

微电铸及其在 MEMS 中的应用

吕文龙, 陈义华, 孙道恒*

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 研究了微电铸在 MEMS 结构层制造工艺中的可行性并搭建了微电铸实验系统. 通过对不同 Watts 镍电解液的成分实验得到了一组性能较好的成分配比. 通过晶种层材料的实验得出 Ti-Cu 作为晶种层材料的优点. 利用微电铸的方法制作出微机械隧道陀螺仪中的悬臂梁、挡板、驱动电极等, 得到了一组比较有价值的电铸参数, 并对电铸中存在的问题进行了阐述. 实验结果表明, 采用方波脉冲电铸能够得到晶粒粗细均匀、硬度和应力符合设计要求的悬臂梁等 MEMS 结构.

关键词: 微电铸; 脉冲; 镍; 悬臂梁

中图分类号: TQ 153.4

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2005) Sup-03 16-03

表面微机械加工是制作微电子机械系统(MEMS)的关键技术. 迄今为止, 微机械的制造主要以多晶硅作为结构层, 而以 SiO_2 作为牺牲层. 对其他材料系也进行了简单的研究, 例如, 和 Si_3N_4 结构层在一起时多晶硅作为牺牲层. 在这种表面微细加工工艺中, 结构层厚度的典型值被限定在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 这是因为膜中的残余应力导致制造过程中的机械失效或者由于膜的淀积速度低产生工艺局限引起的. 随着 LIGA(基于 X 射线、光刻、电镀和模塑)以及类 LIGA 工艺的出现, 对高长宽比微细结构的兴趣也随之增加, 这是由于在这些工艺中结构层的淀积是基于金属的电铸, 而电铸具有很高的淀积速度. 金属结构层的使用在很多应用领域都具有吸引力, 包括光学微机械器件用的反射表面、磁驱动器或传感器用的磁性金属、微机械加工线圈和静电驱动器.

另外, 高长宽比结构的厚度比较大, 可增加静电微驱动器中的力或力矩. 目前镀镍、镀铜或者至少含有一种金属的合金是广泛应用的结构金属; 聚酰亚胺、光刻胶、LPCVD、PSG、铬或钛被用作牺牲层来分离结构金属^[1].

1 微电铸的基本原理

1.1 基本过程

微电铸系统主要由电极、电解液和电源组成. 电解液是电铸时金属离子的载体, 是含有金属盐且易于导

电的溶液, 通常包含有其它的添加剂以增强电铸的质量; 电极有阴极和阳极, 阴极与电源的负极相连, 一般是用于电铸微构件的样片, 阳极与电源的正极相连, 一般是与微电铸构件相同材料的金属物.

在电铸槽中进行的反应其实质是氧化还原反应, 但它和一般氧化还原反应有区别, 这类氧化还原反应是在组成电极的金属和溶液的界面上进行的^[2]. 在金属-电解液边界处会产生双层带电层——Helmholtz 层和扩散层. 有很多原因导致这一现象的产生, 一个原因是表面包含很多具有产生双层电荷的均匀的成行排列的分子; 另一个是金属离子的优先吸附, 因此被拒绝的阴离子集聚在阳离子附近形成双层.

1.2 脉冲电铸

脉冲电铸(PEP)是通过脉冲电流对 Helmholtz 平面和扩散层的影响来改善电铸效果, 因为脉冲宽度(即导通时间 T_{on})很短, 峰值电流密度很大, 在 T_{on} 期间靠近阴极处金属离子急剧减少, 但扩散层却来不及长厚就被切断电源. 在脉冲间歇时间(即关断时间 T_{off})里, 阴极表面缺少的金属离子及时由主体溶液得到补充, 扩散层厚度很大程度被减小, 电解液中金属离子的浓度趋于一致. 因此, 脉冲电铸主要起到 3 个效果: 1) 补充了扩散层内金属离子的浓度; 2) 扩散层周期间歇式形成, 从而减薄了扩散层的厚度; 3) 减低了浓度过电位, 从而提高了阴极极限电流密度. 镀层的均匀性受电流密度分布和电解液成分传输的影响. 在脉冲电铸中, 间歇性的通电使得阴极表面的离子浓度能得到缓冲, 大大减小了由于电解液成分传输的不均匀性造成的镀层厚度的差异, 提高了镀层均匀性. 在深槽的电铸中, 同样由于多了扩散时间而脉冲电铸的深镀能力明显优于直流电铸. 在脉冲电铸中, 镀层的晶体要比直流电铸精细很多. 有两个原因: 首先, 在脉冲电铸中, 可以使用

收稿日期: 2005-04-10

基金项目: 福建省自然科学基金(A0110003)和福建省科技计划重点项目(2002H022)资助

作者简介: 吕文龙(1980-), 男, 硕士研究生.

