

具有双应变梁的硅微机械 倾角传感器结构设计

孔德义, 张 涛, 梅 涛, 倪 林, 孙 斐, 陶永春

(中国科学院合肥智能机械研究所传感技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230031)

E-mail: kongdy@iim.ac.cn

摘要: 提出了一种能抗侧向耦合干扰的微机械硅倾角传感器的敏感结构设计, 它由两个不同大小的质量块和连接它们的两个相互平行的硅应变梁组成。文中通过推导给出了硅应变梁上所受的应变与倾角及位置的解析关系, 并计算了在两个不同质量块作用下硅梁上的应力分布, 最后提出了制作该结构的工艺设计。

关键词: 倾角传感器; 双应变梁; 微机械

中图分类号: TN212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776(2003) 07/08-0302-03

Design of a micromechanical inclinometer with two strained silicon beams

KONG De-yi, ZHANG Tao, MEI Tao, NI Lin, SUN Fei, TAO Yong-chun

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Intelligent Machines,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In this work, a new structure design of micromechanical inclinometer is presented. It consists of two silicon bulk masses that are connected by two parallel silicon beams. The two beams are in the same sizes and located symmetrically between the two masses, thus improving the lateral shock resistivity. The quantitative expression of stress distribution on the two beams versus tilting angle has been derived, and calculated results have been discussed. Finally, the process procedure of fabricating such a inclinometer is proposed.

Key words: inclinometer; double strained beams; micromachining

1 引言

倾角传感器是一种用于姿态监测和控制的传感器, 在卫星、导弹、坦克、火炮、飞机、汽车、舰船、地质石油勘探、建筑施工、机器人的陆地和水下作业等各种军事及民用领域有极为广泛的应用。传统的倾角传感器尺寸较大, 不适用于对体积和重量有一定限制的领域, 并且不便于携带。MEMS 技术能够实现倾角传感器的轻小型化, 并且已经研制出一种热对流式硅倾角传感器^[1], 但这种传感器功耗较大, 响应较慢。此外, 一种小量程的硅加速度传感器也可改

作倾角传感器来使用^[2]。

本文提出了一种新的 MEMS 硅倾角传感器的敏感结构设计, 它由两个不同大小的质量块和连接它们的两个相互平行的硅应变梁组成。当一端的质量块悬空时, 硅梁处于应变状态, 其应变大小及其分布随着倾角的不同而相应改变, 由此检测出倾角的大小。这种结构设计的优点是: ①采用相互平行的双应变梁能够显著提高抗侧向冲击能力; ②在两个硅梁上的对应位置制作不同走向的应变电阻能将应变信号差分放大, 进一步提高灵敏度; ③硅应变梁两端的质量块采用不对称设计, 这样在敏感结构与

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 安徽省自然科学基金资助课题(00043510)

衬底封接前有两个不同的灵敏度(对应于不同的抗冲击强度)可供选择。

2 理论分析

图 1 是所提出的硅倾角传感器的敏感结构,其中,硅片厚度为 $500\mu\text{m}$,晶向为 $\langle 100 \rangle$;两个硅质量块的尺寸分别为 $1.2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 500\mu\text{m}$ 和 $3.2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 500\mu\text{m}$;两个硅梁的尺寸相同,都是 $600\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$,相互平行,它们之间相距 $800\mu\text{m}$,完全对称,均沿着 $\langle 110 \rangle$ 方向。

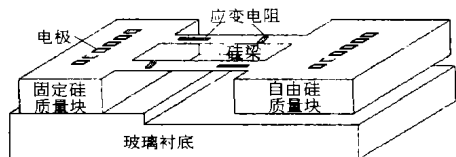


图 1 硅倾角传感器敏感结构

下面将推导并计算图 1 所示结构处于不同倾角时硅梁上表面的应力分布情况。由于两个硅梁尺寸相同并完全对称,为便于推导,在两个硅梁的对称轴上用一假想的具有同一尺寸的虚拟硅梁来代替这两个实际的硅梁。因此,虚拟硅梁上所受应力值的一半即是实际硅梁对应位置所受的应力大小。为简便起见,推导中忽略硅梁弯曲变形对弯矩的影响。

