

基于“8 悬臂梁-质量块”结构的新颖 x 轴音叉式 硅微机械陀螺^{*}

段 飞^{1,2} 焦继伟^{1,†} 王育才^{1,2} 张 颖¹ 宓斌玮¹ 李金鹏¹ 钱 清¹ 王跃林¹

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 设计、制作并测试了一种新颖的 x 轴音叉式微机械陀螺, 它以“8 悬臂梁-质量块”结构来实现 Coriolis 力的检测, 与常见的单层弹性梁-质量块结构相比, 具有更好的模态稳定性; 大质量块与薄弹性梁的结构设计有助于获得低机械噪声与高灵敏度. 采用体硅微机械加工工艺在(111)硅晶圆上试制了基于“8 悬臂梁-质量块”结构的微陀螺, 由于在(111)晶向上硅的湿法腐蚀速率极其缓慢, 而用氧化硅填充的限制槽限定侧向腐蚀范围, 因此这套工艺能对双层弹性梁的结构尺寸进行精确控制, 获得较小的模态失配. 在大气环境中, 该陀螺具有 $\pm 200^\circ/\text{s}$ 的量程, 角速度灵敏度为 $0.15\text{mV}/(^\circ/\text{s})$, 分辨率约为 $0.1^\circ/\text{s}$.

关键词: 微机械陀螺; x 轴; 音叉式陀螺; “8 悬臂梁-质量块”结构; 限制槽; (111)硅晶圆

PACC: 0630G; 0710C; 4350 **EEACC:** 7230; 8340

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)10-1630-06

1 引言

作为一种具有广泛应用性的 MEMS 惯性器件, 微机械陀螺具有体积小、功耗低、易于集成等优点. 根据多轴检测的需要, 微机械陀螺又分为 z 轴陀螺与 x 轴陀螺(y 轴陀螺可由 x 轴陀螺版图旋转 90° 得到). 与 z 轴陀螺的可动部件只在水平平面内运动不同, x 轴陀螺需要纵向振动产生位移, 即所谓的“out-of-plane”运动位移^[1]. 因此, x 轴陀螺的实现要难于 z 轴陀螺. 文献中对 z 轴陀螺的报道远多于对 x 轴陀螺的报道, 而几乎所有的 x 轴微机械陀螺在纵向振动方向上, 敏感质量块都是由单层弹性梁来支撑的^[2,3]. 要让微机械陀螺获得高灵敏度与低机械噪声, 大质量块与薄弹性梁的设计无疑具有优势^[4]. 对于大质量块与薄弹性梁组成的微机械振动系统, 为了有效避免扭摆等干扰模态带来的耦合误差影响, 对称性支撑的“8 悬臂梁-质量块”结构可以在获得高灵敏度的同时又不失稳定性^[5].

Yazdi 等人^[4]用重掺杂自停止腐蚀工艺在单硅片上制作了具有类似结构的高精度加速度计, 然而, 这种局部掺杂工艺会不可避免地引起较大的应力效应. 文献[5]中提出了一种新颖的基于“8 悬臂梁-质量块”结构的工艺方法, 并由此设计和制作了 z 轴

加速度计, 由于不需要进行局部掺杂, 所以有效避免了残余应力. 本文提出了基于“8 悬臂梁-质量块”结构的 x 轴微陀螺, 由于具有驱动与检测两个自由度, 相对于文献[5]而言, 器件的设计与制作更为复杂. 比如, 整个结构采用音叉式结构; 每个质量块又采取了框架式解耦结构的设计, 等等. 在文献中尚未见有单片晶圆制作的具有类似结构的面内 x 轴硅微陀螺报道, 相对于以往的单层梁-质量块结构的微陀螺而言, 这种 x 轴陀螺具有更好的纵向模态稳定性. 在(111)硅晶圆上制作器件的过程中, 能够有效精确控制弹性梁的尺寸, 得到较小的模态失配. 本文提供了一种实现高稳定性、高灵敏度与低噪声的 x 轴微陀螺的方法.

