

The Fabrication Process of Tunneling Vibratory Microgyroscopes*

WANG Ling-yun, SUN Dao-heng*, LIU Yi-fang

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: Micro-machined tunneling gyroscope with cantilever is a kind of angular rate sensor with high sensitivity and resolution, in which cantilever works as transducer and electron tunneling effect is employed as sensor. It overcomes the traditional one's reduction in sensitivity when miniaturized. The Deep Dry Silicon On Glass (DDSOG) process, which includes the silicon front side etching, the technology of electrodes on the glass, the wafer bonding, the silicon thickness reduction and silicon deep etching on the back side, has been introduced to fabricate the microgyroscope based on its dimension characteristics: $1\mu\text{m}$ gap between silicon tip and its underside electrode, $4\mu\text{m}$ finger gap and width, $50\mu\text{m}$ thickness of cantilever. This process can be used to fabricate not only the micro-machined tunneling gyroscope but also other sensor and actuators.

Key words: micro-machined gyroscope; tunneling effect; DDSOG process; silicon tips

EEACC: 2575; 7630

振动式微机械隧道陀螺仪的制备工艺*

王凌云, 孙道恒*, 刘益芳

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 振动梁式微机械隧道陀螺仪是一种以悬臂梁作为换能构件, 以电子隧道效应为输出敏感方式的高精度和高灵敏的角振动传感器, 解决了传统机械陀螺仪因尺寸减小而导致的灵敏度降低的缺点。结合微机械隧道陀螺仪的尺寸特点: 硅尖与下电极的距离为 $1\mu\text{m}$, 齿厚和齿间距之间的距离为 $4\mu\text{m}$, 梁的厚度为 $50\mu\text{m}$, 提出硅正面刻蚀—玻璃上电极制作—硅玻键合—硅背面减薄—硅背面刻蚀的 DDSOG(Deep Dry Silicon On Glass) 工艺方案, 成功实现了整个器件的工艺制备。本文就 DDSOG 工艺中的关键工艺进行了一一论述, 该工艺不仅能用于隧道陀螺仪的制备, 同时也可以制作其它高深宽比传感器或执行器。

关键词: 微机械陀螺仪; 隧道效应; DDSOG 工艺; 硅尖

中图分类号: TP212; V241.5

文献标识码: A

文章编号: 1004 1699(2008)03-0439-04

微机械电子隧道式加速度的研制成功及其所表现出来的优越性能表明隧道效应传感器是一种非常好的位置传感器, 它具有高灵敏度、高分辨率和低能耗等优点^[1]。正是基于这些优点, 美国加州大学的 R. L. Kubena 博士等人设计了一种静电平板驱动振动梁式隧道陀螺仪^[2], 但该结构由于采用了平板驱动, 其信号线性度较差, 信号处理电路复杂。为了克服这些缺点, 设计了一种扇形梳齿驱动式隧道

陀螺仪, 采用扇形梳齿驱动代替平板驱动^[3]。本文结合该微机械隧道陀螺仪的尺寸特点, 提出硅正面刻蚀—玻璃上电极制作—硅玻键合—硅背面减薄—硅背面刻蚀的 DDSOG(Deep Dry Silicon On Glass) 工艺方案。利用 DRIE(deep reactive ion etching) 等体加工技术实现了隧道陀螺仪的工艺制备。该工艺方案和体硅溶解薄片法(Bulk Silicon Dissolved Wafer Process) 相比, 具有不需要对硅片进行浓硼

基金项目: 国家自然科学基金资助(50675184); 福建省科技计划重点项目资助(2002H022); 回国留学人员基金资助; 厦门大学新世纪优秀人才基金资助

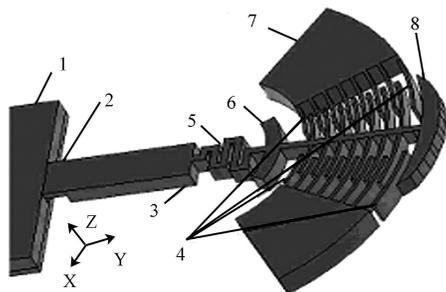
收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-01-07

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

扩散,工艺简单,杂散电容较小,结构厚度不受扩散浓度限制等特点,因而具有较好的应用前景^[4,5]。

1 微机械隧道陀螺仪的工作原理

图1是所设计的振动式扇形梳齿陀螺仪结构示意图。工作时,悬臂梁在扇形梳齿的驱动下,绕Z轴在XY平面内振动,当陀螺仪在Y方向上有一输入角速度时,悬臂梁由于哥氏力将在Z方向产生形变,使得硅尖与其下的电极之间的距离发生变化,由于隧道效应对距离的敏感性,通过检测隧道电流的大小就可以检测出Y方向输入角速度的大小^[6]。根据陀螺仪检测灵敏度和模式匹配的要求,所设计的隧道陀螺仪的主要特征尺寸有:硅尖与下电极的距离为1 μm,硅尖的高度为3 μm;扇形驱动梳齿的齿厚和齿间距之间的距离为4 μm;支撑扇形梳齿的驱动梁和检测梁的厚度为50 μm;阶梯型粗梁的长度为600 μm,支撑扇形梳齿的驱动梁长度为650 μm。



