

文章编号 1004-924X(2010)11-2454-07

单晶硅振动环陀螺仪的制作

张明, 陈德勇, 王军波

(中国科学院 电子学研究所 传感技术国家重点实验室北方基地, 北京 100190)

摘要: 为了简化电容式振动环陀螺仪的制作方法, 进一步提高成品率, 提出了一种结合反应离子深刻蚀(DRIE)与阳极键合的陀螺仪制备方法。分析了振动环陀螺仪的工作原理, 指出了传统工艺存在的缺陷; 对该制作方法所采用的工艺流程进行了详细设计, 分析了不同工艺参数对陀螺仪性能的影响, 并依据分析和实验结果改进了工艺流程和参数。最后, 采用该方法制作了振动环式微机械陀螺仪并进行了测试。实验结果表明, 采用该方法能成功制作电容间隙为 $3\ \mu\text{m}$ 、厚度为 $80\ \mu\text{m}$ 的振动环式陀螺仪微结构。与传统的制作方法相比, 工艺流程大为简化, 掩模板数量从 7 块减少到 2 块, 满足器件性能可靠、工艺简单、成品率高的要求。

关键词: 微机械加工; 深刻蚀; 阳极键合; 振动环陀螺

中图分类号: U666.123 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2454

Fabrication of single-crystal silicon vibrating ring gyroscope

ZHANG Ming, CHEN De-yong, WANG Jun-bo

(*State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: In order to simplify the fabrication process of a vibrating ring gyroscope and to improve its finished products, a fabricating method combing Deep Reactive Ion Etching(DRIE) and anodic bonding technologies was proposed to fabricate sensor structures. The operating principles of the vibrating ring gyroscope and the technological drawbacks in the traditional fabrication process were discussed. Then, the processing flows based on DRIE and anodic bonding technologies were carefully designed, and the effect of different technological parameter on the gyroscope performance was analyzed. On the basis of the analyzed results, the technological flows and parameters were modified. Finally, a single-crystal silicon vibrating ring gyroscope with a high aspect ratio was fabricated and tested. Experimental results indicate that the proposed method can fabricate a vibrating ring gyroscope with $3\ \mu\text{m}$ capacitance gaps and $80\ \mu\text{m}$ depth. In comparison with traditional fabrication technologies, the number of masks has been reduced from 7 to 2, which meets the device requirements for simplicity and stabilization.

Key words: MEMS technology; Deep Reactive Ion Etching(DRIE); anodic bonding; vibrating ring gyroscope

收稿日期: 2010-03-10; 修订日期: 2010-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60772018)

1 引 言

与众多其它类型的陀螺^[1-3]相比,振动环式陀螺具有许多优点,如:极佳的分辨力和较高的灵敏度;在理想情况下,性能不受温度和环境振动的影响等^[4-6]。

密歇根大学的 M. W. Putty 最早研究了振动环陀螺的检测原理,并采用在绝缘模型上电镀镍的方法制作了一个电容间隙为 $7\ \mu\text{m}$,深宽比约为 7 的陀螺^[7]。依据不同的真空度,该谐振器的品质因数介于 2 000 与 10 000 之间。这种方法制作的陀螺由于受到制作绝缘模型材料(主要是聚酰亚胺)的影响,品质因数不会很高,限制了陀螺性能的进一步提高。

Farrokh Ayazi 和 Khalil Najafi 提出了采用多晶硅沉积方法制作电容式振动环陀螺^[8]。该方法采用多晶硅制作谐振子,具有高达 20 000 的品质因数,电容间隙为 $1.4\ \mu\text{m}$,深宽比约为 40。该陀螺具有很好的性能,但是制作过程中需要使用多达 7 块掩模板,工艺非常复杂。另外,从国内现有的研究条件来看,沉积厚度为 $80\ \mu\text{m}$ 的多晶硅结构层还需要解决诸如应力等技术问题。同时,这一方案中 $1.4\ \mu\text{m}$ 的电容间隙采用了牺牲层去除的方法来释放,在释放过程中容易导致电容两极板相互吸合,影响成品率。

国内对振动环式陀螺的研究比较少,目前只有中科院电子所制作的电磁式振动环陀螺。该陀螺的品质因数在 1 Pa 真空度下为 14 000^[9-10]。与静电式振动环陀螺相比,电磁式陀螺最大的缺点在于难以通过后期的方法来改善陀螺性能,从而在一定程度上限制了成品率的提高。

