

# 变面积结构微机械电容式加速度传感器

李宝清, 陆德仁, 王渭源

(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050)

**[摘要]** 文章首次报道了一种基于面积可变电容结构的微机械加速度传感器。质量块呈栅状结构, 由悬臂梁支撑。两组交叉放置的定电极位于质量块的正下方。在惯性力的作用下, 质量块呈平行于衬底水平移动, 引起由质量块的栅与定电极的叉指构成的差分电容变化。通过测量差分电容的变化, 可以得到加速度信号的大小。理论分析表明加速度响应信号随面积呈线性变化, 而与质量块及定电极的间距无关。加速度传感器的制作采用了基于金属电镀的准 LIGA 技术, 设计量程为  $20 \text{ m/s}^2$ 。测量结果表明, 加速度传感器量程为  $20 \text{ m/s}^2$ , 灵敏度为  $58.1 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ , 非线性为 4% FS。讨论了器件线性度不够理想的原因。

**[关键词]** 电容; 加速度传感器; 变面积

## 1 引言

近年来, 固态加速度传感器在汽车安全气囊、心脏起搏器、地震检测等方面得到了广泛应用<sup>[1~8]</sup>。其中, 微机械电容式加速度传感器具有很低的温度效应和较好的线性, 因而得到更多关注。这种加速度传感器通常采用由可动质量块与定电极构成的变间距式敏感差分电容结构来测量加速度信号的大小。该结构的电容变化为非线性。如果限制质量块的移动距离, 以近似获得线性关系, 结果导致差分电容变化量很小, 给后续电路处理带来了困难。一种常用的办法是在接口电路上加反馈信号, 使其呈闭环模式工作, 以保证高线性。在另文中我们报道了一种加偏置的开环模式工作, 在低量程内有足够高的灵敏度和很好的线性度。专利中我们首次报道了一种新颖的变面积结构的加速度传感器, 在结构上避免了差分电容变化的非线性<sup>[9]</sup>。

## 2 原理

### 2.1 传感器基本结构

图 1 所示为该变面积加速度传感器的结构示意图

图。图中 1 为支撑锚点, 2 为栅状质量块, 3 为一组交叉放置的梳状定电极, 4 为固定在锚点上用以支撑质量块的四根弹性梁。质量块可以沿 Y 方向移动。图 2 所示为器件的工作状态示意图。

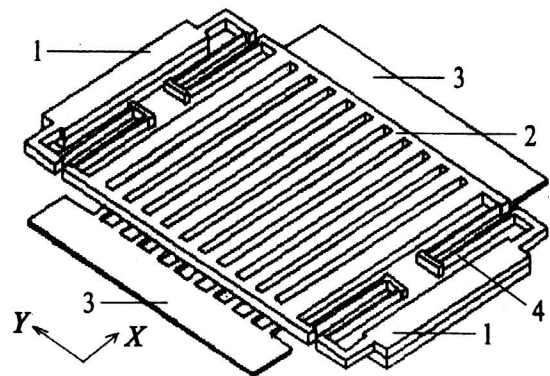


图 1 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor

如图 2b 所示, 在零加速度条件下, 结构电容  $C_1$  与  $C_2$  均为  $C_0$ , 差电容  $\Delta C = C_1 - C_2$ , 为零。如图 2c 所示, 在 Y 向加速度信号作用下, 结构电

[收稿日期] 1999-08-12; 修回日期 1999-11-08

[基金项目] 国家攀登计划 B 微电子机械系统 (MEMS) 资助项目 (85-37)

[作者简介] 李宝清 (1972), 男, 江西南昌市人, 中国科学院上海冶金研究所博士

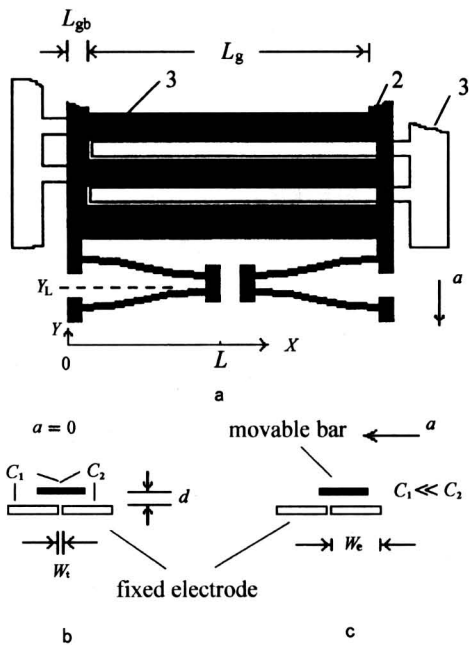


图 2 工作状态示意图

Fig.2 Working status of the device

容  $C_1$  与  $C_2$  发生变化，显然，在满量程下，质量块的移动距离为  $0.5(W_e - W_t)$ ， $W_e$  及  $W_t$  分别为定电极的宽度及其之间的距离，此时，差电容  $\Delta C$  达到最大值。通过测量差分电容  $\Delta C$ ，可获得相应的加速度信号的大小。