1、基座；2、阶梯型粗梁；3、硅尖；4、梳齿挡板；5、S型减振梁；6、耦合调整电极；7、定齿基座；8、自检电极

图1 隧道陀螺仪结构

2 微机械隧道陀螺仪的加工工艺

2.1 DDSOG 制备陀螺仪工艺流程

图2是典型的DDSOG工艺制备微机械隧道陀螺仪的工艺流程图。该工艺过程主要包括硅片上工艺(图2(A))、玻璃上工艺(图2(B))和组合工艺(图2(C~E))。其中硅片上工艺主要包括:硅尖的刻蚀及键合台阶的形成,以及硅尖上电极的溅射等。玻璃上工艺主要包括玻璃上电极的制作工艺。组合工艺主要包括硅玻键合,硅背面减薄及DRIE深刻蚀等。整个工艺过程共需5块掩模板,5次光刻,硅上四次,玻璃上一次。对于隧道陀螺仪的制备而言,其中关键的工艺包括:硅尖的制备、硅玻键合、硅背面减薄及DRIE刻蚀等,其成功与否直接关系到整个



A 硅正面刻蚀

B 玻璃上电极制作



图2 微机械隧道陀螺仪工艺流程

工艺的成败及器件的性能好坏。

2.2 硅尖的制备

微机械隧道陀螺仪的关键技术之一就是硅尖的制备,现已经发展了多种方法制备硅尖,比较成熟的有干法和湿法刻蚀,其中湿法刻蚀又分为各向同性和各向异性。相对于湿法刻蚀而言,干法刻蚀具有:各向同性和各向异性可选择性调节,刻蚀的硅尖不依赖于硅晶体的晶面及步骤简单等特点,故在硅尖的制备中被大量的研究使用^[7]。本文采用国产ICP-2B刻蚀系统,利用SF₆作为刻蚀气体,O₂作为表面钝化和纵横比刻蚀速率的调节气体,保持ICP射频功率为80W的条件下,通过大量的实验得出了在不同压强下,横向和纵向刻蚀速率比随氧气流量的变化关系如图3所示。

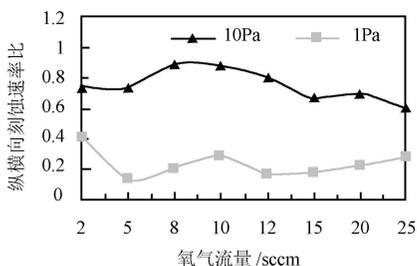


图3 纵横向刻蚀速率随氧气流量的变化

根据应用要求,要制备出形貌可控的硅尖,则必须根据掩膜的大小和要刻蚀的硅尖的高度,从图3中选择出对应的纵横刻蚀速率比,并决定对应的刻蚀条件。对于干法刻蚀硅尖,正确的判断刻蚀终止时间是非常关键的,判断的正确与否直接决定了硅尖的曲率半径,因而对刻蚀的纵向和横向速率的掌握是非常重要的。对于较矮的硅尖刻蚀,选择较慢的刻蚀速率条件有利于刻蚀终止时间的把握。图4是在SF₆和O₂流量分别为60 sccm和2 sccm得到的悬臂梁上的硅尖,其硅尖的曲率半径小于60 nm。

2.3 硅玻键合

硅玻键合工艺主要目的是把正面刻蚀好的硅片和做好电极的玻璃片组合在一起。DDSOG工艺中

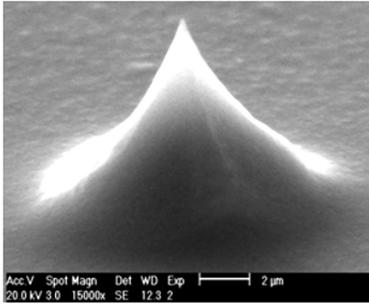
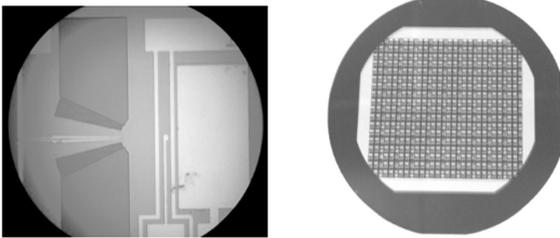