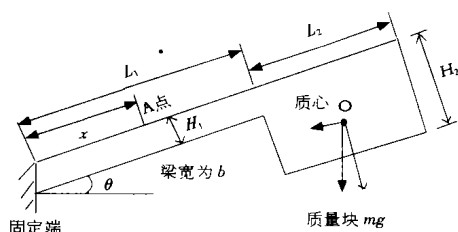


图 2 虚拟梁的受力分析图

图 2 为整个敏感结构倾斜角时的受力分析图。图中虚拟梁的宽度为 b ,厚度为 H_1 ,长度为 L_1 ,自由硅质量块的厚度为 H_2 ,长度为 L_2 ,设其质量为 m 。不失一般性,在虚拟梁上表面取任意位置 A 点,并设它与固定端的距离为 x ,分析其所受应力情况。

在自由硅质量块的作用下,A 点受到三部分的应力作用,其中一个为轴向压应力 σ_1 ,两个弯矩拉应力 σ_2 和 σ_3 。 σ_1 为 mg 的正弦分量 $mg \sin\theta$ 与虚拟梁的截面积之比,即

$$\sigma_1 = mg \sin\theta / bH_1 \quad (1)$$

它与 A 点的位置无关。由于质量块的质心 O 点不在虚拟梁的轴线上,因此 $mg \sin\theta$ 对虚拟梁还有一个弯矩作用,并产生拉应力 σ_2 ,表示为

$$\sigma_2 = mg \sin\theta \left(\frac{H_2}{2} - \frac{H_1}{2} \right) / W_z \quad (2)$$

式中 W_z 为梁的抗弯截面模量。在梁的上表面: $W_z = I_z / y_{\text{max}}$,其中, $y_{\text{max}} = H_1 / 2$, I_z 为梁的惯性矩,表示为: $I_z = bH_1^3 / 12$ 。代入式(2)中化简得

$$\sigma_2 = 6mg \sin\theta \left(\frac{H_2}{2} - \frac{H_1}{2} \right) / bH_1^2 \quad (3)$$

σ_2 也与 A 点的位置无关。 mg 的余弦分量 $mg \cos\theta$ 也对虚拟梁有一个弯矩作用,它引起的拉应力 σ_3 与 A 点的位置有关,根据图 2 容易得到

$$\sigma_3 = 6mg \sin\theta \left(\frac{L_2}{2} + L_1 - x \right) / bH_1^2 \quad (4)$$

虚拟梁在 A 点受到的总应力 $\sigma_{\text{总}}$ 为三部分应力之和,即: $\sigma_{\text{总}} = -\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 。化简后得到

$$\sigma_{\text{总}} = 6mg \left[\left(\frac{L_2}{2} + L_1 - x \right) \cos\theta + \left(\frac{H_2}{2} - \frac{2}{3} H_1 \right) \sin\theta \right] / bH_1^2 \quad (5)$$

如前所述,虚拟硅梁上的应力实际上均匀分摊在两个尺寸相同且相互对称的单个硅梁上,因此单个硅梁在 A 点受到的应力 $\sigma_{\text{单}} = \sigma_{\text{总}} / 2$,即:

$$\sigma_{\text{单}} = 3mg \left[\left(\frac{L_2}{2} + L_1 - x \right) \cos\theta + \left(\frac{H_2}{2} - \frac{2}{3} H_1 \right) \sin\theta \right] / bH_1^2 \quad (6)$$

根据式(6),当自由硅质量块分别取 $1.2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 500\mu\text{m}$ 和 $3.2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 500\mu\text{m}$ 两个不同的尺寸时,计算了硅梁上的应力分布随倾角的变化情况,如图 3,4 所示。图中 x 的变化范围是 $0 \sim 600\mu\text{m}$,的变化范围是 $0 \sim 90^\circ$ 。

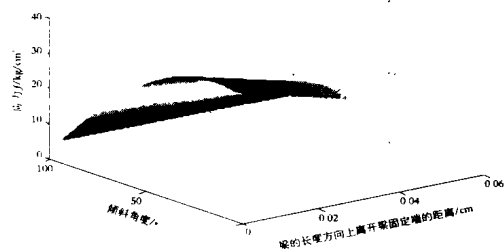


图 3 小质量块 ($1.2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 500\mu\text{m}$) 作用下硅梁上的应力分布与倾角的关系

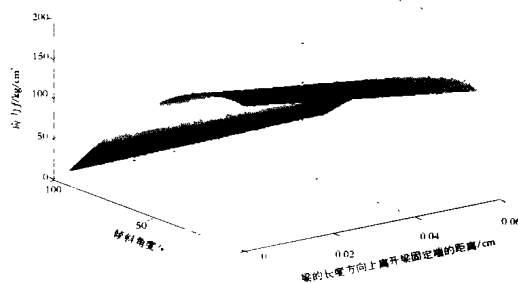


图 4 大质量块 ($3.2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 500\mu\text{m}$) 作用下硅梁上的应力分布与倾角的关系