2 设计与模拟

该微机械陀螺的截面如图 1 所示, 对陀螺沿 y 轴加以驱动振动, 当 x 轴施以一个角速度时, 由于 Coriolis 力的作用, 敏感质量块在 z 方向会产生一个平行纵向位移, 并由上下平板电容加以检测. 作为一种音叉式陀螺, 它由左右两部分完全相同的结构组成, 这两部分具有完全相反的运动, 在电路上以差分形式表现, 一是形成相互的补偿机制, 有效消除轴向加速度的影响^[6]; 二是使输出信号幅度加倍. 整个

^{*} 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号: 2006AA04Z312)

[†] 通信作者. Email: jiaojw@mail.sim.ac.cn

2007-03-27 收到, 2007-05-08 定稿

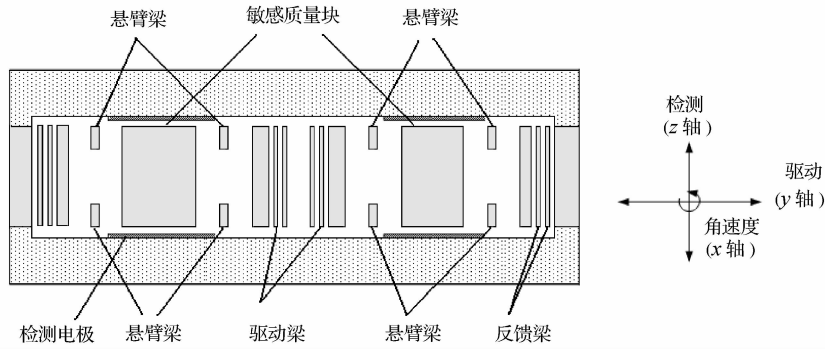


图 1 x 轴微陀螺的截面图

Fig.1 Schematic cross section of the x -axis gyro

陀螺以电磁激励的方式进行驱动,相对常用的静电驱动具有较大的驱动力与驱动幅度,以提高灵敏度.采用了解耦结构设计,以抑制驱动与检测模态之间的机械耦合.

作为微陀螺的 Coriolis 检测部分,每个敏感质量块由 8 根弹性悬臂梁支撑,形成一个 Coriolis 敏感加速度计.这 8 根梁为上下层对称分布,包括 4 根顶层梁与 4 根底层梁.使用对称的多个梁对全硅厚度的质量块进行支撑,既实现了对称的支撑,有利于整体的平衡与稳定,又具有较薄的结构,有利于降低刚度.为了缩小器件面积,将梁设计成如图 2 状.

为简便起见,我们将敏感质量块由 8 根弹性梁支撑的情况称为 8-1 系统,由 4 根单层弹性梁支撑的情况称为 4-1 系统,并通过有限元方法对这两种情况进行了模态的分析与比较,来进行验证.图 3 比较了相同条件的 8-1 系统与 4-1 系统的前四阶模态.检测所采用的模态,即敏感质量块做纵向平动的模态,为 8-1 系统的一阶模态,而对于 4-1 系统,则为其二阶模态.由于具有不同的结构质量分布,既有效降低了纵向刚度,同时又具有相对较大的扭转刚度,所以 8-1 系统工作在频率更低的基态;而且 8-1 系统的基态与相邻模态具有较大的频率差(1st~2nd, 1033Hz),而 4-1 系统的二阶模态与三阶扭摆

模态之间的频率非常接近(2nd~3rd, 259Hz),干扰模态会对工作模态产生较大的影响,特别是频率过于接近的扭摆模态会引起各方向之间较大的耦合效应.所以,8-1 系统比 4-1 系统具有更好的模态稳定性与解耦性.

该陀螺设计为能在大气环境中工作.为了减小敏感质量块与衬底之间的压膜空气阻尼,在质量块上设计了阻尼孔,以降低阻尼,提高 Q 值.质量块几乎与整个硅片同厚,以实现高灵敏度与抑制噪声.厚孔板的空气阻尼可以通过改写的 Reynolds 方程计算得到^[7],理论计算 Q 值为 67.理论计算值高于实测值,这一方面是由于推导计算过程中存在着一定的近似,另一方面是由于加工误差的影响,例如对质量块与衬底之间的气隙高度的控制、图形尺寸的加工等均存在着一定的误差所导致的.

3 制作工艺流程

微机械陀螺在 100mm (111)低阻硅晶圆上制作完成.(111)单晶硅由于具有较为各向同性的杨氏模量、泊松比、剪切模量等参数,所以相比其他晶向的硅材料被视为更好的微机械加工材料^[8].图 4 所示为主要工艺流程:

(a) 利用深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching, DRIE)工艺在(111)硅晶圆两侧刻蚀出位置对应的宽度很窄、深度较浅的限制沟槽对,并通过热氧化的方法在限制槽内填充氧化硅.

(b) 在底部限制槽的旁边,再次利用 DRIE 工艺刻蚀出深腐蚀凹槽,高度为略微超过顶部限制槽的最低处,即底部开口的深槽与顶部开口的限制槽的高度位置略微重叠.

