

基于剪应力检测的石英微结构及其陀螺效应研究*

谢立强[†] 吴学忠 李圣怡 王浩旭 董培涛

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,长沙 410073)

(2009 年 11 月 16 日收到;2009 年 12 月 15 日收到修改稿)

为了简化石英陀螺结构侧壁上的电极图形,设计了一种基于剪应力检测 Coriolis 力的新型石英微结构.通过对剪应力检测方案的分析,微结构侧壁电极的极性单一,采用锥度为 15° 的锥形梁结构作为敏感梁的设计可以增大敏感梁的检测灵敏度.通过各项异性湿法腐蚀 z 切石英片的方法制造了微结构样件.测试表明样件的驱动频率约为 5.6 kHz,大气下的品质因子在 5000 以上.输出信号频谱的谱线存在 Coriolis 力信号,验证了设计思想的正确性.

关键词: 石英陀螺,剪应力检测, Coriolis 力

PACC: 0710C, 0710Y

1. 引言

来源于微电子制造技术的微机电系统技术 (micro-electric mechanical system, 简记为 MEMS) 近年来发展迅速. 基于该技术制作的各种微结构、微器件或微系统具有体积小、成本低、功耗小、性能稳定、可单片集成等一系列显著优点,使其在军民领域得到了广泛应用^[1,2]. 石英具有良好的压电效应,高的振动品质因子以及高的频率稳定性,因此,基于 MEMS 工艺制作的石英微结构的设计成为微传感器领域的一个重要研究方向^[2-5]. 石英陀螺即是利用石英微结构来检测角速度的一种惯性器件. 通常石英陀螺的微结构采用音叉结构的设计方案,驱动模态为音叉在宽度方向的振动,敏感模态为音叉在厚度方向的振动^[6-10]. 然而,检测音叉敏感模态的振动需要在音叉的每个侧壁上制备平行分开的两电极^[6-8,11]. 对于 MEMS 这种二维加工工艺来讲,在石英微结构的侧壁上制备电极图形的难度很大,且侧壁电极的尺寸误差对陀螺的性能影响很大. 因此,设计一种新的敏感结构来降低电极加工难度且提高陀螺性能是解决现有困难的有效的途径. 例如日本 Nihon Dempa Kogyo 公司开发了一种石英陀螺结构,将敏感结构进行重叠层压,使得结构的侧壁电极极性单一^[8,9]. Kenji Sato 设计的石英陀螺结构

将驱动结构与敏感结构分离,从而简化了结构侧壁电极^[12].

本文设计了一种新型石英陀螺结构,它通过剪应力检测的方法来单一化侧壁电极极性. 本文对该陀螺结构的工作原理进行了介绍,针对于剪应力检测方案进行了理论分析,优化设计了陀螺的结构参数. 制造了石英微结构样件,通过测试样件验证了本文思想的正确性.

2. 设计思想

从工作原理、剪应力检测方案的设计、结构参数的确定三方面讨论新型石英微结构的设计思想.

2.1. 工作原理

石英陀螺是基于 Coriolis 力原理工作的. 图 1 所示为微陀螺的一般结构原理图,通过弹簧元件与外部框架相连的质量块 m 相对于框架具有两个自由度(左右振动和上下振动). 假设质量块相对于框架以速度 v 左右振动,此为驱动模态,当框架绕垂直于整个结构平面的方向转动,转动速度为 Ω ,根据 Coriolis 力原理,质量块将受到上下方向的 Coriolis 力 F_C 的作用 F_C 为

$$F_C = -2mv \times \Omega. \quad (1)$$

由于 Coriolis 力的作用,质量块将产生上下方向

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:51005240)资助的课题.

[†] E-mail: nudtxie@yahoo.com.cn

的振动,此为敏感模态. 由于敏感模态的振幅与输入角速度 Ω 成正比,因此,通过检测敏感模态的振动就可以检测输入的角速度 Ω .