以上分析表明,在保证陀螺性能良好的前提下,尽量降低制作工艺的复杂性以提供足够高的成品率是目前陀螺研究和研制的方向。基于这一目的,本文提出了一种单晶硅振动环陀螺的制作方法。采用单晶硅作为制作材料,保证了器件有足够高的品质因数;采用静电键合,反应离子深刻蚀,蒸发、溅射金属和硅片热氧化等成熟工艺,保证了制作方法的简单可靠。

2 影响振动环陀螺性能的参数

振动环陀螺属于振动式陀螺,所有的振动式陀螺都可以等效成一个二阶的质量弹簧系统,如图 1 所示^[11]。

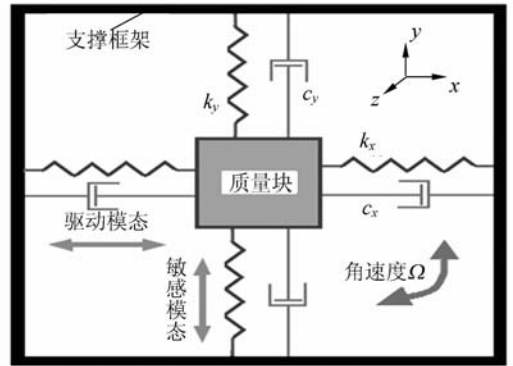


图 1 振动式陀螺的等效质量弹簧系统原理图

Fig. 1 Schematic chart of mass-spring system in vibrating gyroscope

从图 1 可以得出,陀螺具有两个相互正交的振动模式:驱动模式(主模式)和敏感模式(第二模式)。首先,陀螺振子等效质量块以驱动模式谐振,当有垂直于振动平面的外加角速度 Ω 作用于陀螺上时,等效质量块受到科氏力作用,能量从主模式(驱动模式)耦合至第二模式(敏感模式)。此时,可以通过检测第二模式(检测模式)的振动来检测角度或者角速度的大小。这就是陀螺检测角速度的原理。

经过理论分析,陀螺仪的灵敏度可以用公式(1)表示:

$$S = \frac{2F_0 Q_x}{m\omega_x^2 \omega_y} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_x}{Q_y \omega_y}\right)^2 + [1 - \left(\frac{\omega_x}{\omega_y}\right)^2]^2}}, \quad (1)$$

其中, F_0 表征驱动力的大小; Q_x, Q_y 分别是驱动模式和敏感模式的品质因数; ω_x, ω_y 分别表征驱动模式和敏感模式谐振的频率; m 是陀螺的等效质量。通过分析可知,公式(1)在 $\omega_x = \omega_y = \omega$ 取得最大值。如公式(2)所示:

$$S_{\max} = \frac{2F_0 Q_x Q_y}{m\omega^3}. \quad (2)$$

综上所述,为了提高陀螺灵敏度必须尽可能减小驱动模式和敏感模式之间的频率差,当频率差为 0 时,灵敏度取得最大值。在理想情况下,振

动环陀螺的驱动模态和敏感模态谐振频率完全一致。但是,在实际制作过程中,由于工艺和制作材料的缺陷总会导致一定程度的非对称性,因此,在设计 and 制作振动环陀螺时,既要保证工艺简单可行,又必须保证陀螺敏感结构具有良好的对称性和均匀性。否则,陀螺性能指标将严重下降。

3 制作振动环陀螺的关键技术

3.1 振动环陀螺的组成

图 2 是一个典型的振动环式陀螺仪,它主要由振动环谐振子,支撑弹簧,驱动、检测和控制电极 3 部分组成。

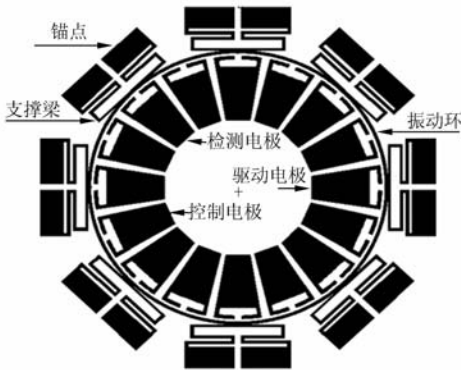


图 2 典型的振动环陀螺

Fig. 2 A typical vibrating ring gyroscope

振动环谐振子是陀螺的核心部分,它用于敏感角度和角速度的变化。在制作过程中,保证敏感谐振子的均匀性和对称性是决定陀螺性能的最关键因素。

支撑弹簧将振动环和分布于环周围的固定锚点连接在一起,起悬浮支撑振动环的作用。理论分析表明,支撑振动环至少需要 8 根均匀性和对称性极好的支撑弹簧,因为每一根支撑弹簧都会对振动环刚度产生影响,只有每一根弹簧都均匀对称才能保证他们作用在振动环上的效果一致,从而保证振动环的均匀对称性。

