

文章编号 1004-924X(2011)09-2123-08

解耦 z 轴微机械陀螺的研制

周浩^{1,2*}, 苏伟¹, 刘显学¹, 唐海林¹

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院 北京研究生部, 北京 100088)

摘要:提出了一种检测模式解耦的 z 轴微机械陀螺,其检测模式被约束为 1 自由度振动,可抑制驱动模式的影响,降低不期望的检测模式偏置,并使用双质量结构在降低模式耦合的同时获得了较好的模式频率匹配。为满足驱动和检测模式自由度约束要求,使用了 U 形支撑梁。采用反应离子深刻蚀工艺制作了高深宽比结构层,获得了较大的验证质量,抑制了器件的机械热噪声,提高了陀螺分辨率。加工的陀螺面积为 $2\ 100\ \mu\text{m} \times 2\ 100\ \mu\text{m}$,厚度为 $60\ \mu\text{m}$ 。采用真空封装,获得了较高的机械品质因子。测试结果表明,驱动和检测模式的品质因子分别为 2 000 和 1 800,机械热噪声为 $3.76(^{\circ})/\text{h} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}}$ 。在 $\pm 200 (^{\circ})/\text{s}$ 的量程内,刻度因子为 $21\ \text{mV}/(^{\circ}) \cdot \text{s}^{-1}$,非线性度为 1.426 %FS,1 h 内测得零偏稳定性为 $0.0579(^{\circ})/\text{s}$ 。

关键词:微机械陀螺;机械解耦;反应离子深刻蚀

中图分类号:TP212.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.2123

Development of decoupled z -axis micromachined gyroscope

ZHOU Hao^{1,2*}, SU Wei¹, LIU Xian-xue¹, TANG Hai-lin¹

(1. *Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*
2. *Department of Graduate Student, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chinamems@163.com*

Abstract: A decoupled-sense-mode z -axis micromachined gyroscope is presented. The sense mode is restricted to be only one degree of freedom for vibration, which restrains the effect from the drive mode and reduces the undesired sense mode bias. Using double masses allows both matched natural frequencies and decoupled modes. A U-shaped beam is utilized for meeting the requirements on the degrees-of-freedom of the drive and sense modes. In order to create a high-aspect ratio structure, a Deep Reactive Ion Etching (DRIE) process is used to achieve a larger proof mass, reduce the thermomechanical noise floor and provide high sensitivity. The area of the fabricated gyroscope is $2\ 100\ \mu\text{m} \times 2\ 100\ \mu\text{m}$, with a thickness of $60\ \mu\text{m}$. The gyroscope is vacuum-packaged for a high mechanical quality factor. Measured results show that the drive and sense mode quality factors are 2 000 and 1 800, respectively, and the thermomechanical noise floor is $3.76 (^{\circ})/\text{h} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}}$. The scale factor is $21\ \text{mV}/(^{\circ}) \cdot \text{s}^{-1}$ in a range of $\pm 200 (^{\circ})/\text{s}$, with a full-scale nonlinearity of 1.426 %FS. The bias drift is

0.057 9 (°)/s over a 1 h measurement period.

Key words: micromachined gyroscope; mechanical decoupling; deep reactive ion etching

1 引言

微机械陀螺是一类重要的微机电 (MEMS) 器件, 是利用科里奥利效应 (Coriolis effect) 检测角速度的传感器, 因其在尺寸、质量、成本以及动力学性能等方面的优势而具有较广的军事和商业用途^[1]。在微机械陀螺设计中, 为了提高器件性能 (如机械灵敏度、分辨率等), 通常需要使陀螺的驱动模态和检测模态的谐振频率匹配^[2]。早期的研究多采用单个验证质量块结构和二维弹簧做支撑, 这种非解耦结构陀螺通常会严重产生严重的模态耦合问题。尽管通过改进支撑梁结构设计 (如采用对称分布弹簧^[3]) 等措施可以提高器件性能, 但是随着模态频率匹配的提高, 模态间的机械耦合也随之增强。采用解耦结构的微机械陀螺可以抑制模态间的耦合, 已报道的解耦微机械陀螺通常采用驱动模态解耦^[4-8], 这虽然降低了驱动模态非线性, 但是没有消除检测模态的零输入输出 (zero-input output)。

