

# 横向加速度传感器设计及特性研究\*

朱海军 陈 宏 鲍敏杭

(复旦大学电子工程系 上海 200433)

**摘要** 一般微机械加工的梁—岛结构加速度传感器,梁的平面都是与器件平面平行的,因此只能测量器件平面法向的加速度分量.我们提出了一种制作梁平面与器件平面相垂直的梁—岛结构的微机械加工方法,并用以设计和制造了一种可测量平行于器件平面的加速度分量的横向加速度传感器,为研制三维加速度传感器提供了新思路.

EEACC: 2560Z, 7230

## 1 引言

压阻式微机械加速度传感器的结构经过演化,有单悬臂梁<sup>[1]</sup>,双悬臂梁<sup>[2]</sup>,四梁<sup>[3]</sup>和五梁<sup>[4]</sup>结构等等.这些结构的传感器均采用微机械加工技术形成梁—岛结构,利用压阻效应来检测加速度.它们的梁的平面平行于硅片表面,梁的挠曲发生在垂直于硅片表面的方向,所以这类结构的传感器能检测的加速度分量都是垂直于器件表面的.我们采用新设计,制作出梁的平面垂直于硅片表面的结构,在平行于硅片表面而垂直于梁平面的横向加速度分量的作用下,梁在硅片平面内发生挠曲,产生较大应力,从而能测量出横向加速度.

这种新设计的横向加速度传感器力敏电阻仍然采用传统 IC 工艺加工.根据硅在 KOH 溶液中的各向异性腐蚀特性,采用边沿〈100〉方向的掩膜,可腐蚀生成〈100〉方向、垂直于硅片表面的直壁梁.为工艺方便,力敏电阻制作在梁的上表面,即在直壁梁的侧面.梁的宽度应尽量小,才能有足够的灵敏度.然而,力敏电阻条及铝引线等需要一定的宽度.为了克服这一矛盾,我们将矩形梁演化成 T 型梁,这样垂直于表面的直壁梁可以做得尽可能薄,而力敏电阻可制作在梁顶部加宽的部分.这样,在横向加速度的作用下,梁发生形变,产生应力,从而测量横向加速度.传感器实物顶视照片和结构示意图如图 1 所示.

只要将二个横向加速度传感器与一个法向加速度传感器集成在一起,就可以形成一个体积很小的三维加速度计.

\* 国家自然科学基金和传感技术国家重点实验室资助项目

朱海军 男,1971 年生,硕士,目前从事逻辑集成电路设计工作

陈 宏 男,1969 年生,硕士,讲师,目前从事半导体器件物理和微机械传感器方面的研究与教学工作

鲍敏杭 男,1937 年生,教授,博士生导师,中国电子学会会员,IEEE 高级会员,目前从事半导体器件物理和微机械传感器方面的研究与教学

1996 年 6 月 27 日收到初稿,1996 年 10 月 13 日收到修改稿

## 2 垂直梁结构及其力学特性分析

我们研制的横向加速度传感器为单悬臂梁结构,其力学示意图如图2所示。 $L_2$ 为质量块质心到支撑点的距离, $L_1$ 为梁长,则决定该结构的形变的微分方程为:

$$EIY'' = F(L_2 - x) \quad (1)$$

式中  $F$  为加速度引起的惯性力; $E$  为扬氏模量, $E=1.7 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ;  $x$  为梁上某点的坐标, $x \in [0, L_1]$ ;  $Y$  为梁上点在挠曲方向的位移; $I$  为梁的惯性矩. 设力敏电阻位于表面边缘,设离中性面距离  $S$  处,对应点  $x$  处的电阻上的应力  $T_c(x)$  为:

$$T_c(x) = -ESY'' = -\frac{SF}{I}(L - x) \quad (2)$$

从式(2)可见应力  $T_c(x)$  反比于惯性矩  $I$ . 在相同的加速度作用下,希望梁上产生的应力较大,灵敏度较高,就要求有较小的惯性矩. 设某一矩形梁的宽度为  $B$ , 高度为  $H$ . 当梁的挠曲发生于垂直于硅片方向,在这个方向上,其惯性矩  $I_{\perp} = BH^3/12$ ; 而当梁的挠曲发生在平行于硅片表面方向,在这个方向上的惯性矩  $I_{\parallel} = HB^3/12$ . 在以往设计的法向加速度传感器中,梁的宽度  $B$  远大于其高度  $H$ , 从而使得  $I_{\perp} \ll I_{\parallel}$ , 因而传感器对硅片法向的加速度分量的灵敏度远大于平行于硅片加速度分量的灵敏度. 在我们横向加速度传感器的设计中,将梁的中平面设计成垂直于硅片表面,使得  $I_{\perp} \gg I_{\parallel}$ , 在横向挠曲时能产生更大应力,从而实现了对横向加速度的敏感.

