

大气下工作的微机械陀螺的设计及其噪声特性^{*}

陈 永¹ 焦继伟¹ 王惠泉² 金仲和² 张 颖¹ 熊 斌¹ 李昕欣¹ 王跃林¹

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

(2 浙江大学信电系, 杭州 310027)

摘要: 设计了一种基于体微机械加工技术的新型音叉式微机械陀螺. 该陀螺在驱动模态和检测模态的空气阻尼均为滑膜阻尼, 有效提高了微机械陀螺的 Q 值和灵敏度, 同时降低了陀螺的热机械噪声. 对陀螺噪声特性进行的分析表明, 该陀螺具有相对很低的热噪声. 制作了陀螺芯片, 并测试了其机械性能和噪声特性. 结果表明, 该陀螺的噪声谱密度不超过 $60\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 灵敏度为 $10\text{mV}/(^{\circ}\text{s}^{-1})$. 该微机械陀螺有望实现较高的角速度分辨率.

关键词: 陀螺; 微机械加工; 噪声; 滑膜阻尼

PACC: 0630G; 0710C; 4350

中图分类号: TP212. 12

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)01-0148-05

1 前言

微机械陀螺由于具有体积小、成本低等特点, 日益引起人们的关注. 目前研究的微机械陀螺大部分为振动式微机械陀螺, 其中的空气阻尼和噪声问题对陀螺器件的性能具有重要影响. 空气阻尼越大, 系统的 Q 值越低, 器件灵敏度也就越低. 为了提高陀螺的灵敏度, 人们采用真空封装的方法来减小空气阻尼^[1], 这种方法增加了陀螺封装的成本, 不利于产业化. 陀螺中的热噪声决定了陀螺可能达到的最小分辨率, 这方面的研究也已有相关报道^[2].

本文在已有工作的基础上^[3]设计了一种新型的微机械陀螺并对其噪声特性进行了研究. 该陀螺采用电磁驱动, 电容检测的方式, 驱动和检测模态的阻尼都是滑膜阻尼, 陀螺结构采用低阻抗单晶硅片, 利用玻璃键合工艺及体微机械加工技术制作, 可实现较高的 Q 值和较低的热噪声.

2 工作原理

如图 1 所示, 该陀螺由对称的两部分构成, 每一

部分包含一个驱动质量块和一个检测质量块, 检测质量块位于驱动质量块的中间, 通过弹性梁和驱动质量块连接, 两个驱动质量块中间由弹性梁连接起来构成音叉式结构. 检测质量块上制作的栅型可动电极与玻璃衬底上叉指形的检测固定电极构成了差分检测电容 C_1 和 C_2 , 如图 1(b) 所示. 为了实现电磁力驱动, 在 z 方向还施加有匀强磁场 B .

陀螺工作时, 两驱动质量块沿 x 方向反相振动, 当沿 z 方向有角速度 Ω 时, 检测质量块在 Coriolis 力的作用下沿 y 方向振动. 此时差分检测电容 C_1 和 C_2 由于极板交叠面积发生变化而改变 (图 1(b)). 通过检测差分电容的变化量, 可以得到系统的角速度.

陀螺在工作时驱动质量块和检测质量块均沿平行于衬底的方向运动, 其中空气阻尼均主要为滑膜阻尼^[3,4], 因而可以获得很高的 Q 值和灵敏度.

3 噪声分析

微机械陀螺的噪声主要是热噪声, 包括热机械噪声和引线电阻的 Johnson 噪声. 热机械噪声是由于传感器中的弹性梁等机械部件内部分子热运动引起

^{*} 国家重点基础研究发展规划资助项目 (批准号: G1999033101)

陈 永 男, 1973 年出生, 博士研究生, 主要从事 MEMS 惯性传感器研究.

焦继伟 男, 1968 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事 MEMS 和 NEMS 的研究. Email: jiaojw@mail.sim.ac.cn

王惠泉 男, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事 NEMS 方面的研究.

