

学校编码: 10384  
学号: 19920081152965

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

差动式电容微机械陀螺仪工艺制备及接口  
电路设计

Fabrication and Interface Circuit Design of Differential  
Capacitive Micro-machined Gyroscope

刘 洋

指导教师姓名: 孙道恒教授

专业名称: 测试计量技术与仪器

论文提交日期: 2011年6月

论文答辩时间: 2011年6月

学位授予日期: 2011年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2011年6月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 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。

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“√”或填上相应内容。保密学位论文应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

## 摘要

微机械陀螺仪以其结构小、成本低、寿命长等优点成为下一代陀螺仪的重要发展方向。目前国内外的研究热点都集中在电容式微机械陀螺仪的研制，但由于加工误差和结构设计等原因，电容式振动微机械陀螺仪仍存在易受机械耦合和轴向加速度影响、检测电容量低、灵敏度不高等缺点。本论文针对上述问题提出了一种差动检测式电容硅微机械陀螺仪，并对其相应的接口电路进行了设计和仿真，论文的主要研究工作如下：

1) 结合现有的线振动式陀螺仪，设计了一种差动式电容检测微机械陀螺仪，对驱动、检测梳齿的电容和梁结构进行了分析，并对结构的驱动与检测模态进行了有限元仿真分析与验证。

2) 设计并完成了差动式陀螺仪制备工艺流程，对梳齿结构的 ICP 刻蚀进行了分组实验，重点研究了刻蚀条件与梳齿线宽损失之间的关系。采取分步刻蚀的方法实现了梳齿间距线宽损失从  $3.47\mu\text{m}$  降至  $1.34\mu\text{m}$ 。

3) 对制备好的陀螺仪进行了开环振动测试，初步获得了陀螺仪在大气环境下驱动与检测模态的幅频特性曲线，并计算了相应的谐振频率和品质因子。

4) 通过有限元仿真和理论计算得出了梁加工倾角与谐振频率的变化关系，获得了加工误差对陀螺仪模态频率的影响规律，为结构设计和工艺过程的优化提供了参数依据。

5) 针对本差动式电容检测微机械陀螺仪的结构特点并结合自激振荡原理，设计了交流增益控制的闭环驱动电路和基于相敏解调的角速度提取电路，对电路的重要参数进行了仿真分析和电路实验，为实现陀螺效应检测电路的可行性提供方案依据。

**关键词：**电容式陀螺仪；差动检测；深刻蚀；自激振荡电路

厦门大学博硕士学位论文摘要库



## Abstract

Micromachined gyroscope has become an important development direction of the gyroscope because of its advantages such as small size, low cost, long lifetime. Currently the research focus home and abroad are concentrated in the development of capacitive micromachined gyroscope. Due to the errors in fabrication process and the design of the structural, capacitive micromachined gyroscope is vulnerable to the mechanical coupling and the axial acceleration. The detection capacitance is not good enough and the sensitivity is low too. Regard of these factors, a differential capacitive silicon micromachined gyroscope is presented in this thesis. An interface circuit is designed and simulated too. The thesis follows in the guidelines:

1) A differential capacitive silicon micromachined gyroscope is designed. Its drive and sense comb capacitance and beam are analyzed. What's more, the drive and sense modes are analyzed through finite element simulation.

2) The fabrication of the gyroscope was accomplished. Group experiments on the ICP etching process of comb structural were carried out. In the experiments, the relations between etching conditions and CD loss of the comb are focally discussed. The CD loss of the comb is finally reduced from  $3.47\mu\text{m}$  to  $1.34\mu\text{m}$ .

3) Open-loop vibration test for the gyroscope was operated. And the amplitude-frequency characteristic curve was obtained. From the curves, we calculated the resonant frequencies and corresponding Q factors.

4) Finite element simulation and theoretical analysis were carried to obtain the relationship between the resonant frequencies and the beam cross-section angle. The analysis above can provide parameters basis for the structural design and optimization in fabrication process.

5) An AC automatic gain control circuit (AGC) for the closed-loop control and angular rate signal detection circuit based on phase demodulation were designed.

Simulation and experiment were implemented to definite key parameters in the circuit. These work can be basis for the realization and feasibility of the circuits' validation.