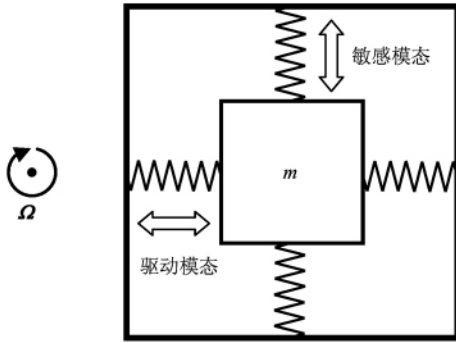


图1 微陀螺结构原理图

为了实现微陀螺原理,需要进行结构设计,使振动质量同时满足驱动振动模态和敏感振动模态;需要设计驱动器和检测器用于激励驱动模态的振动和检测敏感模态的振动. 整个微陀螺系统的工作原理框图如图2所示,设驱动模态振动方向为 x 方向,敏感模态振动方向为 y 方向,输入角速度方向为 z 方向,给驱动器施加一交流电压信号 V_d 来激励驱动模态的振动. 驱动振动的速度与角速度叉乘产生作用在质量块的 F_c ,这将引起敏感模态的振动. 检测到的敏感振动的位移信号经过放大,与同频率的驱动信号进行解调,再经过低通滤波,最后输出的电压信号即为角速度信号.

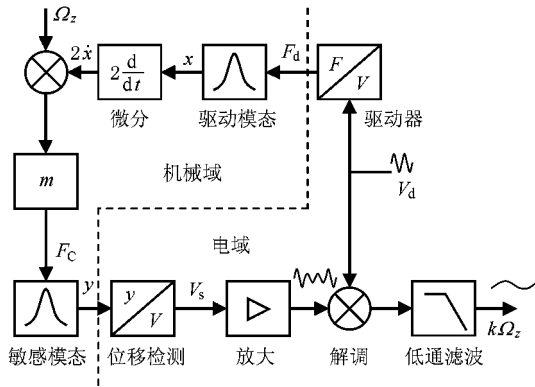


图2 微陀螺系统工作原理图

基于上述思想,本文设计了一种新型石英微结构,如图3所示. 该陀螺结构包含一个驱动梁,一个敏感梁和两个质量块. 在结构上建立坐标系 x, y 轴分别沿着石英晶体的电轴和机械轴方向. 两质量块随着驱动梁在 x 方向同相振动为驱动模态,驱动梁

随着敏感梁在 y 方向的振动为敏感模态(如图4所示). 由于石英具有压电效应,因此可以通过逆压电效应来激励驱动梁的振动,通过压电效应来检测敏感梁的振动. 根据文献[11],外部电路通过驱动梁表面的电极给驱动梁施加交流电压信号,使驱动梁产生驱动模态的振动. 敏感模态的振动会在敏感梁内产生 $x-y$ 方向的剪应力,因此,可以通过在敏感梁两侧壁布置一对电极,利用压电效应检测敏感梁内的剪应力来检测敏感模态的振动.

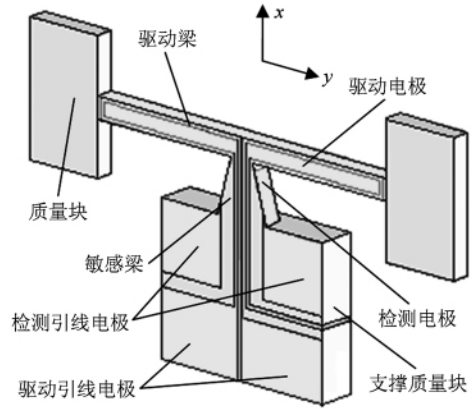


图3 石英微陀螺结构

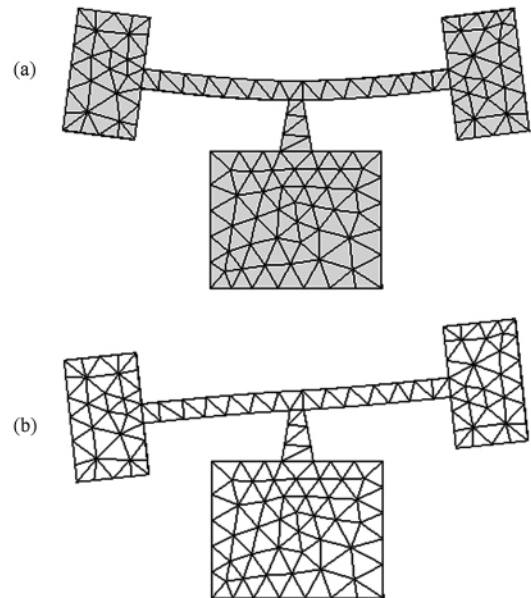


图4 结构的模态振型 (a) 驱动模态,(b) 敏感模态

2.2. 剪应力检测方法

压电材料的压电方程为

$$P^p = d \cdot T, \tag{2}$$

其中 P^p, T 分别为压电极化强度和应力张量, 它们的分量分别表示为 P_i^p, T_j ($i=1-3, j=1-6$), 下标与相应方向的对应关系如表 1 所示; d 为压电系数张量, 其分量为 d_{ij} 表示 j 方向的应力与 i 方向的电极化强度之间的系数. 对于石英材料, 其压电系数为

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 $d_{11} = 2.31 \times 10^{-12}, d_{14} = 0.73 \times 10^{-12}$ [13].