### 2.2 结构电容

令质量块栅条与定电极叉指具有同样宽度  $W_e$ ，位于质量块下方的叉指电极部分的长度为  $L_g$ ，质量块与定电极之间的垂直距离为  $d$ ，则在零加速度条件下的结构电容为

$$C_1 = C_2 = C_0 = N \frac{\epsilon L_g (W_e - W_t)}{2d}, \quad (1)$$

式中  $N$  为质量块栅条数， $\epsilon$  为空气介电常数。考虑到四梁支撑结构，基于弹性力学基本原理，经理论分析，可以得到差分电容  $\Delta C$  为

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\rho S a L^3}{2 E b^3 (W_e - W_t)}, \quad (2)$$

式中： $C = C_1 + C_2$  为总电容， $\rho$  为材料密度， $S$  为质量块面积， $a$  为加速度， $L$  为梁长， $E$  为梁的杨氏模量， $b$  为梁宽度。由式 (2) 可见，式中没有  $d$  参数，意味着该结构的加速度传感器仅对  $Y$  方向的加速度信号敏感，对垂直方向的加速度不响应。此外，式 (2) 中，除加速度  $a$  以外，其余参

数均为常数，所以，差分电容变化与加速度信号  $a$  为线性关系。

### 2.3 分布电容

如图 2a 所示，定电极叉指的根部始终被质量块覆盖，设被覆盖部分长度为  $L_{gb}$ ，该部分与质量块构成的电容相当于并联在  $C_1$  和  $C_2$  两端的分布电容  $C_P$ ，

$$C_P = \frac{N \epsilon L_{gb} W_e}{d}. \quad (3)$$

此外，实际电容结构还有平板电容的边缘效应，这是另一种分布电容  $C_B$ 。为此用有限元分析软件 ANSYS 进行了计算。图 3 为计入和不计入边缘效应的结构电容曲线。计算参数为： $L_g = 1800 \mu\text{m}$ ， $W_e = 22 \mu\text{m}$ ， $d = 3.0 \mu\text{m}$ ， $W_t = 2 \mu\text{m}$ ， $N = 24$ 。由图 3 可得，由边缘效应引起的分布电容  $C_B$  为  $0.41 \text{ pF}$ 。

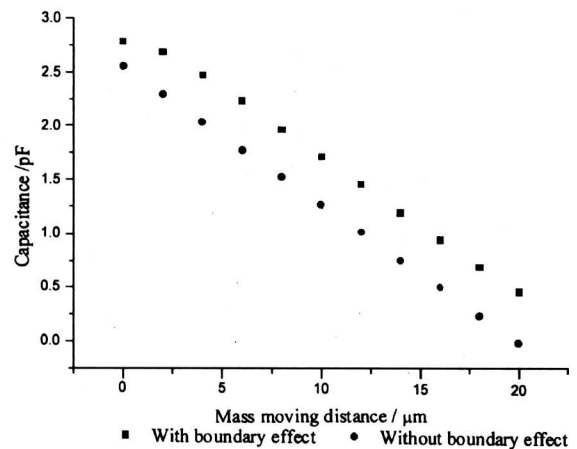


图 3 计入和不计入边缘效应的结构电容曲线

Fig.3 Structure capacitance curve with and without boundary effect

## 3 实验

### 3.1 芯片制作

为了避免采用硅衬底引起的 MOS 电容效应，加速度传感器选用了玻璃衬底。传感器的可动结构部分采用准 LIGA 技术电铸 Ni 制作<sup>[10]</sup>，其中牺牲层材料为电镀 Cu。芯片的结构参数为：弹性梁和栅质量块厚度  $h = 50 \mu\text{m}$ ， $b = 8 \mu\text{m}$ ， $L_g = 1600 \mu\text{m}$ ， $L_{gb} = 200 \mu\text{m}$ ， $W_e = 22 \mu\text{m}$ ， $d = 3.0 \mu\text{m}$ ， $W_t = 2 \mu\text{m}$ ， $N = 24$ ，芯片的设计量程为  $20 \text{ m/s}^2$ 。