* 通讯作者: sundh@jing.xian.xmu.edu.cn

较高的峰值电流,因而新的晶核生长速度加快;其次,晶核在生长过程中由于 T_{off} 的存在而受到阻碍,减少了外延生长的趋势.在脉冲电铸中有很多参数会影响晶核的形成和它的生长,在本文中主要从以下几个方面考虑:平均电流密度 \bar{I} 、温度 T 、杂质、pH 值、占空比 $T_{\text{on}}:T_{\text{off}}$ 等.

2 实验部分

2.1 微电铸系统的搭建

图 1 是本实验中所搭建的微电铸系统.电源是 SM D-10 数控双脉冲电镀电源,此电源可输出各种参数可调的波形脉冲.恒温磁力搅拌器是 DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,具有从室温到 250 °C 的水浴或油浴恒温加热功能,同时还带有旋转的磁力搅拌功能.电铸槽是用玻璃做的立方体槽.

2.2 晶种层的选择

晶种层在电铸中是作为导电的材料,具有导电和粘结悬臂梁与基底两个作用.因此它要求具有良好的导电性能和粘附能力.为了使镀层的厚度均匀性较好,在晶种层上的电流分布应比较均匀,这就要求晶种层的电阻率通常要低于 $0.5 \Omega \cdot \text{cm}^{[3]}$.由于在电铸完成后还要将光刻胶除去,因此要求各种功能材料如光刻胶等能容易从晶种层上去除.对于不同的微电铸系统,有各种不同的晶种层,如 Cr-Ni 、 Cr-Au 、 Ti 、 Ti-Au 、 Ti-Cu 等.对于 Ti-Cu 系统,光刻胶很容易从铜表面完全去除,而且铜本身是一种良好导电材料.针对铜和镍的选择性腐蚀, HNO_3 对铜的腐蚀速率很快,可高于 10 nm/sec,但是对镍的腐蚀速率也相当快,而且 HNO_3 不能用水进行稀释,因此选用了甲醇对 HNO_3 进行稀释.

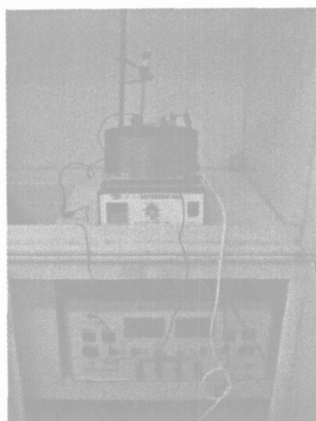


图 1 微电铸系统

Fig.1 Micro-electroforming system

2.3 电解液的配制(Watts 镍电解液)

按照各种组分在电铸过程中所起的作用,可将电解液看成是由主盐、导电盐、缓冲剂、阳极活化物、络合剂、添加剂等组成.本实验得到了一种较好的 Watts 镍电解液的成分配比:硫酸镍(300 g/L)、氯化镍(45 g/L)、硼酸(35 g/L)、糖精(2 g/L)、苯亚磺酸钠(0.2 g/L)、十二烷基硫酸(0.2 g/L)、光亮剂(2 mol/L)、硫酸镁(20 g/L)、酒石酸钾钠(10 g/L)、氯化钠(10 g/L).由此电铸得到的镀层的晶粒不仅带有光泽,且增长稳定,厚度均匀,颗粒细小,无明显针孔现象.

通过对电镀电源提供的几种输出波形的反复实验得到方波脉冲电流既方便调节各种参数,得到的镀层质量也符合设计时的要求,故采用方波脉冲电流进行电铸. T 为脉冲周期, T_{on} 为脉冲宽度(导通时间), T_{off} 为脉冲间歇(关断时间), I_p 为峰值电流, \bar{I} 为平均电流,一般 T_{on} 和 T_{off} 以毫秒计算,而且 $T_{\text{on}}/T_{\text{off}} < 1$.

2.4 微机械隧道陀螺仪中的悬臂梁、挡板、驱动电极的制作

微机械隧道陀螺仪(如图 2)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 Coriol 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的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.其中,悬臂梁、挡板、驱动电极的制作流程见图 3.