表 1 变量下标与变量方向的关系

下标	1	2	3	4	5	6
方向	x	y	z	$y-z$	$z-x$	$x-y$

敏感梁在 y 方向的弯曲主要是梁内正应力 T_1 和剪应力 T_6 作用的结果. 根据压电方程 (2) 和 (3), 这两个应力只产生电极化强度 P_1^p 和 P_2^p 两个分量, 其值为

$$\begin{cases} P_1^p = d_{11}T_1 \\ P_2^p = -2d_{11}T_6 \end{cases}. \quad (4)$$

根据石英微结构的特点, 敏感梁没有 x 方向的表面, P_1^p 产生的束缚电荷很难通过布置电极来感测. 而 P_2^p 产生的束缚电荷可以通过在敏感梁的侧壁上 (y 方向表面) 布置一对电极来感测 (如图 5 所示) 相比传统石英陀螺的结构需要在敏感梁的每一个侧壁上制造并列分开的两电极, 该方案极大的降低了电极制造的难度, 利于结构的小型化设计. 此外, 根据 (3) 和 (4) 式, 剪应力 T_6 与 y 方向电极化强度 P_2^p 之间的压电系数 $d_{26} = -2d_{11}$ 是石英所有的压电系数分量中最大的, 因此, 在其他条件相同的情况下, 采用该压电系数分量可以提高敏感梁的检测灵敏度.

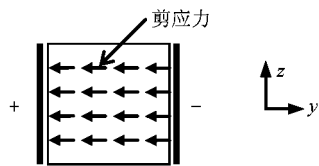


图 5 敏感梁截面的剪应力分布及电极配置

为了进一步提高剪应力检测的灵敏度, 敏感梁设计成为变截面梁结构. 如图 6 所示, 梁的长度、厚度和锥度分别为 l, h 和 α , 则梁的宽度 b 可表示为

$$b(x) = b_0 - 2x \tan \alpha \quad (0 \leq x \leq l), \quad (5)$$

其中 b_0 为梁固定端的宽度, 与梁端部相连的结构可

以等效成为一个质量块. 当质量块受到 y 方向 F_c 的作用时, 梁内的剪应力 T_6 表示为 [14]

$$T_6(x, y) = \frac{VS^*}{Ih} - \frac{Mb}{2I} \left(1 - \frac{S^*b}{I}\right) \tan \alpha, \quad (6)$$

其中 V, M 分别表示梁所受的剪力和弯矩; I, S^* 分别为梁横截面对中性轴的惯性矩和静矩, 可以推导出它们的表达式为

$$\begin{aligned} V(x) &= F_c, \\ M(x) &= F_c(x-l), \\ I(x) &= hb^3/12, \end{aligned} \quad (7)$$

$$S^*(x, y) = \frac{h}{2} \left(\frac{b^2}{4} - y^2 \right).$$

将 (5) 和 (7) 式代入 (6) 式可得梁边缘侧壁处的剪应力

$$T_6(x, \pm b/2) = \frac{6F_c(l-x)}{hb^2} \tan \alpha. \quad (8)$$

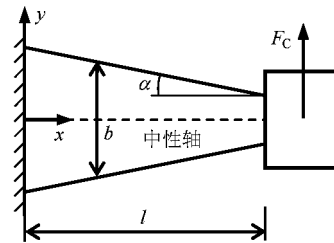


图 6 敏感梁结构示意图

根据 Gauss 定理, 则梁侧壁表面产生的束缚电荷面密度为

$$\begin{aligned} \rho_{bs}(x) &= | -2d_{11}T_6(x, \pm b/2) | \\ &= \frac{12d_{11}F_c(l-x)}{h(b_0 - 2x \tan \alpha)^2} \tan \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