本文提出一种检测模态解耦的 z 轴微机械陀螺, 采用 U 形梁支撑, 不仅满足了解耦模态的自由度约束要求, 还降低了驱动模态对检测模态的影响。加工采用反应离子深刻蚀 (DRIE), 获得了较大的深宽比结构, 并在抑制机械热噪声的同时获得了大的检测电容。

2 解耦结构原理

2.1 z 轴微机械陀螺原理

图 1 是典型的 z 轴微机械陀螺的简化模型。系统主要由验证质量和支撑梁弹簧构成。在外部驱动力 $f_0 \sin(\omega_d t)$ 作用下, 验证质量沿 x 方向 (驱动模态) 振动。当 z 轴方向有角速度 Ω_z 输入时, 在 y 方向 (检测模态) 将感应出科里奥利力。在科氏力作用下, 结构会在 y 方向振动。可以采用质量-弹簧-阻尼系统描述陀螺运动, 如式 (1):

$$\begin{cases} m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = f_0 \sin(\omega_d t) \\ m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = 2m_x \Omega_z \dot{x} \end{cases} \quad (1)$$

这里 $m_{x,y}$, $c_{x,y}$, $k_{x,y}$ 分别是 x, y 方向的质量,

阻尼和刚度。求解式 (1) 可得科氏力作用下检测模态的振幅:

$$y_m = \frac{2m\Omega_z x_m \omega_x}{k_y \sqrt{1 - (\omega_x/\omega_y)^2 + (\omega_x/(Q_y \omega_y))^2}}, \quad (2)$$

式中 $x_m = f_0 Q_x/k_x$ 是驱动模态振幅; $\omega_{x,y}$, $Q_{x,y}$ 分别是 x, y 方向的谐振频率和品质因子。

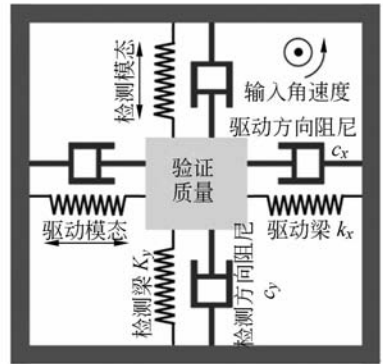


图 1 z 轴微机械陀螺模型

Fig. 1 Conceptual model of z -axis micromachined gyroscope

因为检测模态振幅 y_m 与输入角速度 Ω_z 为线性关系, 因此通过测量 y_m 可以间接获得输入角速率。由式 (2) 可知, 在驱动振幅和输入角速率为常数的情况下, 最终的检测振幅取决于驱动模态谐振频率和两模态频率匹配程度 (ω_x/ω_y): 在驱动频率一定的情况下, 驱动和检测模态的频率差越小, 检测振幅越大。

微机械陀螺机械灵敏度可以定义为^[9-10]:

$$S_m = |y_m/\Omega_z| = \left| \frac{2m x_m \omega_x}{k_y \sqrt{1 - (\omega_x/\omega_y)^2 + (\omega_x/(Q_y \omega_y))^2}} \right|. \quad (3)$$

根据式 (3) 可知, 频率失配越小, 陀螺的灵敏度越大。

因此在微机械陀螺设计中, 为了提高检测信号的幅值和陀螺机械灵敏度, 在驱动模态谐振频率一定情况下, 通常需要减小谐振频率差, 即使驱动和检测的谐振频率匹配。

2.2 解耦原理分析

如前所述, 早期的研究采用 1 个验证质量同时采用二维弹簧做支撑 (图 2(a)), 因为驱动和检测模态共用一个验证质量块, 同时二维弹簧在驱

动和检测两个方向上同时振动,因此两个模态之间存在严重的耦合。机械耦合将导致较高的零输入偏置,即使没有角速度输入信号,也会产生输出信号。同时驱动模态的线性度也被干扰(当有输入角速率时,检测模态在科里奥利力作用下开始振动,这会干扰驱动模态的线性度)^[2]。此外,由于只使用 1 个验证质量,在采用电容检测时也会产生同频干扰,影响器件精度^[11]。

图 2(b)是驱动模态解耦原理示意图。因为使用了两个质量块和 1 维驱动梁,所以驱动模态的振动被限制为 1 自由度运动(仅在驱动方向振

动),因此,驱动模态不受检测模态振动影响,非线性度被抑制,降低了正交误差。但由于检测模态具有 2 自由度,即同时在检测方向和驱动方向上运动,检测模态的偏置漂移仍然存在。