驱动、检测和控制电极均匀分布在振动环周围,驱动振动环工作、检测敏感信号以及提供必要补偿的作用,它们是制作振动环陀螺的难点所在。通过式(1)可知,提高驱动力有益于提高陀螺的检测灵敏度。同时,电容检测原理要求检测电容的极板间距尽可能小且极板正对面积尽可能大,这样有益于增大检测信号。所以在设计振动环陀螺

时,电极和振动环之间的间距很小,一般小于 $5\ \mu\text{m}$,本文设计的振动环陀螺间距为 $3\ \mu\text{m}$ 。另外,振动环结构的厚度要大,以提供足够大的检测电容正对面积,本文设计为 $80\ \mu\text{m}$ 。

由上述分析可知,为提高陀螺性能,要求陀螺具有高深宽比和高对称性结构。由于采用单晶硅作为谐振子材料,在释放悬浮结构时,需要采用阳极键合方法将可动部件采用悬臂支撑的方式固定在玻璃衬底上。

3.2 制作振动环陀螺的关键技术

目前,振动环式微机械陀螺主要采用电镀和多晶硅沉积的方法制作,这是制作高深宽比结构的传统方法。但是,在制作微机械振动环陀螺时,如前文所述会有诸多工艺难点问题。近年来,深刻蚀技术在制作高深宽比结构的微传感器领域被广泛采用,所制作的器件具有良好的一致性,因此考虑到传统方法的缺陷,本文设计了一种基于深刻蚀和静电键合技术的制作工艺。

静电键合技术是 Wallis 和 Pomerrantz 于 1969 年提出的。静电键合技术可将玻璃与硅等不同材料键合在一起,而不用任何粘接剂,键合界面有良好的气密性和长期的稳定性。影响键合效果的主要因素有:温度、外加电压、阳极形状、静电引力和键合引入的应力,根据具体玻璃和硅片的厚度以及材料特性,需要做合适的调整。

深刻蚀技术即硅的深深刻蚀技术,与传统的干法刻蚀技术相比,它能够制作高深宽比的三维微结构,刻蚀过程主要包括感应耦合等离子体对硅进行刻蚀以及侧壁钝化两个部分,加工厚度可达几百微米,侧壁垂直度达 $(90 \pm 3)^\circ$,刻蚀速率可达 $2.5\ \mu\text{m}/\text{min}$,硅与氧化硅的选择比大于 150。

经过理论分析和 ANSYS 有限元仿真,并充分考虑现有实验条件,设计出的陀螺其尺寸如表 1 所示。

表 1 陀螺结构参数

Tab. 1 Structure parameters of vibrating ring gyroscope

陀螺尺寸	单位/ μm
环半径	2 500
电容间隙	3
环宽度	50
环高度	80
支撑弹簧宽度	20

基于上述设计,采用下述制作流程:

第一步:将清洗过的厚度为 280 μm 硅片单面蒸发金属 Al,如图 3(a)所示。

第二步:以 Al 为掩模层,制作锚点结构,厚度为 200 μm ,如图 3(b)所示。刻蚀 200 μm 的原因是:受到深刻蚀深宽比的限制,可动结构厚度为 80 μm 时,成品率较高,键合面刻蚀 200 μm 可以省略正面硅片的减薄工艺,且 200 μm 深度不会严重影响硅片表面粗糙度,用台阶仪测试刻蚀 200 μm 后硅片表面粗糙度为 80~100 nm 左右。