根据 (9) 式可以绘出梁的不同侧壁处的电荷面密度与锥度之间关系. 如图 7 所示, 随着锥度的增

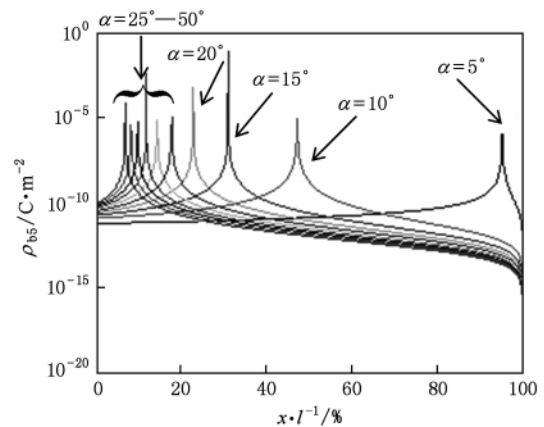


图 7 敏感梁侧壁电荷面密度分布

加,电荷面密度的峰值位置由梁的自由端向固定端移动.由于靠近梁端部的电荷不利于电极的采集,因此,梁的锥度被限定在 5° — 20° 范围内.在梁侧壁范围内对电荷面密度积分,可以求得在不同锥度下的侧壁电荷量 Q ,如图8所示.由此看出 $\alpha = 15^{\circ}$ 的电荷量最大,因此,为了提高石英微陀螺的灵敏度,敏感梁的锥度设计为 15° .

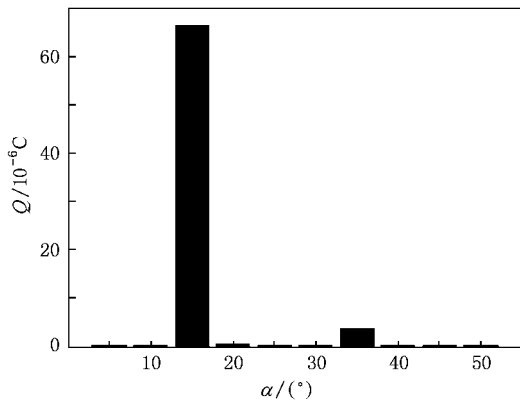


图8 不同锥度梁侧壁的电荷量

2.3. 结构参数设计

通过以上的分析,并结合有限元仿真的方法来获得最佳的结构尺寸参数.在不同结构参数下仿真求出微结构的驱动模态和敏感模态,使驱动模态和敏感模态频率相近并远离其他模态频率.最终获得的驱动模态频率约为5400 Hz,敏感模态频率约为5500 Hz.同时100 Hz的频差使得该结构具有适当的检测带宽^[15].表2总结了石英微结构的具体结构参数.

表2 石英微陀螺的主要结构参数

物理量/单位	参数
厚度/mm	0.5
质量块宽度/mm	2.1
质量块长度/mm	3.5
驱动梁宽度/mm	0.5
驱动梁长度/mm	9.0
敏感梁长度/mm	3.0
敏感梁宽度/mm	0.5
敏感梁锥度/ $(^{\circ})$	15

3. 实 验

石英微结构的制造过程主要包括结构的各项异性湿法腐蚀和电极的制备.如图9所示,选用厚

$500 \mu\text{m}$ 双面抛光的 z 切石英片作为基片,经过清洗后,在基片表面分别镀制 100 \AA 的铬和 2000 \AA 的金膜,并利用光刻技术形成掩膜图形.将有掩膜层的基片浸泡到氢氟酸与氟化氢氨的混合溶液中进行化学腐蚀来得到石英微结构.结构表面的电极图形和迹线是利用孔洞掩膜的方式,通过蒸镀铝膜的方法制备而成.

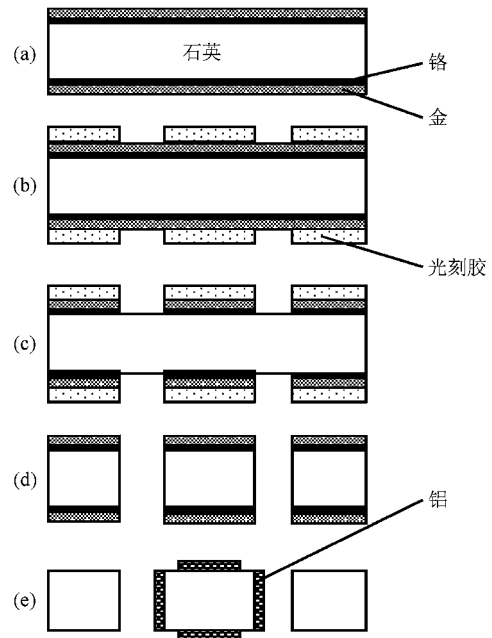


图9 石英微结构的制造工艺 (a)镀膜,(b)光刻,(c)腐蚀掩膜层,(d)腐蚀石英,(e)制备电极

整个结构通过支撑质量块与基座粘结起来,并封装在金属管壳内.最终制作的器件如图10所示,该器件尺寸为 $20.9 \text{ mm} \times 18.4 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$.

