

硅尖的制备及在传感器技术中的应用*

王艳华, 王明亮, 孙道恒, 马海阳
(厦门大学 机电系, 福建 厦门 361005)

摘要: 介绍了硅尖的制备及其在传感器技术中的应用。硅尖的制备方法可与现代 IC 工艺兼容且易削尖, 故比其它材料微尖更实用。硅尖的应用随着制备工艺的改进与其它相关技术的进步必将得到新的开发。

关键词: 硅尖; 刻蚀; 微加工技术; 传感器

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-9787(2003)06-0058-04

Fabrication and application of silicon tip in sensor technology

WANG Yan-hua, WANG Ming-liang, SUN Dao-heng, MA Hai-yang
(Dept of Mech Ect Engin, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Fabrication of silicon tip is described. Then the application of silicon tip in sensor technology is summarized. The method of fabrication of silicon tip is compatible with modern IC processing, in addition to the silicon tip can be easy to sharp, it is practical than other materials. It is believed that the application of silicon tip would be developed with the improvement of fabrication technology and other correlation technology.

Key words: silicon tip; etch; micromachined technology; sensor

0 引言

微尖是指在平面上刻蚀或淀积加工形成锥、柱状的微三维结构。其材料可使用金属、半导体、金刚石等。根据材料的不同其制作方法也各异。最早的 AFM 是用微小的金刚石颗粒来作为微尖, 直接用手粘附, 其制作难度高、质量差。美国的 HRL 实验室采用溅射一层金属然后光刻极小图形的方法来制备柱状金属尖, 由于受光刻技术的影响, 金属尖的曲率半径有限^[1]。早期场致发射中的微尖是通过在密排的掩模窗口蒸发金属来制备自对准的金属尖而得到的。这种金属尖可以很尖, 但是其高度受到掩模板和底座间距离的限制, 而且当把掩模板移开时尖容易被折断, 所以需要探求新的制作微尖的方法。硅尖以其易控良好的曲率半径, 成熟的微机械加工技术^[2], 再加上由隧道硅尖和弹性薄膜构成的基于隧道效应的电子隧道式传感器, 很好地解决了目前传感器技术中由于体积减小带来的灵敏度降低的问题, 从而受到广泛的关注。下面对硅尖的制备方法和应用进行简要介绍。

1 硅尖的几种主要制备方法

1.1 各向异性湿法刻蚀

各向异性法湿制备硅尖, 是将 $\langle 100 \rangle$ 晶向的硅片在掩模的保护下, 用各向异性腐蚀液如 KOH, TMAH 等腐蚀成尖。但单用各向异性腐蚀法制备出的硅尖不是很理想, 所以通常各向腐蚀法需配合局部氧化削尖。局部氧化削尖的机理主要就是由于晶向影响和 SiO_2 的粘滞流动, 在较低温度下硅尖端的氧化速率减低, 从而使硅尖变尖锐。局部氧化削尖方式可使硅尖曲率半径准确度很高, 且曲率半径极限也惊人^[3]。一般在实验室中用该法可得到曲率半径小于 30 nm 的硅尖。此法也是实验室中最常用的一种方法, 其优点是对硅尖表面不产生损坏, 且有较好的重复性和一致性, 但刻蚀时温度需要控制好, 腐蚀液温度过高表面不易平整, 温度太低会产生白色沉淀物。

1.2 各向同性湿法刻蚀

该法主要是利用腐蚀液对硅的不同晶面具有相同的腐蚀速率, 在掩模的保护下将硅片腐蚀成尖。

收稿日期: 2003-01-27

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

各向同性湿法刻蚀可以省去氧化削尖的过程,一步到位。当然也可根据要求的曲率半径进行氧化削尖^[4]。各向同性湿法刻蚀中影响均匀性的因素主要有衬底的晶向及光刻的均匀性。不同的硅衬底腐蚀得到的硅尖顶端曲率半径有差别,可能是晶面的腐蚀速率差异所致。这种方法由于可省去中间的氧化过程,故工艺最为简单。但其腐蚀速率难以控制,对二氧化硅的掩模直径要求较大,硅尖表面不平整。

1.3 反应离子刻蚀

在反应离子刻蚀过程中,惰性气体在高频或直流电场中受到激发并分解,如氟里昂气体 CF_4 分解形成 F^+ ,然后与被腐蚀的材料起反应形成挥发性物质(如 SiF_4)再由抽气泵排出去。

