

旋转载体用

硅微机械振动陀螺

XUANZHUAN ZAITI YONG
GUIWEI JIXIE ZHENDONG TUOLUO

王宏伟◎著



吉林大学出版社
JILIN UNIVERSITY PRESS

旋转载体用 硅微机械振动陀螺

XUANZHUAN ZAITI YONG
GUIWEI JIXIE ZHENDONG TUOLUO

王宏伟◎著



图书在版编目 (CIP) 数据

旋转载体用硅微机械振动陀螺 / 王宏伟著. —长春:
吉林大学出版社, 2015. 8
ISBN 978-7-5677-4345-8

I. ①旋… II. ①王… III. ①振动陀螺仪 IV. ① TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 198440 号

书 名: 旋转载体用硅微机械振动陀螺
作 者: 王宏伟 著

责任编辑、责任校对: 赵洪波 刘子贵
吉林大学出版社出版、发行
开本: 710×1000 毫米 1/16
印张: 10 字数: 123 千字
ISBN 978-7-5677-4345-8

封面设计: 中尚图
北京墨阁印刷有限公司 印刷
2015 年 8 月 第 1 版
2015 年 8 月 第 1 次印刷
定价: 32.00 元

版权所有 翻印必究
社址: 长春市明德路 501 号邮编: 130021
发行部电话: 0431-89580026
网址: <http://www.jlup.com.cn>
E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

前 言

本书介绍了研制一种全新的硅微机械陀螺的过程。该陀螺具有设计新颖、结构简单、重量轻、成本低等优点，适用于敏感旋转载体的偏航或俯仰角速率。例如，用于各种口径，旋转速率在 $10\sim 25\text{Hz}$ 范围的火箭弹姿态控制和高速旋转炮弹的姿态控制。

从理论上较全面深入地研究了该硅微机械陀螺的动力学行为，论证了该陀螺的敏感元件结构和封装结构，微机械加工和封装工艺流程，以及电容—电压变换和信号放大电路，并进行了敏感元件和电路的制作，最后完成了包含测试电路的硅微机械陀螺整体制作和测试。

应用陀螺力学理论推导给出了该硅微机械陀螺的数学模型，为旋转体用硅机械陀螺的研制提供了理论依据。用弹性力学理论分析求解了硅振动元件弹性梁的扭转刚度，用流体动力学理论求解了硅振动元件振动的阻尼系数。结合陀螺敏感元件结构，推导给出了电桥输出电压与摆角的关系，进而求得陀螺的灵敏度。

对硅振动元件所受的静电力矩进行了计算，得到和弹性力矩相比静电力很小的结果。对陀螺温度性能进行了计算，得到温度变化引起该陀螺性能变化主要取决于信号处理电路的温度性能。

在硅腐蚀工艺中，选用腐蚀温度为 104°C 的 KOH 溶液进行硅腐蚀，收到了快速腐蚀的良好效果。针对该陀螺敏感元件结构，在加工硅振动元件的工艺中，把整个加工过程分为两个阶段分开进行（即四寸硅片的腐蚀和硅振动元件分离单元的腐蚀），从而简化了工艺难度。

设计和分析了信号提取电路,得到在 $10\sim 25\text{Hz}$ 频率范围内放大倍数等于 47,相位差在 $5.5^\circ\sim 8^\circ$ 范围内的信号处理电路。

对研制得到的陀螺样机进行了常温性能测试,在旋转载体的旋转速率为 12Hz 时,该陀螺的零位漂移在 20min 内为 $0.04^\circ/\text{s}$,测量范围为 $275^\circ/\text{s}$,比例系数为 $28.16\text{ (mV}/^\circ/\text{s)}$,非线性度为 $2.4\%\text{FS}$ 。