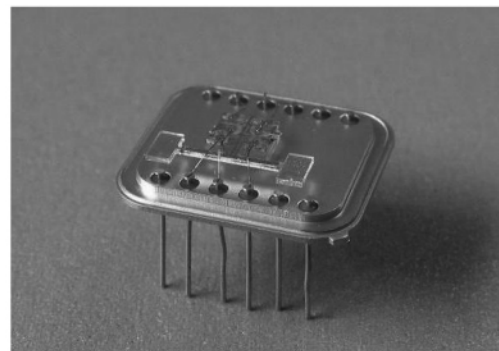


图10 石英微陀螺器件

4. 测 试

本文对石英微结构样件进行了初步的测试,测

试内容主要包括模态测试和 Coriolis 力测试.

4.1. 模态测试

通过模态测试可以验证微结构的模态振动性能. 本文利用 NF 公司的频率响应分析仪测试驱动梁的导纳来表征其驱动模态特性. 从图 6 所示的导纳曲线可以看出驱动模态的谐振频率约为 5.6 kHz, 从数据上计算出的品质因子在 5000 以上. 因此, 可以确定该陀螺结构无需真空封装, 可以在大气下正常工作.

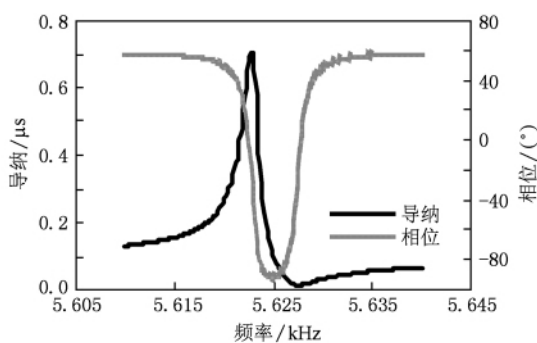


图 11 驱动模式的导纳曲线

4.2. Coriolis 力测试

微陀螺是利用 Coriolis 效应测量输入角速度的, 因此, 对其敏感梁的振动信号进行分析观察其中是否有 Coriolis 力导致的振动信号是验证微结构是否具备测量角速度能力的主要途径. 通过外部电路提

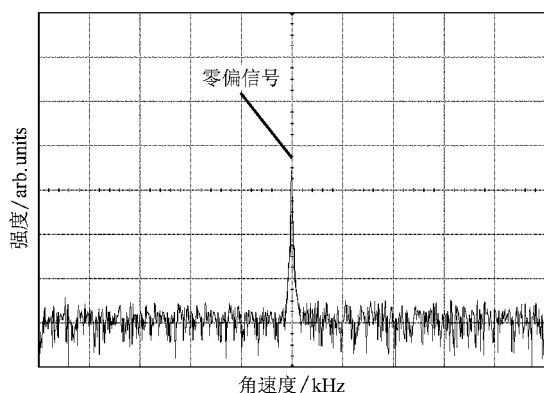


图 12 无输入角速度时输出信号的频谱

供的正弦电压信号激励驱动梁振动, 利用 Agilent 公司生产的示波器测量得到检测电极信号的频谱, 如图 12 所示, 其中只有一根谱线, 且其频率为驱动电压频率, 这根谱线代表的是零偏信号. 当有频率为 4 Hz 的正弦角速度输入时, 输出信号的频谱, 如图 13 所示, 可以看到在零偏信号的两侧出现了两根谱线. 由此可见, 该结构已经具备了测量角速度的能力.

