

# 微机械陀螺测试技术的研究<sup>\*</sup>

罗文华 温廷敦

(中北大学 仪器科学与测试技术教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**[摘要]** 文章介绍了微机械陀螺的基本原理以及几种不同检测方式的硅微陀螺, 包括电容式、压电式、压阻式、隧道式等, 分析了这些微陀螺的基本检测原理, 总结出它们在检测性能方面存在的一些问题。为了提高微机械陀螺的灵敏度提出用新的微机理介观压阻效应, 并对基于介观压阻效应的微陀螺前景进行了论述。

**[关键词]** 微机械陀螺; 介观压阻效应; 共振隧穿; 超晶格

**[文章编号]** 1672-2027(2008)01-0096-03 **[中图分类号]** TP212 **[文献标识码]** A

## 0 引言

微机械陀螺是指采用微机械加工技术制备的, 用来测量角速度的一种微惯性装置。微陀螺的关键技术主要有两个, 一是微陀螺的加工技术, 二是微陀螺微弱信号的检测技术<sup>[1]</sup>。随着MEMS加工工艺的迅猛发展, 微陀螺的检测技术已经成为制约其发展的瓶颈。

微机械陀螺是利用振动质量被基座带动旋转时产生的哥氏效应来敏感角速度。当微陀螺工作时, 施加一定的激励使其在驱动方向上振动, 由于哥氏力作用使得系统产生沿检测方向的振动, 然后根据不同的检测原理测量出检测方向的振动, 从而计算出被检测对象的角速度。其基本模型如图1所示。施加一定的激励使质量块 $m$ 沿驱动方向( $x$ 方向)产生振动, 当质量块沿 $z$ 方向有旋转角速度 $\omega$ 时, 在哥氏力作用下, 质量块就会产生沿检测方向( $y$ 方向)的振动, 其振动方程为: $m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = F_c$  (1)

$$F_c = 2m\Omega\dot{x} \quad (2)$$

其中 $F_c$ 为哥氏力。在实际应用中常是利用杆、梁或薄板的扭转、弯曲等弹性体的振动来替代, 因而微机械陀螺的检测实际上就是检测微机械陀螺中弹性体在检测方向的振动参数。

## 1 微机械陀螺的不同检测方式

由于微机械陀螺在检测方向的振动是很微弱的, 而且受到微陀螺空间大小的限制, 因而微机械陀螺在检测方向的振动检测方式是非常重要的。微机械陀螺的检测方式主要有电容式、压电式、压阻式以及隧道式等。

### 1.1 电容检测方式

电容检测式微机械陀螺是直接检测方向的振动位移。在微陀螺中固定一极板, 同时在振动弹性体垂直检测振动方向的表面上制作随着弹性体振动的极板, 通过检测两极板间的电容变化得出弹性体的振动位移。两极板间的电容为:

$$C = \epsilon S / 4\pi kD \quad (3)$$

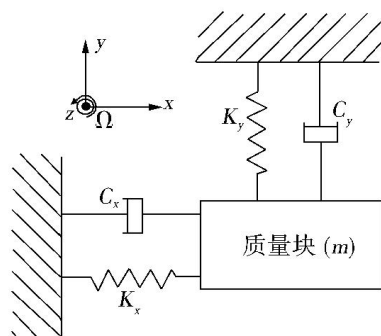


图1 微机械振动陀螺原理图

Fig 1 The principle fig of  
micro-gyro scope

\* 收稿日期: 2008-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60476043)。

作者简介: 罗文华(1976-), 女, 四川大英人, 中北大学在读硕士研究生, 主要从事纳米机电控制器件的设计与研究。

其中,  $\epsilon$  为介质介电常数,  $D$  为极板间距,  $S$  为极板的有效面积,  $k$  为静电力常量。根据(3)式, 测量出电容的变化就可以得出极板间距的变化, 从而得出弹性体的振动位移。图2就是韩国三星利用电容检测制造的双轴多晶硅表面微机械陀螺<sup>[2]</sup>。该微陀螺通过检测底部电极和结构之间的电容变化来检测旋转体的扭转振动。电容检测式微陀螺一般不需要额外的加工步骤就能制造出电容器, 具有温漂小、灵敏度高和稳定性高等优点。但是由于检测质量微小, 产生的哥氏惯性力很微弱, 这使极板间距变化非常微小, 导致电容的变化量也非常微小, 因此输出电压非常小, 并且当检测扭转振动时, 极板间距和极板的有效面积都会发生变化从而影响测试精度。

