

学校编码：10384
学号：200129002

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学
硕 士 学 位 论 文

微机械隧道陀螺仪悬臂梁的
微电铸工艺实验研究

Experimental Research on Micro-electroforming for
Fabricating Cantilever Used in Micro-machined
Tunneling Groscope

王明亮

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：2004 年 5 月

论文答辩时间：2004 年 6 月

学位授予日期：2004 年 月

答辩委员会主席：_____

评 阅 人：_____

2004 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文,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的其他个人或集体的研究成果,均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人(签名):

2004年5月 日

摘 要

悬臂梁式微机械隧道陀螺仪是一种以悬臂梁作为换能构件，以电子隧道效应作为输出敏感方式的高精度和高灵敏度的角振动传感器，解决了传统微机械陀螺仪因尺寸减小而导致的灵敏度降低的缺点。加工工艺是制约其产业化的关键。悬臂梁是其核心构件，它将输入的角度速度转为梁的振动位移，为了达到高的响应频率和输出，悬臂梁应达到一定的厚度和尺寸精度，这给悬臂梁的制作带来一定的难度。本文利用近紫外线厚胶光刻和微电铸的方法实现悬臂梁的制作，主要的研究工作包含如下几个部分：

- 根据微机械隧道陀螺仪的工作原理和悬臂梁的结构特点，分析制作要求和工艺难点；查阅资料了解当前主要的 MEMS 加工工艺，特别是三维结构的加工，选择微电铸方法加工悬臂梁；
- 基于所设计悬臂梁的制作工艺，结合已完成微尖的加工工艺，设计微机械隧道陀螺仪完整的加工工艺流程；设计与工艺流程配套的掩模图形；制作实验用板，并用大量实验提供具体工艺参数；
- 实验分析牺牲层的制作工艺，用 BP212 制作 2mm 厚、高平整性的牺牲层；实验分析悬臂梁微电铸模的制作工艺，用 AZP4620 制作出带有垂直侧壁且厚度满足要求的电铸模；
- 分析微电铸工艺条件对电铸的作用方式；搭建一套电铸平台，实验分析电铸液成分主要是添加剂的作用；实验分析各种影响电铸层质量的因素，针对电铸层厚度不均匀等问题提出了在阴极前放置不锈钢网等介电材料、降低电流密度等改进措施；尝试使用脉冲电流作为电铸电源提高了电铸层质量和均匀性。

关键词：微机械隧道陀螺仪 悬臂梁 微电铸

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 fabrication problem is the key issue impeding its commercialization. The cantilever is the critical component of the gyroscope, which transduces the angular rate to the displacement of itself. In order to acquire board response frequency and high output, the thickness and the size of cantilever is demanding, which is a challenge for fabrication. In this paper, UV-lithography in thick photoresist and microelectroforming are used to fabricate the cantilever, the main works are as follows:

- Analyze the main obstacles in the fabrication basing on the working principle of micro-machined tunneling gyroscope and the structure specialty of cantilever. Refer literatures, compare the popular MEMS fabrication technology of the 3-D structure and choose a technology used in the cantilever fabrication.
- Design the fabrication flow of the device basing on the selected technology for cantilever and the acquired parameters for micro-tip. Design the masks for the fabrication flow. Bring out the experimental mask and do a large mount experiments to trace out the parameters of the flow.
- Make out $2\mu m$ sacrificial layers with uniform surface by BP212 and microelectroforming molds with vertical sidewall and satisfied thickness.
- Set up a set of microelectroforming equipments and analyze the effect of

electroforming solution specially the additives by experiments. Experimentally analyze the issues affect microelectroforming and improve the uniformity of electroformed layer by putting a stainless net close to cathode and reducing the current density. Attempt to improve the property and the uniformity of electroformed layer by using pulse current in electroforming.