第三步:去除不需要的 Al 掩模,并清洗硅片。采用阳极键合法将硅片和玻璃键合在一起,如图 3(c)所示。

第四步:在硅表面溅射金属铝,以铝为掩模,采用深刻蚀的方法刻蚀硅片,释放悬浮结构。如图 3(d)所示。

采用这一工艺流程制作的振动环陀螺均匀性较差,主要是因为最后一次深刻蚀时,刻蚀掩模面积不一致,产生了 Lag 效应,如图 4 所示。

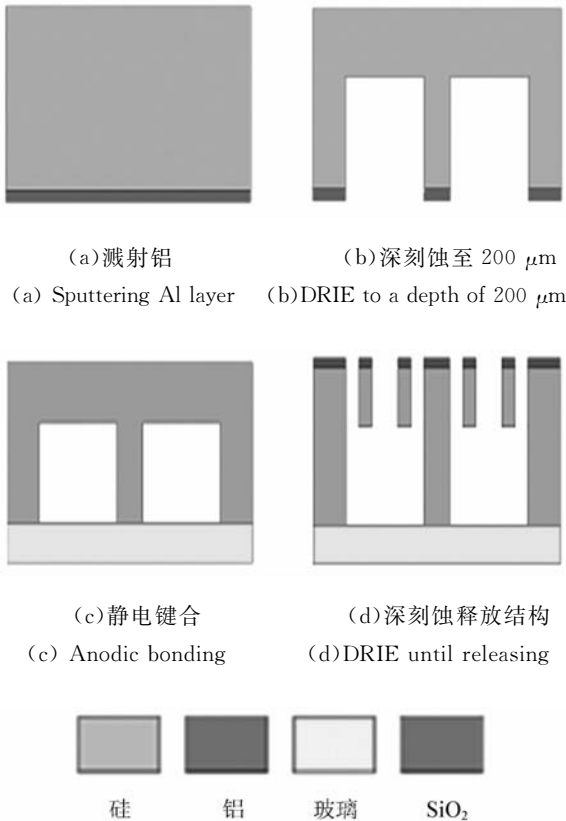


图 3 工艺流程图

Fig. 3 Fabrication process

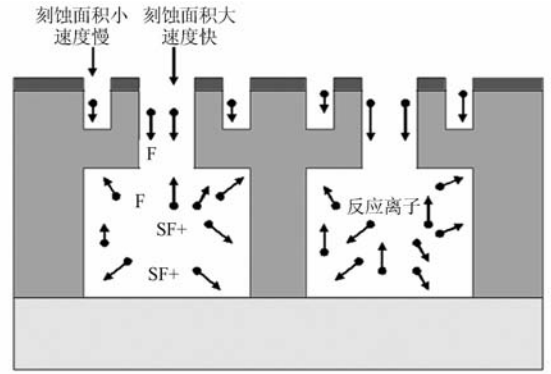


图 4 由 Lag 效应引起的过刻蚀现象

Fig. 4 Over etching caused by Lag effect

从图 4 可以看出,刻蚀面积大的区域比刻蚀面积小的区域刻蚀速度快。这样大面积区域会首先刻蚀穿,等离子气体就会存在于结构背面的空腔中对结构背面产生严重刻蚀,均匀性变差。针对这个问题,本文对工艺流程进行了改进。主要是在键合之前将硅片进行一次氧化,制作厚度为 0.1 μm 的氧化硅保护层,如图 5 所示。这样由于有氧化硅的保护,当等离子体进入空腔之后不会和硅结构发生反应。在显微镜下观察,采取保护的结构与无保护结构存在明显差异,如图 6 所示。图 6(a)中未保护的刻蚀边缘呈齿状,这是由于过刻蚀产生,图 6(b)施加 SiO_2 薄层保护的边缘平整,证明保护效果显著。

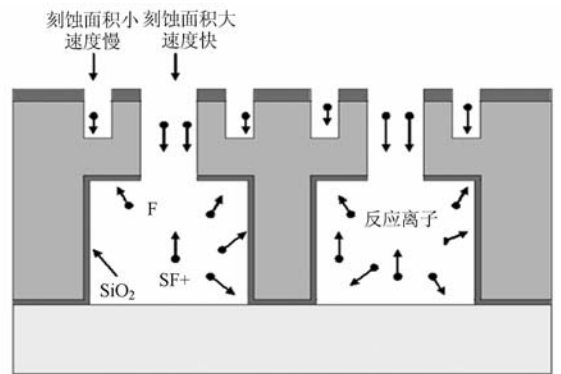
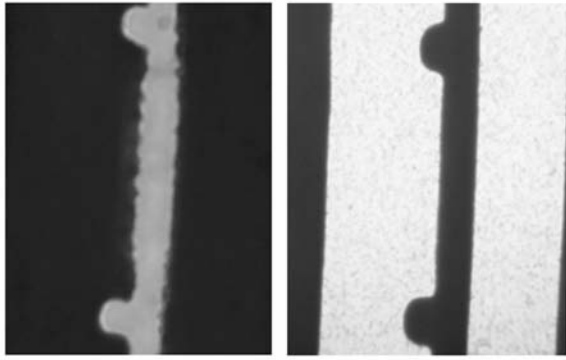