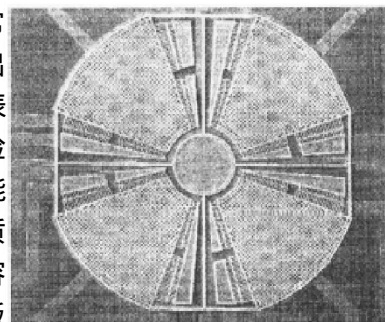


图2 双轴多晶硅表面微机械陀螺

Fig. 2 Double axis and poly silicon surface microgyroscope

## 1.2 压电检测方式

压电检测方式就是利用扩散在弹性体上的压电晶体的压电效应检测出弹性体的检测方向振动所对应的应变, 从而检测出检测方向的振动来测量角速度的。当仅考虑一个方向应力时压电方程, 并结合电容和电量的关系可以得到:

$$U = d_{11}\sigma_{11}/C \quad (4)$$

$\sigma_{11}$  是沿晶轴  $x$  方向施加的应力,  $d_{11}$  是压电系数,  $U$  为压电晶体端的电压,  $C$  压电晶体的等效电容。

从公式(4)可知如果测量出压电晶体两端的电压, 就可以得到晶体内部应力的变化, 从而计算出弹性体检测方向的振幅得出被测物体的角速度。文献[3]就是一种以压电方式检测的微机械陀螺。

压电检测式的微机械陀螺具有体积小、动态范围宽等优点。但是由于压电系数受温度影响大, 因此该类型的微陀螺的温度漂移特别大, 需要进行温度补偿, 这样增加了制作工艺的难度。

## 1.3 压阻检测方式

当微陀螺工作时, 分布在检测方向的压阻条随着弹性体的振动其内部应力改变, 由于压阻效应压阻条的阻值将会发生改变, 通过适当的外部电路将电阻变化转化成电压就能够测量出角速度的大小。根据压阻效应, 电阻的变化率为:

$$\Delta R/R = \pi\sigma$$

式中  $\pi$  为压阻系数,  $\sigma$  为应力。

压阻式微陀螺具有固有频率高, 动态响应快, 体积小等特点。从(5)式可以看出材料的压阻系数直接影响着该检测方式微机械陀螺的测量精度, 但是由于材料的压阻系数比较小, 且受环境温度影响较大, 因而基于压阻效应的微机械陀螺灵敏度比较低, 温度漂移比较明显, 这两大问题局限了压阻式微机械陀螺的发展。图3就是复旦大学研制的一种采用压阻检测微陀螺, 该陀螺的灵敏度只有  $0.22 \mu V/S^{[4]}$ 。

## 1.4 隧道检测方式

隧道检测式微机械陀螺是近年发展起来的一种新型的微陀螺, 它利用隧道电流对位移变化的敏感从而检测角速度。在隧道间距很小时, 隧道电流与隧道间距关系为:

$$\Delta I = (-\alpha\sqrt{\Phi V/R}) \cdot \Delta D \quad (6)$$

式中,  $\alpha = 0.1025 \text{ nm}^{-1} \text{ eV}^{-1/2}$ ,  $\Phi$  为隧道有效势垒高度,  $D$  为隧道电极的间距,  $V$  为偏置电压,  $R$  为隧道等效电阻。因而可近似认为电流变化量与隧道间距变化量成线性关系, 只要检测出电流变化量的大小, 就能够测量出隧道间距的变化量的大小, 从而测量出角速度的大小。

隧道电流感知位移变化敏感, 因此该种检测方式的微陀螺的灵敏度和精度比较高, 厦门大学的李文望等曾仿真得出该检测方式的微机械陀螺灵敏度可达<sup>[5]</sup>。同时隧道式微陀螺满足微陀螺小型化的要求。但是由于隧道电极间距非常小, 因此制作工艺非常复杂, 容易失败。

