

# 大流量压阻式流量传感器的研制

王小保<sup>1</sup>, 钱劲<sup>2</sup>, 张大成<sup>1</sup>

(1. 北京大学微电子学研究院, 北京 100871; 2. 中国科学院力学所, 北京 100871)

E-mail: wxb@ime.pku.edu.cn

**摘要:** 根据流体力学差压原理, 采用硅微机械加工手段设计制作了微挡板结构的压阻式流量传感器。测试结果表明, 该传感器具有测量 0.1 ~ 10L/min 的气体流量的能力。

**关键词:** 差压; 流量传感器; 微机械加工; 压敏电阻

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776(2003) 07/08-0449-03

## Research on a piezoresistive mass flow sensor

WANG Xiao-bao<sup>1</sup>, QIAN Jin<sup>2</sup>, ZHANG Da-cheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Micromachined piezoresistive flow sensors that operated in differential pressure modes have been designed, fabricated and tested. The testing result shows that the measuring flow rates range from 0.1 to 10L/min for gas.

**Key words:** differential pressure; flow sensor; micromachining; piezoresistivity

## 1 引言

随着微机械加工方法的逐步成熟, 微机械系统尤其是各种微型传感器开始在工业和日常生活中得到了广泛的应用。在工作原理上, 目前常用的微机械流量计有热线式和机械式<sup>[1~4]</sup>。前者通常采用加热元件改变流体的温度场, 然后利用热敏元件检测出流量变化; 后者基于流体的动能同压强的相互转化, 通过流体通道和力敏元件的设计, 检测出流量变化。本文描述的传感器基于后一种方式。与传统流量计相比, 微型流量传感器具有体积小、成本低、易于同工作电路集成化等优点。以往的微机械流量传感器多追求对小流量的检测, 如果能够采用微机械结构实现中等流量的检测, 将使微机械流量传感器的应用得到很大的扩展。

传感器采用微机械体硅工艺制作, 经由压敏电阻构成的电桥结构输出电压信号。试验结果表明该微机械流量计完全可以测量 0.1 ~ 10L/min 之间的

气体流量, 具有较高的精度、重复性和抗过冲能力。

## 2 设计

流体力学中有两个著名的方程, 即连续性方程和伯努力方程

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (1)$$

$$P_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \quad (2)$$

式中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  表示流体密度;  $v_1$ 、 $v_2$  表示流速;  $A_1$ 、 $A_2$  表示流体通道横截面积;  $P_1$ 、 $P_2$  表示流体压强。

方程(1)表明, 对于不可压缩流体(密度恒定), 通道面积和流速成反比, 即在理想情况下, 流体流量不因通道面积的变化而变化, 始终保持恒定。

方程(2)表明, 流体压强和动能可以互相转化, 即如果流体通道的横截面积发生变化, 那么因此而改变的动能会转化为同一位置的压强。假设在该位置放一挡板, 如图 1 所示, 就会观察到挡板因前后两面受压不同而发生弯曲。挡板的弯曲程度和内部应

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(TG1999033108)

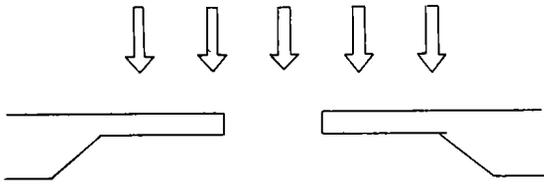


图1 挡板示意图

力同材料、所受外力等因素有关。如果能检测到挡板发生的这些变化,便可间接反映出流速的变化。在已知通道面积的条件下,就能够得到流量的变化。这便是传统流量计中的机械差压式的检测原理。我们将式(1)、(2)进行转化,可以得到一个更直接的表达式,  $K$  为结构系数,同传感器结构有关,  $Q$  即流量

$$P = K \frac{Q^2}{2A^2} = K \frac{Q^2}{2A^2} \quad (3)$$

实际上,粘滞力会对以上转化产生影响,使其偏离理想二次曲线关系。实验证明,当流体的雷诺数 ( $Re$ ) 较大时(通常要大于 2300),粘滞力的作用相对较小,可以近似认为流体的动能与压强之间的转变占主要地位。相反,当  $Re$  远小于 2300 时,就要考虑流体粘滞力造成的影响。 $Re$  的表达式如下

