

一种具有隔振框架的解耦硅微陀螺*

肖定邦^{1,†} 吴学忠¹ 李伟东² 董培涛¹ 侯占强¹ 李圣怡¹

(1 国防科技大学微系统实验室, 长沙 410073)

(2 中国电子科技集团第二十四研究所, 重庆 400021)

摘要: 提出了一种利用隔振框架解耦的硅微陀螺, 其驱动模态和检测模态不仅有各自独立的支撑结构, 还有各自独立的惯性质量块, 隔振框架隔离了驱动结构和检测结构, 减小了模态之间的交叉耦合; 利用 TMAH 湿法腐蚀结合深反应离子刻蚀工艺, 在 n 型<100>低阻硅片上制作出了微陀螺样片, 并为其研制了配套的测控电路; 测试结果表明, 驱动模态频率为 2.981kHz, 品质因子为 800, 检测模态频率为 2.813kHz, 品质因子为 34, 刻度因子为 38mV/(°/s), 线性度优于 0.8%, 微陀螺在 0.5h 内的零偏稳定性为 0.28°/s.

关键词: 硅微陀螺; 解耦结构; 隔振框架

PACC: 0630G; 0731C **EEACC:** 7230; 8340

中图分类号: TN305 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)12-2427-05

1 前言

硅微陀螺具有体积小、重量轻、价格低的优点, 在飞行器稳定控制、武器系统导航制导、微卫星姿态控制等领域具有广泛的应用前景. 振动式硅微陀螺由于没有旋转部件成为微陀螺的主要结构形式, 这种微陀螺具有两个工作模态, 即驱动模态和检测模态, 其驱动轴、检测轴和角速度敏感轴三者之间相互正交. 它的工作原理是驱动微陀螺的惯性质量在驱动轴向产生振动, 如果有敏感轴向的输入角速度, 受到哥氏力的作用, 惯性质量将在检测轴向产生振动, 测量得到该振动信号就能够从中解调出输入角速度.

制造误差和内部残余应力导致微陀螺驱动模态和检测模态之间会有交叉耦合, 产生正交误差, 影响微陀螺的性能^[1,2]. 设计解耦结构可以减小正交误差, 文献[3~5]为微陀螺驱动模态和检测模态设计了相互隔离的支撑结构, 文献[6~12]则采用多框架结构分离驱动模态和检测模态. 现有这些解耦微陀螺虽然分离了驱动模态和检测模态的支撑结构, 但是各模态的惯性质量块相同, 在有输入角速度时, 惯性质量块既有驱动模态振动, 又有哥氏力导致的检测模态振动, 影响微陀螺的性能.

受石英陀螺结构设计方法的启发^[13], 本文提出了一种具有隔振框架的解耦硅微陀螺, 其驱动模态和检测模态不仅有各自独立的支撑结构, 还有各自独立的惯性质量块, 其中的隔振框架能够防止驱动模态的振动传递到检测质量块上, 减小了模态之间的交叉耦合. 作者首先对该微陀螺结构进行了设计与模拟, 然后介绍了主要加工工艺过程, 研制了微陀螺测控电路, 最后对其模态频率、灵敏度、线性度、短期零偏稳定性等性能指标进行

了测试.

2 结构与模拟

这种解耦微陀螺的结构如图 1 所示, 它主要包括驱动结构、隔振框架和检测结构 3 部分. 驱动结构和检测结构分别由两个悬臂梁质量块构成, 它们具有各自独立的支撑梁和惯性质量. 隔振框架采用 4 梁固支结构, 锚点位于框架中心.