从图 3,4 中可以看出,应力的最大值出现在硅梁的根部,尤其重要的是,这里也是应力随着倾角变化最快的位置,这是设计应变电阻的重要依据。因此,将应变电阻布置在硅梁根部可以得到最高的灵敏度。

根据图 3 的计算结果发现,当以小质量块作为自由端时,在 $0\sim 10^\circ$ 的范围内,随着倾角 θ 的增加,应力逐渐增大;倾角超过 10° 以后,应力随着 θ 的增加开始单调下降。由此可见,对应一个应力信号输出,将会出现两个不同的 θ 解。一个可行的解决办法是把与衬底封接后的敏感结构倾斜 10° 安装,并将该位置的输出标记为水平面即可,不过这样传感器的测量范围就减少了 10° ,即 $0^\circ\sim 80^\circ$ 。计算表明,对于沿 $\langle 110 \rangle$ 方向布置在硅梁根部的单个应变电阻,倾角每变化 1° 时电阻的相对变化率 $\Delta R/R$ 约为 2.9×10^{-5} 。

图 4 的计算结果与图 3 略有不同,当以大质量块作为自由端时,在 $0\sim 10^\circ$ 的范围内,应力变化不大,因此灵敏度很低,要避免在该范围测量。当倾角超过 10° 以后,应力随着 θ 的增加开始单调下降。解决办法同上,将敏感结构倾斜 10° 安装即可。计算表明,倾角每变化 1° 时 $\Delta R/R$ 约为 1.4×10^{-1} ,相当于采用小质量块时的 5 倍。

不论是对于小质量块情形还是大质量块情形,若分布在两个硅梁上的应变电阻相互垂直(如图 1 所示),则由于压阻系数的不同,这两个应变电阻能构成差动输出,理论上灵敏度可再增大一倍。

3 制作工艺

传感器敏感结构的尺寸已在前文中给出,每个硅梁的两端都布置了两个应变电阻,这样可根据需要选择两个不同的质量块作为自由端;不同硅梁对应位置上的两个应变电阻相互垂直,分别沿 $[110]$ 和 $[\bar{1}10]$ 方向,这样可构成差动输出以提高灵敏度。由于篇幅所限,这里只简单介绍整个敏感结构的半导体工艺制作流程,顺序如下

- 1) 硅片清洗及双面热氧化;
 - 2) 硅片正面光刻并腐蚀出两个硅梁上的四个应变电阻区窗口以及两个未在图 1 中标出的温度补偿电阻区窗口;
 - 3) 正面第一次离子注入形成电阻区;
 - 4) 正面匀胶并光刻出电阻头窗口;
 - 5) 光刻胶作为掩膜,进行第二次离子注入以形成欧姆接触区;
 - 6) 采用 LPCVD 在双面淀积一层氮化硅;
 - 7) 正面光刻并刻蚀出分离槽结构窗口和引线孔窗口;
 - 8) 背面光刻并刻蚀出分离槽结构窗口;
 - 9) 正面蒸发 Cr-Au 复金属材料;
 - 10) 正面光刻并腐蚀出 Cr-Au 引线 and 电极;
 - 11) 采用 KOH 腐蚀出敏感单元结构;
 - 12) 与玻璃衬底进行静电封装;
 - 13) 金丝球焊引线并进行外封装。
- 目前该传感器正在工艺流水之中。

4 结 论

本文提出了一种新的具有双应变梁的微机械硅倾角传感器结构设计。其结构简单,制作工艺容易实现,具有较强的抗侧向冲击能力和较高的灵敏度,并且硅梁两端的质量块采用不对称设计,这样可根据抗冲击强度的需要选择不同的灵敏度。需要注意的是,为避免在小角度范围内传感器的灵敏度较小,需要将敏感结构倾斜一定角度进行安装。

参考文献:

- [1] 李立杰,梁春广. 微机械热对流加速度计 [J]. 半导体学报, 2001.(4).
- [2] Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning [M]. Analog Devices Technical Reference Books, Prentice Hall, 1999.

作者简介:

孔德义 (1966-),男,安徽铜陵人,博士,副研究员,现从事微型传感器和微型机器人方面的研究工作。