**Key Words:** capacitive gyroscope; differential detection; high aspect ratio etching; automatic gain control circuit

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要 .....	I
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 课题背景与意义.....	1
1.1.1 硅微机械陀螺仪的国内外发展现状.....	1
1.1.2 典型电容式微机械陀螺仪的结构特点.....	8
1.1.3 论文的研究意义.....	10
1.2 论文的主要研究内容.....	12
<b>第二章 差动式电容微机械陀螺仪的结构设计</b> .....	<b>13</b>
2.1 动力学基础.....	13
2.1.1 微机械陀螺仪的哥氏效应.....	13
2.1.2 工作原理分析.....	14
2.2 结构方案设计及分析.....	18
2.2.1 结构方案设计.....	18
2.2.2 静电梳齿驱动原理.....	20
2.2.3 差分式电容检测原理.....	22
2.2.4 结构梁刚度计算.....	24
2.2.5 结构模态仿真.....	25
2.3 轴向加速度影响分析.....	27
2.3.1 驱动方向加速度影响分析.....	27
2.3.2 检测方向受加速度影响分析.....	28
2.3.3 角速度输入方向受加速度影响分析.....	29
2.4 本章小结.....	29
<b>第三章 差动式微机械陀螺仪的制备工艺</b> .....	<b>31</b>
3.1 微机械陀螺仪制备工艺总体方案.....	31

3.2	微机械陀螺仪加工工艺流程.....	32
3.2.1	硅结构层工艺.....	32
3.2.2	玻璃基底工艺.....	32
3.2.3	硅玻键合组合片工艺.....	34
3.3	差动式微机械陀螺仪硅结构层 ICP 刻蚀原理.....	36
3.3.1	Bosch 硅深槽刻蚀工艺.....	36
3.3.2	影响梳齿结构 Lag 效应和 Notching 效应.....	38
3.4	差动式微机械陀螺仪结构层 ICP 刻蚀实验研究.....	40
3.4.1	结构层 ICP 刻蚀实验研究流程及方法.....	40
3.4.2	分步刻蚀抑制 Lag 效应的作用.....	41
3.4.3	铝保护层在根切效应中实验研究.....	46
3.5	本章小结.....	47
<b>第四章</b>	<b>梁加工误差对谐振频率的影响分析.....</b>	<b>49</b>
4.1	差动式微机械陀螺仪谐振频率测试.....	49
4.2	谐振频率误差分析.....	52
4.3	梁加工误差对谐振频率影响的仿真验证.....	54
4.4	本章小结.....	56
<b>第五章</b>	<b>差动式微机械陀螺仪接口电路设计.....</b>	<b>57</b>
5.1	闭环自激振荡基本条件.....	57
5.2	差动微机械陀螺仪闭环自激振荡电路设计.....	60
5.2.1	闭环自激振荡电路总体设计.....	60
5.2.2	载波发生电路设计.....	61
5.2.3	振幅信号提取电路设计与仿真.....	62
5.2.4	驱动振幅信号解调电路设计与仿真.....	66
5.2.5	驱动信号控制模块设计与仿真.....	71
5.2.6	驱动电压调节模块设计与仿真.....	77
5.2.7	起振条件分析.....	79
5.3	差动式微机械陀螺仪检测电路设计.....	80

5.3.1	检测电路信号分析.....	80
5.3.2	开环检测电路.....	81
5.4	振幅信号提取电路测试.....	82
5.4.1	实验设备.....	82
5.4.2	电路模块测试.....	84
5.5	本章小结.....	86
<b>第六章</b>	<b>结论与展望</b> .....	<b>87</b>
6.1	结论.....	87
6.2	展望.....	88
<b>附录 A:</b>	<b>闭环驱动电路原理图</b> .....	<b>90</b>
<b>附录 B:</b>	<b>开环检测电路原理图</b> .....	<b>91</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>92</b>
<b>致 谢</b>	.....	<b>95</b>
<b>硕士期间科研成果</b>	.....	<b>96</b>

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，把传感和检测单元有机地融合到了一体，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大大缩小。随着 MEMS 技术的成熟，出现了振动式原理的硅微机械陀螺仪。硅微机械陀螺仪的出现，以其体积小、重量轻、功耗低、集成度高、抗过载能力强等优点，受到广泛的关注。微机械陀螺可应用于汽车牵引控制系统、行驶稳定系统、摄像机稳定系统、飞机稳定系统以及军事等领域。