微陀螺的驱动模态为驱动质量块沿驱动轴方向的反向振动, 其模态频率只与驱动质量块和驱动模态支撑梁有关系, 与隔振框架和检测结构无关. 检测模态为检测质量块沿检测轴方向的反向振动, 同样, 它的模态频率也只与检测质量块和检测模态支撑梁有关系, 与隔振框架和驱动结构无关. 因此, 可以分别设计驱动结构和

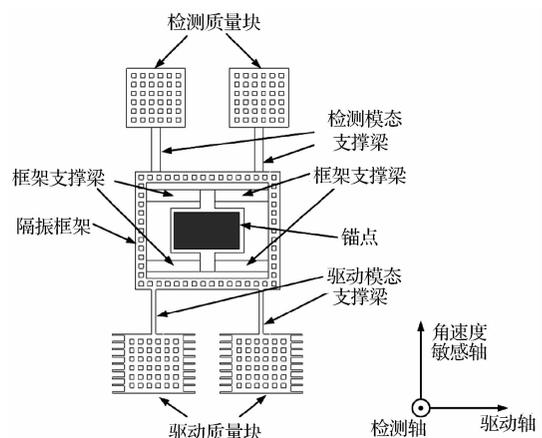


图 1 解耦微陀螺结构

Fig. 1 Structurally decoupled gyroscope

* 国家自然科学基金(批准号:50375154)和国防科技大学优秀研究生创新资助项目

† 通信作者. Email: dingbangxiao@yahoo.com.cn

2008-04-10 收到, 2008-08-29 定稿

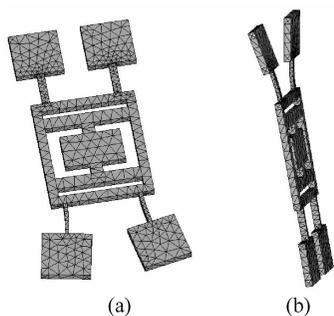


图 2 微陀螺的驱动模态和检测模态 (a) 驱动模态; (b) 检测模态
Fig.2 Drive and sense modes of the gyroscope (a) Drive mode; (b) Sense mode

检测结构, 并使其模态频率达到匹配, 提高了设计效率. 利用 Ansys 仿真得到的驱动模态和检测模态如图 2 所示, 其中驱动模态频率为 2.890kHz, 检测模态频率为 2.901kHz.

隔振框架是该微陀螺实现解耦的关键结构. 当驱动质量块沿驱动轴方向反向振动时, 驱动模态支撑梁对隔振框架的作用力在同一直线上, 大小相等、方向相反, 隔振框架受到的合力和合力矩为零, 隔振框架和检测质量块不受驱动模态振动的影响, 隔振框架有效地隔离了驱动模态振动. 当有输入角速度时, 驱动质量块上的哥氏力将在隔振框架上产生转矩, 使隔振框架发生绕检测轴的扭转振动, 从而带动检测质量块产生检测模态的振动. 因此, 隔振框架即能够隔离驱动模态的振动, 又能够将驱动质量块上的哥氏力传递到检测质量块上, 达到了解耦的目的.

微陀螺的芯片结构如图 3 所示, 它是硅-玻璃双层结构, 采用梳齿电容激励驱动质量块振动, 采用平板电容测量检测质量块的振动, 电极制作在玻璃基底上.

3 加工工艺

这种硅微陀螺采用厚度 $300\mu\text{m}$ 的 n 型 $\langle 100 \rangle$ 低电阻双面抛光硅片和厚度 $500\mu\text{m}$ 的 Pyrex7740 玻璃片制

