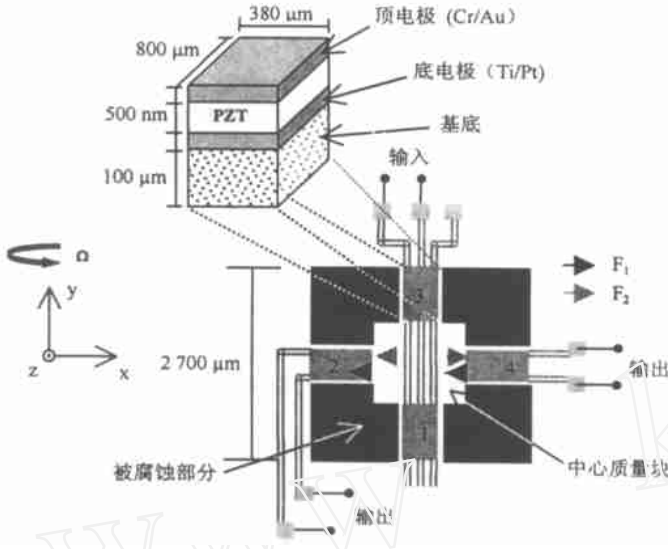


图 1 四梁式微型陀螺的俯视图

Fig. 1 Top view of the 4 sensor-beam micro-gyroscope

块, 厚度约为 500 μm, 质量块大底面的四边伸出四根梁, 厚度约为 100 μm. 除四梁的外端与基底固结外, 整个结构是悬空的. 四梁上有一层压电陶瓷薄膜伴以上下电极, 其面积为 380 μm × 800 μm, 压电陶瓷 (PZT) 的厚度为 500 nm.

该陀螺工作时按图 1 所示方向放置. 压电陶瓷 PZT 的极化方向与 z 轴同向, 且垂直于所铺设的压电陶瓷薄膜. 当输入端加上交流电压, 也就是梁 1、3 上的压电陶瓷薄膜沿极化方向被加上交流电压, 其频率为结构的谐振频率. 基于压电反效应, 薄膜会产生扩张型振动. 压电陶瓷的本构方程为

$$\begin{pmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} \\ S_{31} \\ S_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & T_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & T_{11} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, s_{ij}^E 是恒定电场中的弹性系数, T_{kk} 是常应力下的逆电因子, d_{im} 是压电常数, S 和 T 分别为弹性应变张量和弹性应力张量, D 和 E 分别为电场矢量和电场强度. 习惯上, 脚标 1、2、3 分别对应于 x 、 y 、 z 坐标轴及相应的平面法向量.

由本构方程 (1) 可看出, 交流电场下压电陶瓷薄膜在 x 、 y 、 z 三个方向上都会产生振动:

$$S_{11} = d_{31} E_3, \quad (2)$$

$$S_{22} = d_{31} E_3, \quad (3)$$

$$S_{33} = d_{33} E_3, \tag{4}$$

但只有 y 方向上的振动所造成的梁 1、3 的不断伸长和收缩致使中心质量块沿 z 轴方向振动。在这种状态下沿 y 轴正向施加角速度,则由科里奥利效应,中心质量块会产生 x 轴方向的振动,其振动频率与所加电压频率相同。加在惯性体上的科里奥利力 F_1 由式(5)决定,

$$F_c = 2m v \times \omega. \tag{5}$$

其中: m 为惯性体的质量, v 为惯性体的运动速度, ω 为角速度。

由图 1 又可看出,中心质量块在 x 轴方向上的振动必然会不断地挤压或拉伸梁 2、4,致使梁 2、4 上的压电陶瓷薄膜不断地受到压力或拉力 F_2 。此时,由压电的正效应,压电陶瓷薄膜会在 z 轴方向上产生交变电场

$$D_3 = d_{31} \times T_{11}. \tag{6}$$

此电场的频率与所加电场频率相同,幅度与角速度的大小成正比。

当然,中心质量块沿 z 轴方向的振动也会导致梁 2、4 的伸长或收缩。这时,压电陶瓷薄膜也会受到压力或拉力,则由压电的正效应,薄膜也会在 z 轴方向上产生交变电场。

$$D_3 = d_{31} \times T_{11} \tag{7}$$

是一幅度恒定的电场。实际测得的输出信号是两个交变电场之和:

$$D_{out} = D_3 + D_3. \tag{8}$$

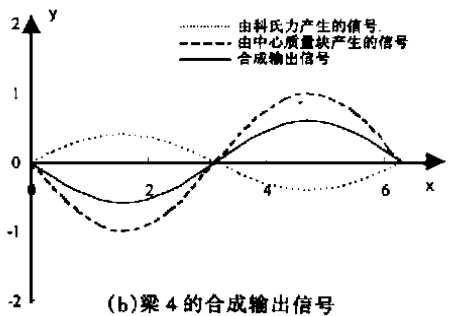
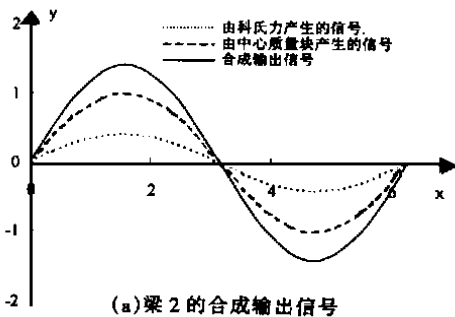


图 2 梁 2 和 4 的输出信号组成

Fig. 2 Output signal components at beams 2 and 4

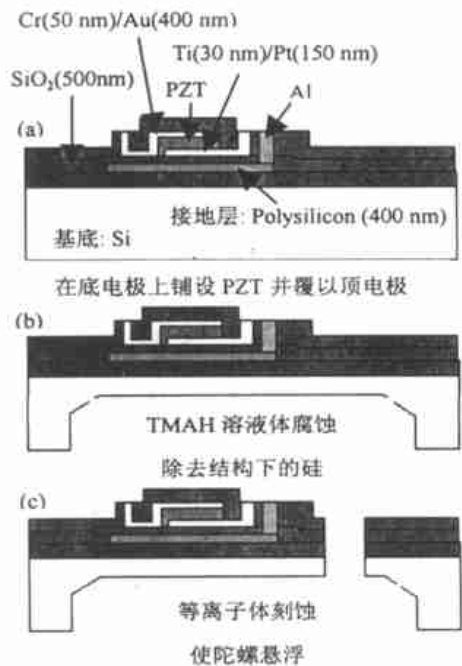


图 3 制作微型陀螺的关键步骤

Fig. 3 Critical fabrication steps of microgyro

对于特定的角速度,从梁 2 和梁 4 上所测得的输出是不同的。假定某时中心质量块沿 z 轴正向运动,则其对薄膜 2、4 作用力皆为压力。而此时科氏力为 x 轴反向,对薄膜 2 是压力,对薄膜 4 是拉力。两者的合成输出信号由图 2 所示。对薄膜 2,因所受到的皆为压力,则所合

成的输出信号是增强的;反之对薄膜 4,它的输出信号因所受的力相反而被削弱。

3 制作过程

微型压电陀螺是以与 IC 技术兼容的方法制作的. 图 3 为其制做的关键步骤. 底电极为钛/ 铂, 顶电极为铬/ 金. 压电陶瓷薄膜以 sol-gel 方法铺设在钛/ 铂底电极上, 铺设时硅片转速为 6 000 rpm, 然后放置在 350 的平台中烘烤 20 s. 为了降低压电陶瓷薄膜的内应力, 防止薄膜开裂, 还需将硅片放入 700 的炉中退火 3 h. 然后, 将一层二氧化硅覆盖在结构上, 从背面进行硅的立体腐蚀, 出现倒四棱台. 利用等离子体刻蚀技术从正面将图 1 中的阴影部分的硅除去, 使悬浮的四根梁出现.

4 测试过程及结果

测试过程如下:

1) 首先将陀螺四梁上的压电陶瓷极化. 极化方法为: 在四梁的压电陶瓷上下电极上加 0.3 V 的直流电, 放入 200 的环境中 1 h.

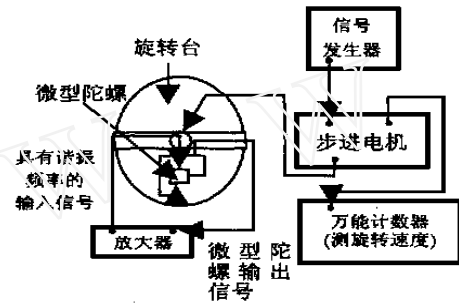


图 4 测量陀螺灵敏度的实验装置

Fig. 4 Experimental setup for measuring sensitivity of gyroscope

2) 在静止状态下, 从输入端输入不同频率的信号以测出微型陀螺的谐振频率.

3) 将微型陀螺放置在旋转台上, 输入峰值为 0.3 V 的交流信号将陀螺的中心质量块驱振. 加以不同的旋转速度, 梁 2 或 4 的相应输出信号会有不同的振幅, 由此标定陀螺的灵敏度. 因输出信号接近白噪音, 应辅以信号放大装置来获取信号. 实验装置如图 4 所示.