为了抑制零输入偏置,可以采用检测模态解耦结构(图 2(c))。由于检测模态只能在检测方向振动(1 自由度),因此不会受驱动机构影响,从而抑制了检测模态偏置,即检测模态被解耦。虽然驱动模态会受到检测模态反馈的影响而出现非线性行为,但是可以通过闭环恒幅驱动来降低或消除这种非线性。

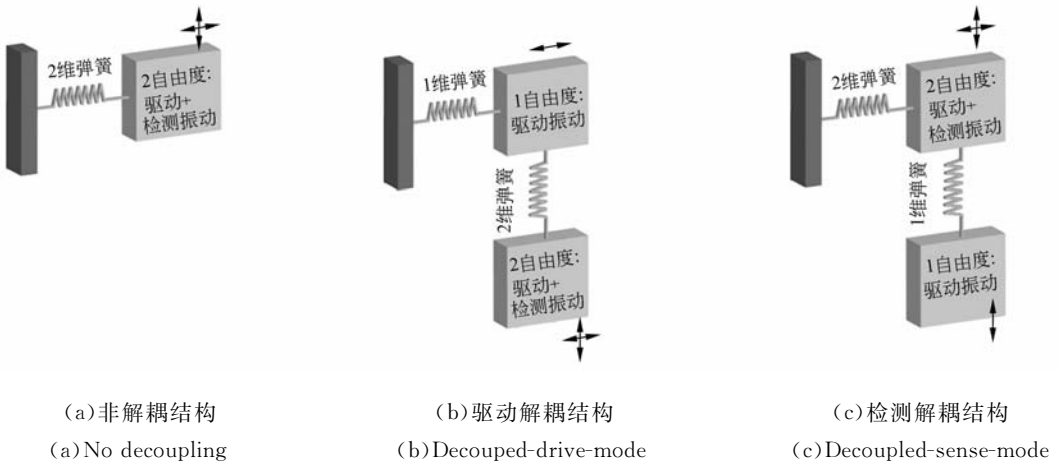


图 2 不同微陀螺结构原理图
Fig. 2 Principle schematics of different structures

3 解耦 \approx 轴微陀螺结构与仿真

图 3 所示是本文提出的解耦 \approx 轴微机械陀螺结构。结构包括 3 个主要部件:驱动和检测质量块(内、外框架),U 形支撑梁,平衡叉指梳齿(用于驱动内框架)和差分叉指梳齿(用于检测外框架的位移)。在静电驱动力作用下,驱动梳齿和内框架在驱动方向谐振,当 \approx 轴有角速率输入时,内框架上感应出沿检测方向的科里奥利力,通过梁 x 的作用,内外框架沿 y 轴振动,从而引起外框架上检测梳齿电容变化。通过检测该电容变化量可以获得输入角速率值。

根据陀螺的工作原理,支撑梁的设计应当满足在所需振动模态方向刚度尽可能小,而在其他模态保持较大的刚度。对于 \approx 轴陀螺而言,支撑梁应当在 \approx 轴旋转方向具有很大的刚度,这是因

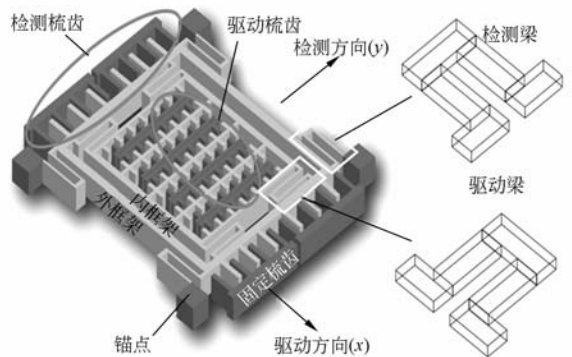


图 3 微机械陀螺结构示意图
Fig. 3 Schematic illustration of designed micromachined gyroscope structure

为结构在 \approx 轴方向即使产生一个很小的扭转,也将会导致陀螺性能的下降。本文采用 U 形弹簧作为驱动梁和检测梁,可满足自由度约束和刚度要求,还能抑制加工产生的残余应力^[12]。