2003-12-16 收到, 2004-07-03 定稿

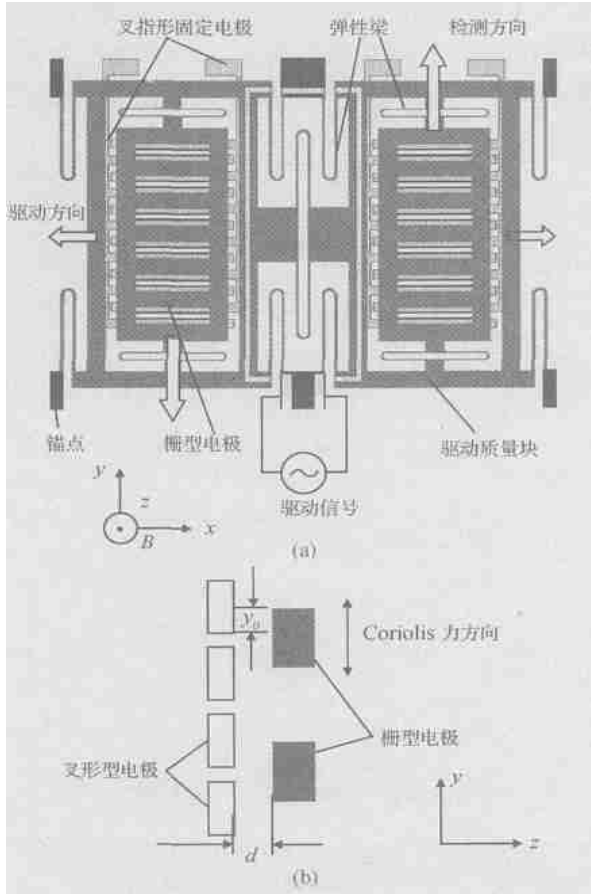


图 1 音叉式微机械陀螺示意图 (a) 俯视图; (b) 检测电容结构剖面图

Fig. 1 Schematic of the tuning fork type micromachined gyroscope (a) Top view; (b) Sectional view of the detection capacitors

的随机波动. 热机械噪声引起的波动力可以用下式表示^[4]:

$$F_n = \sqrt{4 k_B T m \omega_0 \zeta \Delta f} \quad (1)$$

式中 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度; m 为质量块的质量; ω_0 为系统固有频率; ζ 为阻尼比; Δf 为工作带宽. 将热机械噪声等效为角速度信号, 可以得到:

$$\Omega_n = \frac{\sqrt{k_B T \omega_0 \Delta f}}{\sqrt{m_s \omega_d^2 A_d^2 \Omega_s}} \quad (2)$$

式中 Ω_n 称为噪声等效角速度; m_s 为检测质量块的质量; ω_d 和 ω_s 分别为驱动和检测模式固有频率; A_d 为驱动振幅; Q_s 为检测模式的 Q 值.

由(2)式可以看出, 热机械噪声与陀螺的 ω_d , ω_s , m_s , Δf , A_d 和 Q_s 等参数有关. 令: $m_s = 4.4 \times 10^{-6} \text{ kg}$, $\omega_d = 2800 \times 2\pi \text{ rad/s}$, $\omega_s = 3000 \times 2\pi \text{ rad/s}$, A_d

$= 10 \mu\text{m}$, $\Delta f = 100 \text{ Hz}$, $Q_s = 890$, 则室温下 ($T = 300 \text{ K}$) 热机械噪声等效角速度信号为

$$\Omega_n = 8.02 \times 10^{-6} \text{ rad/s} \approx 1.79 \text{ h}$$

Johnson 噪声主要是由于信号输出线内部分子热运动引起的电压的随机波动. 微机械陀螺输出端等效电路如图 2 所示. 图中, C_1 和 C_2 为检测电容, C_d 为分布电容, R 为信号输出线的引线电阻, 指从检测电容到输出端金属焊盘之间的硅结构电阻, V_m 为陀螺接口电路施加在检测电容上的电压. 电阻 R 的 Johnson 噪声的等效电压可以表示为:

$$V_R = \sqrt{4 k_B T R \Delta f} \quad (3)$$

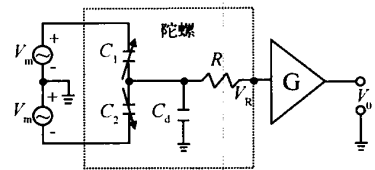


图 2 微机械陀螺检测端等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of detection part of the gyroscope