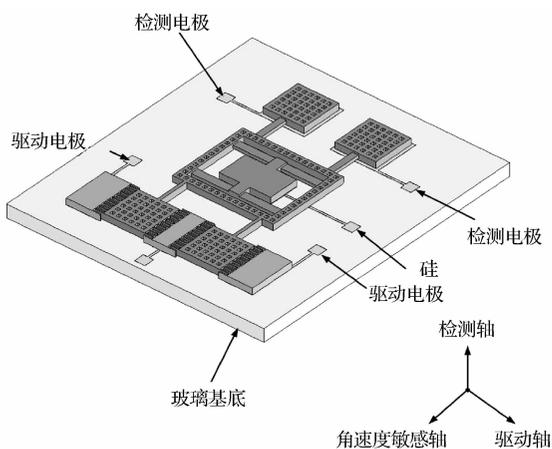


图 3 微陀螺芯片结构
Fig.3 Designed gyroscope chip

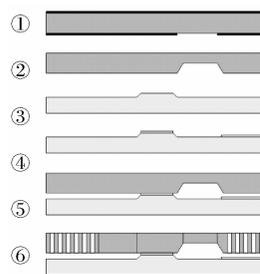


图 4 微陀螺的加工工艺流程
Fig.4 Fabrication process of the gyroscope

作, 其主要工艺流程如图 4 所示: ①硅片热氧化, 氧化厚度 300nm , 对氧化的硅片进行光刻, 利用 BOE 缓冲液腐蚀氧化层; ②利用 SiO_2 做掩模, 在 25% 的 TMAH 溶液中对硅片进行腐蚀, 腐蚀温度 85°C , 当腐蚀区域剩余的硅片厚度达到检测模态支撑梁的设计厚度时停止腐蚀, 腐蚀深度 $180\mu\text{m}$, 检测模态支撑梁的厚度为 $120\mu\text{m}$, 利用 BOE 缓冲液去除所有 SiO_2 ; ③利用铬-金掩模在 HF 溶液中对 Pyrex 玻璃进行腐蚀, 腐蚀深度为平板电容的极板间隙 $15\mu\text{m}$; ④在 Pyrex 玻璃上蒸镀一层铝薄膜, 铝膜厚度 $1\mu\text{m}$, 然后进行光刻, 腐蚀出铝电极; ⑤硅片和 Pyrex 玻璃片对准键合; ⑥在键合好的硅片上表面光刻, 然后进行深反应离子刻蚀, 释放结构, 刻蚀的深度为硅片厚度 $300\mu\text{m}$, 驱动模态支撑梁宽度为 $120\mu\text{m}$, 检测模态支撑梁宽度为 $300\mu\text{m}$, 刻蚀的特征尺寸为 $30\mu\text{m}$.

制作的微陀螺芯片如图 5(a) 所示, 芯片旁边的刻度尺每格 1mm , 芯片的尺寸约为 $12\text{mm} \times 10\text{mm}$. 该微陀螺采用金属管壳封装, 管壳内充 N_2 , 气压为一个大气压, 金属管壳的压封采用电阻焊的方式. 封装后的微陀螺如图 5(b) 所示, 封装后其外形尺寸为 $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 12\text{mm}$.

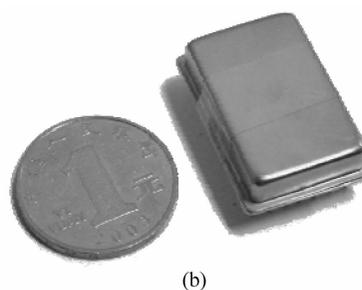
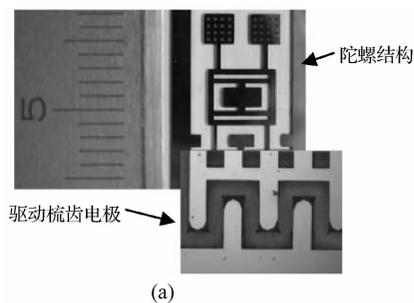