检测梁在 x 方向的刚度很大,因此可以确保检测模态被解耦,即为 1 自由度振动,仅在 y 轴方向振动。驱动模态除了驱动方向上有谐振,还会在科里奥利力作用下沿检测方向振动,因此驱动模态可能具有非线性行为。但是,通常检测模态的振动幅值很小(约几十纳米),远小于驱动梳齿间隙(通常为 $2\sim 3\ \mu\text{m}$),因此由梳齿间隙确定的静电驱动力受其影响很小,此外在电路设计中采用恒幅驱动也能进一步抑制驱动的非线性行为。

z 轴陀螺的支撑梁弹性系数和质量都正比于结构层厚度,所以谐振频率独立于结构厚度,因此 z 轴陀螺具有较大的厚度误差容差^[13]。利用这一特点,采用后面讨论的反应离子深刻蚀,可以获得较厚的结构,从而提高内外框架的质量,抑制器件的机械热噪声,提高陀螺分辨率^[14]。利用作者前期有关微陀螺结构稳健设计的研究结果^[15],得到了表 1 所示设计参数。需要注意的是,在微陀螺结构参数中,U 形梁的宽度是关键设计参数,对模态谐振频率的影响较大,从而影响驱动和检测模态的频率匹配。根据式(2)、(3)可知,这种影响引起的两模态频率失配会导致输出幅值降低,最终导致结构机械灵敏度的下降。

表 1 z 轴微机械陀螺结构尺寸

Tab. 1 Design parameters of z -axis micromachined gyroscope

设计参数	长/ μm	宽/ μm	交叠长度/ μm	间隙/ μm
驱动梁	400	16	—	—
检测梁	460	20.5	—	—
驱动梳齿	50	7	35	2.5
检测梳齿	320	7	300	2.5
结构厚度	60			
结构尺寸	$2\ 105\ \mu\text{m}\times 2\ 100\ \mu\text{m}$			

根据上述设计参数,在 CoventorWareTM 中进行了直流工作点分析和交流小信号分析。图 4 显示了在不同直流电压下,陀螺结构的静态位移。可以看出,结构的静平衡位置基本不受影响。根据交流小信号仿真结果(图 5),可知驱动模态谐振频率和检测模态谐振频率分别为 12.449, 12.473 kHz,模态频率差为 24 Hz。

本文也对比了驱动解耦和检测解耦 2 种结构的耦合情况。对于驱动解耦结构(图 6(a)),检测

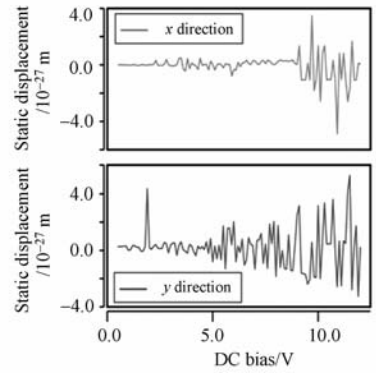
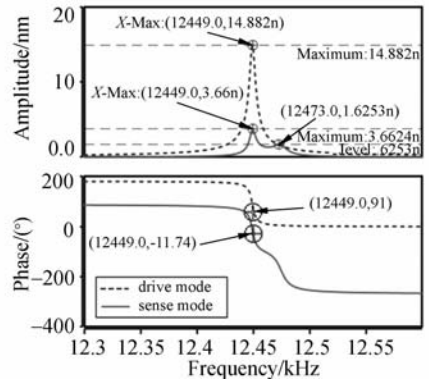
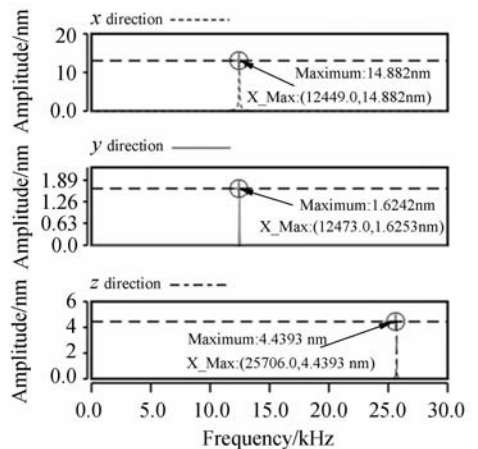


