

文章编号: 1672-2892(2010)06-0716-04

双框架解耦微陀螺原理样机研制

唐海林, 刘显学, 周浩, 郑英彬, 张茜梅, 施志贵, 吴嘉丽

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了把驱动工作模态和检测工作模态有效隔离, 以减小模态间的互相干扰, 设计了一种双框架解耦微机械陀螺。通过采用可工程化的鲁棒优化结构设计和工艺补偿的制造工艺, 实现了工艺误差范围内的稳健设计。这种内外框架结构的微陀螺设计, 包括自激闭环驱动电路和开环检测电路, 对微陀螺进行测试, 得到微陀螺驱动模态品质因素 $>2\ 000$, 检测模态品质因素 >800 , 量程为 $2\ 400^\circ/\text{s}$, 线性度 $<0.3\%$, 灵敏度为 $1^\circ/\text{s}$ 。

关键词: 微惯性测量组合; 微陀螺; 鲁棒优化设计; 键合—深刻蚀释放体硅工艺; 驱动电路; 检测电路

中图分类号: TN403; V241.5

文献标识码: A

Study on the prototype of dual frames decoupled micromechanical gyroscope

TANG Hai-lin, LIU Xian-xue, ZHOU Hao, ZHENG Ying-bin, ZHANG Qian-mei, SHI Zhi-gui, WU Jia-li
(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: This paper presents a decoupled micromechanical gyroscope with dual frames. The robust structure considering fabrication errors is obtained by the use of optimal robustness of design and process compensation. Experimental results show that the quality factor of driving mode is more than 2 000, while the quality factor of sensing mode is more than 800; and the range is $2\ 400^\circ/\text{s}$, the sensitivity and linearity of the fabricated gyroscope are $1^\circ/\text{s}$ and less than 0.3% respectively.

Key words: Micro Inertial Measurement Unit; micromechanical gyroscope; optimal robustness of design; bonding and deep RIE release process; drive circuit; sense circuit

微陀螺是微惯性测量组合(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU)中的核心组件之一, 利用它来感测物体的旋转, 从而达到控制物体姿态的目的。微陀螺具有微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)器件所特有的优点, 但是技术难度相当大, 其原理决定了至少需要两自由度以上的工作模态, 且需要匹配两工作模态的固有频率, 导致结构复杂, 相互之间会产生干扰, 因此对结构设计以及加工工艺提出了非常高的要求^[1-2]。同时微陀螺能正常工作的前提是必须保证结构在1个自由度方向上恒幅振动, 由于“哥氏效应”引起的陀螺输出信号也极其微弱且混杂各种噪声, 这使微陀螺电路设计面临相当大的困难和挑战^[3]。针对上述问题, 本文设计了一种双框架解耦微机械陀螺, 通过采用可工程化的鲁棒优化设计方法和在工艺加工中进行工艺补偿设计, 解决了微结构两工作模态间的相互影响问题, 实现了加工过程中误差范围内的稳健设计。在驱动电路设计中采用双回路控制方法实现了闭环自激驱动和恒幅控制, 检测电路中通过施加载波调制, 再经过多次解调, 滤波后还原出被测信号, 实现了极其微弱“哥氏力”信号检测。

1 工作原理和结构设计

双框架解耦微陀螺结构示意图如图1, 其中内框架是微陀螺的驱动部分, 外框架是微陀螺的检测部分, 内框架由驱动梁、驱动梳齿、振动检测梳齿和内框条组成, 外框架由检测梁、检测梳齿和外框条组成, 整个活动结构由4个固定锚点通过阳极键合固定在玻璃基座上。玻璃基地上有金属引线, 可以把微陀螺输入输出信号与外部封装管壳连接导通。

微陀螺工作时在内框架驱动梳齿上施加激励电压,驱动内框架沿 x 轴向振动,当激励电压频率与内框架驱动梁固有频率一致时,微陀螺内框架将会发生谐振。通过振动检测梳齿可以把内框架振动情况检测出来,利用这一检测信号再闭环反馈到施加的激励信号,可以完成微陀螺的闭环自激驱动,达到恒幅稳定谐振状态,这也是微陀螺正常工作的必要条件。当结构绕 z 轴转动时,由于“哥氏效应”,谐振的内框架将会在 y 轴方向产生“哥氏”加速度,引起外框架在 y 轴方向上发生位移,位移变化可以通过检测梳齿电容的变化而得到,从而检测出旋转角速度 Ω_z 。

由图 1 可以看出,由于内框架只需要在驱动轴向 x 轴产生振动,而不希望在其他的自由度上进行工作,因此连接内框架的驱动梁就可以设计成只在 x 轴向上刚度较小,而其他方向上刚度都非常大;同理外框架可以设计成只在 y 轴向上刚度较小,其他方向上都很大。这样就有效地把微陀螺的 2 个工作模式分开,大大减小了由于驱动不完全对称造成的正交误差,达到解耦作用。微陀螺 2 个工作模式的结构分析分别见图 2 和图 3。

在微陀螺结构设计中,采用了可工程化的鲁棒优化设计方法,在充分掌握加工误差的基础上通过考虑最坏情况容差和灵敏度分析进行结构优化^[4-5],实现了微陀螺结构参数的稳健设计,大大提高了微陀螺工艺可制造性。

2 工艺制造及误差补偿

针对微陀螺需要高驱动、检测能力和有限面积内尽量大质量的要求,通过工艺研究,开发了“键合—深刻蚀释放体硅”工艺,这种工艺方法可以制造得到高深宽比微结构,深宽比达到 20 以上,结构层厚度达到 $60\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$,工艺流程见图 4^[4]。

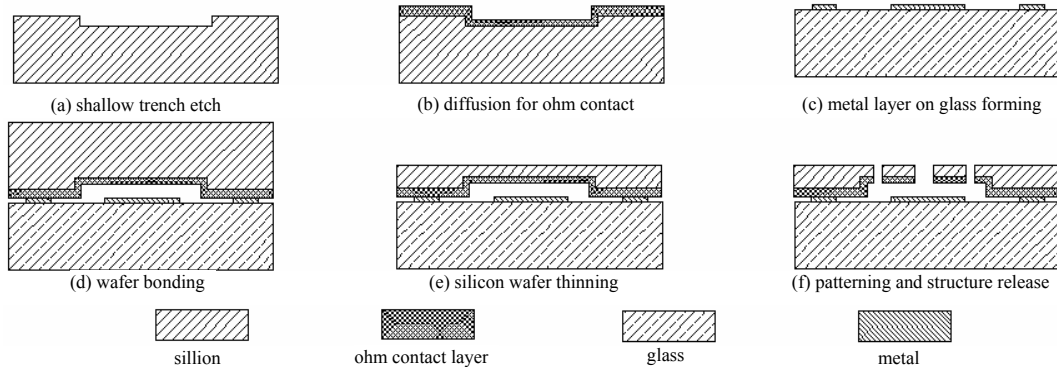


Fig.4 Flows of bonding and deep RIE release process
图 4 键合—深刻蚀释放体硅工艺流程图

在工艺制造中,充分考虑到工艺过程中带来的尺寸误差,因此采用了误差补偿工艺设计,对微陀螺关键结构都相应进行了尺寸补偿,补偿大小取决于工艺过程中的尺寸损失,这样可有效减小加工与设计值之间的尺寸误差。加工完成后经过测试,微陀螺结构关键尺寸中驱动梁以及检测梁宽度与设计值之间误差 $< 0.1\%$,比不采取误差补偿设计的减小了 $3/4$,因此固有频率实测值与设计值误差 $< 5\%$,微陀螺驱动和检测梳齿扫描电子显微镜(Scanning

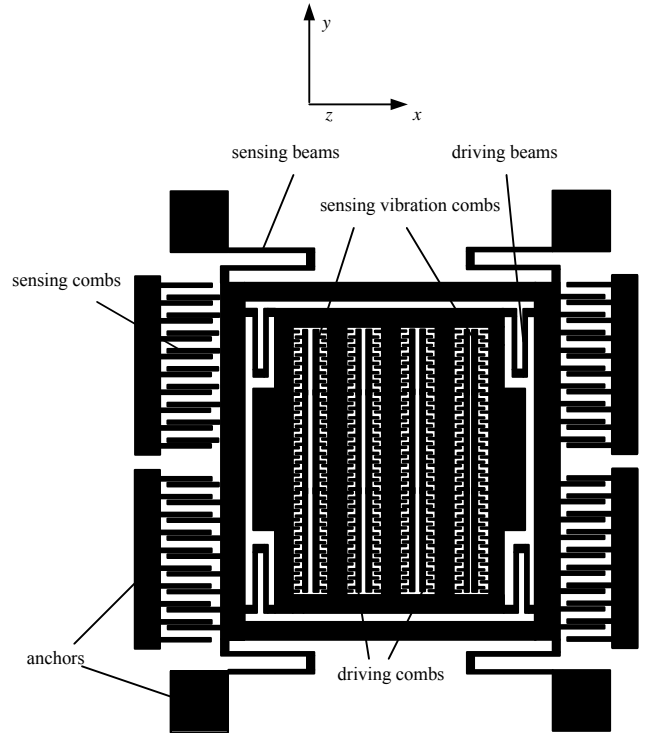


Fig.1 Sketch of dual frames decoupled micromechanical gyroscope
图 1 双框架解耦微陀螺结构示意图

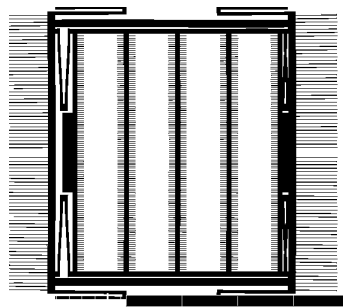


Fig.2 Drive mode of gyroscope
图 2 微陀螺驱动模式

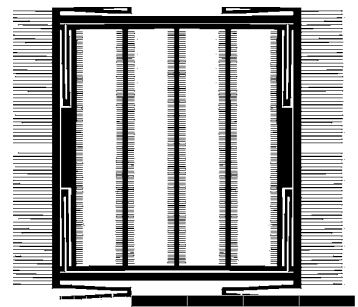


Fig.3 Sensing mode of gyroscope
图 3 微陀螺检测模式

Electronic Microscopy, SEM)照片见图 5 和图 6。

3 微陀螺电路设计及测试

微陀螺电路包括驱动电路和检测电路设计,驱动电路设计需要保证微陀螺在高品质因素真空封装环境中保持自激、恒幅振动,检测电路需要去除各种噪声影响,提取出极其微弱的“哥氏力”角速度信号,从而反映出输入旋转角速度^[6],微陀螺电路原理框图见图 7。

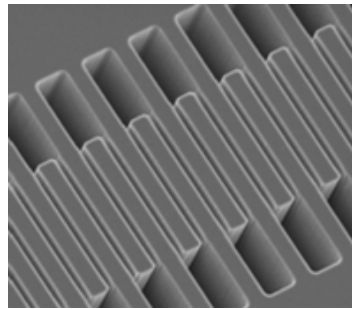


Fig.5 SEM of drive combs
图 5 微陀螺驱动梳齿

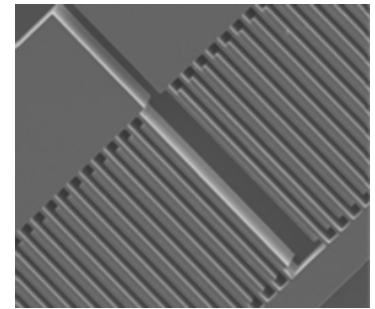


Fig.6 SEM of sensing combs
图 6 微陀螺检测梳齿

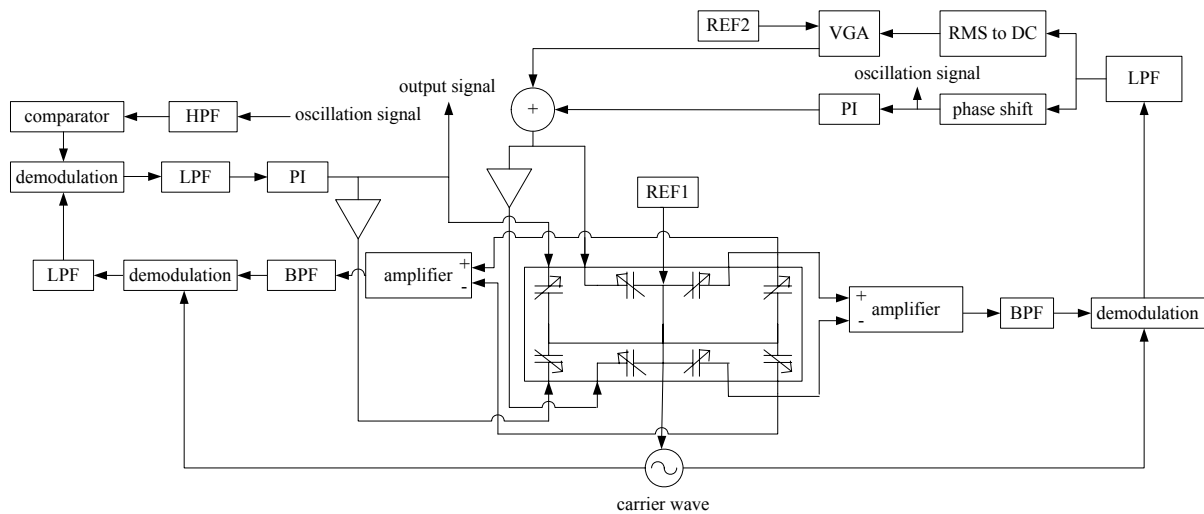


Fig.7 Block diagram of micromechanical gyroscope circuits
图 7 微陀螺电路原理框图

图 7 中分为 2 个回路,其中右边为微陀螺驱动电路,左边为微陀螺检测电路。在驱动电路中,针对微陀螺高品质因素的特点,采用了双闭环自激谐振驱动方式,即一个回路利用微机械表头的选频特性对回路自身特定噪声不断放大,再经过解调,滤波,移相,比例/积分调节等,实现了对微陀螺谐振频率的跟踪;另一回路根据检测谐振器振幅幅值来改变回路增益从而完成自动增益控制,实现维持振幅处于恒定状态,避免冲击震动带来的波动和输出饱和。与外加驱动信号的开环方式相比,自激谐振不需要外加激励源,克服了谐振频率蠕变的影响,与闭环锁相驱动方式相比,自激谐振不依赖鉴相器和压控振荡器的精度,对温漂和时漂有很强的抑制作用,可达到最大的检测分辨率。图 8 和图 9 分别为自激起振瞬间和稳定谐振时的信号截图。

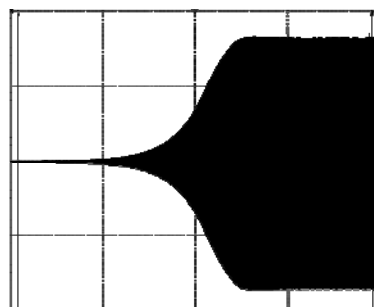


Fig.8 Map of self-excited vibration
图 8 微陀螺起振瞬间截图

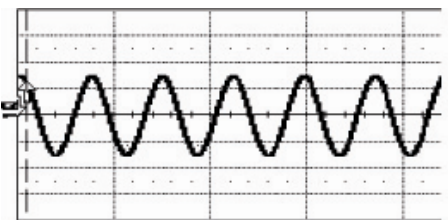


Fig.9 Map of stable vibration
图 9 微陀螺稳定谐振截图

微陀螺产生的“哥氏力”极其微弱,并混杂有各种噪声,检测电路设计中将“哥氏力”引起的电容变化信号由高频载波和驱动振动信号共同调制,利用同频噪声的相位不相关特性,再经过 2 次解调和 3 次滤波大大削减了驱动信号耦合噪声、正交误差噪声、加速度噪声、寄生哥氏力噪声等,实现了强噪声背景下微弱信

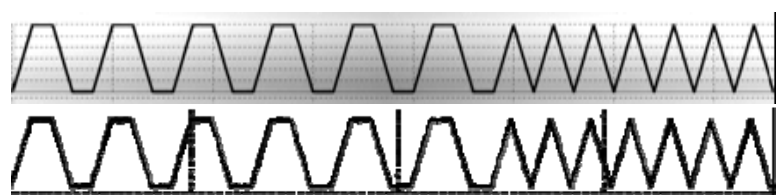


Fig.10 Figures of input from vibrator and output from gyroscope
图 10 转台输入与微陀螺输出曲线

号的提取,最小可检测电容值为 10^{-5} pF。经测试微陀螺驱动模态品质因素 >2000 ,检测模态品质因素 >800 ,量程为 $2400^\circ/\text{s}$,线性度 $<3\%$,灵敏度 $1^\circ/\text{s}$ 。

图10为转台输入与微陀螺输出曲线对比,其中上方为转台转速曲线,下方为微陀螺输出曲线,从图中可见,微陀螺可很好反映出转台转速增加,减小动态变化。图11为微陀螺线性度测试结果。

4 结论

设计研制了一种双框架解耦微机械陀螺,通过把驱动与检测结构通过内外框架隔离,有效减小了2个工作模态间的相互干扰。在结构设计中,采用了可工程化的鲁棒优化设计方法进行分析,同时在工艺制造中采取补偿设计,实现了在加工过程中误差范围内的稳健设计。微陀螺加工完成后在闭环驱动电路条件下自激恒幅振动,检测电路经过多次解调和滤波后,提取出极其微弱的“哥氏”加速度信号,从而测量出角速度。微陀螺原理样机经过转台测试后,得到了样机的初步指标,在后续的研制中,还需要着重提高微陀螺的分辨能力、重复性、偏置稳定性等指标,使微陀螺研制朝实用化方向发展。

参考文献:

- [1] Geiger W, Butt W U, Frech J, et al. DECOUPLED MICROGYROS AND THE DESIGN PRINCIPLE DAVED[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2002,95(2):239-249.
- [2] 唐海林,程永生,苏伟. 微机械梳状陀螺仪的瞬态分析[J]. 信息与电子工程, 2004,2(2):118-120. (TANG Hai-lin, CHENG Yong-sheng, SU Wei. Transient Analysis of a Micro Gyroscope[J]. Information and Electronic Engineering, 2004,2(2):118-120.)
- [3] 苏岩,周百令,王寿容. 微机械角速度传感器信号分析与处理[J]. 测控技术, 2000,19(6):22-26. (SU Yan, ZHOU Bai-ling, WANG Shou-rong. Signal and Processing of Micro-machined Angular Velocity[J]. Measurement and Control Technology, 2000,19(6):22-26.)
- [4] Zhou Hao, Su Wei, Tang Hai-lin. Optimal and Robust Design of a MEMS Gyroscope Based on Sensitivity Analysis and Worst-case Tolerance[C]// The first Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics, Shanghai, China, 2009:81-84.
- [5] Zhou Hao, Tang Hai-lin, Su Wei, et al. Robust Design of a MEMS gyroscope Considering the Worst-case Tolerance[C]// IEEE-NEMS 2010. Xiamen, China:[s.n.], 2010.
- [6] 刘显学,苏伟. 微机械音叉陀螺外围电路研究及仿真[J]. 信息与电子工程, 2006,4(5):61-64. (LIU Xian-xue, SU Wei. Simulation of Micro-gyroscope Peripheral Circuit[J]. Information and Electronic Engineering, 2006,4(5):61-64.)

作者简介:



唐海林(1979-),男,广西省桂林市人,硕士,副研究员,主要从事惯性传感器与MEMS技术以及工艺研究,email:hailinxue@yahoo.com.cn.

刘显学(1980-),男,广西省柳州市人,硕士,主要从事惯性测量与MEMS技术。

周浩(1976-),男,四川省射洪县人,在读博士研究生,主要从事微机械陀螺的结构稳健优化设计。

张茜梅(1968-),女,四川省安岳县人,本科,主要从事MEMS工艺技术的研发。

郑英彬(1974-),男,河南省南阳市人,硕士,主要从事MEMS的工艺设计研究。

吴嘉丽(1957-),女,安徽省太和县人,高级工程师,主要从事MEMS技术研究。

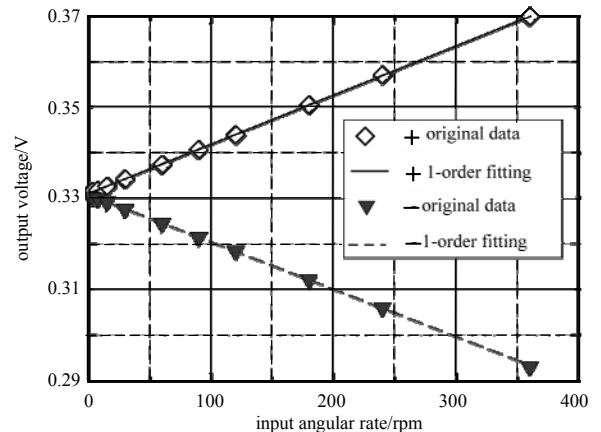


Fig.11 Results of micromechanical gyroscope linearity
图11 微陀螺线性度测试结果