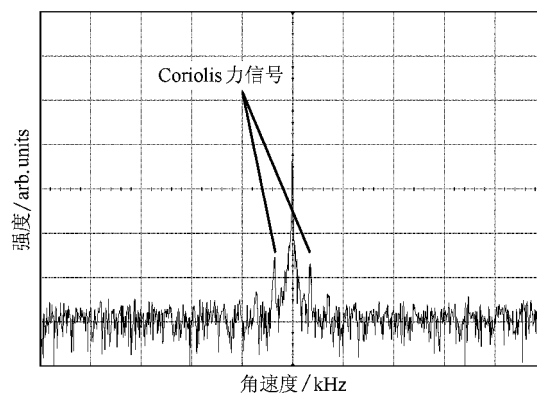


图 13 有输入角速度时输出信号的频谱

5. 结 论

利用剪应力检测的方案, 设计了一种新型石英陀螺结构. 通过理论分析和实验验证可以得到以下结论: (1) 结构侧壁上的电极为一极性的单电极, 相对于传统石英陀螺结构的侧壁双电极设计, 该结构的侧壁电极易于通过孔洞掩膜工艺进行加工; (2) 驱动模态和敏感模态均在结构平面内振动, 因此, 空气阻尼均为滑膜阻尼, 使得该结构在大气下具有较大的振动品质因子; (3) 检测敏感梁振动的压电常数分量 d_{26} 是石英所有的压电常数分量中最大的, 在其他条件相同的情况下, 该结构具有较高的灵敏度; (4) 敏感梁采用锥形梁的结构方案, 可以提高敏感梁振动的检测灵敏度; (5) 通过实验制作出了石英微结构样件, 测试得到该样件的驱动频率约为 5.6 kHz, 大气下驱动品质因子高于 5000. 输出信号频谱中存在 Coriolis 力信号验证了本设计思想的正确性.

- [1] Yu Y T, Yuan W Z, Qiao D Y, Liang Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5691 (in Chinese) [虞益挺、苑伟政、乔大勇、梁庆 2007 物理学报 **56** 5691]
- [2] Kal S 2007 *Def. Sci. J.* **57** 209
- [3] Li H Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1361 (in Chinese) [李洪奇 2005 物理学报 **54** 1361]
- [4] Meyer Y, Collet M 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 1
- [5] Liang J X, Kohsaka F, Li X F, Kunitomo K, Ueda T 2009 *Proceedings of Transducers* June 21—25, 2009 Denver, USA, p308
- [6] Madni A M, Costlow L E, Knowles S J 2003 *IEEE Sens. J.* **3** 569
- [7] Megherbi S, Levy R, Parrain F, Mathias H, Traon O L, Janiaud D, Gilles J P 2007 *Proceedings of International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems* April 16—18, 2007 London, UK p1
- [8] Madni A M, Costlow L E, Smith M W 2006 *Proceedings of SAE World Congress* April 3—6 2006 Detroit, USA, 2006
- [9] Uehara H, Ohtsuka T, Inoue T 2005 *Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition* August 29—31, 2005 Vancouver, Canada p886
- [10] Ohtsuka T, Inoue T, Yoshimatsu M, Matsudo H, Okazaki M 2006 *Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition* June 4—7, 2006 Miami, USA, p129
- [11] Senturia S D 2000 *Microsystem Design* (Boston: Kluwer Academic Publishers) p581
- [12] Sato K, Ono A, Tomikawa Y 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 3000
- [13] Qin Z K 1980 *Piezoelectric Quartz Crystal* (Beijing: Defense Industry Press) p68 (in Chinese) [秦自楷 1980 压电石英晶体 (北京:国防工业出版社) 第 68 页]
- [14] Timoshenko S P, Gere J M 1972 *Mechanics of Materials* (New York: Van Nostrand Reinhold Company) p158
- [15] Schofield A R, Trusov A A, Shkel A M 2009 *Proceedings of Transducers* June 21—25, 2009 Denver, USA p1952

A novel quartz micro-structure based on shear stress detection and its gyroscopic effect*

Xie Li-Qiang[†] Wu Xue-Zhong Li Sheng-Yi Wang Hao-Xu Dong Pei-Tao

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 16 November 2009; revised manuscript received 15 December 2009)

Abstract

In order to simplify sidewall electrode pattern of quartz gyroscope, a novel micro-structure used to sense Coriolis' force based on shear stress detection is demonstrated. The approach of shear stress detection is analyzed and the structure of sidewall electrode is a single polarity electrode. A tapered beam with 15° taper designed as the sensing beam can increase its sensitivity. A prototype structure is fabricated by processing z-cut quartz by anisotropic wet etching technique. The prototype has a drive mode frequency of about 5.6 kHz, and the quality factor is over 5000 in atmosphere. The spectrum analysis of the structure's output signal reveals the Coriolis force, which validates our new design scheme.

Keywords: micromachined quartz gyroscope, shear stress detection, Coriolis force

PACC: 0710C, 0710Y

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51005240).

[†] E-mail: nudtxie@yahoo.com.cn