图 4 直流工作点分析

Fig. 4 Results of DC operating point analysis



(a) 12.3~12.6 kHz



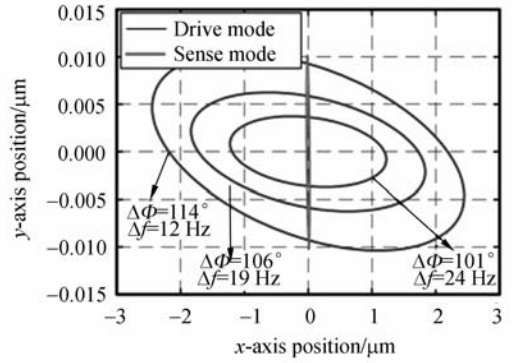
(b) 0~30 kHz

图 5 交流小信号仿真

Fig. 5 Small signal AC analysis

模态非解耦,因此驱动方向的振动会在检测方向泄露,这就导致了两模态间存在机械耦合。这种

耦合依赖于驱动振动的振幅和速度,因此,驱动和检测的频率失配会导致两者相位差不为 0° 或 180° ,检测质量的运动轨迹是椭圆形状。同时随着频率失配的增大,相位差向 90° 靠近,椭圆轨迹振动将影响相位相关的检测^[12]。本文提出的检测模式解耦结构,由于检测方向自由度的约束,检测质量振动轨迹近似为直线(图6(b))。



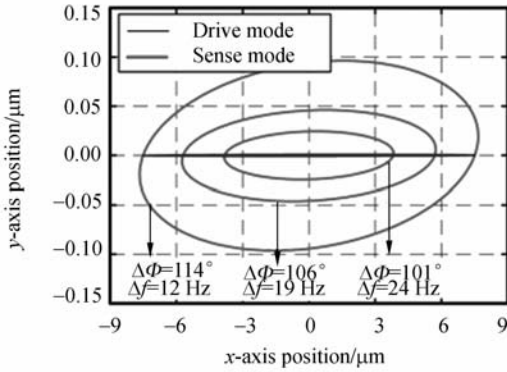
(b)检测模式解耦

(b)Decoupled-sense-mode

图6 解耦结构振动模式

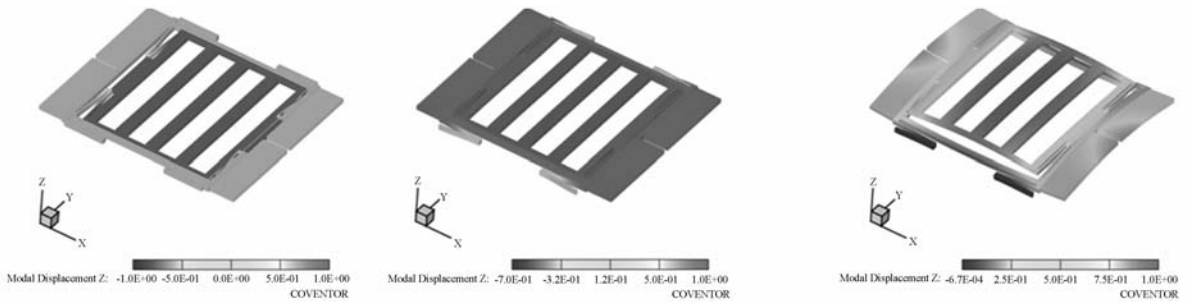
Fig. 6 Oscillation patterns of decoupled structures

图7为微机械陀螺结构有限元分析前3阶模式的振形,其中1阶模式为驱动模式,当驱动模式谐振时,检测模式由于自由度的约束保持静止,因此驱动振动对检测模式的影响被抑制。第3阶模式为 \approx 轴方向振动,其谐振频率远离驱动频率。



(a)驱动模式解耦

(a)Decoupled-drive-mode



(a)1阶模式

(a)First-order mode

(b)2阶模式

(b)Second-order mode

(c)3阶模式

(c)Third-order mode

图7 微陀螺前3阶模式振形

Fig. 7 The first three order modes of designed gyroscope

4 加工工艺

采用反应离子深刻蚀(DRIE)可以获得设计所需的高深宽比结构,同时采用键合工艺制作玻璃衬底,可以显著降低寄生电容,提高器件信噪比。图8是键合-反应离子深刻蚀工艺。首先使