## 1.1 课题背景与意义

### 1.1.1 硅微机械陀螺仪的国内外发展现状

20 世纪 80 年代末，随着微机械加工技术的出现和发展，世界上各个国家大幅开展针对硅微机械振动陀螺仪的研究，其中美国、英国、德国、日本、韩国等在这方面研究水平走在世界的前列。

1988 年，美国 Charles Stark Draper Lab (CSDL) 实验室研制出了世界第一个微机械陀螺仪。如图 1-1 所示，该陀螺由外框架、互相垂直的内外扭转轴以及一个敏感质量块组成。外电极通过位于上下方的电容极板施加交变电场产生静电力矩，引起外框架绕驱动轴产生振动。当系统存在沿 Z 轴的角速度时，内框架及敏感质量块在哥氏力的作用下绕检测轴振动，通过硅片上电容板检测出电容的变化，即可得到系统角速度。该陀螺角速度分辨率为  $4^{\circ}/s$ ，测量范围为  $50-500^{\circ}/s$ <sup>[1]</sup>。

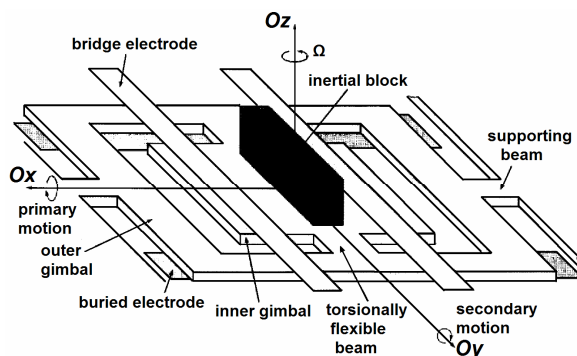


图 1-1 Draper 实验室微机械框架式陀螺仪<sup>[1]</sup>

1993 年, Draper 实验室采用基于硅玻键合和硅溶片工艺的方法制作了第二代音叉式微机械电容式陀螺仪, 如图 1-2 所示。与第一代微机械陀螺仪相比, 该陀螺仪具有结构和工艺简单、且在驱动方向上可以获得较大振动幅度的特点。驱动环上采用了自激振荡电路, 检测环上属于开环检测, 该陀螺仪具有  $1^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$  的分辨率<sup>[2, 3]</sup>。

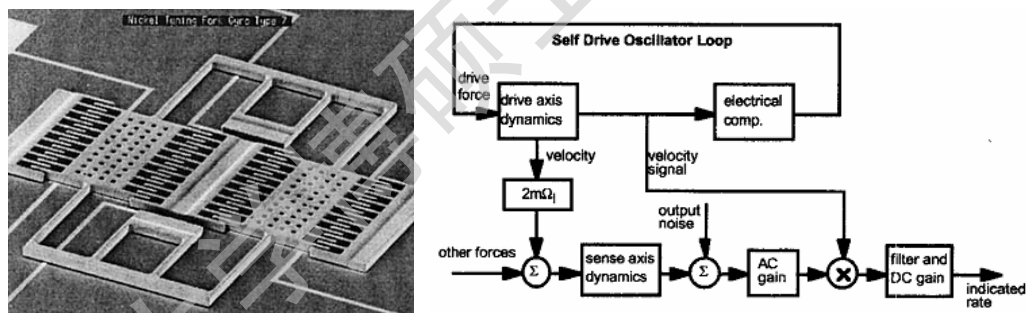


图 1-2 Draper 实验室音叉式微机械陀螺仪<sup>[2, 3]</sup>

1994 年, 美国 Michigan 大学研制了一种振动环式微机械陀螺。如图 1-3 所示, 该陀螺由一个圆环、八个半圆形的弹性支撑梁以及均匀分布在圆环四周的驱动、检测和平衡调整电极构成, 圆环通过中心的锚点固定于衬底上。旁边的静电极通过静电力驱动圆环振动, 当有角速度信号输入, 谐振圆环在检测方向上形变并引起检测电极电容变化。谐振子的材料是多晶硅, 电极材料为单晶硅, 运用 LPCVD 生长氧化层做图案, 并用干法刻蚀制备出结构层。驱动方向上采用锁相环电路控制频率的稳定, 自动增益控制电路控制振动幅度的稳定, 检测方向上采用开环检测电路, 分辨率达  $0.5^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[4]</sup>。



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库