

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 19920060153191

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

微机械隧道陀螺仪关键工艺及特性研究

Research on the Key Process and Characteristics of

Micro-machined Tunneling Gyroscope

王 凌 云

指导教师姓名: 孙道恒教授

专业名称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2009年11月

论文答辩时间: 2009年12月

学位授予日期: 2010年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009年11月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（）课题（组）的研究成果，获得（）课题（组）经费或实验室的资助，在（）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填写上相应内容。保密学位论文是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

目前正在研究和已开发的微机械陀螺仪大都采用电容检测方式,微小电容的检测能力却限制了微机械陀螺仪的检测精度。隧道效应所具有的高位移敏感特性正好解决了传统检测方式因器件尺寸减小而导致的灵敏度降低的缺陷。因此,隧道效应与微机械陀螺仪的结合为高精度微机械陀螺的发展开辟了新的空间。然而,要实现微机械隧道陀螺仪,必须解决隧尖的制备、悬臂梁的制作及微弱隧道电流检测等一系列关键技术问题,为此,本文围绕这几个关键技术问题开展了如下研究工作:

1) 结合微机械陀螺仪和隧道效应的特点,提出了角振动隧道陀螺仪和线振动隧道陀螺仪两种新型设计方案。基于电磁学和弹性力学相关理论对静电驱动器、驱动梁及检测梁刚度的设计等问题进行了理论分析,结合 ANSYS 仿真软件,在模态分析基础上,确定了陀螺仪的结构尺寸参数。根据 Coriolis 力产生原理,通过结构简化模型进一步分析和对比了两种隧道陀螺仪的机械灵敏度及特点。

2) 利用硅尖结构宽高比与 ICP 工艺横纵刻蚀速率比之间的内在联系,提出了一种形貌可控的硅尖制备方法,建立了刻蚀工艺条件—掩膜尺寸、刻蚀时间—掩膜尺寸的匹配关系,制备出顶尖曲率半径分别为 20nm 和 50nm,顶角为 60° 和 40° 的多种高度和底部尺寸的硅尖,完成了隧道陀螺仪的关键结构—硅尖的制备;最后,对该法制备的硅尖阵列的场发射性能进行了测试和分析。

3) 为了使 SOG 片硅层均匀减薄到隧道陀螺仪悬臂梁所设计的 30 μ m 厚度要求,提出了 KOH 超声湿法腐蚀减薄的工艺方法。分析了硅湿法腐蚀的作用机制,搭建了超声搅拌腐蚀系统,并针对减薄速率、表面质量及均匀性展开了实验研究,确定了 KOH 超声湿法腐蚀的各个工艺参数,实现了 SOG 片硅层按设计厚度进行均匀减薄的要求。

4) 针对所设计的微机械隧道陀螺仪的悬臂梁与硅尖在结构上相互结合的特点制定了 DDSOG (Deeply Dissolved Silicon-on-Glass) 的体硅加工方案。利用硅尖刻蚀和 SOG 减薄工艺的研究成果,实现了微机械隧道陀螺仪的整体制备工艺。通过分步刻蚀的方法,解决了深刻蚀工艺中所出现的光刻胶选择比不够、DRIE

根切效应以及刻蚀过程中出现的热集中等问题。

5) 制作完成了具有微弱电流放大能力的 $I-V$ 放大器, 并成功实现了两种隧道陀螺仪的隧道电流检测。针对两种微陀螺的驱动和检测在面内和面外的结构特点, 制定了图像处理法、静电力阶跃激励法和机械激励法等振动特性测试方法, 在大气环境下分别对隧道陀螺仪驱动和检测模态的振动特性进行了测试, 得到了其相应的谐振频率及品质因子。基于杜芬方程, 对线振动隧道陀螺仪在驱动方向上所表现出来的非线性现象进行了实验和理论研究, 并对其在模态匹配上潜在的应用进行了分析和讨论。