图 4 示意了制作该电容式加速度传感器的工艺

流程，主要步骤为：**a.** 选择抛光玻璃为衬底，**b.** 制作 Cr-Au 定电极和锚点区，**c.** 在定电极上方生长 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜作为绝缘层，**d.** 电镀 Cu 牺牲层并

开锚点窗口，**e.** 用厚光刻胶制作可动结构的铸模，**f.** 电镀 Ni 结构层，**g.** 去除厚光刻胶，**h.** 去除 Cu 牺牲层以释放可动 Ni 结构层。

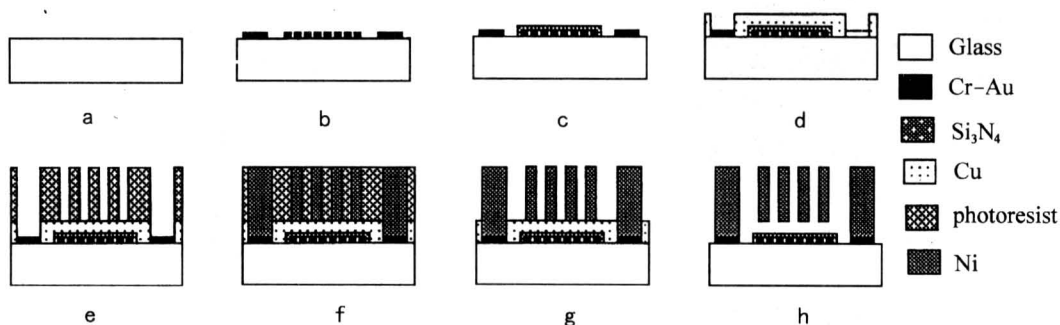


图 4 工艺流程图

Fig.4 Schematic process to fabricate the sensor chip

### 3.2 接口电路

图 5 所示为实验采用的接口电路，详细结果已另文发表<sup>[11]</sup>。一对相差为 180°，幅度为 2.5 V 的高频方波被分别加载在两个定电极上，若差电容  $\Delta C \neq 0$ ，则质量块上有电信号  $u(t)$  输出。

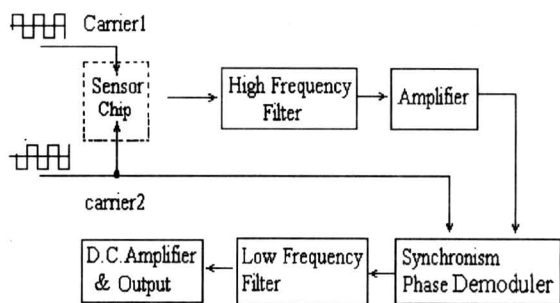


图 5 接口电路原理图

Fig.5 Schematic principle of the interface circuit

输出信号  $u(t)$  为：

$$u(t) = 2KV_0 \frac{\Delta C}{C} / (1 + \frac{C_P + 2C_B}{C}), \quad (4)$$

式中， $V_0$  为载波电压， $K$  为增益系数。由于总电容  $C$ ，分布电容  $C_P$ 、 $C_B$  均为常数，因此电路的输出信号仅与加速度信号  $a$  呈线性相关。另外，由式 (4) 可见，分布电容  $C_P$  和  $C_B$  的存在一定程度上降低了输出信号的灵敏度。

### 3.3 封装和测量

制作好的芯片，被封装在集成电路专用管座中，然后将加速度计放在振动台上，通过引线连到

差分电容接口电路上，在 25 Hz 频率下，进行响应测量。

## 4 结果

图 6 为传感器芯片的 SEM 照片 (a) 和封装器件照片 (b)。图 6 中所示梁和质量块结构的厚度  $h$  为 9  $\mu\text{m}$ ，梁宽度  $b$  为 10  $\mu\text{m}$  (设计值各为 50  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$ )，其余尺寸参数与前述的设计值一样。

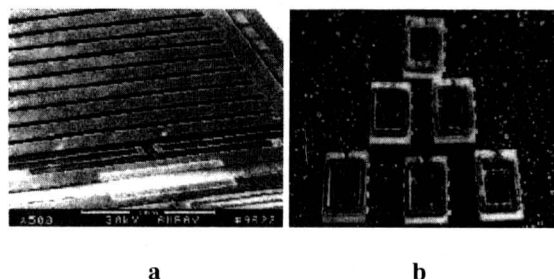


图 6 传感器芯片的 SEM 照片 (a) 和封装器件照片 (b)