(c) 将整片(111)晶圆置入 KOH 溶液腐蚀.由于腐蚀凹槽侧面为腐蚀速度很快的(110)晶面,所以会产生侧向腐蚀,腐蚀距离以腐蚀出底层弹性梁为宜.这样,利用各向异性腐蚀产生了“8悬臂梁-质量

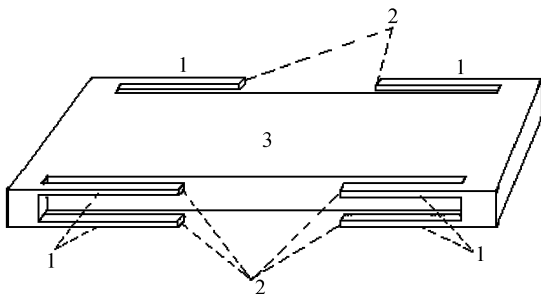


图 2 “8 悬臂梁-质量块”结构示意图 1. 弹性梁;2. 锚点连接;3. 敏感质量块

Fig.2 Diagram of “8-beams/proofmass” structure
1. Elastic beams;2. Anchor points;3. Seismic mass

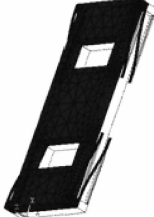




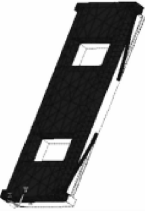


	一阶模态	二阶模态	三阶模态	四阶模态
8-1 系统				
	1st(2386Hz)	2nd(3419Hz)	3rd(5098Hz)	4th(6010Hz)
4-1 系统				
	1st(3441Hz)	2nd(4263Hz)	3rd(4522Hz)	4th(8547Hz)

图 3 4-1 系统及 8-1 系统的模态分析与比较
Fig.3 Vibration modes comparison of “4-1” type and “8-1” type

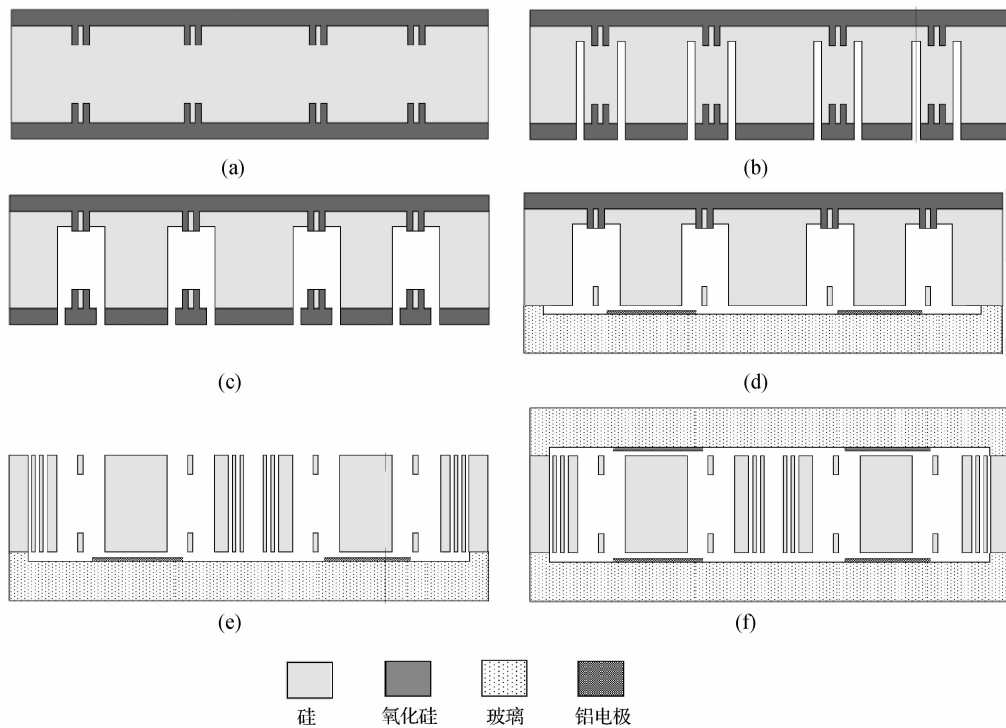


图 4 主要工艺流程 (a) 刻蚀出限制沟槽对,并用热氧填充;(b) 刻蚀深腐蚀凹槽;(c) KOH 溶液腐蚀,形成底层梁;(d) 与玻璃衬底键合;(e) 通过 DRIE 释放可动结构;(f) 第二次键合,形成上盖板