图 5 微陀螺样片
Fig.5 Fabricated gyroscope

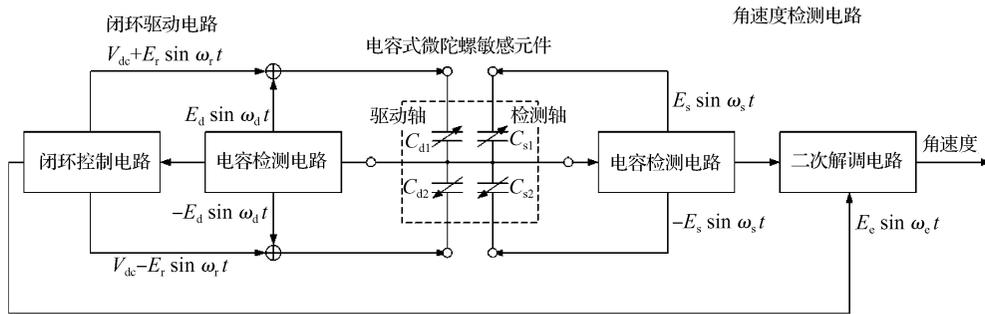


图 6 微陀螺测控电路的结构框图
Fig.6 Block diagram of the readout circuit of the gyroscope

4 测控电路

该微陀螺的电路等效模型为两对差分电容，它们的公共极板连接在一起。研制的测控电路结构框图如图 6 所示，其中 C_{d1} 和 C_{d2} 为驱动轴差分电容， C_{s1} 和 C_{s2} 为检测轴差分电容。该电路主要包括闭环驱动电路和角速度检测电路两部分。闭环驱动电路激励驱动质量块在驱动轴方向做恒幅反向振动，角速度检测电路则测量检测质量块的振动，并从中解调出输入角速度。该测控电路采用两路不同频率的正弦波 ($E_d \sin \omega_d t$ 和 $E_s \sin \omega_s t$) 分别对驱动轴差分电容和检测轴差分电容进行调制，从频谱上将驱动电压信号、驱动质量块振动信号和检测质量块振动信号区分开来。为了减小高次谐波和交叉耦合的影响，选取驱动轴调制载波频率为 230kHz，检测轴调制载波频率为 170kHz。图中 V_{dc} 为驱动电压直流偏置， $E_d \sin \omega_d t$ 为交流驱动电压， $E_c \sin \omega_c t$ 为测量得到的驱动轴振动信号。

研制的微陀螺测控电路实物如图 7 所示，主要采用分立元器件设计，为了减小体积，采用了 3 层 PCB 板叠加结构，电源电压为 $\pm 12V$ 。

5 微陀螺性能测试

首先对微陀螺的模态频率和品质因子进行测试。测试仪器为 NF 频率响应分析仪 FRA5087，测试方法是利用正弦电压产生静电力，分别激励驱动质量块和检测质

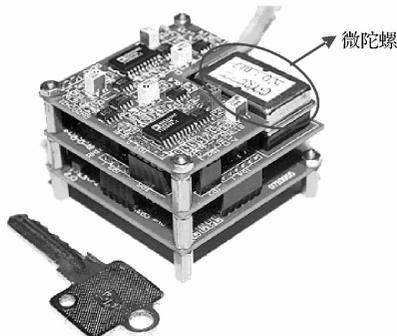
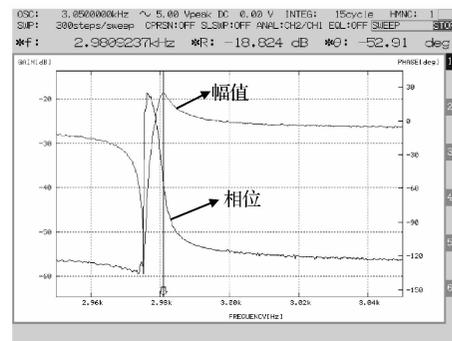


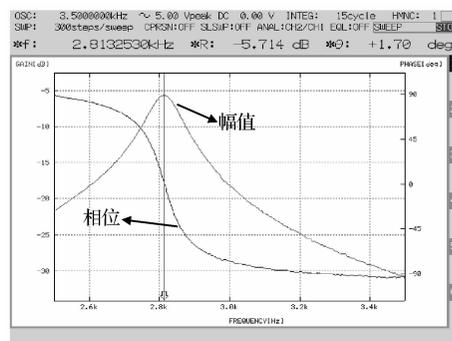
图 7 微陀螺测控电路实物图
Fig.7 Read-out circuit photo of the gyroscope