图 5 显示了微型陀螺对不同频率信号的反应, 并得到陀螺的谐振频率为 73.84 kHz. 对于不同的角速度, 测量梁 2 和 4 的不同输出信

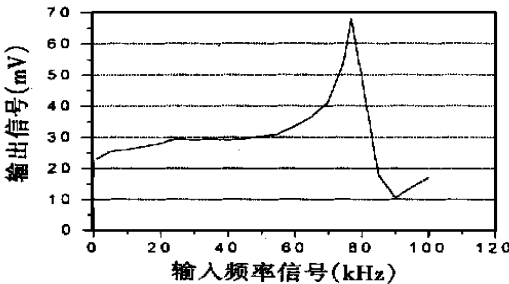


图 5 在没有转动的情况下, 微型陀螺对应不同输入频率的输出信号

Fig. 5 Differential output response of microgyro to input frequencies (measured at no rotation)

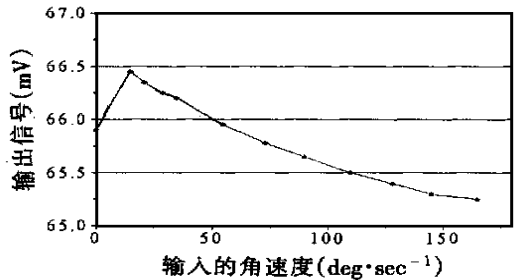


图 6 以谐振频率振动的陀螺的输出响应

Fig. 6 Differential output response of micro-gyroscope operating at resonant frequency

号, 得到陀螺以谐振频率振动时的灵敏度为 $-30.8 \mu\text{V} \cdot \text{V}^{-1} \cdot (\text{g} \cdot \text{sec})^{-1}$, 见图 6. 线性区域约在

150 μ sec 范围内. 随着角速度的增加, 输出信号象预见的那样逐渐下降.

5 结论

本文简述了一种新型的微型压电陀螺的设计原理及制做方法, 并由实验结果证明其设计是可行的. 该陀螺结构简单, 对输入的角速度有较大范围的线性反应. 谐振频率为 73.84 kHz, 此时灵敏度为 $-30.8 \mu\text{V} \cdot \text{V}^{-1} \cdot (\mu\text{sec})^{-1}$. 当然, 微型陀螺的性能被制做过程中的许多不确定因素所限制, 还有待于改进和提高.

参 考 文 献

- [1] Sderkvist J. Micromachined gyroscopes[J]. Sensors and Actuators, A43 1-3 1994, 65~71.
- [2] Greiff P, *et al.* Silicon monolithic micromechanical gyroscope, Transducers '91 [C]. San Francisco, USA, 1991, 966~968.
- [3] Tanaka K, *et al.* A micromachined vibrating gyroscope [J]. Sensors and Actuators, A50 1-2, 1995, 111~115.
- [4] Bernstein J, *et al.* A micromachined comb drive tuning fork rate gyroscope, Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems[C]. Fort Lauderdale, USA, 1993, 143~148.
- [5] Hansjoachim H, *et al.* Sensor for determining angular velocity, World Patent [P]. WO 90/07124, 1990.
- [6] Brooks K, *et al.* Orientation of rapid thermally annealed lead zirconate titanate thin films on (111) Pt substrates[J]. J Mater. Res., 1994, 9(10).
- [7] Reaney Ian M, *et al.* Use of transmission electron microscopy for the characterization of rapid thermally annealed, solution gel, lead zirconate titanate films [J]. J. Am. Ceram. Soc., 1994, 77 (5):1209.

A New Four-Beam Sensor Piezoelectric Microgyroscope

MA Wei¹, SHFWei Ricky Lee², YU Ji-lin¹

(1. Department of Modern Mechanics, USTC, Hefei 230026, China)

(2. Department of Mechanical Engineering, HKUST, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong)

Abstract: A novel piezoelectric micro-gyroscope is designed and fabricated on silicon crystal, with an IC compatible technology. High quality PZT thin film is deposited by the sol-gel technique on Pt/Ti/SiO₂/Si substrate. Due to direct piezoelectric effect, the micro-gyroscope can be driven in a resonant state with a 0.3 V AC source. The output is detected by the reverse piezoelectric effect and is nearly linearly proportional to the rotational speed. Its operation principle is given, and the theory is confirmed by experimental results. The total area of the micro-gyroscope is 2.7 mm \times 2.7 mm. The sensitivity of this sample micro-gyroscope is $-30.8 \mu\text{V} \cdot \text{V}^{-1} \cdot (\mu\text{sec})^{-1}$ with a measurement range of 150 μ sec at a resonant frequency of 73.84 kHz.

Key words: piezoelectric; Coriolis force; micro-machine fabrication; IC technology; micro-gyroscope