

电化学腐蚀技术 在制作硅谐振式微力传感器中的应用

中国科学院合肥智能机械研究所 孔德义 虞承端 梅涛 陈永 李科 熊小义

一、引言

微力传感器在微量称重、液体表面张力分析及生物体微组织力测量等领域具有广阔的应用前景。我国以前自主研发的微力传感器基本上都是采用半导体应变片和扩散硅制成的压阻式传感器,其主要缺点是漂移较大,要实现高精度测量与长期监测较为困难。而谐振式传感器由于具有频率输出、高稳定性和高分辨率等优点,被看作是力敏传感器的发展趋势之一。国外已研制出力、压力、加速度等多种谐振式固态传感器,其中荷兰 Twente 理工大学研制出一种硅谐振式微力传感器,其量程仅为 0~0.4 牛顿。该传感器的核心敏感元件是一个 $6 \times 0.4 \times 0.02 \text{mm}^3$ 的双端固支谐振硅梁,由各向异性腐蚀技术加工而成。

目前国内的硅谐振式力敏传感器虽然已经能够量产,但其核心敏感元件仍然依赖进口。为开发具有自主知识产权的硅谐振式力敏传感器,我们研制了一种量程和尺寸比文献更小的硅谐振式微力传感器,其核心敏感部分是尺寸为 $0.69 \times 0.08 \times 0.005 \text{mm}^3$ 的谐振硅梁,它采用电化学腐蚀技术加工而成,该技术的优点是能够精确控制谐振硅梁或其他应变硅膜的厚度,并且重复性好。

二、电化学腐蚀技术原理

用于半导体加工的电化学腐蚀技术实质上是加上直流偏置的各向异性腐蚀技术,它早在 1970 年就被提出并用来对硅膜进行减薄。采用的腐蚀剂有 KOH、EPW 和 N_2H_4 等,其中以 KOH 最为常用。

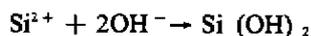
对硅的电化学腐蚀原理图如图一所示。当不加电位时, KOH 溶液中的 N 型硅和 P 型硅被正常腐

蚀;当外加在硅片上的电位逐渐升高并达到某一临界值时,腐蚀停止,即硅片被钝化。在钝化过程中发生的化学反应如下:

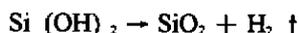
外加在硅片上的电位升高使得硅表面的空穴浓度增加,使表面的硅原子被氧化:



腐蚀液中的 OH^- 被硅表面吸附并与硅发生反应:



中间产物 $\text{Si}(\text{OH})_2$ 进一步分解为 SiO_2 和 H_2 , 即:



在表面生成的 SiO_2 阻止了硅被进一步腐蚀,因而被称为预钝化层。对应的临界电位称为硅的钝化势。若外加电位回落到钝化势以下,硅将继续被腐蚀。钝化势的数值大小与硅的导电类型、电阻率、腐蚀液种类及其浓度有关,即在相同的腐蚀液中, N 型硅和 P 型硅的钝化势通常并不相等。利用这个特点,通过控制外加在硅片上的电位大小可实现对不同导电类型的硅材料的选择腐蚀。如针对图 1 所示情形,当 $\langle 100 \rangle$ 晶向、电阻率为 $5 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 的硅片在温度为 60°C 、浓度为 40% 的 KOH 溶液中腐蚀时, P 型硅的钝化势比 N 型硅高出约 40mV。因此,只要将外加电位调整到 P 型

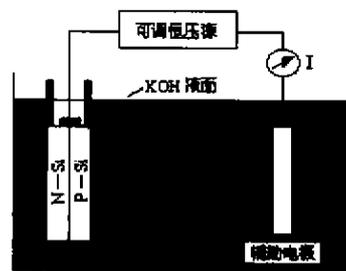


图 1 电化学腐蚀原理图

硅和N型硅的钝化势之间，即高于N型硅的钝化势且低于P型硅的钝化势，则N型硅被钝化而P型硅不断被腐蚀，一直到只剩下N型硅层时腐蚀停止。N型硅层的厚度在进行器件结构设计时确定，并通过在P型硅衬底上采用外延、离子注入、扩散或硅-硅键合技术形成一层导电类型相反的硅层来实现。