目 录

第一章 综述	1
1.1 MEMS 概述	2
1.2 微机械陀螺概述	10
1.3 本书研究内容	20
第二章 旋转载体用硅微机械陀螺的数学模型	23
2.1 硅微机械陀螺工作原理	23
2.2 质量运动的数学模型	24
2.3 误差分析	33
第三章 陀螺力学参数计算	37
3.1 微机械陀螺硅振动元件结构	37
3.2 硅质量的转动惯量	39
3.3 硅振动元件弹性梁的力学分析与计算	41
3.4 硅振动元件的振动阻尼	48
第四章 电容敏感	59
4.1 电容敏感	59
4.2 静电吸合	66
第五章 陀螺力学性能分析	71
5.1 载体旋转角速率对输出信号的影响	71
5.2 固有频率、阻尼比和相位角	75
5.3 温度对阻尼系数的影响	77

5.4	有限元分析和仿真	80
第六章	信号检测电路	87
6.1	电路组成	87
6.2	电路分析	91
6.3	电路的温度误差	99
第七章	硅振动元件制作工艺	107
7.1	湿法腐蚀	107
7.2	硅振动元件加工工艺流程	109
7.3	工艺详细步骤	110
第八章	陀螺部件的制作及整体封装	121
8.1	陀螺结构组成	121
8.2	陶瓷极板的制作	124
8.3	“三明治”敏感元件的粘接	129
8.4	敏感元件与外壳底座的粘接及电极引线的焊接	131
8.5	外壳底座与外壳盖的粘接	132
8.6	外壳的封接	133
第九章	陀螺性能测试	137
9.1	陀螺常温性能的测试	137
9.2	理论计算与实验结果比较	141
9.3	理论计算与实验结果的误差分析	142
参考文献		147

第一章 综述

陀螺是用来测量运动物体的方位和转动角速度的传感器，它是惯性传感器中一个重要的类别，它和加速度计构成的惯性测量单元可以测量运动物体的运动状态。

20 世纪 50 年代以前出现了第一代陀螺仪，即框架式陀螺，接着是浮子陀螺、动调陀螺、激光陀螺、光纤陀螺等。无论是机械陀螺，还是激光、光纤陀螺，它们都是由精密加工制造的零件，经过精密装配、调试、检测而成，加工装配费工费时，并且体积大、重量重、功率大、成本高，从而限制了这些陀螺的推广应用。20 世纪 80 年代末、90 年代初，硅微机械陀螺的出现立即引起惯性技术界的高度关注，它正好弥补了上述陀螺的不足。

在过去的四十多年中，IC 的工艺技术一直发展很快。硅工艺技术的不断提高，使得器件的尺寸越来越小，集成电路的集成度得到空前的提高，形成了强大、完善的微电子产业。得益于集成电路工艺技术的进步，人们开始借助 IC 加工技术制作能完成特定功能的微型机械结构，如微型传感器、微型执行器等，于是一个新兴的技术领域——微机械技术，迅速发展起来。

最早的微机械技术产生于二十世纪 70 年代，它用来制作压阻式压力传感器，把硅材料腐蚀后制作成膜片，利用静电键合来实现芯片与玻璃底座

间的封接。由于这种技术在固态压力传感器的产业上取得了巨大的成功，因而受到高度重视。1982 年 Peterson 发表了一篇关于硅材料的综述文章^[1]，进一步使人们认识到利用硅材料进行微机械加工的重要意义。从上世纪 80 年代开始，欧美及日本等纷纷展开了微机械技术的研究。

早期的开发工作主要集中于使用硅工艺，并成功地开发了一系列微机械器件，例如压力传感器和喷墨打印机的喷嘴。精确地说，它们只是一种器件，而不是 MEMS (Micro-Electron-Mechanical-System)。更完善、更完整意义上的 MEMS 是指集微传感、微执行和信号处理于一体的微型机电系统。它进展相对较慢，因为它的制造过程比较复杂。

MEMS 技术是一种典型的多学科交叉的前沿性研究领域，它几乎涉及自然及工程科学的所有领域，如电子技术、机械技术、物理学、化学、生物医学、材料科学、能源科学等^[2]。随着 MEMS 尺寸的缩小，有些宏观的物理特性发生了改变，很多原来的理论基础都会发生变化，如力的尺寸效应、微结构的表面效应、微观摩擦机理等等。另一方面，为了制作各种 MEMS 系统，需要开发许多新的微加工工艺、微装配工艺、微系统的测量等技术。