在反应离子刻蚀中由于既有化学反应又有物理的过程,故纵向反应速率和横向反应速率的选择很重要,如果横向反应速率大了,则刻蚀出的硅尖原坯高度不够,将影响纵横比,而且氧化腐蚀后制备出的硅尖的曲率也不理想^[5]。用该法可得到曲率半径为 $10 \sim 20 \text{ nm}$ 的硅尖。该法具有刻蚀速度可调、刻蚀控制容易、对晶面方向要求不高、腐蚀出的硅尖底面平整、无残留物、硅尖质量好及侧壁光滑等优点,由于用于隧道效应的硅尖对刻蚀底面的平整度要求很高,所以在传感器的应用中有良好的效果。只是其动用设备太多,制备时间偏长。

2 硅尖在传感器中的应用

2.1 硅尖在微机械电子隧道式红外传感器中的应用

微机械电子隧道式红外传感器的工作方式是在弹性膜上施加偏转电压,把它拉到能够与硅尖发生隧道效应的距离。一个标准的宽带反馈电路用来控制偏转电压保证隧道电流恒定。器件吸收了红外辐射后,束缚气体的压力变化,直接影响加在弹性膜上的平衡力,从而使膜发生偏转,导致硅尖与弹性膜的距离发生变化,继而导致隧道电流的变化,通过测试隧道电流,即可得到红外探测器的响应率和噪声^[6]。1996年 Kenny 所制作的隧道式红外传感器的 NEP 噪声等效功率可降至 $7 \times 10^{-11} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$,对于整个红外波段都敏感,且灵敏度高。其结构示意图见图 1 所示。

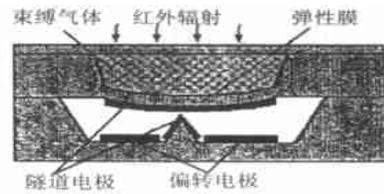


图1 微机械电子隧道式红外探测器

Fig 1 Micromachined electron tunneling infrared detector

2.2 硅尖在微机械电子隧道式磁强计中的应用

隧道效应磁强计由上层的玻璃衬底和下层的硅片组成,见图 2 所示。

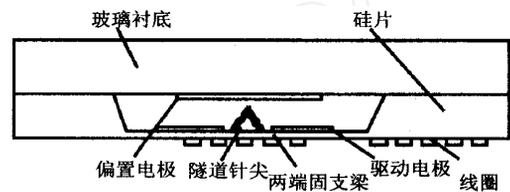


图2 微机械电子隧道式磁强计

Fig 2 Micromachined electron tunneling magnetometer

在驱动电极和偏置电极之间加上一定电压,静电力使微梁变形,当硅尖和电极之间的间距约为 1 nm 时,会产生隧道电流,在梁背面的平面线圈内通上交流电流,梁在洛仑兹力的作用下上下振动,通过测量隧道电流的大小,就能得到梁的变形量和磁感应强度的大小^[7]。通过优化设计的磁强计的分辨率可达 $4 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2.3 硅尖在场发射压力传感器中的应用

场发射压力传感器的典型结构如图 3 所示。

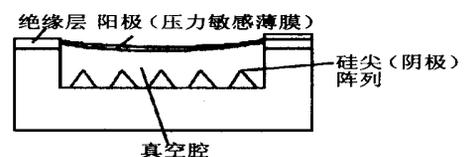


图3 场发射二级管压力传感器示意图

Fig 3 Schematic diagram of a field-emission diode pressure sensor

整个器件主要由阳极板、场发射硅尖、阴阳极之间的真空微腔、绝缘层等几部分组成。

实际应用时,在阴阳极之间加上正向偏压,只要电压的大小使得阴极硅尖顶端的场强值大于 $1 \times 10^7 \text{ V/cm}$,阴极硅尖端就会有显著的电子发射,形成正向电流。传感器的阴极采用硅尖阵列形式,以增大发射电流。当弹性膜受力而发生形变时,阴阳极的距离就会改变,那么在偏压不变的情况下,阴极尖端的表面场强会发生显著的变化,使阴极发射电流变大或变小。这样就可通过测量发射电流变化而间接得到弹性膜上的受力。澳大利亚新南威尔士

大学的 lee 和 Huang 于 1991 年第六届固态传感器和执行器国际会议上提出用这种结构制作了阴极锥形和楔形发射体压力传感器。所加电压为 40 V, 动态压力范围为 $2.98 \times 10^5 \sim 3.043 \times 10^5$ Pa, 输出电流范围为 0.4 ~ 2.0 mA。后来在此基础上还发展了三极管式压力传感器和悬臂梁式压力传感器^[8]。