关键词: 微机械隧道陀螺仪; 硅尖; DDSOG; 硅片减薄; 隧道效应

Abstract

While prior research on micro gyroscope has been mostly adopted the method of capacitive detection, the capability to measure small capacitance hinders the development of high sensitive micro gyroscope. With its high-displacement-sensitivity, tunneling effect meets the developmental requirements of high precision micro gyroscope fabrication. In addition, the deficiency of sensitivity reduction, which results from size reduction in traditional micro gyroscope detection method, can be overcome. Therefore, a combination of tunneling effect and micro gyroscope offers a promising method for the development of high-precision micro gyroscope, of which the realization crucially relies on the solution of a number of key technical problems, such as the design and fabrication of tunneling tip and micro-cantilever, and the detection of weak tunneling current. Attempting to address these technical issues, the present study investigates the realization of micro tunneling gyroscope by conducting the following research :

1) Based on the characteristics of micro gyroscope and tunneling effect, two new types of design solution, angular vibrating tunneling gyroscope and linearity vibrating tunneling gyroscope, have been introduced. A theoretical derivation, which is based on is the theories of electromagnetism and elastic mechanics, has been carried out for the design of the electrostatic actuator and the cantilever rigidity of driving and sensing beam. Finally, the size parameters of the structure design have been obtained using the ANSYS software based on model analysis. The mechanical sensitivity and the characteristics of the two types of tunneling gyroscope through simplified structure model have been further analyzed and compared in terms of the Coriolis effect.

2) According to the size characteristic of the designed micro gyroscope: the distance between tunneling tip and opposite electrode is $1\mu\text{m}$, the comb finger width is $4\mu\text{m}$, and the thickness of cantilever is $30\mu\text{m}$, the Deeply Dissolved Silicon-on-Glass process, a bulk process, was introduced to realize our design. A method of fabricating a morphology controllable tip was designed based on the internal relationship between the ratio of lateral etch rate to vertical etch rate in ICP process and the ratio of silicon tip width to its height. With this method, the relationship of etching mask dimension, etching time, apex angle of silicon tip and etching condition can be easily determined. Finally, the tunneling tip, which is the crucial structure of tunneling gyroscope, was obtained using this method. The uniformity of the silicon tip made under this method was also analyzed and evaluated via the test of the field emission performance of silicon tips array.

3) KOH wet etching with ultrasonic agitation was presented to thin the silicon

layer on SOG wafer and meet the design thickness requirements of micro cantilever in tunneling gyroscope. An ultrasonic etching system was set up based on the wet etching and ultrasonic agitation mechanism. A series of experiments have been conducted to discuss the thinning rate, surface quality and uniform of silicon wafer after etch-back. The optimized parameters in KOH ultrasonic etching system have been obtained, which realized the uniform thickness of silicon layer and thus met the requirement of micro tunneling gyroscope.

4) Based on DDSOG process, the micro tunneling gyroscope was successfully realized through an integration of traditional micro processing and the research results of silicon tip fabrication and SOG etch-back. Some critical problems in DRIE process, such as the low selectivity of photoresist, footing effect and thermal concentration, were solved by multi-step etching method.

5) An I - V amplifier circuit was designed and successfully used to realize the detection of tunneling current of the two types of tunneling gyroscope. Given the vibration direction of driving and sensing mode in in-plane and out-of-plane, several vibration measuring methods, including image processing, electrostatic force step stimulation and mechanism excitation, were utilized to test the vibration characteristics of the driving and sensing model of the tunneling gyroscope under the atmosphere environment. Moreover, the resonance frequency and quality factor of the tunneling gyroscope were also obtained. Based on Duffing equation, the nonlinear phenomena in the driving direction shown by the linearity vibrating tunneling gyroscope has been analyzed theoretically and experimentally. Its potential application for mode matching in micro gyroscope has been analyzed and discussed.

Key words: micro-machined tunneling gyroscope; silicon tip; DDSOG; silicon wafer etch-back; tunneling effect.