图1所示的是两电极电化学腐蚀系统。由于腐蚀液与辅助电极之间的界面势与通过该界面的电流有关，因此硅片相对于腐蚀液的电位难以精确控制，再加上N型硅与P型硅的钝化势通常比较接近，因而经常会出现两者同时被腐蚀或同时被钝化的情形。鉴于两电极电化学系统中存在的问题，在制作硅谐振微力传感器中的敏感元件谐振硅梁时，我们采用了四电极电化学腐蚀系统。

三、硅谐振微力传感器的结构设计和制作

1. 传感器结构设计

在硅谐振微力传感器的结构设计中我们采用

反馈选频放大器构成自激振荡电路，从而检测出硅梁的固有频率。当硅梁受外力作用产生应变时，其固有频率发生变化，由此检测出力的大小。

为提高成品率，我们在E型膜上集成了四对硅梁（横向和纵向各两对），只要有一对甚至一个硅梁完好，整个传感器即能够正常工作。

2. 微谐振硅梁加工

在整个传感器的制作工艺中，对谐振硅梁的加工是一个技术难点。在实验中我们采用了如图三所示的四电极电化学腐蚀系统，除了在溶液中设置一个参比电极外，还在N型硅梁与P型衬底之间施加了一个反向偏置电压。参比电极为恒电位仪连接到P型衬底的工作电极提供了一个稳定的参考电位，确保了P型衬底上所加电位的精确性；反向偏置电压拉开了N型硅梁和P型衬底的电位差，因而在保证P型Si被连续腐蚀的同时，N型硅梁被可靠地钝化。

实验中采用P型<100>晶向硅片，通过低浓度扩磷实现硅梁区域的反型掺杂。硅梁沿<100>晶向布置，采用扩硼工艺在N型硅梁上制作了应变检

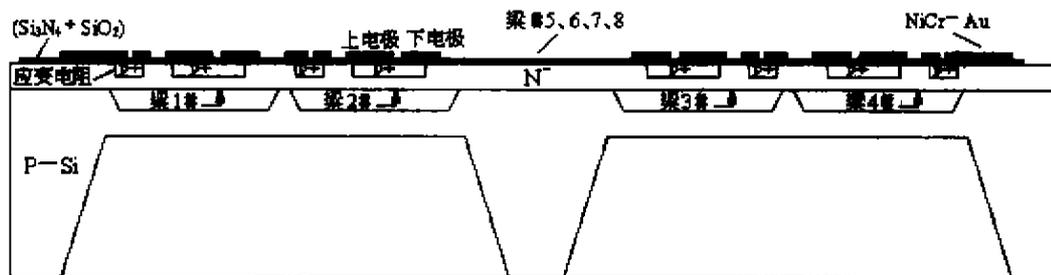


图2 硅谐振微力传感器结构示意图

E型方膜作为一次敏感元件，而谐振硅梁则作为二次敏感元件，由于硅梁不直接与被测介质接触，因而可以提高品质因素、稳定性和可靠性。另外，E型膜具有应力集中作用，灵敏度高，这对于量程为0.1牛顿的微力传感器尤其适合。利用E型膜上存在的正、负应变区，通过在相应位置制作分别受相反应变作用的一对硅梁构成差动输出，可以减小温度变化和安装应力的影响。