量块振动，通过测量差分电容得到质量块的振动，经过扫频就可以测量得到微陀螺驱动结构和检测结构的频率响应曲线。测试结果如图 8 所示，图中上面为相频曲线，下面为幅频曲线。测试结果表明，微陀螺的驱动模态频率为 2.981kHz，品质因子为 800，检测模态频率为 2.813kHz，品质因子为 34。驱动模态的阻尼为滑膜阻尼，检测模态的阻尼为压膜阻尼，因此驱动模态的品质因子要远远高于检测模态，这与测试结果完全符合，模态频率没有达到匹配的原因是制造误差导致的结构尺寸偏差。

这种微陀螺的驱动和检测模态均由相对独立的两个振子组成，制造误差会导致两个振子的谐振频率不



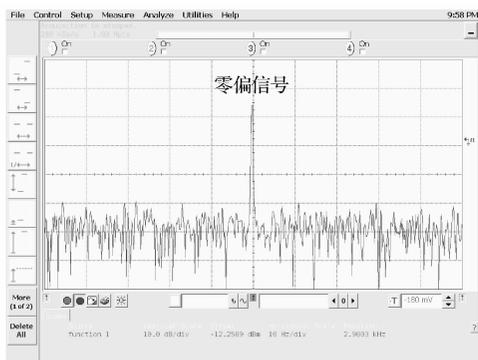
(a)



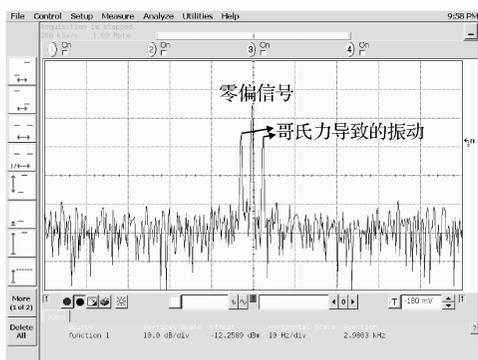
(b)

图 8 微陀螺驱动结构和检测结构的频率响应曲线 (a) 驱动轴频率响应；(b) 检测轴频率响应

Fig.8 Drive and sense mode characteristics of this gyroscope (a) Drive mode frequency response; (b) Sense mode frequency response



(a)



(b)

图 9 检测轴输出信号的频谱分析 (a) 没有输入角速度; (b) 有输入角速度

Fig.9 Frequency spectrum of the sense mode oscillation (a) Without angular rate input; (b) With an angular rate input

同.文中设计的微陀螺特征尺寸较大,支撑梁的特征尺寸大于 $100\mu\text{m}$,质量块的尺寸为 $2.4\text{mm}\times 2.4\text{mm}$,现有微机械加工工艺的绝对精度达到 μm 量级,因此该微陀螺制造的相对精度较高,两个振子谐振频率的偏差很小,充 N_2 封装时,器件的品质因子不高,从频率响应曲线上很难分辨出两个振子谐振频率的差别,图 8 驱动模态和检测模态的频率响应曲线中分别只有一个谐振点证明了这一点.真空封装后,微陀螺的品质因子将显著增大,两个振子谐振频率之间的偏差会导致它们的振动幅值有显著差别.传统石英微陀螺采用的是激光校准的方法,通过调整质量块的质量使两个振子的谐振频率一致.本文介绍的微陀螺既可以采用激光校准的方法,也可以采用静电力调频的方法,对每个振子的谐振频率进行调整,使它们达到一致.