Key word: micro-machined tunneling gyroscope, cantilever, microelectroforming

目 录

第 1 章 前 言	1
1.1 课题背景	1
1.2 微机械隧道陀螺仪的结构	2
1.2.1 工作原理	2
1.2.2 结构方案	3
1.2.3 结构要求	6
1.3 制作微机械隧道陀螺仪所面临的问题	7
1.4 微结构三维制作工艺的研究现状	8
1.5 本文主要内容	10
第 2 章 工艺流程的设计	11
2.1 设计思想和几点说明	11
2.2 工艺流程	12
2.3 掩模板的设计与制作	20
2.3.1 掩模图形的设计	20
2.3.2 实验用板的设计与制作	22
2.4 工艺实验的研究方案	26
2.5 本章小结	29
第 3 章 微电铸模的制作	30
3.1 光刻	30
3.1.1 光刻的基本原理	30
3.1.2 光刻的基本流程	32
3.2 牺牲层的制作	34
3.2.1 制作工艺	35
3.2.2 牺牲层的厚度和平整性	36

3.3 悬臂梁微电铸模的制作.....	38
3.3.1 制作工艺.....	39
3.3.2 结论与分析.....	41
3.4 本章小结.....	45
第 4 章 微电铸工艺.....	46
4.1 微电铸的基本原理.....	46
4.1.1 基本过程.....	46
4.1.2 微电铸液成分的传输.....	48
4.2 微电铸平台的搭建.....	50
4.3 微电铸中常见问题.....	51
4.3.1 悬臂梁材料和晶种层材料的选择.....	51
4.3.2 电铸液成分的实验研究.....	53
4.3.3 影响铸层晶体质量的几个相关因素.....	59
4.4 铸层均匀性的研究.....	61
4.5 脉冲电铸.....	65
4.6 制作实例.....	67
4.6.1 悬臂梁和电极.....	67
4.6.2 微尖.....	69
4.6.3 其他微构件.....	70
4.7 本章小结.....	71
第 5 章 总结与展望.....	72
5.1 总结.....	72
5.2 展望.....	72
参考文献.....	74
致 谢.....	82

Index

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Structure of Micro-machined Tunneling Gyroscope	2
1.2.1 Mechanism.....	2
1.2.2 Structure Layout.....	3
1.2.3 Structure Specialty.....	6
1.3 Issues in Fabrication	7
1.4 Status of 3-D Structure Fabrication Technologies	8
1.5 Paper Skelton	10
Chapter 2 Fabrication Flow	11
2.1 Design Methodology	11
2.2 Fabrication Flow	12
2.3 Design of Masks	20
2.3.1 Layout of Masks	20
2.3.2 Design of Experimental Mask	22
2.4 Experiment Methodology	26
2.5 Conclusion	29
Chapter 3 Microelectroforming mold	30
3.1 Lithography	30
3.1.1 Mechanism.....	30
3.1.2 Process	32
3.2 Sacrificial Layer	34
3.2.1 Fabrication Parameters.....	35
3.2.2 Thickness and Uniformity.....	36
3.3 Microelectroforming mold of cantilever	38
3.3.1 Fabrication Parameters.....	39
3.3.2 Result and Discussion.....	41

3.4 Conclusion	45
Chapter 4 Microelectroforming	46
4.1 Principal	46
4.1.1 Mechanism	46
4.1.2 Transportation of Ingredients	48
4.2 Set up of Microelectroforming Equipments	50
4.3 Issues in Microelectroforming	51
4.3.1 Cantilever Material and Seed layer	51
4.3.2 Recipe of Solution	53
4.3.3 Microelectroforming Conditions	59
4.4 Uniformity	61
4.5 Microelectroforming with Pulse Current	65
4.6 Fabrication Exaples	67
4.6.1 Cantilevers and Electrodes	67
4.6.2 Micro-tips	69
4.6.3 Other Micro-structures	70
4.7 Conlusion	71
Chapter 5 Summary and Recommendation	72
5.1 Summary	72
5.2 Recommendation	72
Reference	74
Acknowledgement	82