2.4 硅尖在热敏器件中的应用

器件外观如图 4 所示。

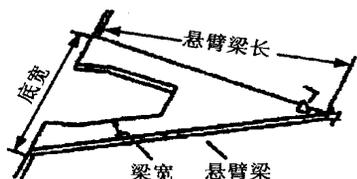


图 4 硅尖端传感器外观结构

Fig 4 Appearance structure of a Si-tip sensor

器件的形成是采用外加电压对硅尖端上进行电击穿, 形成穿透氮化硅层的隧道, 实现外层金属与内层硅尖之间的欧姆接触, 并且通过电击穿能够得到较小的接触节点。根据热电偶工作原理, 当硅衬底温度固定为 T_0 , 则可由所测电动势的大小 E 来求未知的硅尖端处温度。这里硅尖能够提高探测头的敏感程度。这种硅尖端传感器作为一个微型的热电偶, 对器件及引线微区的温度变化可以进行精确测量。由于尖端处电阻较大, 热容小能够响应频率极高的温度变化。另外, 该尖端对极微小的能量输入非常敏感, 10^{-12} J 左右的能量即可使该尖端温度升高 1¹。热敏器件的内部结构示意图如图 5 所示。

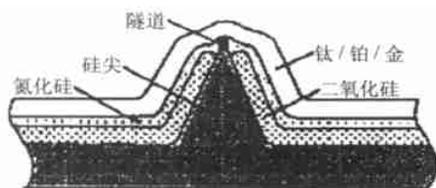


图 5 热敏器件的内部结构

Fig 5 Internal construction of thermal element

2.5 硅尖在微机械电子隧道式加速度计中的应用

加速度计隧道电极的位置由加在两偏转电极上静电力控制, 静电力使悬臂梁向下偏转, 当两电极的距离达到 1 nm 以内时, 产生隧道效应。通过静电反馈回路调节偏转电压来控制悬臂梁的位置, 使隧道电流始终保持恒定, 当悬臂梁受到加速度时, 悬臂梁发生位置移动即悬臂梁发生偏转。通过调节静电偏转电压来迫使检验质量回到原位, 故可以通过检测偏转电压的大小就可以测量加速度^[9,10]。1988 年美

国的喷气推进实验室制成的微机械电子隧道式加速度计, 器件可测小于 0.1 nm 的位移变化量, 具有 $10 \mu g_n/\text{Hz}$ 的噪声限制灵敏度, 带宽 3 kHz。单悬臂梁硅微机械加工加速度计的噪声灵敏度可达到 $10^{-7} g_n/\text{Hz}$ 。双梁结构的隧道式加速度计灵敏度 $10^{-8} g_n/\sqrt{\text{Hz}}$ 。Yeh 和 Najafi 于 1997 年制作的低压隧道式加速度计, 噪声限制灵敏度 50 Hz 时 $1.75 m g_n/\text{Hz}$; 2 kHz 时, $25 m g_n/\text{Hz}$ 最小可测加速度 $22.8 m g_n$ 。其结构示意图如图 6 所示。

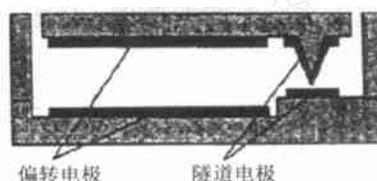


图 6 微机械电子隧道式加速度计的结构图

Fig 6 Structure diagram of micromachined electron tunneling accelerometer

3 结论

采用硅制备微尖, 由于硅材料本身的材料特性以及微加工工艺的日益成熟, 使得硅尖与其它的材料制备的微尖相比更有竞争力。硅尖的应用也日趋广泛, 硅尖制备方法与现代 IC 工艺的兼容使得在制作集成 MEMS 器件成为可能; 利用硅尖制备其它的微尖的研究也广泛开展。可以预期, 随着其它相关科学技术的进步以及硅尖制备的改进完善, 硅尖的应用将也会得到新的开发。

参考文献:

- [1] Kubena R L, Vichers Kirby D J, Joyce R J, et al. A new tunneling based sensor for inertial rotation rate measurements [J]. Sensors and Actuators A, 2000, 83 (1 - 3): 109 - 117.
- [2] Ku T K, Chen S H, Yang C D, et al. Enhanced electron emission from phosphorus and boron doped diamond-clad Si field emitter arrays [J]. Thin Solid Films, 1996, 290 - 291: 176 - 180.
- [3] Ravi T S, Marcus R B. Oxidation sharpening of silicon tips [J]. J Vac Sci Technol B, 1991, 9(6): 2733.
- [4] Kleps I, Nicolaescu D, Lungu C, et al. Porous silicon field emitters for display applications [J]. Applied Surface Science, 1998, 111: 228 - 232.
- [5] Bcuret C, Niedermann Ph, Stauffer U, et al. Fabrication of metallic probes by a new technology based on double molding [J]. Microelectronic Engineering, 1998, 41/42: 543 - 546.
- [6] Kenny T W, Reynolds J K, Pbdosek J A, et al. Micromachined infrared sensors using tunneling displacement [J]. Transducers Rev Sci Instrum, 1996, 67(1): 112 - 113.
- [7] Miller L M, Kenny T W, Kovrcic J A. A tri-magnetometer based on

electron tunneling [J]. Proceedings of the 9th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1996, 2(11 - 15) : 467 - 472.

