

硅十字梁单块力传感器

王 言 王 毕 南 晋 琦 鲍 敏 杭

(复旦大学电子工程系, 上海)

1989年5月14日

本文介绍一种用硅材料制成的十字梁力传感器, 它的各主要结构部分是通过微加工技术在同一硅片上得到的。具有灵敏度高、温漂小, 成本低、一致性好等优点。本文对器件进行了结构分析、应力计算, 得到了各结构参数对器件灵敏度的影响, 并在理论分析的指导下制作了高灵敏度的力传感器样品, 最高灵敏度可达 $340\text{mV}/10\text{g}$, 适用于小量程范围力的测量。器件还具有过载保护结构。

主题词 硅, 传感器, 力, 敏感元件

一、引 言

目前, 传感器在工业自动化、航天航海、医学工程及人们日常生活中都有着广泛的用途, 在用于机械量测量的压力、加速度和力传感器中, 压力传感器和加速度传感器的固态化工作进展是很不错的, 相对来说, 力传感器仍然是以结构型为主, 一般是在金属应变梁上贴应变片的结构, 在这种结构中, 金属应变梁, 应变片, 胶粘剂, 支架等部件, 一般都是不同种类的材料, 这将不利于传感器的稳定性, 特别是温度稳定性和长期时漂, 同时也会降低其使用寿命。本文中讨论的 FY-1 力传感器, 采用了固态化的结构, 应变梁和支架是通过各向异性腐蚀而获得, 力敏电阻通过离子注入而形成, 三者是整体, 无须粘合, 并且由于三者是同种材料, 故有利于提高稳定性和寿命, 制作过程中采用了集成电路工艺, 具有体积小, 成本低、一致性好等优点。该传感器采用了硅材料制作十字梁整体化结构, 具有较强的新颖性。

二、传感器结构设计

由于力传感器要受力, 必须有一相对比较大的受力部位, 在 FY-1 中把它设计为位于器件中心部位的“岛”, 岛的正中间有一受力的“坑”。另外还需把受力传给应变部位, 考虑对称性, 把应变部位设计成与“岛”相联的十字梁, (图 1)。

器件受力后引起四条对称的梁发生形变, 形变导致梁上的力敏电阻的特定参数发生变化, 从而产生一定输出, 图 1 中的剖面图中可见岛的底部与基座平面有一间隔, 受力引起的垂直位移只能在此范围内, 若受力超出一定范围时, 岛底部和平面相抵, 阻止了进一

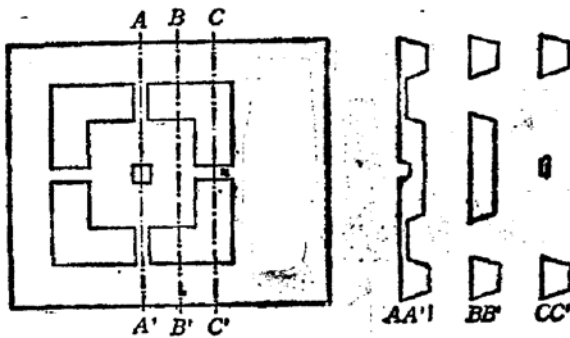


图 1 传感器芯片示意图

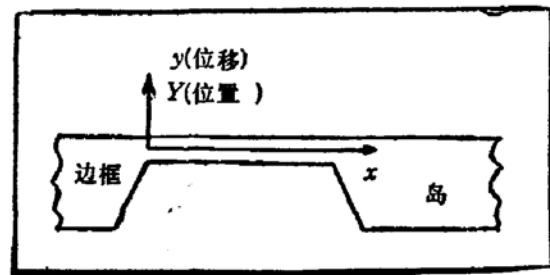


图 2 坐标示意图

步位移,防止过大的受力下梁的断裂,即具有过载保护功能,下面分析十字梁结构的应力状况和灵敏度。

根据弹性力学,有:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = \omega(x)$$

式中 E 为杨氏模量; I 为横剖面的惯性矩, x 为梁上任一点的坐标, y 为该点的位移(见图 2), 设梁长为 L , 我们可得到边界条件如下:

$$x = 0 \text{ (梁与支架的相交处): } y = 0; \frac{dy}{dx} = 0$$

$$x = L \text{ (梁与岛的相交处): } \frac{dy}{dx} = 0; E \cdot I \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{FL}{4}$$

在本情况中梁上并无侧向载荷,即 $\omega(x) = 0$, 于是 $\frac{d^4 y}{dx^4} = 0$, 将该方程与边界条件

联列求解可得应变方程为:

$$y = \frac{1}{E \cdot I} \left(-\frac{1}{8} F \cdot L \cdot x^2 + \frac{1}{12} F x^3 \right) \quad (1)$$