第 1 章 前 言

1.1 课题背景

微陀螺是一种主要的微惯性器件，也是一种典型的微机电系统，是基于微电子技术和微制造技术，结合陀螺理论而发展起来的，已成为惯性陀螺的主流。从上世纪 90 年代开始，随着微电子技术的提高和微制造技术的丰富，微机电系统的实现方式多样化，微陀螺的种类也不断增多。按驱动方式可分为静电驱动式、电磁驱动式和压电驱动式；按检测方式可分为电容检测式、压电检测式和隧道电流检测式等^{[1]-[7]}。

微机械振动陀螺仪利用单晶或多晶硅制成的振动质量，被基座带动旋转时产生 Coriolis 惯性力，带动质量块往复运动。振动的幅度与基座的旋转角速度成正比，从而感测基座的角速度。目前，敏感信号的检测主要用平板电容器来进行，惯性质量带动检测电容的动极板往复运动，极板间距发生变化，通过检测电容变化提取角速度信号。但是，由于 Coriolis 力(矩)很微弱，敏感电容器极板间距变化相当微小。相对电容变化 $\Delta C/C$ 约为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ ，要检测到如此微小的变化显然相当困难。另外，传感器中的误差源通常都远大于所要检测的变化量，几乎淹没了有用信号。如果不能采取有效措施减小这些误差源，根本无法检测到真正的输入角速度。因此，如何获得尺寸微小、精度高、灵敏度高的微机械陀螺，一直是各国研究者希望解决的问题^[8]。

当一对电极非常接近时，将产生电子隧道效应。隧道电流对电极间的位移变化极其敏感。对于 $\Phi = 1eV$ 的典型势垒高度，隧道电极间距 x 每减小 $0.23nm$ 时，隧道电流增加一个数量级。电子隧道电流对位移的变化有极高的灵敏度。另外，由于发生隧道效应只需隧道两电极表面一个金属原子，

因此其灵敏度不随横向尺寸的减小而降低。电子隧道的这两个显著特点正好解决了传统的位移型传感器小型化带来的问题。它作为灵敏的位移型传感器被用在许多微传感器和微执行器之中。美国喷气推进实验室(JPL)、斯坦福大学、休斯研究所等高校和研究机构相继进行了多种隧道传感器的研究。现已研制出红外探测器、加速度计、磁强计、压力传感器、地震仪等多种微机械电子隧道传感器^{[9]-[14]}。

目前国内外对利用隧道效应的微机械隧道陀螺仪的研制开发工作相对较少。在国外, Hughes Research Laboratories(HRL)于 2000 年在 Sensors and Actuators 发表一篇报道^[15];在国内,东南大学仪器科学与工程系于 1999 年在《传感器技术学报》^[16]和 2000 年在《中国惯性技术学报》^[17]上发表了两篇文章,提出将微机械振动陀螺仪与电子隧道效应结合的设想和器件结构设计方案,但是并没有实际器件的制作报道。

本课题组于 2000 年 6 月提出一种新的微机械隧道陀螺仪的结构方案^[8]。在此之前,课题组的其他成员已经对微机械隧道陀螺仪进行了结构设计与分析,提出用悬臂梁作为换能机构,将隧道效应应用于微机械陀螺仪中。同时展开了器件制作工艺的研究,已完成了陀螺仪的关键构件之一——微尖的制作。本文的主要任务是接着完成另一关键构件——悬臂梁的制作。

1.2 微机械隧道陀螺仪的结构特点

1.2.1 工作原理

如图 1-1 所示:所设计微机械隧道陀螺仪由悬臂梁、控制电极、驱动电极、微尖和挡板组成。在陀螺开始工作之前,首先通过控制电极加上控制电压将悬臂梁下拉到与微尖的间距处于能够产生隧道电流的工作范围的位置,并在微尖处产生隧道电流;接着通过在驱动电极两侧加上直流偏压和相位相反的交流偏压使悬臂梁的末端沿 Y 方向产生振动,这时陀螺处于工

作状态，当敏感到绕 X 方向的角速度时，由于 Coriolis 效应，梁将在 Z 方向产生振动，从而引起隧道电流变化；在检测电路得到微小电流变化同时将这种变化趋势通过反馈控制电路在控制电极上加上反向变化的电压使隧道间距处于平衡状态，最后反向电压即反应角速度的变化。