1.1 MEMS 概述

1.1.1 MEMS 加工技术

MEMS 加工技术主要有三种。第一种是日本的精密加工；第二种是以美国为代表的利用化学腐蚀或集成电路工艺技术对硅材料进行加工，形成硅基 MEMS 器件；第三种是由德国开发的 LIGA (LIGA 是德文

Lithographie—光刻、Galvanoformung—电铸和 Abformung—压铸三个词的缩写) 技术。其中第二种方法与传统 IC 工艺兼容, 可以实现微机械和微电子的系统集成, 而且该方法适合于批量生产, 已经成为目前 MEMS 的主流技术。由于利用 LIGA 技术可以加工各种金属、塑料和陶瓷等材料, 而且利用该技术可以得到高深宽比的精细结构, 它的加工深度可以达到几百微米, 因此 LIGA 技术也是一种比较重要的 MEMS 加工技术。目前微机械加工能力还非常有限, 远不及传统的机械加工技术, 因为由平面掩膜而生成的三维结构无法实现那些由分体加工和组装完成的复杂结构, 所以虽然好多微机械技术都冠以三维加工技术, 但没有一种技术是真正三维的。

硅微机械加工工艺有很多种, 传统上将其分为体硅加工 (bulk micromachining) 工艺和表面硅加工 (surface micromachining) 工艺两种。体硅加工工艺是直接对体材料 (通常是单晶硅基片) 进行加工制作出准三维结构, 包括各向同性腐蚀、各向异性腐蚀、腐蚀终止控制技术、静电键合等。表面微机械加工工艺的加工对象一般不是体材料本身, 而是单晶硅衬底上沉积或生长的薄膜材料, 如多晶硅、氮化硅、二氧化硅等。通过对这些薄膜材料的平面加工, 堆叠出所需要的微结构。

体硅加工工艺适合于力敏器件的制作, 因为由此得到的器件的力学性能比较完美, 有利于实现高测量精度。压阻式压力传感器正是在该技术下实现了产业化; 另外, 体硅加工也适用于惯性器件的制作, 如加速度传感器中大质量块的形成, 有利于提高检测信号。体加工的缺点是在与 IC 工艺的兼容方面不理想, 在信号处理复杂、易受外界干扰从而需要与接口电路集成的场合不占优势。

表面微机械加工最大的优点是集成电路工艺兼容性好, 易于实现微结构与信号处理电路的单片集成, 形成规模化生产。利用表面微机械加工

工艺可以制作微桥、微腔、微马达和梳状静电驱动式微机械陀螺等，其可动结构的悬空一般采用牺牲层腐蚀释放的方法实现。1982 年美国 U. C. Berkeley 用表面牺牲层技术成功研制出微型静电马达，使 MEMS 进入新纪元^[3]，如图 1.1 所示。20 世纪 90 年代由 ADI 公司推出的与信号处理电路单片集成的微加速度传感器 ADXL-50^[4]更使人们振奋。

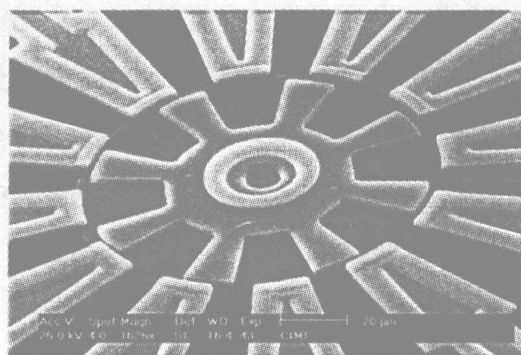


图 1.1 微型静电马达

表面微机械加工的缺点是其较多地受到沉积薄膜材料特性的影响，许多技术上的问题如多晶硅等薄膜材料生长过程中引入的残余应力，牺牲层去除后可动结构与衬底的黏附等，都亟待解决。