用湿法刻蚀和淀积工艺,在玻璃上溅射Cr/Pt/Au,生成电极和互连;下一步在 $350\ \mu\text{m}$ 厚的单晶硅晶圆(100)晶向上通过浅槽刻蚀和扩散制作欧姆接触;然后将单晶硅与玻璃键合;之后采用湿法腐蚀将硅片减薄至 $60\ \mu\text{m}$ (器件结构厚度);最后,采用反应离子深刻蚀制作结构层并去除光刻胶。

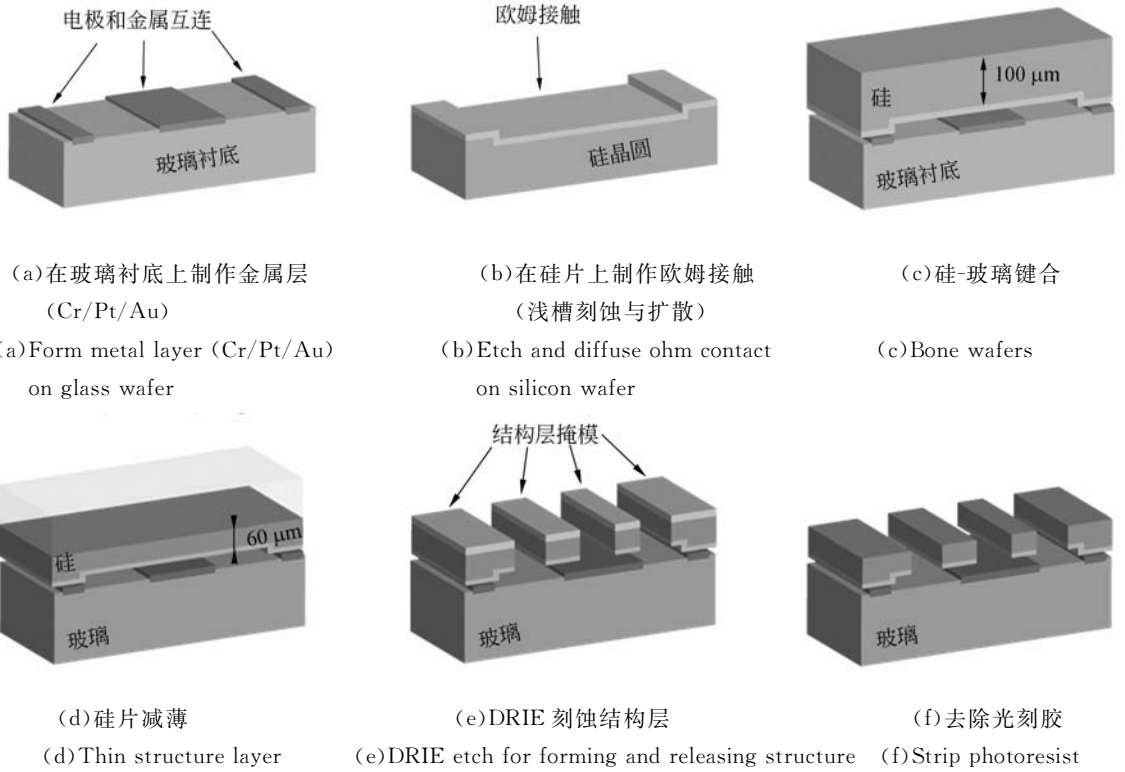


图 8 键合-反应离子深刻蚀 (DRIE) 工艺流程

Fig. 8 Bonding-deep Reactive Ion Etching (DRIE) process

5 性能测试

图 9 是加工的微机械陀螺结构扫描电镜图。为了获得较高的机械品质因子,采用真空封装(10 Pa)。使用动态信号分析仪测得驱动谐振频率为 12.560 kHz,品质因子为 2 000。利用振动台测得检测模态谐振频率为 12.605 kHz,品质因子为 1 500。计算得到机械热噪声等效输入角速率为 $3.76 (^{\circ})/h \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}$ 。

利用转台对陀螺进行性能测试,试验装置如图 10 所示。图 11 描述了陀螺角速率输入与检测电压输出关系。在 $\pm 200 (^{\circ})/s$, 刻度因子为 $21 mV/(^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 。计算陀螺实测值与拟合直线的最大偏差,可得其线性度为 1.426 %FS。