Fig.6 SEM photo of the sensor chip (a) and photo of packaged sensors (b)

测量出加速度计的静态电容  $C_0$  为 1.4 pF。根据式 (3)，计算的分布电容  $C_P$  为 0.3 pF。前已给出由边缘效应引起的分布电容  $C_B$  为 0.41 pF。

测量加速度传感器输出信号时，引线长短、放置位置等都对结果有影响，一个典型的测量结果示于图 7。由图 7 可见，加速度计在 20  $\text{m/s}^2$  量程内，灵敏度为 58.1  $\text{mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ ，非线性为 4%。

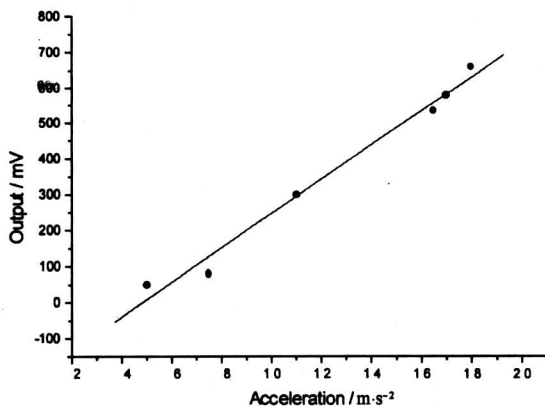


图7 变面积结构微机械电容式加速度计输出信号的测量结果

Fig.7 Experimental relationship between electronic signal and acceleration

## 5 讨论

理论上, 该结构的器件对垂直方向的加速度信号不响应。但是, 由于分布电容的存在会导致器件对垂直方向的加速度信号有响应。考虑分布电容后, 器件对垂直方向加速度的响应输出为

$$u(t)_V = 4V_0 \cdot$$

$$\left[ \frac{N\epsilon L_g \Delta y_m (1 - \delta_d/d)}{N\epsilon L_g (W_e - W_t) (1 - \delta_d/d) + d(C_P + C_B)} - \frac{N\epsilon L_g \Delta y_m}{N\epsilon L_g (W_e - W_t) + d(C_P + C_B)} \right], \quad (5)$$

$$\delta_d = -\rho S g L^3 / (2Eh^3), \quad (6)$$

根据器件参数, 以及镍密度  $\rho$  为  $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量  $E$  为  $186 \text{ GN/m}^2$ ,  $g = 9.807 \text{ m/s}^2$  为重力加速度, 计算出垂直方向灵敏度为  $3.0 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ , 远小于  $Y$  向灵敏度, 其影响可以忽略。

如式(4)所示, 分布电容  $C_P$  和  $C_B$  会降低传感器灵敏度, 由  $C_B = 0.41 \text{ pF}$  和  $C_P = 0.3 \text{ pF}$ , 可以计算出传感器灵敏度降低了约 20%。

目前这种新颖的加速度计的线性度不理想。原因之一是器件的质量块、弹性梁的厚度  $h$  为  $9 \mu\text{m}$ , 远小于设计值  $50 \mu\text{m}$ , 而弹性梁宽度  $b$  为  $10 \mu\text{m}$ , 稍大于设计值  $8 \mu\text{m}$ 。这种情况可能使器件在  $Y$  方向移动时会产生扭曲, 导致器件响应的非线性。另一原因是来自测试装置, 器件与接口电路靠引线连接, 已发现对输出响应有影响。因此解决的办法: 一是增加质量块和梁的厚度, 二是将器件与接口电