传感器的结构如图2所示，在硅梁上制作了位于介电薄膜两侧的上下电极和位于硅梁根部的应变电阻分别进行静电激励和应变检测，它们与正

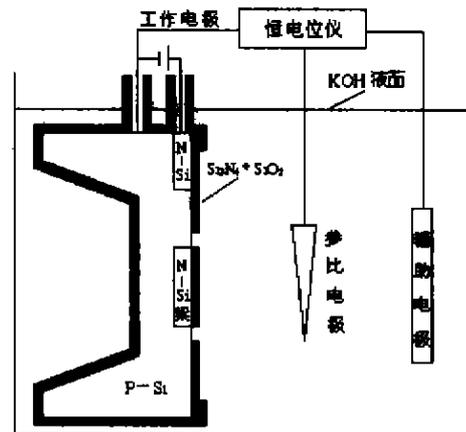


图3 四电极电化学腐蚀系统示意图



图4 采用四电极电化学腐蚀技术加工的谐振硅梁

测电阻和下激励电极。硅片正面的绝缘介质和金属电极由薄膜工艺制作完成。对硅片背面进行各向异性腐蚀得到 E 型膜结构。

进行电化学腐蚀之前，在 N 型硅梁两侧的 P 型硅上光刻出两个直角三角形腐蚀窗口。将恒电位仪的工作电极与 P 型硅衬底粘接，并保持其电位相对于参比电极为 $-1.5V$ 。在 N 型硅梁与

型硅开始暴露在 KOH 腐蚀液中。由于硅梁的横向（沿宽度方向）为 $\langle 100 \rangle$ 晶向，因此梁下的 P 型硅以接近垂直方向的腐蚀速率被腐蚀，直至穿通而使整个硅梁被刻蚀出来。

电化学腐蚀的实验结果如图 4 所示，图中硅梁的尺寸为 $0.69 \times 0.08 \times 0.005 \text{mm}^3$ （长 \times 宽 \times 厚）。实验中采用的 KOH 腐蚀液的浓度为 33%，温度为 75°C 。经过多次实验后我们发现，采用四电极电化学腐蚀技术加工的硅梁精度高，重复性好，成功率接近 100%。

3. 验结果

硅谐振微力传感器的外围电路包括应变检测、

表 1 微力传感器的性能参数

| | |
|------|-----------------------|
| 量程 | 0.1N |
| 分辨率 | 0.001mN |
| 品质因素 | 33.16 |
| 工作温度 | 0~47 $^\circ\text{C}$ |

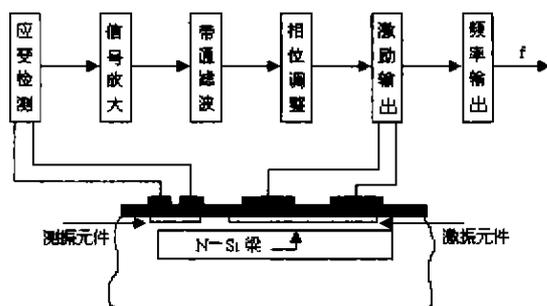


图5 硅谐振微力传感器系统框图

P 型硅衬底之间也加上一个 $1.5V$ 的反向偏置电压，即硅梁与参比电极同电位。腐蚀开始时，由于 P 型硅的开路电位 ($-1.5V$) 低于其钝化电位 (约 $-1.2V$)，因此暴露在两个直角三角形窗口下的 P 型硅被正常腐蚀；N 型硅梁的电位 ($0V$) 大大高于其钝化电位 (约 $-1.3V$)，其表面被钝化。当腐蚀深度达到硅梁的厚度时，位于 N 型硅梁下面的 P

信号放大、带通滤波、相位调整、激励输出和频率输出等部分，它们与传感器芯片配接后可输出与被测微小外力相对应的频率信号。整个传感器的系统框图如图 5 所示。

表 1 给出了我们制作的硅谐振微力传感器的一些性能参数，其量程仅为 0.1 牛顿，分辨率为 1 毫克力，品质因素大于 300 ，工作温度为 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

四、结束语

我们采用四电极电化学腐蚀技术成功地刻蚀出尺寸为 $0.69 \times 0.08 \times 0.005 \text{mm}^3$ （长 \times 宽 \times 厚）的谐振硅梁，在梁上集成了激励和检测元件。该技术加工的硅梁精度高，重复性好。对硅谐振微力传感器的性能测试表明，该硅梁能检测 1 毫克力的变化。这种技术可加工出具有精确厚度的敏感元件如硅膜、硅梁等，因而可用于力、压力、加速度等多种高性能的硅固态传感器的制作。