由以上分析,为提高灵敏度,应将梁的厚度  $B$  的值设计得很小,梁才能有较小的惯性矩. 但为了检测应力,需要在梁侧面制作力敏电阻,并且铝引线也有一定的宽度,这样我们将梁的截面演化成 T 形,如图3所示. 它基本上仍然是垂直于硅片表面的直壁的悬臂梁结构.  $h, b, W, H$  为梁截面的四个参数,  $H$  等于硅片的厚度,虚线所示为梁的中平面. 通过计算,得到这一结构的惯性矩  $I$  的表达式为:

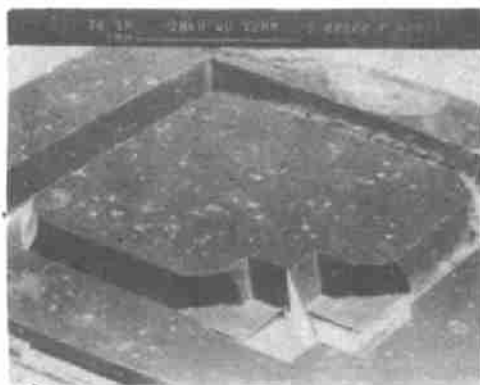


图1 传感器底视图 SEM 照片

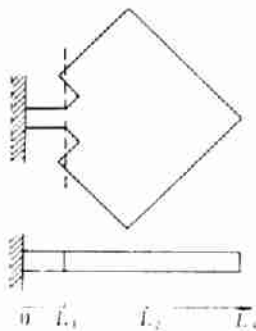


图2 传感器顶视及力学示意图

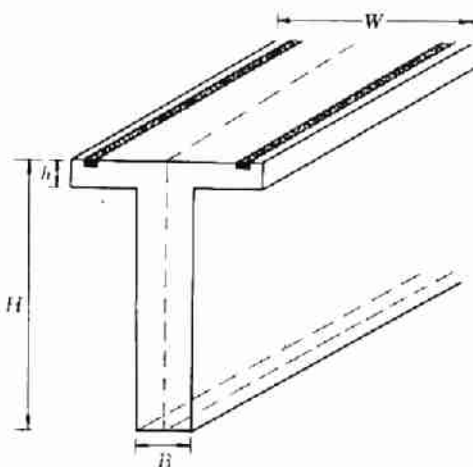


图3 T型直壁梁结构示意图  
其中阴影部分为电阻

$$I = \frac{1}{12}hW^3 + \frac{1}{12}(H-h)B^3 \quad (3)$$

$W$  值由工艺参数如电阻条宽及工艺容差决定,选择  $h, B, W$  值,使得惯性矩较小,从而得到较高的输出灵敏度. 经过折衷,传感器的  $h, W, B$  的设计值分别取为  $14\mu\text{m}, 100\mu\text{m}, 30\sim 50\mu\text{m}$ .

为了分析传感器的频率特性,我们对质量块作近似. 为计算方便,忽略部分质量块,只考虑图 1 中虚线以右部分,这样根据能量法,可以计算出传感器的振动基频:

$$\omega_0^2 = \int_0^{L_1} EI[Y''(x)]dx / \int_{L_1}^{L_2} \rho A(x)[Y(x)]^2 dx \quad (4)$$

式中  $\rho$  为硅的密度;  $E$  为扬氏模量,根据式(4),可以估算出第一共振峰出现的频率. 其中  $L_1, L_2, L_3$  分别为  $620\mu\text{m}, 1500\mu\text{m}$  和  $3900\mu\text{m}$ . 经计算,理论上第一谐振频率为  $1.2\text{kHz}$  左右.

### 3 力敏电阻的设计

一般情况下,力敏电阻在应力作用下的变化由下式表示:

$$\frac{\Delta R}{R} = \Pi_l T_l + \Pi_t T_t \quad (5)$$

式中  $\Pi_l, \Pi_t$  分别为纵向和横向压阻系数;  $T_l$  为沿电阻方向的正应力;  $T_t$  为垂直于电阻方向的正应力. 设电阻纵向在晶体主轴坐标系中的方向余弦为  $l_1, m_1, n_1$ ; 而电阻横向的方向余弦为  $l_2, m_2, n_2$ , 这样,就有<sup>[5]</sup>:

$$\Pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + n_1^2 l_1^2) \quad (6)$$

$$\Pi_t = \pi_{12} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_2^2 l_2^2 + m_2^2 m_2^2 + n_2^2 n_2^2) \quad (7)$$

在传统纵向加速度传感器中,电阻制作在 $\langle 110 \rangle$ 方向的梁上,这种情况下,  $\Pi_l = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$ ,  $\Pi_t = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$ . 一般采用 P 型力敏电阻,近似有  $\Pi_l = \pi_{44}/2$ ,  $\Pi_t = -\pi_{44}/2$ , 具有较高的压阻系数,以惠斯通全桥形式输出具有较高的输出灵敏度.