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 陀螺仪的发展历程.....	1
1.1.2 硅微机械陀螺仪的国内外研究现状.....	3
1.1.3 硅微机械陀螺仪的检测方式及其特点.....	9
1.1.4 微机械隧道效应传感器的研究现状.....	13
1.2 研究目标与主要研究内容.....	16
第二章 微机械隧道陀螺仪的设计.....	19
2.1 微机械振动陀螺动力学基础.....	19
2.1.1 哥氏 (Coriolis) 加速度.....	19
2.1.2 微机械振动陀螺工作原理.....	20
2.2 微机械隧道陀螺仪的结构方案及工作原理.....	21
2.2.1 微机械隧道陀螺仪的设计要点.....	21
2.2.2 微机械隧道陀螺仪的结构方案.....	22
2.3 微机械隧道陀螺仪驱动模态的设计.....	23
2.3.1 扇形梳齿静电驱动的设计.....	23
2.3.2 平行梳齿静电驱动的设计.....	26
2.3.3 角振动隧道陀螺仪的驱动梁设计.....	27
2.3.4 线振动隧道陀螺仪的驱动梁设计.....	29
2.4 微机械隧道陀螺仪检测模态的设计.....	30
2.4.1 角振动隧道陀螺仪检测梁的设计.....	30
2.4.2 线振动隧道陀螺仪检测梁的设计.....	31
2.5 微机械隧道陀螺仪的模态仿真.....	32
2.6 微机械隧道陀螺仪的机械灵敏度分析.....	36
2.6.1 角振动隧道陀螺仪的机械灵敏度分析.....	36
2.6.2 线振动隧道陀螺仪的机械灵敏度分析.....	38
2.7 隧道陀螺仪的工艺方案设计.....	39
2.8 本章小结.....	40
第三章 硅尖的制备工艺及其场发射特性的测试.....	42
3.1 硅尖的主要制备方法.....	42
3.2 隧道陀螺仪硅尖制备方法的确定.....	43
3.3 ICP 刻蚀设备及原理简介.....	44
3.4 ICP 刻蚀形貌的实验研究.....	45
3.4.1 ICP 刻蚀形貌的实验研究流程及方法.....	45

3.4.2	电极功率对刻蚀形貌的影响	46
3.4.3	氧气流量对刻蚀形貌的影响	47
3.4.4	反应室压力对刻蚀形貌的影响	50
3.5	形貌可控的硅尖刻蚀方法	50
3.6	掩膜形状及边缘质量对硅尖刻蚀的影响	53
3.7	硅尖场发射特性的测试	54
3.7.1	场发射原理	54
3.7.2	场发射结构及其制备	56
3.7.3	硅尖场发射特性测试	57
3.8	本章小结	59
第四章	运用超声搅拌的硅片 KOH 湿法腐蚀减薄实验研究	61
4.1	目前硅片减薄工艺的主要方法	61
4.2	硅湿法腐蚀反应机制	62
4.2.1	硅湿法腐蚀中反应物质的交换过程	62
4.2.2	氢气及反应生成物对湿法腐蚀过程的影响	63
4.3	超声搅拌在 KOH 腐蚀减薄中的应用	64
4.3.1	超声搅拌在 KOH 湿法减薄中的提出	64
4.3.2	超声腐蚀作用原理	65
4.4	超声搅拌湿法腐蚀减薄硅的实验研究方法	66
4.4.1	超声搅拌湿法腐蚀实验装置	66
4.4.2	超声搅拌湿法腐蚀减薄的实验研究流程	67
4.4.3	腐蚀结果的表征方法	67
4.5	KOH 超声搅拌湿法腐蚀减薄的实验研究结果	68
4.5.1	KOH 溶液温度和浓度对腐蚀速率的影响	68
4.5.2	KOH 溶液温度和浓度对腐蚀表面粗糙度的影响	69
4.5.3	搅拌方式对 KOH 溶液的腐蚀速率的影响	72
4.5.4	搅拌方式对 KOH 溶液腐蚀结果表面粗糙度的影响	73
4.5.5	超声功率对 KOH 腐蚀速率及表面粗糙度的影响	74
4.5.6	超声搅拌对减薄均匀性的影响	77
4.5.7	超声搅拌在 KOH 腐蚀减薄中存在的问题	78
4.6	本章小结	80
第五章	微机械隧道陀螺仪的制备	82
5.1	隧道陀螺仪的版图设计	82
5.2	隧道初始间距的控制	83
5.3	隧道陀螺仪隧尖的制作	84
5.3.1	硅尖的刻蚀	84
5.3.2	硅尖上金属层的制作	85
5.4	隧道陀螺仪 SOG 组合片的制作	86
5.4.1	玻璃上金属电极的制作	86