图4 悬臂梁上的硅尖

的硅玻键合工艺,除了要注意硅片和玻璃片的清洗,控制合适的温度和电压外,硅片与玻璃片的对准是至关重要的,由于硅片背面刻蚀的对准图案来自于玻璃上的对准图案,因而硅玻键合对准的好坏直接影响到硅背面刻蚀图案的质量。在实际操作中,尽量缩小硅片与玻璃片之间的距离,这样可以进一步减少对准后进行硅玻贴合时产生的误差。另外,为了防止可动结构在键合过程中与玻璃粘结,在跨度较大的可动结构处,应预留更多的键合台阶^[8]。本文选用与硅片热膨胀系数较一致的四寸 Pyrex7740 玻璃作为键合的玻璃片。在 AWB04 键合机上进行对准键合,键合温度控制在 350 °C,电压控制在 1000 V 左右。图 5 是键合对准的结构及键合后的组合片。对于 DDSOG 工艺而言,为了兼顾后续 KOH 湿法腐蚀工艺,防止 KOH 溶液渗透入结构中导致结构的钻蚀,如图 5(b) 在硅片的四周键合出一个封闭的圆环是非常必要的。



(a) 键合后对准的陀螺仪图形 (b) 键合后的组合片

图5 硅玻键合

2.4 硅片减薄

硅片减薄的主要目的是把硅片减薄到所设计的结构层厚度,因而减薄的精度直接影响到器件性能的好坏。目前比较常用的减薄方式有机械抛光和刻蚀工艺,刻蚀减薄因其成本低廉因而被广泛采用。刻蚀减薄中比较常用的是湿法刻蚀工艺,而在各种湿法刻蚀溶液中,又因 KOH 具有选择性好,有较高的刻蚀速率,刻蚀表面光滑等优点而被广泛的使用^[9-10]。对于 KOH 腐蚀系统而言,较高的浓度可以获得较高的表面质量,同时,腐蚀速率也会随着浓度的升高而降低,这有利于减薄厚度的精确控制。

在 KOH 腐蚀液中加入异丙醇会抑制腐蚀中产生的氢气泡,使腐蚀液腐蚀速度均匀,避免出现金字塔形的小丘现象。通过大量不同浓度和温度的腐蚀实验对比,最终确立了 KOH 腐蚀单晶硅(100)晶面质量最佳的条件为: KOH 浓度为 58%, 异丙醇浓度为 2%, 温度为 80 °C, 相应的腐蚀速率为 34.2 μm/h。在此条件下得到的腐蚀表面比较平整光亮,无沉积物和蚀坑,同时减薄厚度的一致性较好,不影响后继工艺的线条光刻。图 6 是在该条件下腐蚀得到的(100)晶面结果。

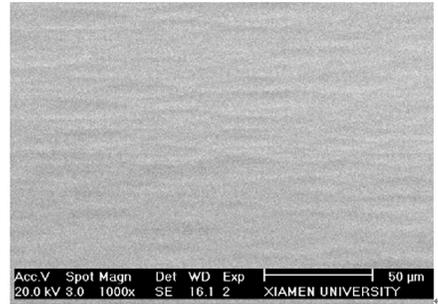
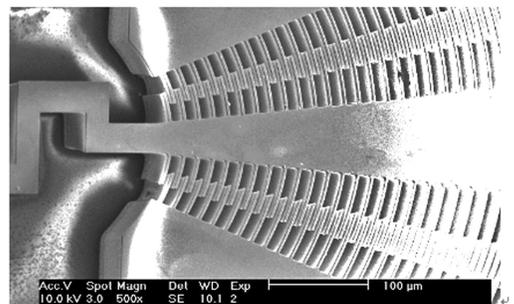