由于当前硅微机械加工工艺飞速发展，不断有新的工艺方法出现，许多工艺方法兼具体加工和表面加工的特点，很难给予确切的分类，如 Robert Bosch 公司采用体—表面混合微机械工艺制作的陀螺利用了两者的优点，实现了产业化生产^[5]。

下面介绍一些主要的单项工艺。

(1) 湿法腐蚀

硅的湿法腐蚀分为各向同性腐蚀和各向异性腐蚀。各向同性腐蚀是指

对硅的各个晶面的腐蚀速率相等，所用腐蚀液如 HNA (HF , HNO_3 和冰醋酸混合溶液) 等；各向异性腐蚀是指对硅的不同晶面腐蚀速率不同的腐蚀技术，它分无机和有机两种腐蚀液，有机腐蚀剂有 EPW 溶液 (乙二胺、邻苯二酚和水混合溶液)，四甲基氢氧化铵 (TMAH) 和联氨等，无机腐蚀剂有 KOH , NaOH , LiOH , CsOH 和 NH_4OH 等。

各向同性腐蚀液可用于圆孔、针尖等结构的制作，也可利用它对不同浓度掺杂的硅的腐蚀速度不同 (只腐蚀重掺杂硅而不腐蚀轻掺杂硅) 的性质，通过控制掺杂剖面 and 自停止腐蚀来实现微机械结构的加工。各向异性腐蚀是 MEMS 工艺中主要的加工工序，通常 $\{111\}$ 面腐蚀最慢，与 $\{100\}$ 面的腐蚀速度比可达 $1:100$ ；另外，EPW 和 KOH 对浓硼掺杂的硅的腐蚀速率也很慢。因此可以利用各向异性腐蚀和掺杂浓度选择腐蚀的特点将硅片加工成所需的微机械结构。

(2) 干法刻蚀

20 世纪 90 年代中期，ICP (电感耦合等离子体) 的出现，促进了体硅工艺快速发展，图 1.2 为利用 STS 公司生产的 ICP 刻蚀设备刻蚀出的高深宽比的硅槽，可以看出，得到的硅槽的侧壁垂直度相当好。该技术现在已被广泛用于复杂的微机械结构的加工，如加速度计和陀螺等。该方法与化学腐蚀相比可以更精确地控制结构的尺寸，得到的机械结构的厚度也比较大，保证了器件的灵敏度。但采用该方法一般仍需用到与集成电路不完全兼容的键合和减薄工艺。

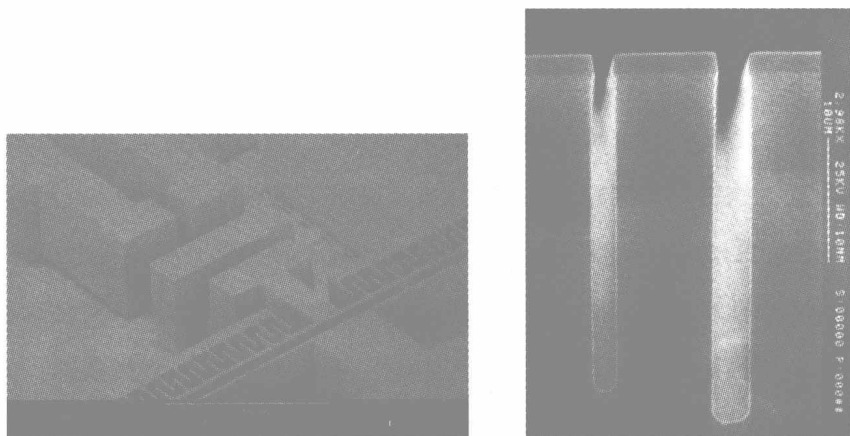


图 1.2 STS 公司生产的 ICP 刻蚀设备所刻出的高深宽比硅槽 SEM 照片

还有一种是反应离子刻蚀 (RIE)，它是利用低压 ($10^{-4} \sim 1$ Torr) 放电所产生的离子、电子等组成的部分离化气体及自由原子团与固体表面发生物理、化学作用。