5.4.2 硅—玻璃阳极键合	87
5.5 SOG 组合片的硅面减薄	89
5.6 微机械隧道陀螺仪的 DRIE 刻蚀	90
5.6.1 DRIE 刻蚀掩模的选择	90
5.6.2 DRIE 根切效应对结构的影响	91
5.6.3 DRIE 中的热集中效应对刻蚀结果的影响	93
5.6.4 分步刻蚀法在隧道陀螺仪深刻蚀中的应用	93
5.7 本章小结	96
第六章 微机械隧道陀螺仪的隧道电流及振动特性测试	97
6.1. 微机械隧道陀螺仪的隧道电流测试	97
6.1.1 I - V 测试电路设计与制作	97
6.1.2 I - V 测试电路的标定	100
6.1.3 隧道偏压电路	101
6.1.4 隧道电流测试及分析	102
6.2. 微机械隧道陀螺仪的振动特性测试方法	104
6.2.1 驱动梁振动特性的测试方法	104
6.2.2 检测梁振动特性的测试方法	105
6.3. 角振动隧道陀螺仪的振动测试及分析	106
6.3.1 驱动梁的静态电压偏转特性测试	106
6.3.2 驱动梁的固有频率测试	107
6.3.3 检测梁的固有频率测试	109
6.4. 线振动隧道陀螺仪的振动测试及分析	109
6.4.1 驱动梁的静态电压偏移特性测试	109
6.4.2 驱动梁的固有频率测试	111
6.4.3 检测梁固有频率测试	113
6.5. 线振动隧道陀螺仪驱动梁的非线性振动	113
6.5.1 驱动梁的非线性振动现象及振动特性测试	113
6.5.2 基于非线性振动的模态匹配方法的初步研究	115
6.6. 本章小结	118
第七章 结论与展望	119
7.1. 结论	119
7.2. 展望	121
附录 A: 微机械隧道陀螺仪各单元版图	122
附录 B: 微机械陀螺驱动电路原理图	123
参考文献	124
博士期间发表的论文及专利	134
致 谢	136

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

MEMS 技术作为微电子平面加工工艺和硅微机械加工技术结合的产物，是微电子技术的拓展和延伸，具有把传感和检测单元有机的融合为一体的特点。不仅继承了微电子技术批量化生产的特点，而且使传感器的体积可以大大缩小。这种小型化使得 MEMS 技术在工业自动化、娱乐消费电子、车辆安全等领域得到了广泛地应用。特别是微惯性器件和微惯性测量组合 (Micro Inertial Measurement Unit, 简称 MIMU) 技术在军事和民用行业的大量应用需求，促成了微惯性传感器的飞速发展。目前微加速度计的灵敏度已达到 μg 精度，微陀螺仪精度和性能好坏成为决定未来微惯性测量组合技术的关键所在，因而提高微陀螺仪的灵敏度成为目前微惯性技术领域发展的重点和关注热点。

1.1 研究背景与意义

1.1.1 陀螺仪的发展历程

陀螺是敏感壳体相对惯性空间角运动的装置，角速度传感器和角位移传感器统称为陀螺。利用陀螺的进动性和在惯性空间的定轴性，并和其他物理器件结合，可以做各种加速度、角加速度、方位、姿态的指示测量仪表。陀螺已成为各种运载器自动控制、制导和导航系统中的重要元件。概括起来，陀螺的发展大致经历了四个阶段的发展历程^[1~2]：