$$Re = UD_h / \mu \quad (4)$$

式中,  $U$  为平均流速;  $D_h$  为通道孔径尺寸;  $\rho$  为流体密度;  $\mu$  为流体粘滞系数。

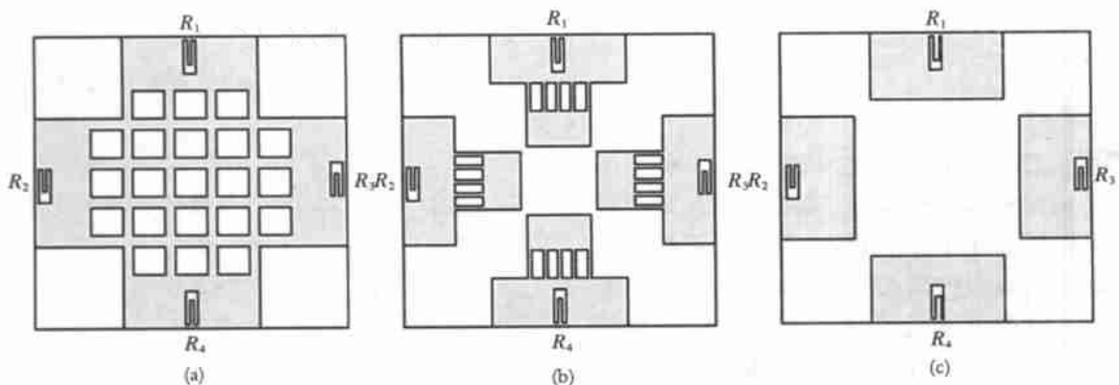


图2 挡板设计方案

### 3 制作

图3是传感器制作的工艺流程,采用体硅工艺。原始硅片为 n 型,  $20\mu\text{m}$ , 电阻率  $2 \sim 4 \text{ cm}$ 。热氧化之后,硼注入形成  $p^-$  压敏电阻和  $p^+$  欧姆接触区。然后淀积  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 进行背面  $\text{KOH}$  腐蚀,形成约  $25\mu\text{m}$  厚的硅膜。硅片正面刻蚀接触孔,溅射铝膜并刻出引线。最后,在硅膜上刻蚀出“窗口”,形成设计的挡板形状。最后一步中的硅刻蚀采用了 ICP 系统。

图4是刻蚀后的硅膜(正面)SEM 照片。可以

依据以上理论,流量传感器的设计就转变为挡板结构和净流道面积的综合设计。我们设计了三种挡板方案,如图2所示。图中方框为  $1500\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ,框内灰色部分为挡板,白色部分为流体通道,用  $R$  标注的图形为压敏电阻。方案(a)和(b)的净流道面积非常接近,均在  $1.2\text{mm}^2$  左右,由此可以推断由于挡板形状不同而导致的灵敏度差异。方案(c)的净流道面积较大一些,在  $1.3\text{mm}^2$  左右。另外,挡板(a)、(b)较(c)有更好的抗冲击能力,因为其大应力集中点较为分散,并未全部集中在挡板根部,但是也因此降低了一定灵敏度。挡板的设计厚度为  $25\mu\text{m}$ 。经有限元分析软件 ANSYS 模拟计算,在最大流量  $10\text{L}/\text{min}$  的流体冲击下,挡板(c)的弯曲挠度不到  $1\mu\text{m}$ ,最大应力在  $1.0\text{E}8 \text{ Pa}$  量级。该结果表明挡板的形变仍处于小变形范畴,远小于失效强度。

压敏电阻制作在挡板同体硅连接的部位,即图中方框的边沿,能够获得最大应力。电阻连接成 wheatstone 电桥形式,可以得到反映流量大小的电压信号,电压信号正比于压敏电阻处的应力变化。

经过计算,本文研究的流量传感器的  $Re$  值在  $200 \sim 20000$  之间。在小流量范围 ( $2\text{L}/\text{min}$  以下),流体粘滞力的作用会比较明显。

看出,图形转移良好。

### 4 测试和结果分析

测试装置如图5所示,工作电压为  $5\text{V}$ ,测试气体为空气。

测试结果如图6所示,横坐标为流量,纵坐标为电压输出,输出电压中已经减去了零位输出。图中的(a)、(b)、(c)分别对应图2中的方案(a)、(b)和(c)。图中显示流量同输出电压为非线性关系,与拟合曲线保持了良好一致。同时比较发现,设计方案(a)、(b)、(c)的灵敏度依次降低。对于(a)、(b)来