该微陀螺是利用哥氏效应测量输入角速度,因此,对其检测质量块的振动信号进行分析,观察其中是否有哥氏力导致的振动信号,是验证该微陀螺是否具备测量角速度能力的主要途径.利用 Agilent 示波器 DSO8104A 测量得到检测差分电容输出信号的频谱如图 9(a)所示,其中只有一根谱线,它的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 3Hz ,幅值为 $120^\circ/\text{s}$ 的正弦输入角速度时,检测差分电容输出信号的频谱如图 9(b)所示,可以看到,在零偏信号的两侧出现了两根谱线,这两根谱线就是由哥氏力导致的检测

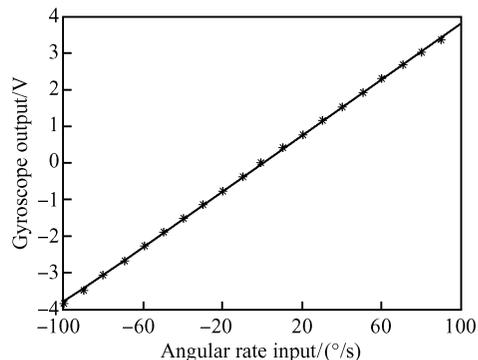


图 10 微陀螺对不同输入角速度的输出曲线

Fig.10 Angular rate input versus voltage output plot obtained from the fabricated gyroscope

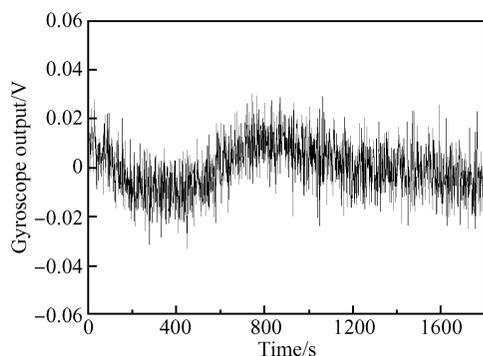


图 11 0.5h 内微陀螺的零偏

Fig.11 Random variation of the output bias of the gyroscope for zero-rate input measured for a period of 0.5h

质量块振动信号,由此可见,该微陀螺已经具备了测量角速度的能力.

在 920E-450 转台上对微陀螺进行测试,输入角速度的范围为 $-100^\circ\sim 100^\circ/\text{s}$,间隔 $10^\circ/\text{s}$ 测量一个点.测量得到不同输入角速度对应的微陀螺输出电压如图 10 所示,结果表明该陀螺的刻度因子为 $38\text{mV}/(^\circ/\text{s})$,线性度优于 0.8% .

在输入角速度为零的情况下,利用 Agilent 数字多用表 34401A 记录 0.5h 之内微陀螺的输出电压曲线,如图 11 所示.测量结果表明,0.5h 之内微陀螺的零偏稳定性为 $0.28^\circ/\text{s}$.

上述测试结果表明,这种微陀螺已经初步达到低端领域应用要求,其测量灵敏度和线性度比较理想,但零偏稳定性较差.主要原因是大气压封装下,微陀螺的品质因子太低,导致振动幅值很小.真空封装后微陀螺的品质因子将有大幅提高,输出噪声和零偏稳定性也将会有显著改善.

6 结论

提出了一种具有隔振框架的解耦硅微陀螺,其驱动模态和检测模态不仅有各自独立的支撑结构,还有各自独立的惯性质量块,其中的隔振框架能够防止驱动模态的振动传递到检测质量块上,减小了模态之间的交叉耦

合. 对研制样片测试的结果表明, 这种器件设计是正确的, 工艺流程是可行的, 而且这种微陀螺具备较高的测量灵敏度, 具有实用化研究的价值.