式中 F 是岛上所得到的力。

当 $x = L$ 时, 得到岛垂直位移与外力之关系:

$$y = -F \cdot L^3 / 24 E \cdot I \quad (2)$$

将矩形梁横剖面惯性矩 $I = bh^3/12$ (b, h 为梁宽与梁厚) 代入则得:

$$y = -L^3 F / 2 E \cdot b \cdot h^3 \quad (2')$$

梁上应力 $\sigma_{xx} = E \epsilon_{xx} = E \cdot Y/R$, 式中 ϵ_{xx} 为应变, R 为应变半径, Y 为梁上任一点到中心面的距离(见图 2), 当曲率不大时,

$$1/R = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{F}{4} (2x - L),$$

于是:

$$\sigma_{xx} = E \cdot Y/R = Y \cdot \frac{F}{4I} (2x - L) \quad (3)$$

令 $Y = h/2$, 则 $\sigma_{xx} = Fh \cdot (2x - L)/8I$, 这就是梁表面的应力与坐标的关系

式,显然它是随坐标线性变化的,在梁的两端达到正负极大。数值为 $\pm \frac{3}{2} FL/bh^2$,式中已将梁截面作为矩形,将 $I = \frac{1}{12} bh^3$ 代入。这就决定了器件应设计在端头或近端头处,以获得尽可能大的灵敏度。

我们选择四端电阻作为敏感元件,这种利用横向压阻效应的四端器件,我们在其它论文中已作了比较详细的分析^[2,21],这里只做简单的引进,器件输出电压 V_0 为:

$$V_0 = \rho'_6/\rho_0 \cdot \frac{\omega'}{l'} V_s \quad (4)$$

式中 ω'/l' 是器件的宽长比; V_s 为电源电压; ρ'_6 是电阻率矩阵中的一个因子; ρ_0 是器件电阻率。 ρ'_6/ρ_0 与元件所在位置处的应力 $\sigma_{m,x}$ 及压阻系数 π'_{66} 有关^[2]:

$$\frac{\rho'_6}{\rho_0} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \pi'_{66} \quad (5)$$

如果是在(001)晶面上,并且元件上电流方向是[100]或[010]方向,则 $\pi'_{66} = \pi_{44}$,将它和(3)式一起代入(5)式,则可得

$$\frac{\rho'_6}{\rho_0} = \frac{3}{4} \frac{FL}{bh^2} \pi_{44} \quad (6)$$

$$\text{因此 } V_0 = \frac{3}{4} \left(\frac{\omega'}{l'} \right) \frac{L \pi_{44}}{bh^2} V_s \cdot F$$

故十字梁端头上横向压阻器件灵敏度为:

$$S = \frac{\partial V_0}{\partial F} = \frac{3}{4} \left(\frac{\omega'}{l'} \right) \cdot \frac{L \cdot \pi_{44}}{bh^2} V_s \quad (7)$$

根据文献^[23],硅材料的断裂应力 σ_{rs} (rupture strength) = 3×10^9 dyne/cm² 如果设计在应力极值为 σ_{rs} 的二分之一时,让岛与底座相抵,实现过载保护的也就达到了:

由(3)式可得, $F = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{\max} \cdot b \cdot h^2}{L}$,代入(2)式有:

$$y_{\max} = - \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_{\max} \cdot L^2}{E \cdot h} \quad (8)$$

把硅材料扬氏模量 $E = 1.9 \times 10^{12}$ dyne/cm² 梁宽 $267 \mu\text{m}$ 和梁长 $L = 700 \mu\text{m}$ 代入:

$$y_{\max} \approx - \frac{1.5}{\mu} \quad (8')$$

以梁厚 $h = 100 \mu\text{m}$ 为例,保护间隔为 $1.25 \mu\text{m}$

以梁厚 $h = 25 \mu\text{m}$ 为例,保护间隔为 $5 \mu\text{m}$

三、制作和测量

在(001)硅片上用双面套准光刻与常规集成电路工艺相结合制作力传感器芯片,并配以正面和背面的 EPW 各向异性腐蚀^[4],形成岛、梁和过压保护等结构,用静电键合的方法将硅片与特种玻璃结合成整体,用铝线通过压焊引出,即成了一个完整的 FY-1 力传感

器,见图 3.

芯片面积为 $5 \times 6\text{mm}^2$,中心部位受力岛的面积为 $2 \times 2\text{mm}^2$,梁长 $700\mu\text{m}$,梁宽 $267\mu\text{m}$.