由于横向加速度传感器的梁直壁结构,梁的方向在 $\langle 100 \rangle$ 方向,力敏电阻制作在梁上只能沿着 $\langle 100 \rangle$ 方向. 当梁横向挠曲时,电阻只受到纵向应力的作用,不存在剪切应力,由(6)式可得:  $\Pi_l = \pi_{11}$ , 这时如按惯例采用 P 型力敏电阻,因为  $\Pi_t$  很小,压阻效应不显著,因而灵敏度极低. 当改用 N 型力敏电阻  $\pi_{11}$  就很大(在高阻的情况下,压阻系数值约为  $-102 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N}$ ), 具有显著的压阻效应. 这就使得我们采用 N 型的力敏电阻.

实际上压阻系数同温度、表面掺杂浓度密切相关<sup>[6]</sup>. 表面掺杂浓度低,压阻系数高,但却引入较大温度系数;反之掺杂浓度高,压阻系数低,却有较低的温度系数. 在选择掺杂浓度时根据两者进行折衷. 实验中,我们采用离子注入来制作电阻,方块电阻约为  $50\sim 100\Omega/\square$ .

由于力敏电阻是制作在梁的侧面(硅片的上表面)扩展出的 T 形的上表面,为了不影响灵敏度, T 形梁上部区域还是比较狭窄的. 因此只能制作四个平行与梁方向的力敏电阻,两个电阻  $R_1, R_2$  分置于垂直梁的两侧. 为了拼成平衡电桥,另外在框上再制作两个固定电阻  $R_3, R_4$ . 这样四个电阻构成惠斯通电桥,其输出灵敏度为:

$$V_{\text{ses}} = 1/2\pi_{11} |T_{\text{max}}| V_s \quad (10)$$

式中  $V_s$  为电源电压;  $T_{\max}$  为梁上电阻上所受的应力. 根据第二节的设计数据,  $\pi_{11}$  值取  $102 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N}$ . 计算得到这种传感器的灵敏度为  $1.1 \text{mV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (5\text{V})^{-1}$ .

## 4 垂直梁结构的研制

对于传统的梁—岛结构梁的平面是平行于硅片表面的, 梁的方向在  $\langle 110 \rangle$  方向, 腐蚀的结果是梁的侧面是斜面, 但由于梁的宽度大于厚度, 而挠曲发生在垂直于硅片方向, 因此斜面对梁的影响不大; 在横向加速度传感器中, 梁的弯曲方向在平行硅片方向, 侧面如是  $\langle 111 \rangle$  斜面则灵敏度就会严重下降, 因此侧面应制作成直壁. 因为 KOH 溶液采用  $\langle 100 \rangle$  条作掩膜时, 能腐蚀成直壁, 故梁的方向选择在  $\langle 100 \rangle$  方向, 和传感器边框成  $45^\circ$  夹角, 如图 1 所示.

为了制作直壁的 T 型梁结构, 需从硅片的两面进行加工. 采用双面对准光刻的方法, 根据 KOH 溶液在  $\langle 100 \rangle$  方向腐蚀特点, 在正反面形成  $\langle 100 \rangle$  掩膜, 经腐蚀后形成所要求的直壁结构和质量块. 工艺流程如图 4 所示.

首先我们在硅片正面梁区上用离子注入磷制作 N 型力敏电阻如图 4(a) 所示. 为防止表面反型而引起漏电穿通等现象, 我们在磷注入后去除表面氧化层, 对硅片进行全面的硼注入. 硼注入的能量和剂量保证 PN 结仍有足够高的击穿电压, 我们的实验中测得的击穿电压为 40V 以上. 氧化后根据双面对准记号光刻形成正反面的梁掩膜, 如图 4(b) 所示. 先腐蚀正面形成梁的上部, 如图 4(c) 所示. 然后从背面腐蚀, 形成 T 型梁的下部. 由于  $\langle 100 \rangle$  晶向的腐蚀特性是纵向和横向腐蚀速率相同, 在制作掩膜时需有预留的宽度, 如图 4(d) 所示. 腐蚀穿透后, 就形成了 T 型截面的直壁梁.