图 5 SiO_2 保护层原理图

Fig. 5 Schematic chart of SiO_2 Protection layer

值得指出的是阳极键合要求硅与玻璃良好接触,氧化硅绝缘层的存在会导致静电引力降低,增加键合难度。经过多次键合实验验证,只要氧化硅维持在一定厚度以下,就不会对键合强度产生明显影响。



(a) 未保护

(b) SiO₂ 保护

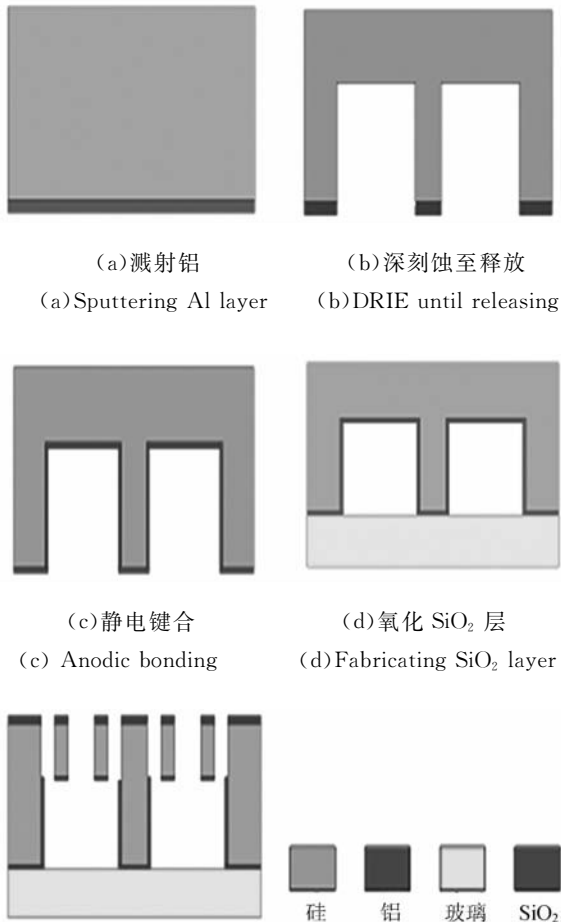
(a) Without protection

(b) SiO₂ protection

图 6 保护前后的电容间隙对比图

Fig. 6 Capacitance gap without protection and with SiO₂ layer protection

更改后的整体详细工艺流程如下:



(a) 溅射铝

(b) 深刻蚀至释放

(a) Sputtering Al layer

(b) DRIE until releasing

(c) 静电键合

(d) 氧化 SiO₂ 层

(c) Anodic bonding

(d) Fabricating SiO₂ layer

(e) 深刻蚀至 200 μm

(e) DRIE to a depth of 200 μm

图 7 改进后的工艺流程

Fig. 7 Improved fabrication process

第一步:将清洗过的厚度为 280 μm 的硅片单面蒸发金属 Al,如图 7(a)所示。

第二步:采用深刻蚀方法刻蚀硅片,深度为 200 μm,如图 7(b)所示。

第三步:将硅片采用热氧化的方法制作 0.1 μm 的氧化层,如图 7(c)所示。

第四步:以硅片刻蚀面为键合面,将硅片和 7740 # 玻璃键合在一起,如图 7(d)所示。

第五步:以铝为掩模,采用深刻蚀工艺刻蚀硅表面,直至结构释放,如图 7(e)所示。

此制作工艺仅需要 2 块掩模板,进行 2 次光刻即可,工艺简单,且都比较成熟,成品率较高。

4 制作与实验结果

采用上述工艺流程所制作的振动环陀螺如图 8 所示。

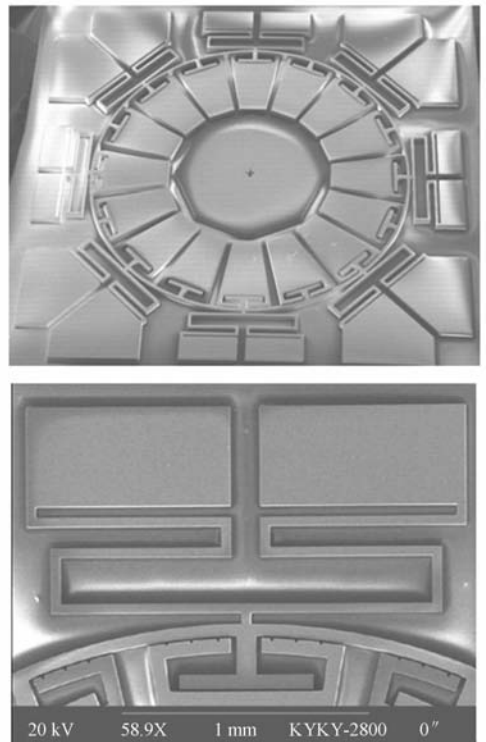


图 8 振动环陀螺

Fig. 8 Vibrating ring gyroscope

采用 HP3562A 动态信号分析仪对振动环谐振子进行频率特性测试,测试原理如图 9 所示,得

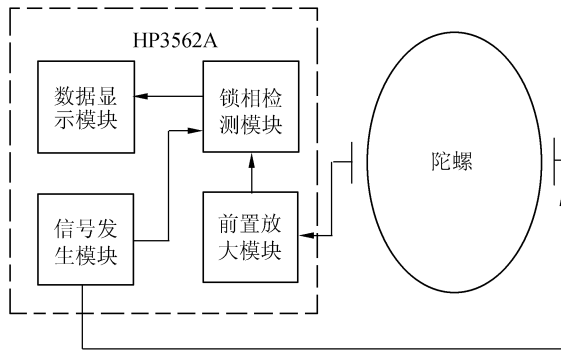
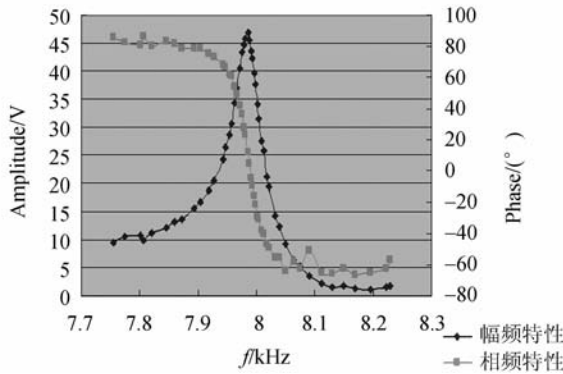


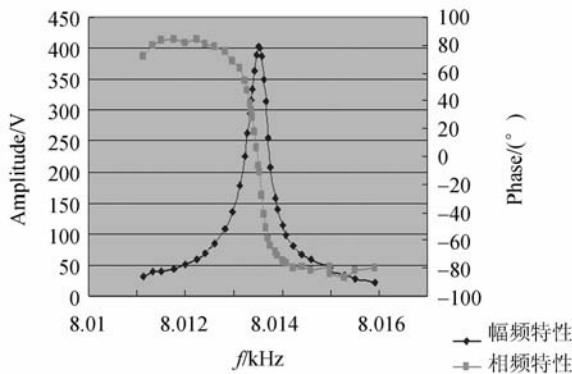
图 9 陀螺频率响应特性测试原理图

Fig. 9 Test principle of amplitude-frequency characteristic

出器件的幅频特性曲线如图 10 所示。由图 10 可知,振动环能够被很好地释放。在空气中,当偏置电压为 20 V 时,以 1.5 V 正弦信号激励的品质因数为 200,如图 10(a) 所示。在 1 Pa 真空度条件



(a) 空气中测试
(a) Test in air



(b) 1 Pa 真空度下测试
(b) Test in 1 Pa vacuum

图 10 陀螺的幅频特性曲线图

Fig. 10 Amplitude-frequency characteristic of gyroscope

下,只需施加 5 V 偏置电压,以 150 mV 正弦信号激励,品质因数可以达到约 27 000 左右,如图 10(b) 所示。

将采用此工艺方法制作的陀螺与前文所述的电镀和多晶硅工艺制作的陀螺进行简单对比。如表 2 所示。

表 2 3 种工艺的对比

Tab. 2 Comparison of three different fabrication methods

	工艺复杂度	品质因数
电镀工艺	中等	低(10 000)
多晶硅工艺	复杂	高(20 000)
深刻蚀工艺	简单	高(27 000)