## 1.5 新型检测方式- 介观压阻效应<sup>[6]</sup>

通过以上分析可知电容式、压电式、压阻式的微陀螺灵敏度比较低, 隧道式微陀螺虽然灵敏度高, 但是隧

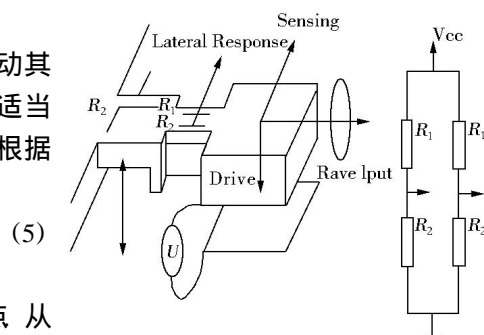


图3 复合梁-质量块压阻式微机械陀螺

Fig. 3 Compound beam and mass block piezoresistive micro-gyroscope

道针尖加工工艺复杂,不容易成功,因此需要有新理论、新的材料来制成满足灵敏度高和小型化的微陀螺

自从超晶格的概念提出以来,利用共振隧穿中电子是垂直于界面运动,路程比平面器件短,响应更快的特点可制成共振隧穿器件<sup>[7]</sup>。因此可以将共振隧穿薄膜作为微机械陀螺的敏感部分,根据其介观压阻效应来检测共振隧穿薄膜内部应力的变化从而测量出输入角速度。共振隧穿薄膜具有介观压阻效应,其原理可描述为:在力学信号的作用下,纳米结构的应力分布会发生变化,应力分布的变化将产生内建电场,而内建电场会导致结构中量子能态发生变化,从而引起共振隧穿电流的变化。简言之,外加的力学信号会引起共振隧穿薄膜结构  $I$ - $V$  特性曲线的变化。当偏置的共振隧穿电压固定时,力学信号和隧穿电流之间的关系就可以等效为力学信号与电阻变化量之间的关系<sup>[8,9]</sup>。共振隧穿薄膜的介观压阻特性受温度的影响较硅压阻特性小,把共振隧穿薄膜作为微陀螺的检测元件,就可以得到能耗低、灵敏度高、尺寸不受限制的微机械陀螺。

## 2 结束语

随着航天科技的不断发展,对高精度、高灵敏度、微型化的微陀螺的需求已经越来越迫切,本文就是在此情况下提出了一种新的检测机理——介观压阻效应。实验室研究了共振隧穿薄膜的介观压阻效应,并且证明其压阻灵敏度比硅的最大灵敏度提高了一个数量级<sup>[10]</sup>。因此可以预测将介观压阻理论应用到微陀螺中将会极大地提高微陀螺的灵敏度,并且使微陀螺不受尺寸限制。

### 参考文献:

- [1] 刘危,谢旭辉.微机械惯性传感的技术现状及展望[J].光学精密工程,2003,5(11):425-430
- [2] Aa S,Oh Y S, Park K Y. Dual-axis microgyroscope with closed-loop detection[J]. Sensor and Actuators, 1999(73): 1-6
- [3] 何国鸿,陈抗生.压电振动微机械陀螺研究[J].电子学报,1998,11(26):65-68
- [4] Li Xinxin, Bao Minghang, Yang Heng, et al. A micromechanical piezoresistive angular rate sensor with a composite beam structure[J]. Sensors and Actuators A, 1999(72): 217-223
- [5] 李文望,孙道恒.悬臂梁式微机械隧道陀螺的结构设计与性能分析[J].传感器技术,2005,24(2):48-50
- [6] 温廷敦,张文栋.介观压阻效应[J].微纳电子技术,2003,7(8):41-43
- [7] Brown E R, Goodhue W D, T. C. L. G. Sollner[J]. J. Appl. Phys, 1998(64): 1 519
- [8] Pitchand R, Klipstein P C, Couch N R, et al. High pressure studies of resonant tunneling in a graded parameter superlattice and in double barrier structures of GaAs/AlAs[J]. Semicond Sci Technol, 1989, 4(9): 754
- [9] Fobekets K, Vounckxt R, Borghs G. A GaAs pressure sensor based on resonant tunneling diodes[J]. Micromech Microeng, 1994(4): 123
- [10] 王建,张文栋,薛晨阳,等. GaAs 微结构中共振隧穿薄膜介观压阻效应的研究[J].半导体技术,2006,9(31):702-705

## Investigation of Test Technology of Micro-machined Gyroscope

Luo Wenhua Wen Tingdun

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of the  
Ministry Education North University of China, Taiyuan 030051, China)

**[Abstract]** There explains the basic principle of silicon micro-machined gyroscope and several kinds of measure principle, including capacitive type, piezoelectricity type, piezoresistive type, tunneling type. The characteristics of these types are introduced. Some focused problems are pointed out, and several methods and advices are offered to improve the property of silicon micro-machined gyroscope. Furthermore, the principle and application prospect of the meso-piezoresistance which is a new micro-mechanism is also discussed.

**[Key words]** micro-machined gyroscope; meso-piezoresistance; resonant tunneling superlattices