20 世纪 40 年代，高精度的滚珠轴承陀螺和带旋转机构的滚珠轴承陀螺在当时取得了一定的发展。从仪表支撑的性质、仪表的精度和应用情况来看，这是陀螺发展的第一代。这些传统的机械陀螺仪由高速旋转的转子、内环、外环和基座组成，通常用机械加工方法制成，加工精度高，难度大，而且陀螺仪体积大、重量重、功耗高，因此适应性越来越小^[3]。

20 世纪 50 年代，为减少第一代陀螺环架支撑的载荷，消除干摩擦，在陀螺转子的支撑方式上进一步改进，研制了第二代气浮、液浮陀螺。美国麻省理工学院德雷伯试验室采用液浮支撑技术率先研制了单自由度液浮陀螺，使陀螺漂移达到了次惯性级要求^[4]。

20 世纪 70、80 年代, 为了进一步提高陀螺仪可靠性, 减少磨损, 提高寿命和降低成本, 采用干式动力调谐转子挠性陀螺和采用在真空腔内用高压静电悬浮来支撑的静电陀螺, 成为第三代陀螺。动力调谐陀螺仪结构简单、易于制造, 不需要液浮, 也不需要温度控制系统, 因而具有非常好的性能价格比, 目前, 其漂移已达到了 $0.01^{\circ}/\text{h}$ 。静电陀螺仪是利用静电引力使金属球形转子悬浮起来, 是自由转子陀螺^[5~6]。静电陀螺仪的精度一般在 $10^{-4}^{\circ}/\text{h}$ 以上, 漂移率可达到 $10^{-7}^{\circ}/\text{h}$ 。

前三代陀螺仪都是基于经典力学理论研制而成的离不开高速旋转的机械转子陀螺, 由于高速转子存在质量不平衡、易受加速度影响等问题, 因此研制没有高速转子的陀螺一直是人们极为关心的问题, 现在陀螺的发展已进入第四阶段, 即激光陀螺、光纤陀螺和振动陀螺^[7]。

激光陀螺和光纤陀螺的出现是惯性技术的一场大革命。激光陀螺没有可动部件, 有较长的寿命、较高的线性度和动态范围, 但由于两束激光间的相互耦合, 在小角度时频差消失, 存在所谓的闭锁问题^[8~9]。光纤陀螺也是激光陀螺的一种, 它用光纤取代由反射镜构成的光路, 大大增加了光路长度, 提高了灵敏度。相对激光陀螺, 光纤陀螺结构简单, 不需要光学镜的高精度加工、光腔的严格密封和机械偏频技术, 能有效地克服激光陀螺的闭锁现象。光纤陀螺的角速度测量精度已从最初的 $15^{\circ}/\text{h}$ 提高到现在的小于 $0.001^{\circ}/\text{h}$ 的量级^[10~11]。

振动式陀螺不同于传统的机械陀螺, 它引入振动作为参考运动并使其动量守恒, 当外部有角速度时, 系统受哥式惯性力作用, 将激发振动, 振动幅度的改变与角速度有关。振动式陀螺由于不再需要使用旋转部件, 避免了摩擦力的作用, 因而使用寿命大大延长^[12~13]。

20 世纪 80 年代, 随着高精密的微机械加工技术的成熟, 出现了基于振动式原理的硅微机械陀螺。1991 年, 美国麻省理工学院德雷伯实验室成功研制出硅微型振动陀螺仪, 其测量精度达到漂移小于 $10^{\circ}/\text{h}$ 。由于硅微机械陀螺结构中没有高速旋转的转子, 可以将其看作固态装置, 因而工作寿命长、抗冲击; 加之集成度高, 可以将微惯性元件和电子线路集成在同一芯片上, 以减少干扰、提高器件的信噪比^[12]。

综上所述, 从陀螺仪的发展精度来看, 由 20 世纪 40 年代的低精度陀螺 (漂移率每小时几度以上) 到 50 年代的中等精度陀螺 (漂移率每小时零点几度); 由

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库