提出的制作工艺大大简化了传统的制作方法,掩模板数量从 7 块减少为 2 块,仅需 2 次光刻。对比传统的多晶硅制作方法,无需长时间的注入工艺,省略了牺牲层腐蚀步骤。多次制作过程显示,在一块 7.62 cm(3 inch)硅片上能制作 37 个陀螺结构,除去可能产生的 1 至 2 个污损器件,其余均能良好释放。对比本文所讨论的改进前与改进后的微结构,陀螺的频率差由 400 Hz 以上降低为 120 Hz 以内,经过静电调整,均能正常工作。

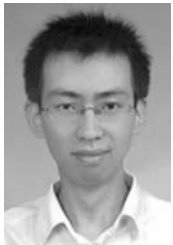
5 结 论

本文结合现有 MEMS 制作工艺条件,提出了一种制作振动环式微机械陀螺的方法。分析了制作工艺对器件性能的影响,改进了工艺参数,并成功制作了振动环陀螺。最后,对采用此方法制作的振动环谐振子进行了测试。试验结果证明:这种制作方法能够制作出性能良好的微机械振动环陀螺器件,大大简化了制作工艺,掩模板数量从 7 块减少为 2 块。因此,本制作方案具有制作工艺简单、成品率高的特点。所制作的振动环陀螺电容间隙为 3 μm,品质因数为 27 000。

参考文献:

- [1] KAZUSUKE M, SUNAO I, NOBUHIRO S, *et al.*. Design, fabrication and operation of MEMS gimbal gyroscope [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005(121):6-15.
- [2] SAID E A, KIVANC A, TAYFUNA A. A high-performance silicon-on insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007(135):34-42.
- [3] SUNGSU P, ROBERTO H, CHIN-WOO T. Dynamics and control of a MEMS angle Measuring Gyroscope [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008 (144):56-63.
- [4] FARROKH A, KHALIL N. A HARPSS polysilicon vibrating ring gyroscope [J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 2001, 10 (2): 169-179.
- [5] CHANG S, CHIA M, CASTILLO-BORELLEY P, *et al.*. An electroformed CMOS integrated angular rate sensor [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998 (66):138-143.
- [6] FARROKH A, KHALIL N. Design and fabrication of a high-performance polysilicon vibrating ring gyroscope [C]. *Eleventh IEEE/ASME International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1998:25-29.
- [7] MICHAEL W P. *A micromachined vibrating ring gyroscope* [D]. USA: University of Michigan, 1995.
- [8] FARROKH A. *A high aspect-ratio high performance polysilicon vibrating ring gyroscope* [D]. USA: University of Michigan, 2000.
- [9] 陈李, 陈德勇, 王军波, 等. 高性能电磁式微机械振动环陀螺 [J]. *光学 精密工程*, 2009, 17 (8): 1916-1921.
- CHEN L, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. High performance electromagnetic micro-machined ring vibration gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1916-1921. (in Chinese)
- [10] CHEN L, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. Micro-machined vibrating ring gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1344-1349.
- [11] 陈李, 陈德勇, 王军波, 等. 一种电磁式微机械振动环陀螺的建模与优化 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, 7(3): 233-238.
- CHEN L, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. Mathematical modeling and optimization design of an electromagnetic micro-machined vibrating ring gyroscope [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2009, 7(3): 233-238. (in Chinese)

作者简介:



张明(1980—),男,山西太原人,博士研究生,2003年于太原理工大学获得学士学位,主要从事微机械陀螺仪的研究。E-mail: zhangming05@mails.gucas.ac.cn



王军波(1973—),男,副研究员,1995年、1998年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2002年于清华大学获得博士学位,主要从事MEMS物理量传感器和生化传感器的设计、加工、封装及微弱信号检测等方面的研究。E-mail: jbwang@mail.ie.ac.cn

导师简介:



陈德勇(1967—),男,研究员,博士生导师,1989年于清华大学获得学士学位,1992年于中国科学院半导体研究所获得硕士学位,2002年于中国科学院电子学研究所获得博士学位,主要从事MEMS加工技术,基于MEMS技术的微结构物理量传感器的设计、制作、封装及测试和微执行器及智能微系统等方面的研究。E-mail: dychen@mail.ie.ac.cn