根据图 2 所示等效电路模型, 可以将电压 V_R 等效为检测电容的变化 ΔC_R .

$$\Delta C_R = \frac{V_R}{2 V_m} (C_1 + C_2 + C_d) \quad (4)$$

单位角速度引起的陀螺检测电容的变化为

$$\Delta C = 2 C_0 \frac{A_s}{y_0 \Omega} = \frac{4 C_0 A_d \omega_d}{y_0 \omega_s^2 \sqrt{(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_s^2})^2 + \frac{1}{Q_s^2} \times \frac{\omega_d^2}{\omega_s^2}}} \quad (5)$$

式中 C_0 为检测电容 C_1 和 C_2 的静态值; A_s 为检测振动的振幅; y_0 为检测电容极板交叠宽度. 可以得到引线电阻噪声等效角速度为

$$\Omega_R = \frac{y_0 \omega_s^2 \sqrt{4 k_B T R \Delta f}}{8 V_m C_0 A_d \omega_d} \times (C_1 + C_2 + C_d) \times \sqrt{1 - (\frac{\omega_d}{\omega_s})^2 + \frac{1}{Q_s^2} \times (\frac{\omega_d}{\omega_s})^2} \quad (6)$$

由(6)式可以看出, Johnson 噪声与引线电阻 R 成正比. 令 $y_0 = 8 \times 10^{-6} \text{ m}$, $C_0 = 2.3 \times 10^{-12} \text{ F}$, $C_1 + C_2 = 2 C_0 = 4.6 \times 10^{-12} \text{ F}$, $R = 14 \Omega$, $V_m = 5 \text{ V}$, 则:

$$\Omega_R = 1.09 \times 10^5 \times (2 C_0 + C_d) \text{ rad/s}$$

分布电容主要由硅结构与周围导体构成的电容组成, 随着硅片厚度的增大和电阻率的减小而增大,

另外当环境湿度增大时分布电容增大,但受环境温度影响较小.在本陀螺设计中,分布电容一般为 pF 数量级,如果令 $C_p = C_0$,则有:

$$\Omega_p = 7.521 \times 10^{-7} \text{ rad/s} = 0.155 \text{ } ^\circ/\text{h}$$

陀螺器件总的热噪声为

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_n + \Omega_p = 1.855 \text{ } ^\circ/\text{h}$$

由以上分析可以看出,由于陀螺的 Q 值和工作频率较高,质量块的质量较大,同时检测端引线电阻很小,因而该陀螺具有很小的热噪声.

4 结构制作

微机械陀螺采用低阻(100)双抛硅片与玻璃键合,并使用深反应离子刻蚀技术刻蚀体硅形成器件结构.

主要工艺步骤如下:(1)在硅片上热氧化形成氧化层做掩膜,用 KOH 溶液腐蚀硅片形成键合区域图形.腐蚀深度就是可动检测质量块与固定电极的间隙 d_0 ;(2)在玻璃片上淀积金属 Al 薄膜,并光刻形成检测固定电极;(3)用阳极键合技术将有结构图形的硅片与具有电极的玻璃片进行键合;(4)在硅片上淀积金属铝薄膜,光刻形成驱动导线和反馈导线;(5)光刻陀螺结构图形;(6)用深反应离子刻蚀技术刻蚀硅,释放陀螺结构;(7)划片,封装器件.器件制作的主要工艺流程如图 3 所示.