- [8] Margues M I, Serena P A, Nicolaescu D, *et al*. Modeling of a pressure sensor based on an array of wedge emitters [J]. Applied Surface Science, 1999, 146 : 239 - 244.
- [9] Yeh Chingwen, Khalil Najafi. A low-voltage tunneling-based silicon microaccelerometer [J]. IEEE Transactions on Electron Device, 1997, 44

(11) : 1875 - 1882.

- [10] Rockslad H K, Kenny T W, Reynolds J K, *et al*. A miniature high-sensitivity broad-band accelerometer based on electron tunneling transducers [J]. Sensors and Actuators A, 1994, 43 : 107 - 114.

作者简介:

王艳华(1976 -),女,福建福州人,2000年9月进入厦门大学机电工程系攻读硕士学位,研究方向为微加工工艺研究。

(上接第57页)

按照表1中的 C_p 标定值可以做出一条标准曲线,见图2。

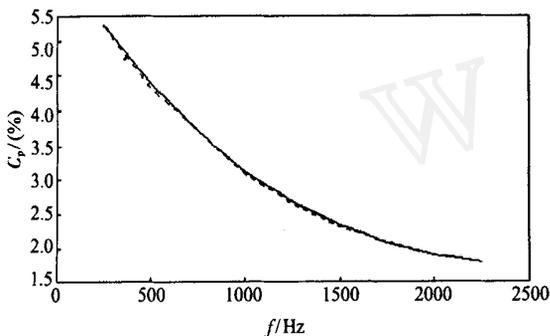


图2 传感器标定曲线

Fig 2 Calibration curve of sensor

图2曲线及标定值是在设计该传感器时根据国家标准而设定的,但实际之中其输入-输出特性存在着明显的非线性,而描述其特性在一定测量范围内可用下式,即

$$C_p = a_0 + a_1(f/f_{\max}) + a_2(f/f_{\max})^2 + a_3(f/f_{\max})^3, \quad (4)$$

式中 C_p 为待测浓度; f 为与待测浓度相应的输出频率; f_{\max} 为频率的可能最大值。

这里要求出 a_0, a_1, a_2 和 a_3 , 来求出 C_p , 根据该传感器的设计和对实际信息的测定要求,应用遗传算法来求 a_0, a_1, a_2, a_3 的值,分别给它们设定一个范围,即

$$0 \leq a_0 \leq 7.8; \quad 0 \leq a_1 \leq 12.4; \quad 0 \leq a_2 \leq 8.0; \quad 0 \leq a_3 \leq 4.$$

同时取复制概率 $P_r = 0.1$,交叉概率 $P_m = 0.8$,突变概率 $P_c = 0.01$ 。以式(3)作为适应度函数关系式,然后进行迭代运算,通过20代的遗传运算后得到

$$a_0 = 6.15; \quad a_1 = 10.1; \quad a_2 = 7.00; \quad a_3 = 1.40.$$

将 a_0, a_1, a_2, a_3 的值代入式(4)分别计算出 C_p 的值,可获得一组的值,绘出曲线。同标定的曲线拟合得很好(参见图2)。

4 结 论

根据试算证明,应用遗传算法可以很好地计算出传感器自校正方程中的待定常数,同时实现了非线性特性的线性化,特别基于 MATLAB 遗传算法工具计算待定常数,使运算更加方便、快捷。根据参考文献[1]函数神经网络作非线性自校正,当多项式方程待定常数 $a_0 \sim a_3$ 为 $a_0 = W_0, a_1 = W_1, a_2 = W_2, a_3 = W_3$ 时,这里的待定常数的遗传算法迭代运算过程,便是求算神经网络的权值,对这一问题还可进一步加以研究。

参考文献:

- [1] 沈毅. 纸浆浓度传感器非线性估计和动态标定的一种新方法 [J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(1) : 1 - 6.
- [2] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1999. 197 - 202.
- [3] Blackman S S, Broide T J. Multiple sensor association and fusion in aerospace application [J]. Journal of Robotic Systems, 1990, 5: 290 - 300.
- [4] 陈国良. 遗传算法及应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1995. 12 - 30.
- [5] 王宁. 遗传算法在多传感器多目标静态数据关联中的应用 [J]. 1999, 14(1) : 18 - 21.

作者简介:

郝云芳(1952 -),女,陕西西安市人,高级工程师,主要从事电子技术教学及科研。