图 12 显示了 1 h 内观察到的陀螺零位漂移,计算零位的标准差,可得零偏稳定性为 $0.0579 (^{\circ})/s$ 。表 2 列出了微机械陀螺的性能测试指标和技术参数。

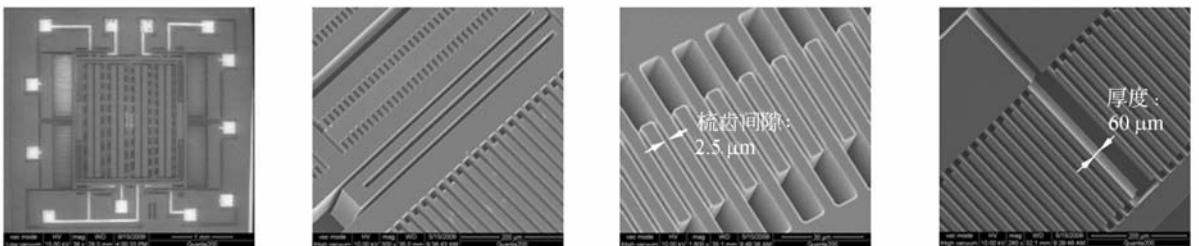


图 9 微机械陀螺结构电子扫描显微镜照片

Fig. 9 SEM pictures of fabricated gyroscope

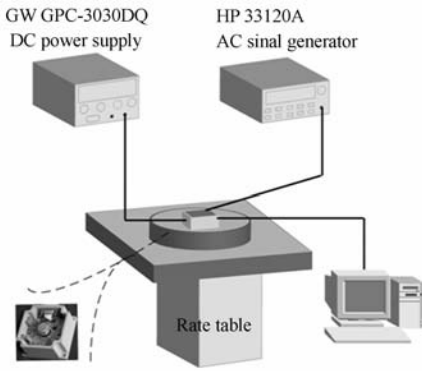


图 10 测试装置

Fig. 10 Experimental setup

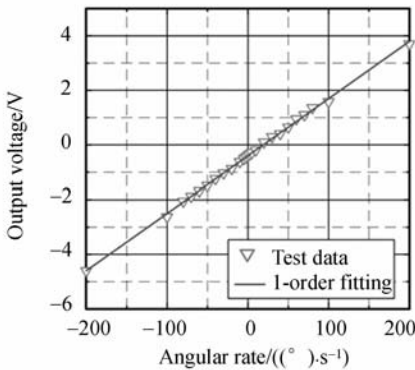


图 11 传感器输入输出关系

Fig. 11 Sensor output vs. rate input

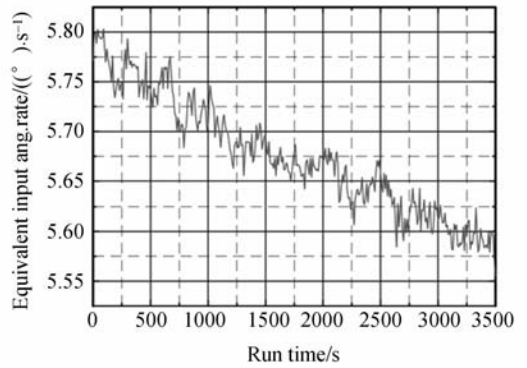


图 12 微机械陀螺零位漂移

Fig. 12 Bias drift of micromachined gyroscope

表 2 加工的微机械陀螺性能参数

Tab. 2 Technical data of fabricated microgyroscope

性能	值
工作电压	12 V
驱动模态品质因子	2 000
检测模态品质因子	1 800
机械热噪声	$3.76 (^\circ)/h \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$
刻度因子	$21 \text{ mV}/(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$
量程	$\pm 200 (^\circ)/\text{s}$
线性度	1.426%FS
零偏稳定性	$0.0579 (^\circ)/\text{s}$

6 结 论

本文设计了检测模态解耦 \approx 轴微机械陀螺,用于抑制驱动模态的影响。结构采用 U 形弹簧和双质量块,能在降低模态耦合的同时获得较好的模态频率匹配。采用反应离子深刻蚀工艺加工出具有高深宽比的结构层,可获得较大的验证质量。为提高机械品质因子,采用真空封装。最后,通过实验测得了该微机械陀螺的性能参数。

3):336-350.