2.5 实验结果与分析

实验采用固定几种参数,改变其中一种参数的方法,得到了一组参数值,最后通过优化组合得到了最优的电铸参数:

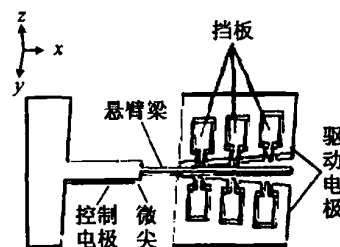


图 2 微机械隧道陀螺仪的结构

Fig.2 The structure diagram of Micro machined tunneling gyroscope

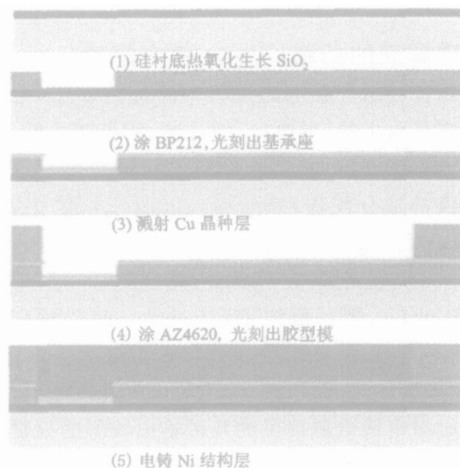


图3 工艺流程图

Fig.3 Flow chart of technics

$\bar{I} = 8 \text{ mA/cm}^2$, $T_{\text{on}}/T_{\text{off}} = 1:5$, $T = 42^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 4.6$, 搅拌速度 = 15 r/min , 双层过滤网过滤. 实验得到了各种不同的镀层(见图4). 其中, 面积最大的基座的镀层厚度最大, 粗梁厚度次之, 细梁厚度最小, 这种彼此厚度不均匀现象主要是由于电铸时的电流密度在不同面积的镀层表面分布不均所致. 实验证明厚度不均匀现象可以通过在保证各镀层表面平整的参数范围内增大占空比、降低电流密度等手段加以抑制. 同时, 列举出一些实验过程中出现的问题, 给读者一些直观的印象, 其中包括搅拌不当造成的镀层不均匀; 电铸时间过长; 占空比选择不当造成的镀层较粗; 晶种层被氧化造成的局部没有镀上等.

3 结 论

本文介绍了微电铸的基本原理, 并阐述了脉冲电铸的特点. 通过悬臂梁等的制作实例, 得到了一些比较

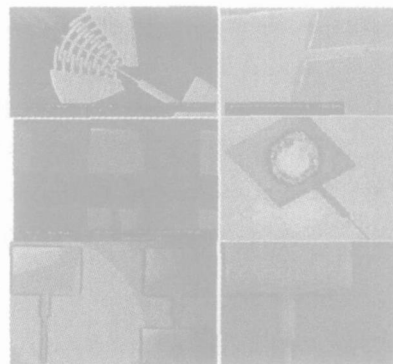


图4 电铸得到的不同镀层

Fig.4 Different plating layers by Micro-electroforming

有价值的实验参数, 特别是得到了一组比较合适的电解液的成分配比. 实验表明, 采用方波脉冲电铸能够得到晶粒粗细均匀、硬度和应力符合设计要求的悬臂梁等 MEMS 结构层, 微电铸在 MEMS 领域拥有美好的前景, 在今后必将发挥越来越重要的作用.

在进行本实验的过程中, 化学系杨防祖老师给予了极大的帮助, 在此特向他表示感谢.

参考文献:

- [1] 周立军. 镍表面微机械加工[J]. 半导体情报, 1997, 4: 55-59.
- [2] Menz W, Mohr J, Paul O, 著. 微系统技术[M]. 王春海, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2003. 7.
- [3] 王明亮. 微机械隧道陀螺悬臂梁的微电铸工艺实验研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2004.
- [4] (美) 科瓦奇 格雷戈里 T A, 著. 微传感器与微执行器全书[M]. 张文栋, 等译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 黄庆安, 编著. 硅微机械加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

Theory and Application of Micro-electroforming in MEMS

LV Wen-long, CHEN Yi-hua, SUN Dao-heng*

(Dept. of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: The feasibility of Micro-electroforming on the fabrication of structural layer in MEMS was researched. An experimental system of Micro-electroforming was established. A appropriate kind of Watts components was found by comparing with several kinds of Watts components. The merit of Ti-Cu crystal seeded layer was found by comparing with other materials. Cantilever, baffle and drive-electrode in Micro-machined tunneling gyroscope were fabricated by Micro-electroforming, and some valuable experimental parameters were obtained. The problems in the process of Micro-electroforming were discussed and solved. Experimental result indicates that cantilever and some else structural layers in MEMS can be fabricated by Micro-electroforming.

Key words: micro-electroforming; impulse; Ni; cantilever