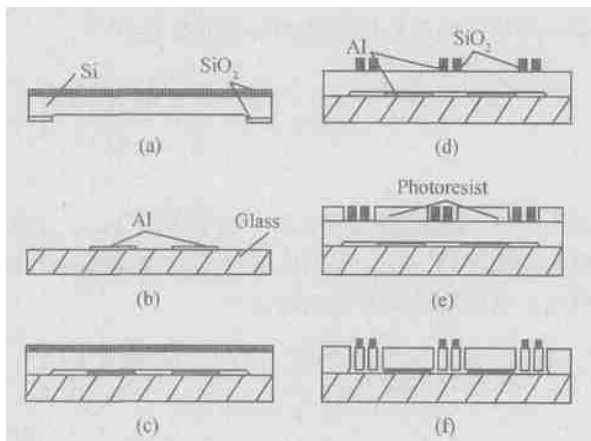


图 3 微机械陀螺工艺流程图

Fig. 3 Sketch showing the fabrication of the gyroscope

5 结果与讨论

我们在大气压下对陀螺的机械性能进行了测

试.陀螺驱动模态的谐振频率和 Q 值为 2852Hz 和 1005,检测模态的谐振频率和 Q 值分别为 2757Hz 和 365.该陀螺在大气压下工作的灵敏度约为 $10\text{mV}/(^{\circ}/\text{s})$,测量范围为 $\pm 180 \text{ } ^\circ/\text{s}$.微机械陀螺的频率特性和角速度响应特性分别如图 4 和图 5 所示.

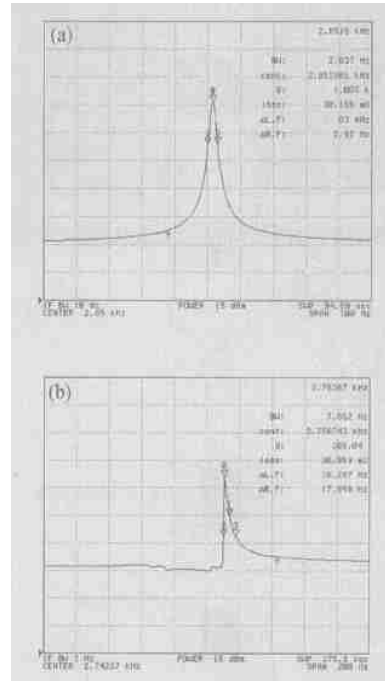


图 4 微机械陀螺的频率响应特性 (a) 驱动模态 ($f_0 = 2852\text{Hz}$, $Q = 1005$); (b) 检测模态 ($f_0 = 2757\text{Hz}$, $Q = 365$)

Fig. 4 Frequency response of the gyroscope (a) Driving mode; (b) Sensing mode

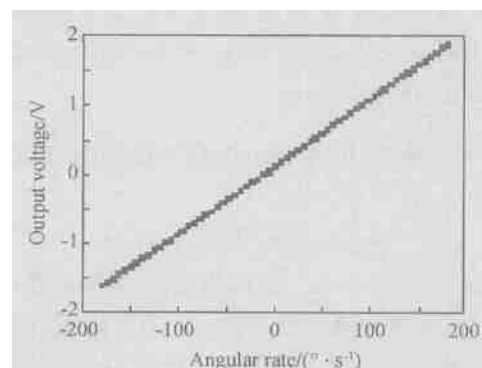


图 5 微机械陀螺的输出特性

Fig. 5 Gyroscope response to angular rate

实验中我们还对微机械陀螺输出信号的噪声频谱进行了分析,结果如图 6 所示.陀螺输出端噪声可分为以下几个部分:(1)白噪声,主要是由于器件内部分子热运动引起,在各个频率处有相同的谱密度,表现为一条与 x 轴平行的直线;(2) $1/f$ 噪声,在