(3) 键合

键合是指不利用任何黏合剂，只是通过化学键和物理作用将硅片与硅片、硅片与玻璃或其他材料紧密地结合起来的方法。键合的主要方法有静电键合和热键合两种。

静电键合是 Wallis 和 Pomerantz 1969 年提出的。它是把金属、合金、半导体与玻璃键合在一起。其基本原理是玻璃在一定温度下软化，行为类似电解质，在外加电压下，正离子 (Na^+) 向阴极漂移，在阳极形成空间电荷区，外加电压落于空间电荷区，玻璃与硅发生化学反应，形成化学键 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 。

硅片与硅片键合属于热键合，不需要外加电压。它是将硅片表面经过一定的化学处理，使表面形成 OH^- 键，然后将两个硅片紧密贴合在一起，经高温处理后，硅片之间直接键合在一起。

键合往往与其他手段结合使用，它可以实现“硅—玻璃”结构的一体化，又可以对微结构进行支撑和保护，实现机械结构之间或机械结构与电路之间的电学连接等。

1.1.2 MEMS 器件和市场情况

由于 MEMS 器件和系统具有体积小、重量轻、功耗低、成本低、可靠性高、性能优异、功能强大、可以批量生产等传统传感器无法比拟的优点，MEMS 在航空、航天、汽车、生物医学、环境监控、军事，以及几乎人们接触到的所有领域中都有着十分广阔的应用前景。MEMS 器件的种类极为繁杂，市场特别分散，全球 MEMS 产品大约有 130 多种^[6]，这些产品包括：

- (a) 微传感器（机械类、磁学类、热学类、化学类、生物学类等等）；
- (b) 微执行器（微马达、微齿轮、微泵、微阀门、微喷射器、微扬声器、微谐振器等）；
- (c) 微机械光学器件（微镜阵列、微光扫描器、微光阀、微斩光器、微干涉仪、微光开关、微可变焦透镜、微外腔激光器、光编码器等）；
- (d) 真空微电子器件（场发射显示器、场发射照明器件等）。

MEMS 产业的蓬勃发展在近 10 年，最近的调查报告显示全球有 368 家 MEMS 公司提供 MEMS 器件的生产和销售服务^[7]。

图 1.3 是全球生产 MEMS 产品的份额图^[6]。从图中可以看出，大部分 MEMS 公司分布在北美（41%），欧洲占 38%，亚洲占 21%。在欧洲，德国占全球总量 10%，法国占 6%，英国占 4%，瑞士占 4%，斯堪的纳维亚占 6%，比利时、荷兰、卢森堡三国占 5%，其他欧洲国家占 3%。在亚洲，日本占全球总量 12%，其他亚洲地区，如中国台湾、新加坡、韩国和

中国大陆等总共占 9%。不像半导体工业是由少数几家大公司垄断市场，MEMS 产业是由许多中小公司共同享有市场，在 368 家公司当中，几乎有 200 家公司，他们的职员人数在 1~10 人^[6]。大部分 MEMS 产品出自美国，其中大约 40% 的微机械加工公司是从 1995 年到 2001 年投资的，在后三年内，新投资的公司每年以 10% 的速度增长，到 2001 年 MEMS 产业的员工人数已增加到 1985 年的 30 倍^[8]。

欧洲 MEMS 产业是全球 MEMS 产业的重要组成部分，由许多中小公司构成，它们生产了种类繁多的微器件和微系统。亚洲的发展很快，调查显示，仅中国台湾就有 62 家与 MEMS 有关的公司，这些公司大部分是新成立的，总的投资为 574000000 美元^[9]。在中国大陆还没有和 MEMS 产业有关的资料可报道。