Fig.4 Main process flow (a) Limit trench pairs patterned and refilled with thermal oxide;(b) Deep groove pairs etching;(c) KOH etching,forming bottom springs;(d) Bonding with bottom glass substrate;(e) Structure releasing by DRIE;(f)Second bonding with cap wafer

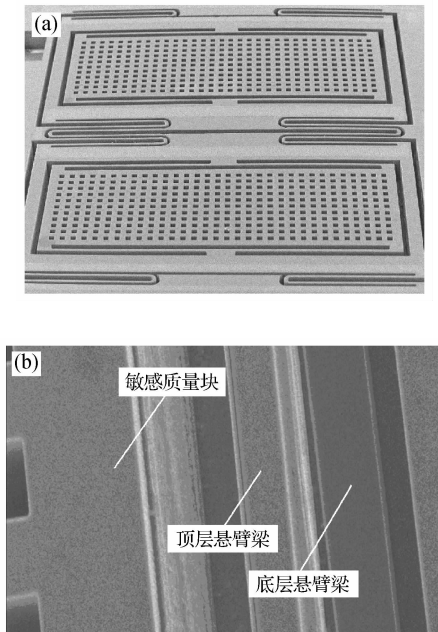


图 5 微陀螺的 SEM 照片 (a) 顶视图; (b) 悬臂梁

Fig.5 SEM pictures of the gyro (a) Top view of the gyro; (b) Close-up view of the dual beams

块”结构中的底层梁部分. 显而易见的是, 由于(111)晶面的腐蚀速率极其缓慢, 而填满氧化硅的限制槽在侧向上又自停止了 KOH 腐蚀, 所以底部与顶部限制槽的高度分别决定了底层与顶层弹性梁的厚度. 通过精确控制限制槽的高度, 就能准确控制弹性梁的厚度尺寸.

(d) 用 HF 去除底面的氧化硅; 将(111)晶圆与具有近似热胀系数的 Pyrex 玻璃做静电键合, 形成玻璃衬底.

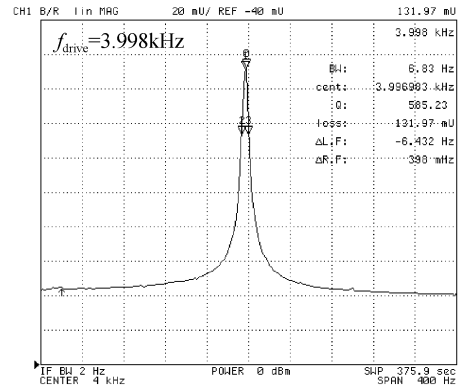
(e) 通过 DRIE 工艺释放可动结构, 包括顶层弹性梁、质量块、驱动梁、反馈梁、阻尼孔等. 质量块几乎与整个硅片等厚.

(f) 通过第二次键合为陀螺加上盖板, 形成完整的器件结构.

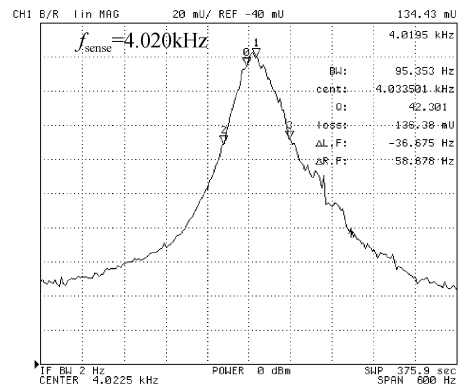
4 测试结果

图 5(a) 给出了第二次键合之前微机械陀螺的 SEM 照片, 图 5(b) 给出了悬臂梁的近照. 由图可见, 弹性梁对称地分布在顶端与底端.

我们在大气环境中对微机械陀螺进行了测试. 微机械陀螺芯片被封装在 12 管脚的带有永磁体的管壳内, 管壳固定在 PCB 电路上并引出各个管脚的接口. 使用 HP4395A 网络分析仪对陀螺的谐振特性进行了测试, 结果见图 6. 驱动与检测模式的谐振频率分别为 3998 与 4020 Hz, 两模式之间的频率失



(a)



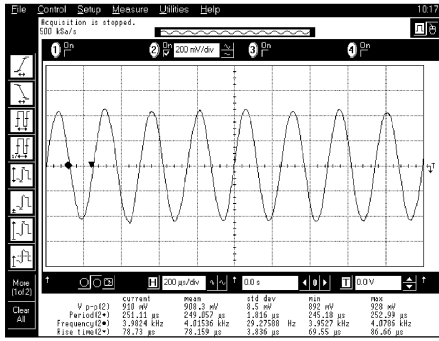
(b)

图 6 微陀螺的谐振特性 (a) 驱动模式谐振特性; (b) 检测模式谐振特性

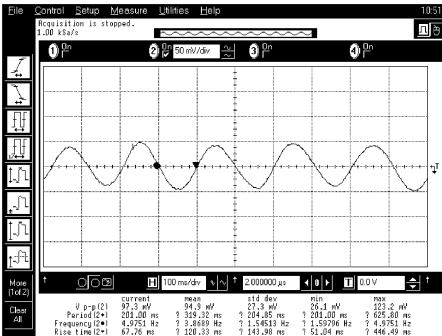
Fig.6 Resonance characteristics of the gyro (a) Drive mode resonance; (b) Sense mode resonance

配度较小. 驱动与检测模式的 Q 值分别为 585 与 42. 由于 x 轴陀螺受到质量块与衬底之间的压膜阻尼的影响, 而测试又在大气环境中进行, 因此检测方向 Q 值相对偏小一些. 如果采用真空封装, 检测方向 Q 值会极大提高, 但制造成本也会增加很多. 图 7(a) 所示为 AGC 驱动自激信号, (b) 为施加 $300^\circ/\text{s}$, 5Hz 的正弦角速度信号时相应输出信号的时域响应, 两者波形稳定, 说明陀螺能工作在驱动与检测模式. 图 8 为测试到的 $200^\circ/\text{s}$ 以内的角速度特性, 标度因子约为 $0.15\text{mV}/(^\circ/\text{s})$. 图 9 为对 $10^\circ/\text{s}$, 2Hz 的角速度输入的频域响应. 由图可见, 角速度与噪声水平相差约 40dB, 意味着由热噪声水平决定的微陀螺的分辨率约 $0.1^\circ/\text{s}$.

我们用网络分析仪测试了微陀螺的噪声特性, 图 10 为测试到的噪声频谱. 解调前的噪声中包含了白噪声、主要来自于外围电路的低频 $1/f$ 噪声、工频电源噪声 (50Hz) 以及驱动载波信号耦合到检测电路输出端产生的器件工作频率噪声.



(a)



(b)

图 7 微陀螺的驱动信号与输出响应 (a)驱动自激信号;(b)输出响应信号

Fig.7 Input and output signals of the gyro (a) Input drive signal;(b)Output response signal

5 结论

设计、制作并测试了一种基于“8 悬臂梁-质量块”结构来检测 Coriolis 效应的 x 轴音叉式微机械陀螺,这种陀螺采用了大质量块-薄弹性梁的设计,从而获得较低的机械噪声与较好的灵敏度.该陀螺在(111)硅晶圆上采用体硅工艺制作,制作过程中对

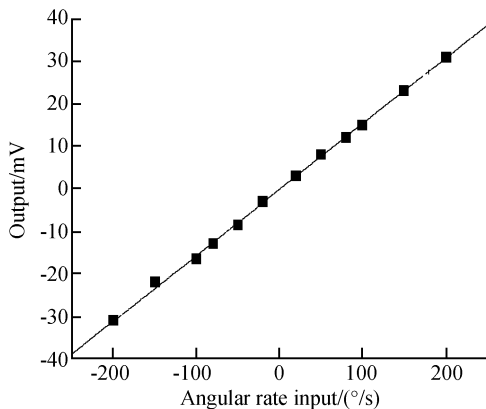


图 8 微陀螺的角速度响应

Fig.8 Output versus angular rate input

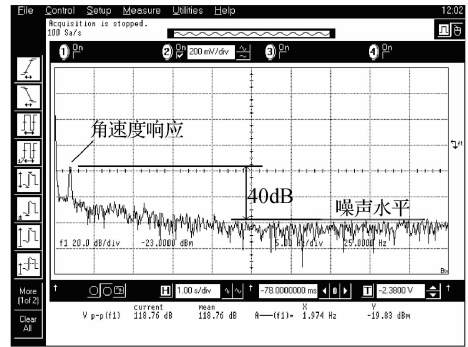


图 9 角速度频率响应

Fig.9 Frequency response to a $10^{\circ}/s, 2Hz$ angular rate input

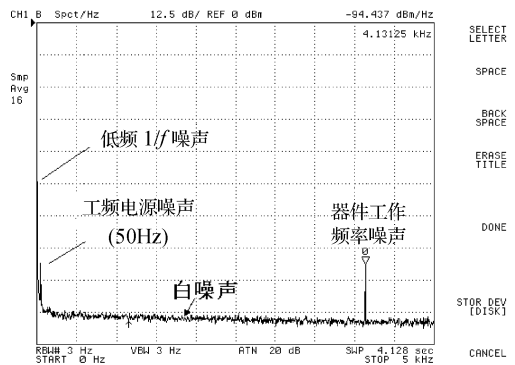


图 10 微陀螺的噪声频谱

Fig.10 Noise spectrum of the gyro

梁的尺寸进行精确控制,获得了较小的模态失配.该陀螺能在大气环境中工作.其制作工艺与我们以前设计的 z 轴微机械陀螺工艺是完全兼容的^[9],因此,完全具备了制备单片集成三轴微机械陀螺的工艺基础.

参考文献

[1] Yang Z, Wang C, Yan G, et al. A bulk micromachined lateral axis gyroscope with vertical sensing comb capacitors. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers, 2005;121

[2] Kim J, Park S, Kwak D, et al. An x -axis single-crystalline microgyroscope fabricated by the extended SBM process. J Microelectromech Syst, 2005, 14;444

[3] Lee B, Lee S, Jung K, et al. A decoupled vibratory gyro-scope using a mixed micro-machining technology. Proc ICRA, Seoul, 2001;3412

[4] Yazdi N, Najafi K. An all-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process. J Microelectromech Syst, 2000, 9(4);544

[5] Wang Yucai, Jiao Jiwei, Duan Fei, et al. Design and fabrication of an accelerometer with novel “8-beams/mass” structure. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(5);783(in Chinese) [王育才, 焦继伟, 段飞, 等. 一种具有“8 悬臂梁-质

- 量块”结构的新型硅微加速度计. 半导体学报, 2007, 28(5): 783]
- [6] Chen Yong. Research of tuning fork type micromachined gyroscope based on slide-film damping. PhD Dissertation of Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, 2004 (in Chinese) [陈永. 基于滑膜阻尼效应的音叉式微机械陀螺研究. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士学位论文, 2004]
- [7] Bao M, Yang H, Sun Y, et al. Modified Reynolds' equation and analytical analysis of squeeze-film air damping of perforated structures. *J Micromech Microeng*, 2003, 13:795
- [8] Kim J, Cho D I, Muller R S. Why is (111) silicon a better mechanical material for MEMS. *Transducers' 01 Eurosensors XV, Int Conf Solid-State Sens Actuators, Munich*, 2001: 662
- [9] Chen Y, Jiao J, Wang H, et al. A novel tuning fork gyroscope with high Q -factors working at atmospheric pressure. *Microsystem Technologies*, 2005, 11(23):111

A Novel Micromachined x -Axis Tuning Fork Gyroscope Based on “8-Beams/Proofmass” Structure*

Duan Fei^{1,2}, Jiao Jiwei^{1,†}, Wang Yucui^{1,2}, Zhang Ying¹, Mi Binwei¹, Li Jinpeng¹,
Qian Qing¹, and Wang Yuelin¹

(1 *State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A novel x -axis tuning fork MEMS gyroscope with “8-beams/proofmass” structure for detecting the Coriolis effect is presented. Compared with the common single-plane beams, the 8 vertical beams, symmetrically located at the top and bottom sides, more stably suspend the large thick proof mass, resulting in large capacitance variation and low mechanical noise. Bulk-micromachining technology is applied to obtain the large proof mass and twin dual beams. During the fabrication process, the dimensions of the beams are precisely confined by thermal oxide-protected limit trench sidewalls and the extremely slowly etched (111)-planes; therefore a small mismatch of less than 30Hz is achieved before tuning. Initial testing shows a sensitivity of 0.15mV/($^{\circ}$ /s) and a rate resolution around 0.1 $^{\circ}$ /s under atmosphere pressure.

Key words: MEMS; x -axis gyroscope; tuning fork gyroscope; “8-beams/proofmass” structure; limit trench; (111) silicon

PACC: 0630G; 0710C; 4350 **EEACC:** 7230; 8340

Article ID: 0253-4177(2007)10-1630-06

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA04Z312)

† Corresponding author. Email: jiaojw@mail.sim.ac.cn

Received 27 March 2007, revised manuscript received 8 May 2007