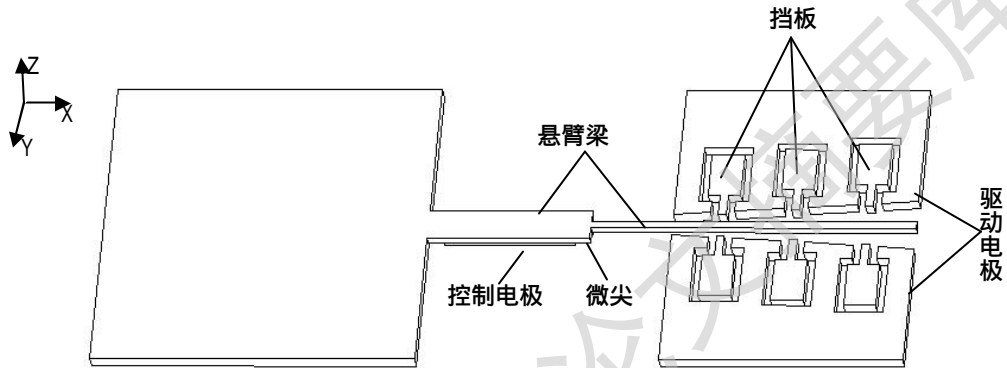


图 1-1 微机械隧道陀螺仪的结构

1.2.2 结构方案

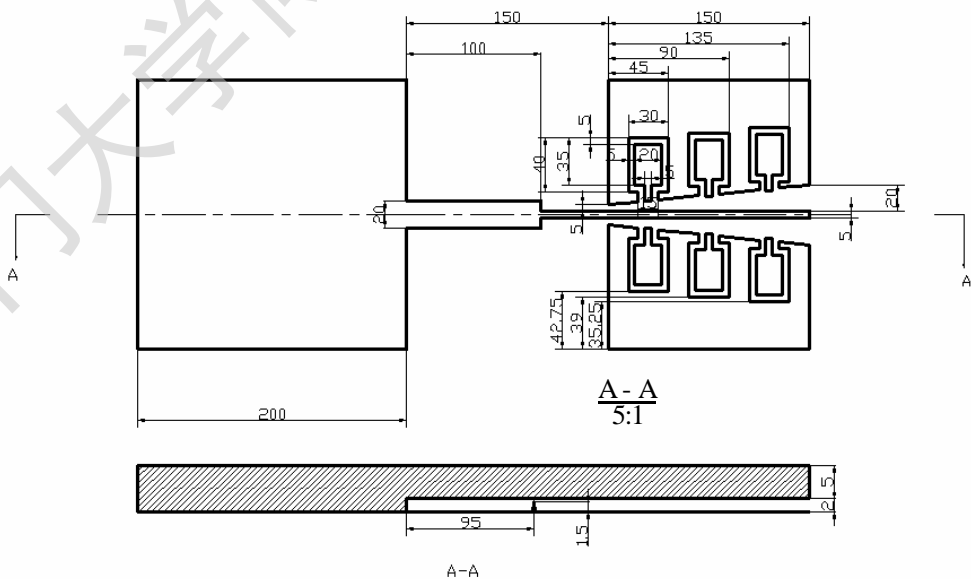


图 1-2 微机械隧道陀螺仪具体尺寸

图 1-2 是微机械隧道陀螺仪的一种实施方案的具体尺寸（为了使视图可视性较强，对 A-A 剖面图的纵轴放大五倍）。采用这种结构有以下优点^{[3][18][19]}：