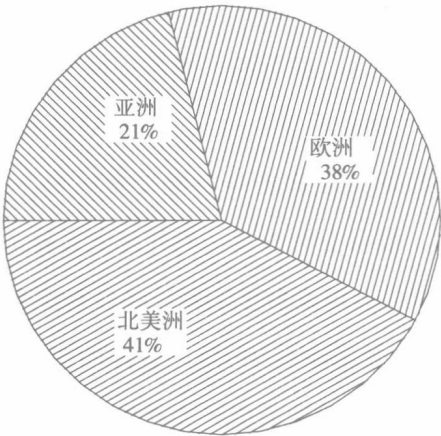


图 1.3 全球 368 家 MEMS 公司的分布

虽然目前 MEMS 的市场还比较小，但 MEMS 的长期市场是在稳步发展的。图 1.4 为全球范围 MEMS 产品从 1996 年到 2003 年的销售估计情况，图中微流量器件的增加速度最快，压力传感器居于第二，惯性测量器

件发展相对比较平稳。整体趋势是逐年增加的。

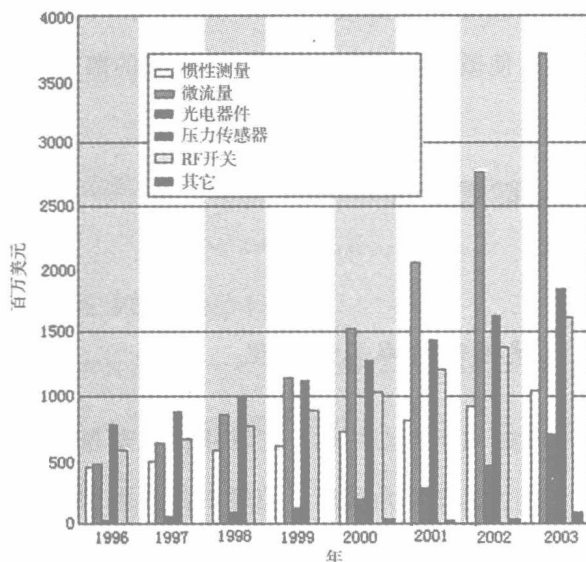


图 1.4 全球 MEMS 市场的销售情况

1.1.3 MEMS 的发展方向

MEMS 器件的延伸是自己能动作的微机器，如微型飞机、微型汽车和微型潜水艇等。它们绝不是日常产品的小型化、微型化缩尺的产物，而是芯片级的集成机械。

微机器的发展，首先需要有适用的微传感器，另外还需要具有与遥控操作系统通信的能力，特别是对那些工作于人体体内的微机器来说，无线通信和遥控能力尤为重要。其次，还需要解决另一个重要的技术难题，就是要保证微机器在空间运动时能获得足够的能量，必须开发合理的、微型化的能源供应装置。如果希望进一步利用微机器的功能，例如清除人体血管中的血液凝块，那么对能源的要求会更多、更高，应达到保证机器正

常、可靠运行的水准。

开发实用微机器的道路还很长，也较艰巨，但 MEMS 的研制开发工作和已取得的成果已使微机器的发展有了一个美好的前景。

1.2 微机械陀螺概述

1.2.1 微机械振动陀螺工作原理

通常的微机械陀螺属于振动陀螺，它利用振动质量在载体旋转时所产生的哥氏（coriolis）力来敏感角速度。陀螺中高频振动的机械结构叫驱动部分，其振动模态称第一模态或主模态；当载体旋转时，哥氏力作用引发敏感模态（也叫第二模态或次模态）。振动式陀螺可用图 1.5 所示的简化模

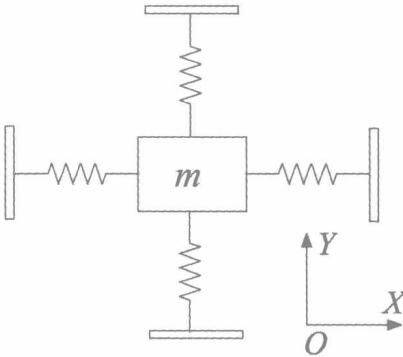


图 1.5 振动式陀螺的模型

型进行分析。图中为有两个振动模式的振动系统，质量 m 沿 X 轴方向驱动，敏感振动沿 Y 轴方向。工作时，激励质量 m 沿 X 轴振动，激励频率为 ω_d ，幅度为 A_d ，则质量 m 沿 X 轴振动位移为