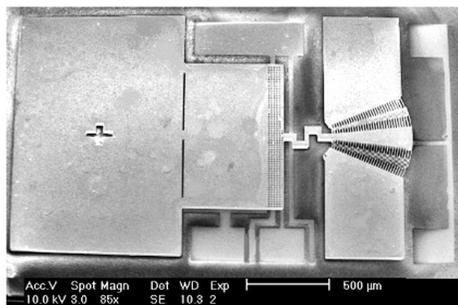
图6 减薄后的硅片表面形貌

2.5 硅背面 DRIE 刻蚀

根据该陀螺仪的尺寸特点,要求在硅背面刻蚀出深宽比达 12.5:1 的梳齿,因而采用 DRIE 深刻蚀技术不失为一种较好的选择。DRIE 深硅刻蚀技术具有控制精度高、大面积刻蚀均匀性好、刻蚀损伤少、污染少,刻蚀垂直度好,刻蚀断面轮廓可控性高和刻蚀表面平整光滑等优点,因而在微惯性器件、微光开关等 MEMS 领域得到广泛的应用^[11]。对于高深宽比的梳齿刻蚀而言,避免 RIE-Lag 和根切效应是非常重要的,对于 RIE-Lag 效应的避免主要是在结构设计的时候尽量使窗口尺寸一致。为了减少根切效应,可在结构的背面生长金属薄膜,通过金属薄膜对刻蚀等离子体的吸附效应,减弱等离子体对梳齿根部的侧向刻蚀,减小根切效应^[12]。实验用的 DRIE 刻蚀设备为 AMS200,使用 Bosch 工艺的 SF₆ 和 C₄F₈ 分别作为刻蚀气体和保护气体。图 7 是刻蚀的梳齿及刻蚀释放后的隧道陀螺仪。



(a) 陀螺仪梳齿



(b) 释放后的隧道陀螺仪结构

图6 硅背面深刻蚀

3 结论

结合微机械隧道陀螺仪的尺寸特点提出了硅正面刻蚀—玻璃上电极制作—硅玻键合—硅背面减薄—硅背面刻蚀的 DDSOG 工艺制备方案。在该工艺方案基础上,采用 ICP 刻蚀方法,在(100)硅片上成功的制作出微机械隧道陀螺仪中关键部件——硅尖。通过硅玻键合工艺使刻蚀后的硅尖和电极成为一个有机的整体,键合后的硅片放在 KOH 溶液中减薄到陀螺仪设计的厚度,利用 DRIE 刻蚀硅片,完成悬臂梁和扇形梳齿等关键性部件的释放,从而实现了整个器件的工艺制备。该工艺方案充分利用了玻璃的透光性、电绝缘性和化学稳定性以及良好的电学性能等特性,可以形成较厚的器件,从而得到较大的质量块,由于直接采用单晶硅作为材料,因而可以大大的减小释放结构的应力。

参考文献:

[1] 杨拥军. 微机械电子隧道传感器研究进展[J]. 半导体情报, 1997, 34(2): 23-27.



王凌云(1978),男,博士研究生,研究方向为微机电系统设计和工艺, rabbitwarrgly@yahoo.com.cn

- [2] Kubena R L, Vickers Kirby D J, Joyce R J, et al. A New Tunneling Based Sensor for Inertial Rotation Rate Measurements[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1999, 8(4): 439-447.
- [3] 孙道恒. 一种微机械隧道陀螺仪原型方案初探[J]. 微纳米科学与技, 2000, 5(1): 106-108.
- [4] 何晓磊, 苏岩. 采用 DDSOG 工艺加工 Z 轴微机械陀螺仪实验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(4): 545-548.
- [5] 唐群, 王寿荣. 三轴微机械陀螺仪的结构设计与仿真[J]. 传感器技术学报, 2006, 19(5): 2212-2214.
- [6] 王凌云, 刘益芳, 孙道恒. 扇形梳齿驱动式微机械隧道陀螺仪的初步研究[J]. 厦门大学学报自然科学版, 2006, 45(3): 355-358.
- [7] Wang Lingyun, Liu Yifang, Sun Daoheng. A Systematic Study of RIE for Silicon Tips[C]// International Technology and Innovation Conference 2006, ITIC2006, 2006, p: 1335-1338.
- [8] 姚雅红, 赵永军, 吕苗等. 采用薄片溶解工艺制造微机械惯性性表的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 36(4): 12-15.
- [9] Shikida M. Differences in Anisotropic Etching Properties of KOH and TMAH Solutions[J]. Sens Actuat. 2000, 84(1): 179-184.
- [10] Hiroshi Tanaka, Shuichi Yamashita, Yoshitsugu Abe, etc. Fast Etching of Silicon with a Smooth Surface in High Temperature Ranges Near the Boiling Point of KOH Solution[J]. Sensors and Actuators A 114 (2004): 516-520.
- [11] Fu L, J M. Study of Deep Silicon Etching for Micro Gyroscope Fabrication[J]. Applied Surface Science, 2001, 177: 78-84.
- [12] Jie Fan, Yong Zhu, etc. An Improved Method Employed in Anodic Bonded Glass-Silicon Gyroscopes to Avoid Footing Effect in DRIE[J], IEEE, 2004, 4: 1896-1899.



孙道恒(1964),男,教授,博士生导师,中国机械工程学会机械设计分会理事、福建省机械工程学会副理事长、厦门市机械工程学会副理事长、《振动、测试与诊断》、《电子机械工程》编委。主要从事微米/纳米集成与封装、聚合物纳米结构及其应用、微纳生物医学传感器与执行器的研究。完成“MEMS 系统级建模新理论新方法”等多项国家自然科学基金和福建省科技计划重点项目, sundh@xmu.edu.cn