- (1) 灵敏度大大提高。前段梁的截面是 $5\text{mm} \times \text{mm}$ ，这使得梁的 Y 方向的自然频率和 Z 方向自然频率很接近。当采用 Y 方向的自然频率作为驱动频率时，在 Coriolis 作用下将在 Z 方向产生振动频率和自然频率接近的振动，引起共振，这将使得梁在 Z 方面的位移输出大大提高，灵敏度大大提高。
- (2) 降低 Y 方向的运动耦合到 Z 方向的位移，提高检测的精确性。由于隧道电流对隧道距离的变化非常敏感，隧道距离变化 0.23nm 引起的隧道电流的变化在一个数量级以上。当梁发生沿 Y 方向的位移时，由于梁对应硅尖的地方的表面粗糙会引起隧道电流的变化。后段梁 $20\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的横截面设计使得梁的沿 Y 方向的刚度大大提高，而在 Z 方向保持较低的刚度；这样既不影响它的灵敏度，也克服了由于横向位移带来的误差。
- (3) 结构紧凑，只需较低的偏置电压就可使器件进入工作状态。硅尖的高度为 1.5mm ，而基底控制电极与梁的间距为 2mm ，所以只需要在驱动电极加上一个较小偏压使悬臂梁在微尖对应的位置向下位移 0.5mm 就可进入检测状态。
- (4) 自保护功能。挡板可防止在驱动电极上产生的瞬间高压使梁与驱动电极接触短路，造成器件损坏。

图 1-3 是在方案一的基础上改变驱动方式而设计出来一种新的实施方案图。方案一是采用平板电容的驱动方式，方案二是采用静电梳状驱动方式。以下分析这两种驱动方式的区别。

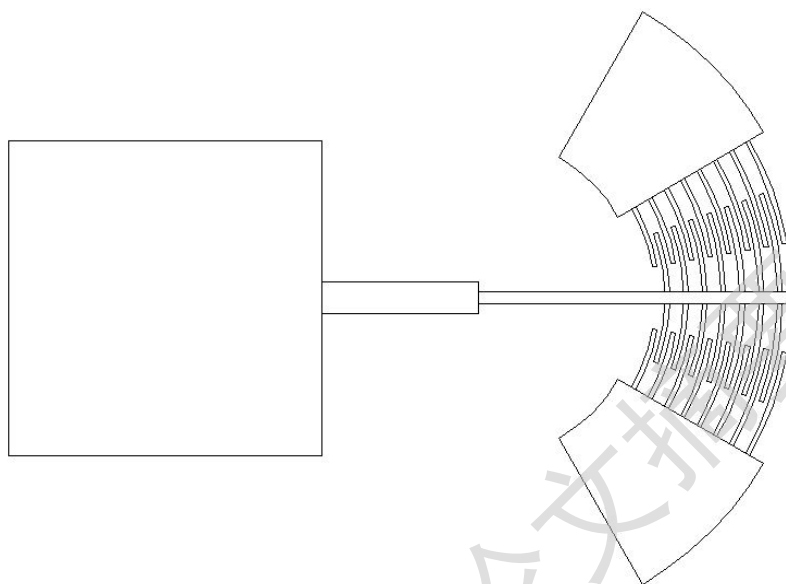


图 1-3 静电梳状微机械隧道陀螺仪结构

在忽略边缘效应下，两极板在驱动电压 U_D 的作用下产生的作用力 F 为：^[20]

$$F = \frac{dw}{dx} = \frac{1}{2} U_D^2 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1.1)$$

其中， w 为极板间距所存储能量， C 为极板电容， x 为极板间距；对于平板驱动方式： $C_{plane} = \frac{eA}{x}$ ，其中 A 为平板面积，代入式 1.1 得：