路集成在一起。这些有待于进一步研究。

致谢 本论文部分工作得到解健芳、陈思琴、陈芬扣和卢平芳的协助, 特此表示感谢。

## 参考文献

- [1] Rudolf F, Jornod A, Bergqvist J, et al. Precision accelerometers with  $\mu\text{g}$  resolution. *Sensors & Actuators* [J], 1990, A21~23: 297~302
- [2] Sukuzi S, Tuchitani S, Sato K, et al. Semiconductor capacitance-type accelerometer with PWM electrostatic servo technique [J]. *Sensors & Actuators*, 1990, A21~23: 316~319
- [3] Kuehnel W, Sherman S. A surface micro-machined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry [J]. *Sensors & Actuators*, 1994, A45: 7~16
- [4] Mineta T, Kobayashi S, Watanabe Y, et al. Three-axis capacitive accelerometer with uniform axial sensitivities [A]. *Transducer'95* [M], 1995. 554~557
- [5] Chau K H L, Lewis S R, Zhao Y, et al. An integrated force balanced capacitive accelerometer for low-g applications [J]. *Sensors and Actuators*, 1996, A54: 472~476
- [6] Spangler L C, Kemp C J. ISAAC: Integrated silicon automotive accelerometer [J]. *Sensors and Actuators*, 1996, A54: 523~529
- [7] Puers R, Reyntjens S. Design and processing experiments of a new miniaturized capacitive triaxial accelerometer [J]. *Sensors and Actuators*, 1998, A68: 324~328
- [8] Selvakumar A, Najafi K. A high-sensitivity Z-axis capacitive silicon microaccelerometer with a torsional suspension [J]. *J. of MEMS*, 1998, 7 (2): 192~200
- [9] 李宝清, 陆德仁, 王渭源. 栅结构电容式微型加速度传感器 [P]. 中国专利: ZL98224574.2, 1998-07-14
- [10] Mao Minyao, Wang Xiaodong, Xie Jianfang, et al. Fully self-aligned nickel mobile micromotor fabricated at low temperature [R]. *The International Society for Optical Engineering (SPIE)*, Austin, Texas, October, 1996. 236~241
- [11] 李宝清, 陆德仁, 王渭源. 高线性微机械差分电容式加速度计测量电路 [J]. *测控技术*, 1999, 18 (10): 12~14

## An Area Changeable Capacitive Micro-machined Accelerometer

Li Baoqing, Lu Deren, Wang Weiyuan

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

[Abstract] In this paper, a newly developed accelerometer based on the principle of area changeable capacitance is presented at the first time. The movable mass is designed as many bars connected together and suspended by elastic beams. Two comb-shaped fixed electrodes with their fingers side by side are alternately placed under the mass. The mass moves in the direction parallel with the substrate plane under the effect of acceleration. The movable mass and fixed electrodes compose a differential capacitor unit. It is concluded by theoretical analysis that the signal of the acceleration is only proportionally related to the area between movable mass and fixed electrodes but not related to the gap between them. The parasitic capacitance  $C_p$  between the mass and fixed electrodes and  $C_B$  induced by boundary effect both lower the sensitivity of the accelerometer by about 20%, and lead to a vertical effect on accelerometer that could be ignored if compared with the sensitivity. The quasi-LIGA technology with Ni as structure layer and Cu as sacrificial layer is used to fabricate the sensor chips. The fixed electrodes are fabricated on a glass substrate. A Cu sacrificial layer used to determine the gap between the mass and fixed electrodes is then electroplated with the fixed electrodes layer. Finally, the movable Ni mass is also electroplated with the Cu layer and is released after selective etch of the Cu layer. After packaging in IC ceramic die under atmosphere, the accelerometer is put on vibrator to be tested under a frequency of 25 Hz. The output signal is connected to the interface circuit with electric wires. The experimental results show that the accelerometer has typical sensitivity of  $58.1 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$  and non-linearity of 4% FS in operating range of  $20 \text{ m/s}^2$ . The obtained non-linearity is not ideal and the reason is discussed based on experimental conditions.

[Key words] capacitance; accelerometer; area changeable

---

## 多晶硅材料有好的市场发展前景

全世界的半导体器件中有95%以上是用硅材料制作的,因此半导体硅材料对现代科学技术和国防军事工业以及整个国民经济的发展都有至关重要的作用。多晶硅是半导体材料的最基础原料,没有半导体多晶硅,就不可能产出单晶硅及硅抛光片,更谈不上发展信息产业及国防军事工业。

1996年全世界多晶硅材料需求量即达15 000 t,而当时的供应量只有13 000 t,缺少2 000 t。有关资料表明,我国1998年多晶硅市场需求量为300~400 t,但产量只有需求量的20%。根据“九五”半导体产业发展规划,国内单晶硅片生产对多晶硅的年需求量在500 t以上,到2000年后,需求量会进一步扩大,加上太阳能电池发展的需要,估计需量将达1 100 t/a左右。国际市场上,韩国、中国台湾、马来西亚、新加坡的单晶硅生产均无多晶硅来源,日本每年进口的多晶硅也占所需多晶硅的1/3,可考虑进入的市场需求量为4 000 t/a。因此发展多晶硅生产是有市场依据的。

(蜀赛明)