参考文献:

[1] 刘危,解旭辉,李圣怡.微机械惯性传感器的技术现状及展望[J].光学精密工程,2003,11(5):425-431.
LIU W, XIE X H, LI S Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 425-431. (in Chinese)

[2] ALPER S E, AKIN T. Symmetrical and decoupled nickel microgyroscope on insulating substrate [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 115(2-

[3] HONG Y S, LEE J H, KIM S H. A laterally driven symmetric micro-resonator for gyroscopic applications [J]. *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, 2000, 10(3):452-458.

[4] KRANZ M. *Design, simulation, and implementation of two novel micromechanical vibratory-rate gyroscopes* [D]. Pennsylvania: Carnegie Mellon University, 1998.

[5] 李锦明. 电容式微机械陀螺仪设计 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
LI J M. *Design of Capacitive Micromechanical*

- Gyroscope [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2006. (in Chinese)
- [6] GEIGER W, BUTT W U, GAIBER A, *et al.*. Decoupled microgyros and the design principle DAVED [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 95(2-3): 239-249.
- [7] XIE H, FEDDER G K. Fabrication, characterization, and analysis of a DRIE CMOS-MEMS gyroscope [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(5): 622-631.
- [8] 蒋明, 杨福俊, 董萼良, 等. 基于高速摄像的双线性振动陀螺力学特性分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 121-126.
- JIANG M, YANG F J, DONG E L, *et al.*. Analysis of mechanical characteristics in the double linear vibratory gyroscope using high speed photography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 121-126. (in Chinese)
- [9] HAN J S, KWAK B M. Robust optimal design of a vibratory microgyroscope considering fabrication errors [J]. *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, 2001, 11(6): 662-671.
- [10] MOCHIDA Y, TAMURA M, OHWADA K. A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beam for the drive and detection mode [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 80(2): 170-178.
- [11] 凌林本, 李滋刚, 周百令, 等. 硅微机械陀螺传感器信号的检测方法[J]. *中国惯性技术学报*, 1999, 7(4): 61-64.
- LING L B, LI Z G, ZHOU B L, *et al.*. The methods used to detect the sensor signal of the silicon micro-mechanical gyro [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1999, 7(4): 61-64. (in Chinese)
- [12] ACAR C. *Robust micromachined vibratory gyroscopes* [D]. Irvine University of California, 2004.
- [13] LI Z, YANG Z, XIAO Z, *et al.*. A bulk micromachined vibratory lateral gyroscope fabricated with wafer bonding and deep trench etching [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 83(1-3): 24-29.
- [14] 刘梅, 周百令. 硅微陀螺机械热噪声研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(S2): 1163-1164.
- LIU M, ZHOU B L. Research on mechanical-thermal noise in micromachined gyroscopes [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(S2): 1163-1164. (in Chinese)
- [15] ZHOU H, TANG H L, SU W, *et al.*. Robust design of a MEMS gyroscope considering the worst-case tolerance [C]. *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xiamen, P. R. China; IEEE NEMS*, 2010: 1012-1016.

作者简介:



周浩(1976—),男,四川射洪人,博士研究生,2000年于天津大学获得学士学位,2007年于西南科技大学获得硕士学位,主要从事MEMS器件设计和结构优化的研究。E-mail: chinamems@163.com



苏伟(1964—),男,四川射洪人,研究员,博士生导师,1986年于国防科技大学获得学士学位,1989年于电子科技大学获得硕士学位,2001年于北京理工大学获得博士学位,现为中国工程物理研究院电子工程研究所副所长,主要研究方向为微电子机械系统,太赫兹技术以及惯导技术。E-mail: weisu@cap.ac.cn



刘显学(1980—),男,广西柳州人,硕士,工程师,2003年于天津大学获得学士学位,2006年于中国工程物理研究院获得硕士学位,主要从事惯性测量与MEMS技术的研究。E-mail: liuxx1999@163.com



唐海林(1979—),男,广西桂林人,硕士,2001年于四川大学获得学士学位,2004年在中国工程物理研究院获得硕士学位,主要从事惯性传感器与MEMS技术以及工艺研究。E-mail: hailinxue@yahoo.com.cn