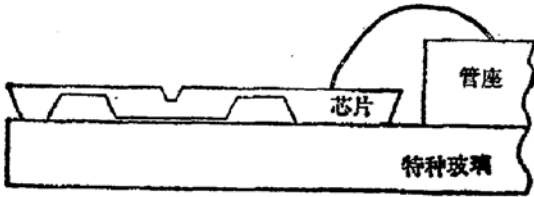


图3 传感器结构图

用天平砝码作为输入 F 的标准,并采用一种专门设计的测试装置,使砝码的重量全部加于岛上。下面列出 4 个不同灵敏度器件的测量结果。

表 1 器件灵敏度测量结果

器件编号	#1	#2	#3	#4
$S(\text{mV/g})$	0.631	1.79	25.6	34.2
非线性 NL	-0.74%	-0.72%	-0.56%	-0.15%
测量范围	75g	25g	10g	10g

四、分析与讨论

前面得到灵敏度公式 $S = \frac{3}{4} \left(\frac{\omega'}{L'} \right) \frac{L \cdot \pi^4}{bh^2} V_s$,事实上这个方程并不精确,这是因为工艺上的限制,使我们无法把这个设计完全理想地实现,灵敏度理论值在计算前必须考虑一些修正。

(a) 由于各向异性腐蚀液使梁的实形状与初始模型有一定差别,硅片上的腐蚀面与暴露侧面成 $\arctg\sqrt{2}$ 角度^[2],因此梁的横截面不再是矩形,而是梯形,平均宽度为 $b' = 0.707h + b$,引入修正因子 $\delta b = \frac{b}{b'} = \frac{b}{0.707h + b}$,这个数据在本设计中为 0.80 左右。

(b) 与(a)相同的原因,背面腐蚀使梁有效长度减小,实际器件设计在离梁端头有一定距离的位置,引入修正因子 $\delta L = \frac{L' - 2x'}{L}$,式中 L 为掩膜图形中的梁长, L' 为有效梁长, x' 为器件中心点至有效端头距离。 δL 的数值约为 0.55。

(c) 四端横向压阻器件存在着端头短路效应^[3],引入一个小于 1 的短路因子 f ,本设计中,长宽比为 1.5:1,则 $f = 0.7$ 。

根据以上讨论,灵敏度计算的表式修正为:

$$S = \frac{3}{4} \frac{\omega'}{L'} \left(\frac{L \pi^4}{bh^2} \right) V_s \cdot \delta_b \cdot \delta L \cdot f \quad (7')$$

将各器件具体数据代入,可得到各器件灵敏度的计算值分别为 2.43mV/g , 4.41mV/g , 45.5mV/g 和 51.1mV/g ,理论值比实验值大 1—3 倍,原因可以这样解释:理论值的计算中,虽然考虑了一些非理想因素,但是仍有另一些因素的影响无法计入:如当应用边界

条件时,假定了 $x = L$ 处的一阶导数 $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$,这只是一种近似,量程较大的情况下,也即梁较厚的情况下,边框的刚度并不比梁大很多,所以这个近似误差较大,从实验数据也可看出,量程大的器件误差较大,另外一些工艺过程中的偏差等非理想因素的影响也会引起灵敏度的下降,考虑了这些因素之后,灵敏度的计算值与实验值之差是可以理解的。

五、FY-1 力传感器应用展望

作者已将本传感器用作医用监护仪的测量探头,用于脉搏波形的测量,也能用作心尖搏动的测量,也成功地将两个 FY-1 传感器配合使用,测量出脉搏传波速度,它是诊断血管壁质量的一个有用参数。作者也将该传感器和一个特制的吊篮装置配合,作为一个微量电子秤使用,最高分辨率达到一毫克以上。

该结构也可用作加速度的测量,通过测力间接得到加速度,用于机械振动和爆破等方面的监测。

本课题得到了复旦大学自然科学基金的资助,研究过程中,吴宪平,谈伟勤和沈嘉英同志给予了很大的帮助,作者谨在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 鲍敏杭,王言,复旦大学学报(自然科学版),25 268(1986).
- [2] Minghang Bao, Yan Wang, *Sensors and Actuators*, 12, 49(1987).
- [3] A. E. Lore, *Mathematical Theory of Elasticity*, Dover Publications, New York, 4th ed., 1944.
- [4] 王言,横向压阻效应研究和硅横向压阻压力传感器研制:复旦大学研究生毕业论文,14(1986).
- [5] 鲍敏杭,齐薇佳,王言,半导体学报,4,34(1987).

Silicon Force Sensor with Cross Beams

Wang Yan, Wang Bi'nan, Jing Qi and Bao Minhang

(Departments of Electrical Engineering, Fudan University, Shanghai)

Abstract

An analysis of sensitivity is presented for a silicon force sensor with cross beams. Force sensors with high sensitivity, small drift to temperature and low cost can be fabricated by using this kind of structure. The sensors for four different ranges are fabricated under the guide of the analysis. The highest sensitivity of the sensors is approximately 340 mv/10g. It is suitable for the measurement of weak force, and it also has a special structure to resist over range force.

Key words silicon, transducer, force, sensor