$$F_{plane} = -\frac{1}{2} \frac{eAU_D^2}{x^2} \quad (1.2)$$

从式 1.2 可以很清楚地看出力与距离、力与电压的关系是非线性的，

要对其进行定量分析是相当复杂的。对于如图 1-4 的梳状驱动：

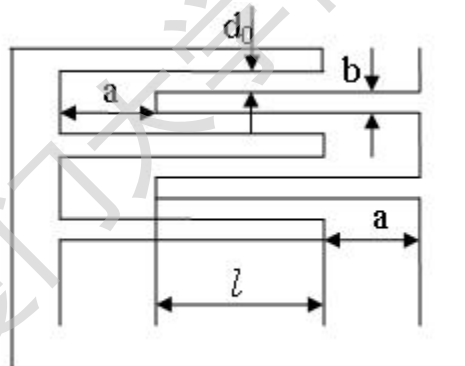


图 1-4 梳状驱动的结构尺寸

$C_{comb} = 2ne \frac{lh}{d_0} + (2n+1)e \frac{bh}{a}$ ，其中 n 为叉指个数， h 为梳齿高度，其他尺寸

如图所示。当 $a \gg d_0$ ， $l \gg h$ 时，可简化为： $C_{comb} \approx 2ne \frac{lh}{d_0}$ ，将其代入式 1.1

得：

$$F_{comb} = ne \frac{h}{d_0} U_D^2 \quad (1.3)$$

可见，静电梳状驱动力与电压的平方成线性关系。在梳状驱动中，电容是通过改变面积来改变的；在平板驱动中，电容的变化是通过改变间距实现的。而电容与面积是成线性关系，与间距成反比关系，这就是梳状驱动的线性关系要明显优于平板驱动的原因。^[21]

综上所述，平板电容驱动结构易引起共振提高灵敏度，但线性度较差。静电梳状驱动结构线性度好，而且从定性分析看，梳状结构的电容较大，驱动力也就大于平板电容，因此所需驱动电压较小。

1.2.3 结构要求

微机械隧道陀螺仪工作时三个主要环节：控制环节、检测环节和驱动环节。

控制环节是通过控制电极和悬臂梁这对水平平板间的静电力实现的，这就要求所加工的控制电极和悬臂梁底面具有较好的平整性。

检测环节是通过检测微尖与悬臂梁之间的隧道电流变化实现的。要产生隧道电流在结构上两个要求：首先，必须使微尖和悬臂梁的间距处在工作范围之内，要达到这项要求主要通过反馈控制实现，但在结构上应对微尖的高度和悬臂梁与基地的间距进行精确控制；其次，对微尖顶部的半径有很高要求，其典型值是在 $100nm$ 的量级^[22]。

驱动环节是通过在驱动电极和悬臂梁这对垂直电容间的静电力实现的，而且悬臂梁在静电力作用下将沿 Y 方向做水平振动，这就要求驱动电极和悬臂梁相对应的侧壁要有良好的垂直度和平整性，若侧壁不垂直则产生的静电力将会有 Z 方向的分力而使悬臂梁在水平方向振动同时也会在竖直方向产生振动。至于悬臂梁的厚度：对于方案一，当悬臂梁高度为 $5\ \mu\text{m}$ 时，由于驱动模态和检测模态的自然频率相接近，容易同时在两个方向上产生共振，提高器件的检测灵敏度。对于方案二，从式 1.3 可以看出，增大悬臂梁厚度即梳状叉齿的高度 h 以及减小叉齿间距 d_0 可以提高静电驱动力。

1.3 制作微机械隧道陀螺仪所面临的问题

从结构特点来看，在加工过程中必须满足三个环节的结构要求。因此在加工过程中将面临如下几个问题：如何把微尖的高度精确控制为 $1.5\ \mu\text{m}$ ？如何把微尖顶部曲率半径控制在 $100\ \text{nm}$ 的量级？悬臂梁的厚度为 $5\ \mu\text{m}$ ，如何制作 $5\ \mu\text{m}$ 的结构层？如何使悬臂梁侧壁垂直平整？结构层还必须承载于 $2\ \mu\text{m}$ 的牺牲层上，采用何种加工工艺来实现这样一个三维结构？

针对第 和 个问题，课题组的王艳华做了大量的研究^[23]，提出利用各项异性腐蚀结合键合技术制作微尖，解决了关键性问题。

第 、 和 个问题是本文要解决的主要内容。在提出具体解决方案之前，应详细分析当前常见的几种三维结构的制作方法及其原理和适用范围，以便根据自身特点和实验条件选择一种合适的方法应用于本课题中悬臂梁的制作。

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库