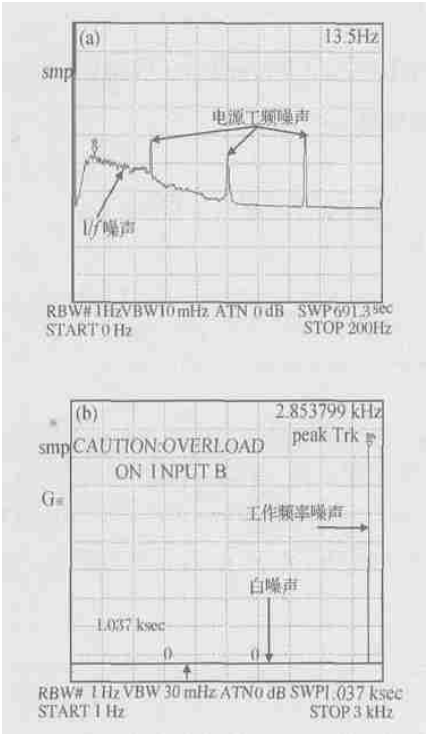


图 6 微机械陀螺的噪声频谱 (a) 0 ~ 200Hz; (b) 0 ~ 3kHz

Fig. 6 Noise spectrum of the gyroscope (a) 0 ~ 200Hz; (b) 0 ~ 3kHz

较低频率处有较高的谱密度,随着频率的增高而减小;(3)电源工频噪声,主要是由于采用直流稳压电源供电引起,特点是在 50Hz 及其整数倍频率的地方具有谱峰;(4)工作频率噪声,主要是由于陀螺接口电路中驱动信号耦合到检测信号中引起,特点是在工作频率(2852Hz)处有一很高的谱峰.电源工频噪声和工作频率噪声都是由陀螺接口电路引入的噪声,因此可以通过改接接口电路的设计来降低其影响.白噪声和 $1/f$ 噪声都是陀螺本身固有的噪声.对

于本文设计的微机械陀螺,白噪声和 $1/f$ 噪声的强度都不超过 $60\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$,对于较小的工作带宽($< 100\text{Hz}$),该噪声对陀螺性能影响很小,因此该微机械陀螺有望实现较高的分辨率.

6 结论

本文设计并制作了一种新型结构的微机械陀螺,该陀螺在大气压下工作具有较高的驱动模态和检测模态的品质因子.对陀螺的噪声特性进行了分析,结果表明该陀螺具有较小的热噪声.在大气压下对陀螺的机械性能和噪声特性进行了测试,陀螺在驱动模态和检测模态的谐振频率和 Q 值分别为 2852Hz 和 1005, 2757Hz 和 365,灵敏度为 $10\text{mV}/(^{\circ}\cdot\text{s}^{-1})$,白噪声和 $1/f$ 噪声均小于 $60\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$.该陀螺是一种有望提供较高角速度分辨率的微机械陀螺.

参考文献

[1] Bernstein J ,Cho S ,King A ,et al. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope. Proc IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '93) ,1993 :134

[2] Annovazzi-Lodi V ,Merlo S. Mechanical-thermal noise in micromachined gyros. Microelectron J ,1999 ,30 :1227

[3] Chen Y ,Jiao J W ,Xiong B ,et al. A novel micromachined gyroscope based on slide-film damping effects. China Mechanical Engineering , 2004 ,15 (2) :103 (in Chinese) [陈永 ,焦继伟 ,熊斌 ,等.一种基于滑膜阻尼效应的新型微机械陀螺.中国机械工程 ,2004 ,15 (2) :103]

[4] Bao M H. Micro mechanical transducers pressure sensors ,accelerometers and gyroscopes. ELSEVIER ,2000

Design and Noise Analysis of A Micromachined Gyroscope Working at Atmospheric Pressure^{*}

Chen Yǒng¹, Jiao Jiwei¹, Wang Huiquan², Jin Zhonghe², Zhang Yǐng¹,
Xiong Bin¹, Li Xinxin¹, 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 Department of Information and Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel tuning fork micromachined gyroscope, based on bulk micromachining technology, is presented. Slidefilm damping plays an important role in this sensor, which enables it to achieve high Q -values and sensitivity and low thermal noise. The analysis shows that this sensor has lower thermal noise. The performance of the sensor is tested. The sensitivity is $10\text{mV}/(^{\circ}\text{s}^{-1})$, and the white noise and $1/f$ noise are less than $60\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$. The sensor has shown its potential to achieve high performance.

Key words: gyroscope; silicon micromachining; noise; slide-film damping

PACC: 0630G; 0710C; 4350

Article ID: 0253-4177(2005)01-0148-05

^{*} Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G1999033101)

Chen Yǒng male, was born in 1973, PhD candidate. He is engaged in the research on MEMS inertial sensors.

Jiao Jiwei male, was born in 1968, professor, adviser of PhD candidate. He is engaged in the research on MEMS and NEMS. Email: jiaojw@mail.sim.ac.cn

Wang Huiquan male, was born in 1980, PhD candidate. He is engaged in the research on NEMS.

Received 16 December 2003, revised manuscript received 3 July 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics