

文章编号 1004-924X(2013)09-2326-07

四模态匹配三轴硅微陀螺仪

夏敦柱*, 孔 伦, 虞 成

(东南大学 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了实现单片集成六自由度微惯性测量单元, 提出了一种改进的由 4 个大质量块和 4 个小质量块组合而成的四方全对称结构的三轴陀螺仪。介绍了该惯性测量元件的结构及工作原理, 根据结构参数计算出了详细的性能指标, 并进行了面内驱动模态和面内外的敏感模态仿真。为提高各敏感模态的机械灵敏度, 提出采用双重静电频率调谐方案, 即先对公共质量块施加调谐电压, 使驱动模态和航向模态的频差最小; 再对小质量块上方的多晶硅电极施加另外的调谐电压, 最终使四模态频率偏差小于 30 Hz, 从而说明该频率调谐方法是有效的。然后, 通过分析热弹性阻尼能量耗散机理, 对驱动及敏感谐振模态的品质因数进行仿真。结果表明: 真空环境不考虑空气阻尼情况下, 两种模态的品质因数分别为 23 816 和 19 507。最后, 基于表面加工和体加工工艺, 设计了高深宽比的加工流程。对该四方对称解耦结构的设计和仿真表明其模态匹配和品质因数性能满足三轴陀螺的设计要求。

关键词: 三轴陀螺; 模态匹配; 正交十字梁; 热弹性阻尼

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2326

Four-mode matching tri-axis silicon microgyroscope

XIA Dun-zhu*, KONG Lun, YU Cheng

(Key Laboratory for Micro-inertial Instrument and Advanced Navigation Technology of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

* Corresponding author, E-mail: xiadz_1999@163.com

Abstract: A tri-axis gyroscope with the improved square symmetrical structure consisting of four large proof-masses and four small proof-masses was proposed to realize a monolithic six Degree of Freedom inertial measurement unit. Firstly, the structure and its working principle of the unit were introduced and the required performance was given by detailed design parameters. Then, the modal analysis for in-plane driving mode and out-plane sensing mode was simulated. To increase the mechanical sensitivity for each sense mode, a dual electro-statically tuning method was adopted. In this method, a tuning voltage was first applied on the proof-mass to make the frequency shift between drive mode and yaw mode as small as possible, and the other tuning voltage was applied on a polysilicon electrode plate over the small proof masses to further make the frequency shift among the four modes to be under 30 Hz. By these, the tuning method was verified to be effective. Furthermore, the quality factors for driving and sensing resonant modes were simulated through analysis of the thermoelastic damping mechanism. The analysis results indicate that the quality factors in driving and sensing modes are 23816 and 19507, respectively. Finally, a process flow for high aspect was designed combining the

收稿日期: 2013-03-22; 修订日期: 2013-04-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61001048); 东南大学微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室基金资助项目 (No. KL201102); 东南大学基本业务费重大引导基金资助项目 (No. 3222002107); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20131295)

surface and bulk micromachining. The design and simulation for this square symmetrical and decoupled structure demonstrate that the mode matching and quality factor can meet the design requirements for the tri-axis gyroscope.

Key words: tri-axis gyroscope; mode matching; crossing tether; thermoelastic damping

1 引言

最近几年研发集成的三轴陀螺仪越来越受到国内外关注。加州大学欧文分校的 Shkel 小组开发了一种金字塔型可折叠的 MEMS 惯性测量单元^[1],它是由三维可折叠的硅上绝缘体 SOI 加工而成的高深宽比传感器。由于环境条件变化所导致的金字塔侧墙间的最大角度错位小于 4 mrad,并且环氧树脂和焊料加固结构间误差角小于 0.2 mrad,谐振测试显示该三维组装结构高达 10 kHz 范围无谐振干扰;环境测试结果亦证明了此加工方法的可行性。但是,这种 4 个惯性测量器件的组合(含两只陀螺和两只加速度计)不能实现 6 自由度的惯性测量单元。Tsai Nan-Chyuan 设计了一种模态解耦的三轴轮式角振动陀螺^[2],驱动电路采用自动增益控制和锁相环模块。通过系统测试,微陀螺的性能分析和评估得到 xyz 三轴正交耦合灵敏度分别降低至 22%,9%和 1.84%。 xyz 三轴信噪比分别达到 59.3,13.8,和 140.1。意大利的意法半导体公司成功开发了一款低功耗三轴数字输出 MEMS 陀螺^[3],它的驱动电路也适合采用自动增益控制和锁相环电路,而且三轴的检测电路采用了时分复用方法,能大大简化模拟前端,实现的结构尺寸仅为 $3.2\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$,采用 $0.13\text{ }\mu\text{m}$ 工艺流的集成电路实际面积仅占 $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 。最终性能显示全温范围标度因数稳定性为 2%,而交叉轴灵敏度低于 $\pm 2\%$ 。TO-KIMEC NC 公司在 2005IEEE Sensors 会议上也介绍了一种 5 自由度的单片集成微惯性测量单元(含 3 轴加速度计和 2 轴陀螺),它的核心部分是基于静电悬浮原理的转速高达 74 000 r/min 旋转的马达^[4]。当绕水平轴出现角速率输入时,静电反馈力矩将抵消进动效应产生的力矩,迫使转子片回到零位。同样,这种静电力反馈原理能实现三维加速度计电容检测,最终的噪声水平分别为 $0.002(^{\circ})/s \cdot \sqrt{\text{Hz}^{-1}}$ 和 $20\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}^{-1}}$ 。尽管整体性能很好,但是其采用的磁悬浮控制回路相当复杂且众多不同电极分布在定子周围造成封装困难。Newcastle University 大学设计出一款谐振

环陀螺,给出了具体结构参数和加工方法,其驱动模态的幅度控制用 DSP 嵌入式系统实现,但检测电路尚在研发中^[5]。

本文提出了一种改进的由 4 个大质量块和 4 个小质量块组成的全对称结构三轴陀螺仪,介绍了它的结构、工作原理和性能指标,并进行了面内驱动模态和面内外的敏感模态仿真。

2 三轴陀螺仪工作原理

图 1 所示是整个三轴陀螺仪的设计原理图。图 1(a)所示该器件主要由 4 个大质量块和 4 个小质量块组成。4 个大质量块绕中心驱动电极四方对称分布,而 4 个小质量块则如图 1(b)所示分别嵌在 4 个大质量块中间方孔中,并且由固定在大质量块上的交叉十字多晶硅梁悬挂支撑。如图 1(c)所示,所有的质量块都是由 4 个拐角处的二维的折叠梁支撑,并在 4 个角落处形成锚点。如图 1(d)所示,该器件共需 5 块掩模板完成,其中 SOI 硅片本身包含了 Handle 层, Buried Oxide 层和器件层。很明显,Handle 层主要作为整个器件的支撑基底, Buried Oxide 层用于区分基底和器件,器件层才是真正的微惯性器件层,而且我们需要通过 Bosch 工艺刻蚀单晶硅形成深槽。淀积氮化硅层隔离结构层和多晶硅电极层。器件上的多晶硅层采用表面工艺实现,主要作为上电极和正交十字弹性梁。

该三轴陀螺的工作原理如下:在驱动模态中,

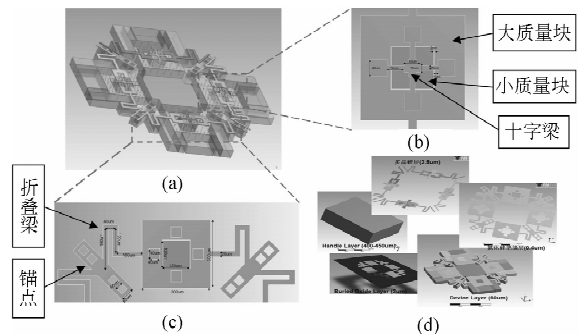


图 1 三轴陀螺仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tri-axis gyroscope

4 个大质量块被中间的驱动电极同步驱动,其中 2 个沿 x 轴驱动,而另外 2 个沿 y 轴驱动,谐振的形状看似同时靠近或远离中间的驱动电极。在敏感到 z 轴方向的角速度时,4 个大质量块在哥氏力作用下做面内同步运动,可以通过电容极板测量其位移变化。同样,在敏感到 x/y 轴方向的角速度时, y/z 轴方向的小质量块在哥氏力作用下做面外差分运动,可以通过其上方的多晶硅电容极板测量其位移变化。

实际上,这种三轴陀螺仪惯性测量单元能同时测量角速度和加速度信号,从而使它具备陀螺和加速度计的混合功能,本文着重介绍其三轴陀螺功能。表 1 和表 2 给出了重要的几何参数和相应的性能指标。

表 1 几何参数

Tab. 1 Geometry parameters

参数	值
器件层厚度	60 μm
电容间隙	2 μm
驱动幅度	0.2 μm
大(外)质量块	600 μm
小(内)质量块	200 μm
极化电压	30 V
品质因数	5 K
工作频率	65 kHz

表 2 性能指标

Tab. 2 The performance index

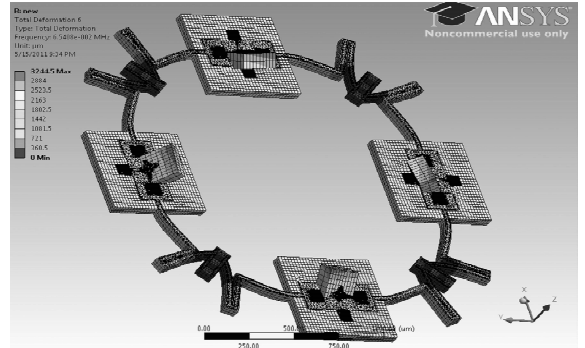
参数	值
面内敏感性	
灵敏度	83.447 $\text{pA}/(^{\circ}/\text{s})$
机械噪声	2.314 3 $(^{\circ})/\text{h} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$
电噪声	8.628 2 $(^{\circ})/\text{h} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$
总噪声	8.933 2 $(^{\circ})/\text{h} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$
面外敏感性	
灵敏度	78.811 $\text{pA}/(^{\circ}/\text{s})$
机械噪声	6.942 8 $(^{\circ})/\text{h} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$
电噪声	9.135 8 $(^{\circ})/\text{h} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$
总噪声	11.474 5 $(^{\circ})/\text{h} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$

至于工作谐振频率的选择,考虑到理论计算中的功耗和谐振后的等效阻抗(简称谐振阻抗),如果选择 300 kHz 工作频率,理论估算需要 300 kOhm 的谐振阻抗,则采用 ICP 刻蚀加工出的电容间隙精度要求高达 1 μm ,这将使加工工艺实现起来比较困难。因此,如果改用 2 μm 电容间隙,

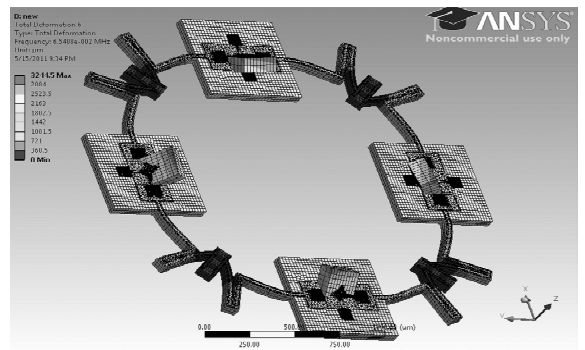
所设计的谐振频率在 65 kHz 左右。

3 三轴陀螺仪仿真

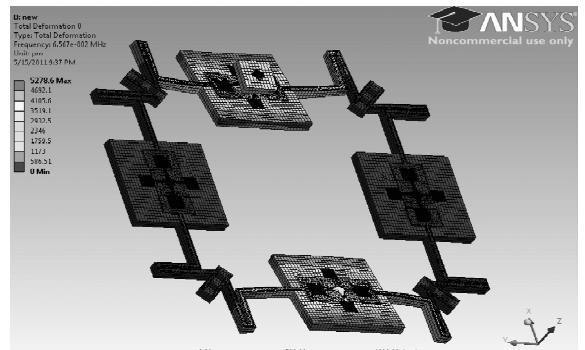
图 2 所示是整个器件的模式分析。在驱动模式中,只有谐振频率为 65.408 kHz 的面内驱动模式被激励(见图 2(a)),让 4 个大小质量块同步进行向心和离心运动。



(a)面内驱动模式
(a)In-plane drive mode



(b)面外z轴敏感模式
(b)Out-plane z-axis sense modes

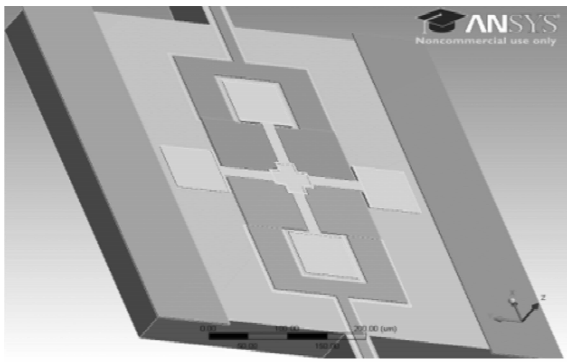


(c)面内x/y轴敏感模式
(c)In-plane x or y-axis sense modes

图 2 模式仿真

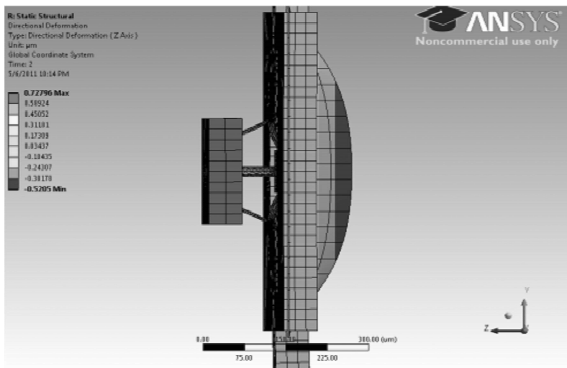
Fig. 2 Mode simulation

在 3 个敏感模态中,由 z 轴角速度引起的面内敏感模态的谐振频率是 65.305 kHz(见图 2(b)),而由 x 轴和 y 轴角速度引起的面外敏感模态谐振频率分别是 65.644 kHz 和 65.670 kHz(见图 2(c))。因此,本文的频率调谐是模态匹配的关键所在。尽管该结构参数的理论设计很理想,但是影响系统灵敏度的 4 个模态中的频率分裂现象依然存在。本文提出双重模态匹配过程来实现四模态匹配。为方便获得仿真中各调谐电压对调频趋势的影响,采用两步调频分析方法,实际操作可同时加载两调谐电压 U_p 和 U_{up} 。首先,将电压 U_p 加在公共质量块上使得面内模态匹配。然后,将另一个调谐电压 U_{up} 加到 4 个小质量块上方的多晶硅电极板上,再次调谐 4 个模态。通过仿真发现,最终的 4 个模态频差能从原先的几百 Hz 减小至 30 Hz 左右,从而确保了各模态的灵敏度将大大提高。



(a)变形前的多晶硅十字交叉梁

(a)Polysilicon crossing tether before deformation



(b)上端调谐电极加载80 V电压后变形

(b)Upper tuning electrode deformation at U_p of 80 V

图 3 吸合效应

Fig. 3 Pull-in effect

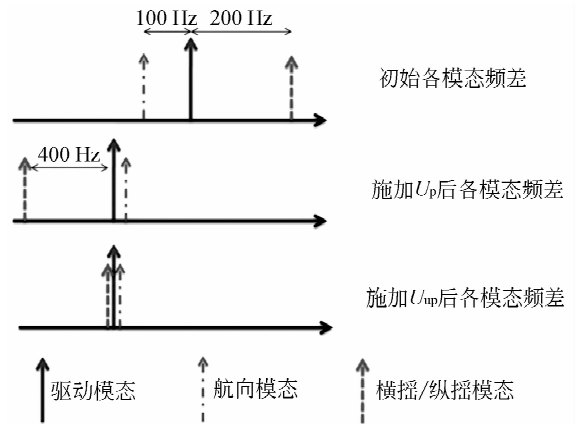
如图 3 所示,在调谐过程中,不断提高极化电压将发生吸合效应。图 3(a)是变形前大小质量

块的状态;当所施加在大质量块上的极化电压高达 80 V 时,很明显小质量块被夸张地拉出来,很容易和上面的另一个调谐电极吸合在一起。

参照文献公式^[6],公共模态调谐方程改写如下:

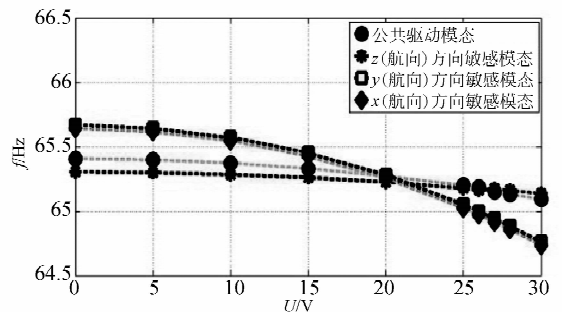
$$\omega_{\text{tuning}} = \sqrt{\left\{ K_{\text{mech}} - \sum_{i=1}^N \left[\frac{\epsilon_0 A_i}{d_i} (U_p - U_{up})^2 \right] \right\} M_{\text{EFF}}^{-1}} \quad (1)$$

其中: N 是加载直流调谐电压差的平行板电极的总数目; U_p 和 U_{up} 分别是加载到公共质量块和上电极极板的调谐电压大小; A_i 是电容重叠面积; d_i 是第 i 个电极的电容间隙; M_{EFF} 是结构的有效质量。



(a)模态匹配调谐过程中频移

(a) Frequency split in mode-matching tuning



(b)频差与 U_p 的关系

(b) Frequency shift vs. U_p

图 4 模态匹配中频移现象

Fig. 4 Frequency shift in mode-match tuning

图 4 阐明了这些模态在加载调谐电压前后的频移现象。在图 4(a)中,驱动模态和航向模态的初始频差是 100 Hz,而驱动模态和横摇及纵摇方向的频差是 200 Hz。当 U_p 加载到公共质量块时,驱动模态和航向模态的初始频差趋势是靠拢,

然而驱动模态和横摇及纵摇方向的频差趋势是远离甚至超出了 400 Hz。然后,当另一个调谐电压同时加载到上电极板上,这些模态之间的频差将会明显得到改善。详细的调谐数据如图 4(b)所示。很明显,当首先增加 U_p 时,被调谐的模态频率 ω_{tuning} 按二次方根规律下降。但是,如果再施加 U_{up} 到上电极板时, ω_{tuning} 将反向降低。原因是此时 U_p and U_{up} 之间的电压差反而变小。最后,通过反复仿真,实验设定 $U_p = 30 \text{ V}$, $U_{\text{up}} = 5 \text{ V}$; 让 4 个模态的频差限定在 30 Hz 以内,这将大大提高三轴角速度测量的灵敏度。

为了提高该种惯性传感器的灵敏度,实际采用真空封装相当重要。如图 5 所示,通过多物理场仿真很容易获得谐振器的品质因数,同时可以计算能量耗散获得谐振状态的表面温度分布。

从理论上讲,通过已知谐振材料的线性热膨胀系数,可以建立应变场和温度场之间的热弹性阻尼耦合方程。热弹性耗散实际是一个谐振周期内热弛豫过程,这是由不可逆转的热扩散过程引起的。由于热弹性体温度梯度的影响,使热量从高温区向低温区传导,结果导致正应变场。应变场和温度场的耦合导致能量耗散的机理称为热弹性阻尼,属于谐振系统固有特性。参照文献中的公式^[7],支配热弹性阻尼的耦合偏微分方程如下:

$$\rho \ddot{u}_i - \frac{E}{2(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} - \frac{E}{2(1+\sigma)(1-2\sigma)} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_i} = - \frac{E\alpha}{3(1-2\sigma)} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (2)$$

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = - \frac{E\alpha T_0}{3(1-2\sigma)} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad (3)$$

其中: ρ 是密度, σ_i 是泊松比, E 是杨氏模量, α 是线性热膨胀系数, C_v 是热容量, k 是热导率, T_0 是平衡温度。梁的状态变化量可以通过温度场 T 和位移场 u_i ($i=x, y, z$) 表示。

通过求解方程(2)和方程(3),利用分离变量法,求得解耦后的温度和位移场函数可以分解成位置和时间的函数乘积

$$u_i(x, y, z) = \hat{u}_i(x, y, z) f(t), \quad (4)$$

$$T_i(x, y, z) = \hat{T}_i(x, y, z) f(t), \quad (5)$$

其中: $f(t)$ 是随时间按指数衰减的函数

$$f(t) = e^{(j\omega - \sigma)t} = e^{j\omega t}, \quad (6)$$

因此,最终的品质因数可以表示为

$$Q = \text{Im}(\lambda) / 2\text{Re}(\lambda) = \omega / 2\lambda, \quad (7)$$

最后,驱动模态和敏感模态的仿真品质因数分别是 23 816 和 19 507,这将保证三轴陀螺仪在真空封装环境下具有较高的机械灵敏度。

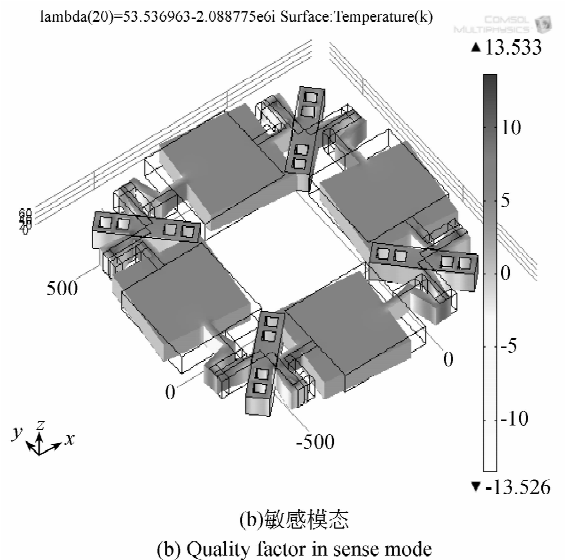
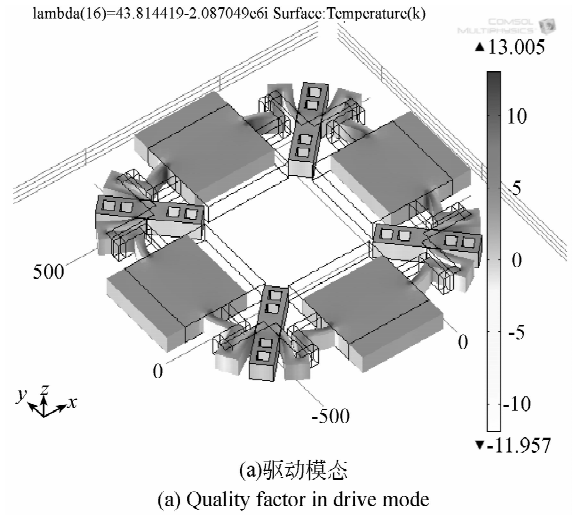


图 5 驱动和敏感模态的品质因数仿真

Fig. 5 Quality factor simulation in drive and sense modes

4 三轴陀螺仪加工

参照已经成功的 HARPASS 工艺^[8],提出的加工过程如图 6 所示。如图 6(a)所示,首先将 500 μm 厚的 SOI 硅晶圆清洗干净。上面的硅作

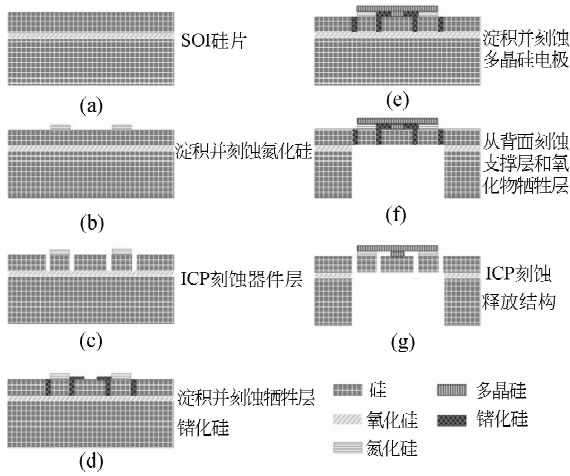


图6 三轴陀螺仪加工流程

Fig. 6 Process flow for Tri-axis gyro

为器件层,中间的掩埋二氧化硅层作为牺牲层,而底部的硅作为衬底层。图6(b)所示,LPCVD高温淀积氮化硅层使其表面共形。涂胶光刻并ICP刻蚀,露出中间硅区作为锚区,这主要让小质量块和大质量块有效地实现电导通。接着,如图6(c)所示,通过ICP刻蚀释放所有的可动质量块。然后,作为牺牲层的锗化硅被淀积和刻蚀,填入该结构的深槽中(见图6(d))。再接着,淀积和刻蚀小质量块上的多晶硅电极板,形成正交十字弹性梁

(见图6(e))。最后,从背面刻蚀支撑层和掩埋氧化层(图6(f)),整个器件通过HF湿法刻蚀释放(图6(g))。

5 结论

为实现六自由度惯性器件(包括三轴陀螺和三轴加速度计),本文提出了一个四方对称的结构。限于篇幅,这里只着重研究三轴陀螺部分的特性。在提出此惯性元件原理基础上,给出了具体结构的设计参数,对陀螺各模态性能进行了分析,这为结构流片提供了依据。通过模态分析发现,驱动模态和其它3个模态的频差仍然非常严重。为了消除频差,提出四模态匹配的两步频率调谐方法。首先将 U_p 加载到质量块上,让驱动模态和航向模态的谐振频率尽量靠近;然后,将 U_{up} 施加到小质量块上面的多晶硅电极上,使前面已经偏离的驱动模态和横摇及纵摇模态再次靠近。仿真结果显示,三轴陀螺可以实现最终的四模态匹配到30 Hz以内,驱动和敏感模态品质因数分别达到23 816和19 507,可满足一定性能的要求。最后,给出了整个器件的加工流程,详细介绍了5块掩模板和采用的高深宽比加工工艺。研究结果表明,整个设计是可行的。

参考文献:

- [1] ZOTOV S A, MONTGOMERY C R, TRUSOV A A, *et al.*. Folded MEMS pyramid inertial measurement unit [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11 (11): 2780-2789.
- [2] TSAI N C, SUE C Y. Experimental analysis and characterization of electrostatic-drive tri-axis micro-gyroscope [J]. *Sensors and Actuators A*, 2010, (158): 231-239.
- [3] PRANDI L, CAMINADA C, CORONATO L, *et al.*. A low-power 3-axis digital-output MEMS gyroscope with single drive and multiplexed angular rate [C]. *Proceedings of 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference on Digest of Technical Papers*, San Francisco, CA, United states: ISSCC, 2011: 103-105.
- [4] NAKAMURA S. MEMS Inertial sensor toward higher accuracy & multi-axis sensing [C]. *Proceedings of the Fourth IEEE Conference on Sensors 2005*, Irvine, CA, United states: Proc. IEEE Sens., 2005: 939-942.
- [5] MARTYNENKO A Y G, MERKURIEV B I V, PODALKOVB V V. Dynamics of a ring micromechanical gyroscope in the forced_oscillation mode [J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2010, 1(1): 43-51.
- [6] AJIT S, MOHAMMAE F Z, FARROKH A. A sub-0.2 o/hr bias drift micromechanical silicon gyroscope with automatic CMOS mode-matching [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 44(5): 1593-1608.
- [7] ABDOLVAD R, JOHARI H, HOBEAM G K, *et al.*. Quality factor in trench-refilled polysilicon beam resonators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(3): 471-478.
- [8] FARROKH A, KHALIL N. A HARPSS polysilicon vibrating ring gyroscope [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10 (2): 169-179.

作者简介:



夏敦柱(1978—),男,江苏南京人,博士,副教授,2008年于东南大学获得博士学位,主要从事微惯性器件及系统的研究。E-mail: xiadz_1999@163.com



虞成(1990—),男,江西上饶人,硕士研究生,2011年于华侨大学获得学士学位,主要从事微惯性仪器仪表方面的研究。E-mail: yulongmentu@163.com



孔伦(1990—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,2012年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事 MEMS 器件的研究。E-mail: kong275@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)