在腐蚀形成梁的同时也生成质量块, 质量块的掩膜仍为  $\langle 110 \rangle$  方向, 由于各向异性腐蚀在  $\langle 110 \rangle$  方向存在削角问题, 设计掩膜时需考虑削角补偿<sup>[7]</sup>.

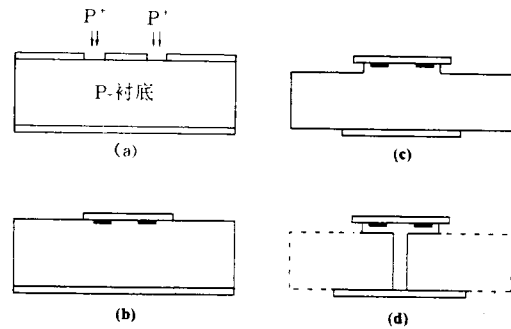


图 4 横向加速度传感器工艺流程示意

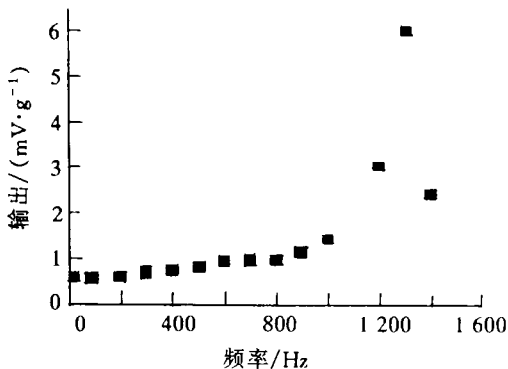


图 5 横向加速度传感器幅频特性

## 5 结果与讨论

腐蚀完成后的加速度传感器芯片经过封装, 可测试其灵敏度及幅频特性. 测得静态输出灵敏度为  $0.8 \text{mV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (5\text{V})^{-1}$ , 比计算值略小. 我们同时测试了器件的频率特性, 如图 5 所示. 由图中可见第一共振峰位于  $1.35 \text{kHz}$  处, 与能量法估计的基频相接近.

采用直壁结构的横向加速度传感器仍然

是悬臂梁的结构,在横向加速度的作用下,梁上产生应力.由图 2 可见传感器的结构是左右对称的,质量块的质心位于梁中线的延长线上,因而不存在一般所说的三维模式的“横向效应”即本例中的法向效应.

## 6 结 论

本文提出了一种单悬臂梁结构的压阻式的横向加速度传感器,采用硅微机械加工技术,根据硅各向异性腐蚀特点,制造出梁中平面垂直于硅片表面的直壁梁结构,实现对横向加速度的敏感.测试表明传感器的静态灵敏度为  $0.8\text{mV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (5\text{V})^{-1}$ ,第一共振频率为  $1.35\text{kHz}$ .

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Lynn Michelle Roylance *et al.*, A Batch-fabricated Silicon Accelerometer, IEEE Trans. on ED, 1979, **26**: 1911.
- [ 2 ] H. Sandmaier *et al.*, A Silicon Based Micromechanical Accelerometer with Cross Acceleration Sensitivity Compensation, Transducer'87, 399~402.
- [ 3 ] H. V. Allen *et al.*, Accelerometer Systems with Self-testable Features, Sensors and Actuators 1989, **20**: 153~161.
- [ 4 ] Minhang Bao *et al.*, A Micromechanical Structure Eliminating Lateral Effect of Silicon Accelerometer, Transducer'91, 101~103.
- [ 5 ] 鲍敏杭,等,《集成传感器》,北京:国防工业出版社,1987.
- [ 6 ] 牛德芳,《力学量敏感器件及应用》,北京:科学出版社,1987.
- [ 7 ] 鲍敏杭,等,半导体学报,1994, **15**(11): 768~773.

## Design and Characterization of Silicon Lateral Accelerometer

Zhu Haijun, Chen Hong and Bao Minhang

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

Received 27 June 1996, revised manuscript received 13 October 1996

**Abstract** The beam for a conventional beam-mass accelerometer is coplanar with the wafer plane. Therefore, the conventional accelerometer is sensitive to an acceleration component normal to the device plane. A novel accelerometer with a beam plane vertical to the wafer plane has been fabricated and characterized. This accelerometer is sensitive to an acceleration component in the wafer plane and vertical to the beam. Therefore, it is called a lateral accelerometer and two conventional accelerometers will lead to a miniaturized three dimensional accelerometer.