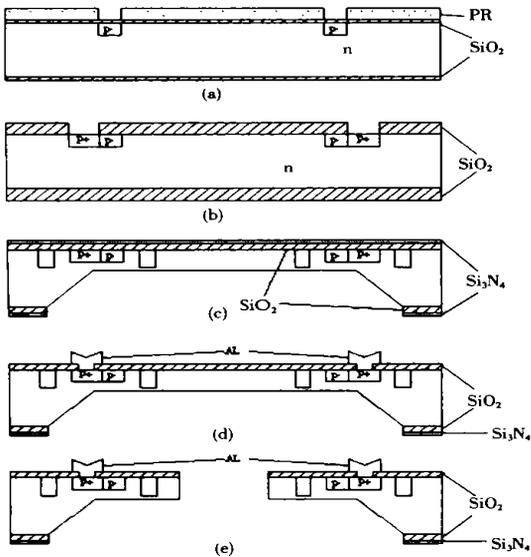
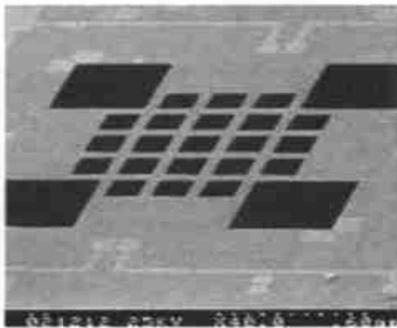
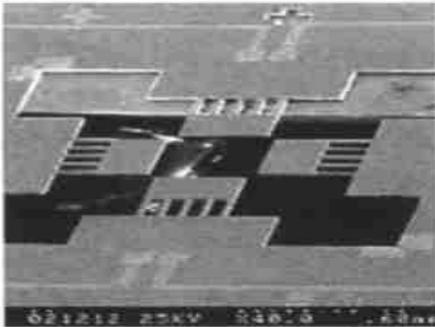


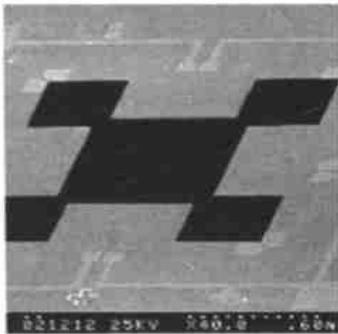
图3 工艺流程



(a)



(b)



(c)

图4 三种设计方案对应的 SEM 照片

讲,因为它们的净流道面积接近,故应是挡板根部产生的应力大小不同而导致的灵敏度差异。对于(c),虽然其挡板根部的应力大于(b)和(c),但是它的净流道面积较(b)、(c)大一些,二者综合作用导致了最终结果。

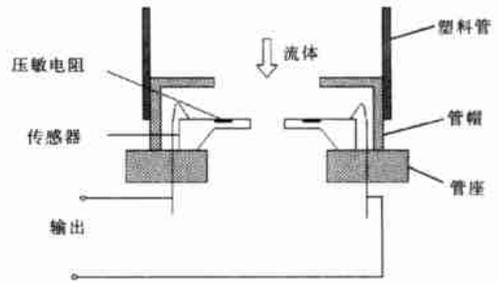


图5 测试示意图

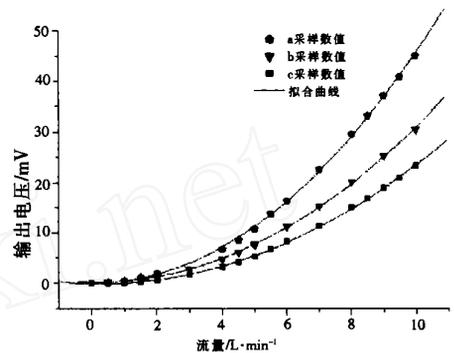


图6 测试结果

## 5 结论

应用流体力学经典原理,采用微机械加工手段,制作了大流量压阻式微型流量传感器。检测结果表明该传感器具有测量 0.1 ~ 10L/min 空气流量的能力,具有较高的精度和重复性。通过挡板形状的设计,可以获得不同的灵敏度和抗过冲能力。

### 参考文献:

- [1] ELWENPOEK M, WIEGERINK R J. Mechanical Microsensors [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- [2] GRAVESEN P, BRANEBJERG J. Microfluidics—a review [J]. J Micromech Microeng, 1993, 3, 168-182.
- [3] TRUONG T Q, LU X Q, et al. Design, analysis, fabrication, and testing of a MEMS flow sensor [A]. ASME Microelectromechanical Systems[C]. 1999, 355-361.
- [4] KIM D K, KANG S G, et al. Characteristics of piezoresistive mass flow sensors fabricated by porous silicon micromachining [J]. Jpn J Appl Phys, 2000, 39: 7134-7137.

### 作者简介:

王小保 (1979), 男,山西长治人,北京大学微电子研究院硕士生,专业方向为 MEMS 器件与工艺。