参考文献

- [1] Weinberg M, Kourepenis A. Error sources in in-plane silicon tuning-fork MEMS gyroscopes. *J Microelectromech Syst*, 2006, 15(3):479
- [2] Kalso E, Szeri A, Pisano A. Cross-coupling errors of micromachined gyroscopes. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, 13(2):323
- [3] Acar C, Shkel A. Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement. *J Micromech Microeng*, 2005, 15:1092
- [4] Alper S E, Akin T. A single-crystal silicon symmetrical and decoupled MEMS gyroscope on an insulating substrate. *J Microelectromech Syst*, 2005, 14(4):707
- [5] Alper S, Azgin K, Akin T. High-performance SOI-MEMS gyroscope with decoupled oscillation modes. 19th IEEE International Conference on MEMS, Istanbul, 2006:70
- [6] Mochida Y, Tamura M, Ohwada K. A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for the drive and detection modes. 12th IEEE International Conference on MEMS, Florida, 1999:618
- [7] Geiger W, Butt W, GaiSer A. Decoupled microgyros and the design principle DAVED. 14th IEEE International Conference on MEMS, Interlaken, 2001:170
- [8] Qiu Anping, Su Yan, Shi Qin. Vacuum packaged micromachined gyroscope. 1st IEEE NEMS, Zhuhai, 2006:407
- [9] Liu Zonglin, Li Shengyi, Wu Xuezhong. A decoupled microgyroscope with electrostatic force feedback. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(2):401 (in Chinese) [刘宗林, 李圣怡, 吴学忠. 解耦型静电电力闭环微陀螺. 传感技术学报, 2005, 18(2):401]
- [10] Wang Yuanshan, Wang Shourong, Xu Yishen. Research on decoupled micromachined gyroscope. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(4):56 (in Chinese) [王元山, 王寿荣, 许宜申. 一种解耦的微机械陀螺研究. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4):56]
- [11] Duan Fei, Jiao Jiwei, Wang Yucai, et al. A novel micromachined x -axis tuning fork gyroscope based on "8-beams/proofmass" structure. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(10):1630 (in Chinese) [段飞, 焦继伟, 王育才, 等. 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. 半导体学报, 2007, 28(10):1630]
- [12] Chen Yong, Jiao Jiwei, Wang Huiquan, et al. Design and noise analysis of a micromachined gyroscope working at atmospheric pressure. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(1):149 (in Chinese) [陈永, 焦继伟, 王惠泉, 等. 大气下工作的微机械陀螺的设计及其噪声特性. 半导体学报, 2005, 26(1):149]
- [13] Madni A M, Costlow L E, Knowles S J. Common design techniques for BEI gyrochip quartz rate sensors for both automotive and aerospace/defense markets. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(5):569

A Decoupled Silicon Micromachined Gyroscope with Vibration Isolation Frame*

Xiao Dingbang^{1,†}, Wu Xuezhong¹, Li Weidong², Dong Peitao¹, Hou Zhanqiang¹, and Li Shengyi¹

(1 *Microsystem Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(2 *No. 24 Research Institute, CETC, Chongqing 400021, China*)

Abstract: A decoupled silicon micromachined gyroscope with vibration isolation frame is introduced. This structure employs independent suspension beams and inertial masses for the drive and sense modes. The drive and sense structures are separated by the vibration isolation frame, so the cross-coupling between the modes is reduced. The gyroscope is fabricated on the n-type $\langle 100 \rangle$ wafer using TMAH wet-etching and DRIE, and its read-out circuit is designed. Test results show that the frequencies of the drive and sense modes are 2.981 and 2.813 kHz, and the quality factors of the drive and sense modes are 800 and 34. The scale factor is measured as $38 \text{ mV}/(^{\circ}/\text{s})$ with a nonlinearity of 0.8%. The short-term bias stability of this gyroscope in half an hour is $0.28^{\circ}/\text{s}$.

Key words: silicon micromachined gyroscope; decoupled structure; vibration isolation frame

PACC: 0630G; 0731C **EEACC:** 7230; 8340

Article ID: 0253-4177(2008)12-2427-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50375154) and the NUDT Innovation Project

† Corresponding author. Email: dingbangxiao@yahoo.com.cn

Received 10 April 2008, revised manuscript received 29 August 2008