

电容式加速度微传感器

郑志霞¹, 冯勇建²

(1. 莆田学院 电子信息工程系, 福建 莆田 351100; 2. 厦门大学 微机电中心, 福建 厦门 361005)

关键词: 加速度; 微传感器; MEMS 工艺

摘要: 介绍一种新型电容式加速度微传感器的结构和原理, 并进行受力分析。利用 ANSYS 进行有限元分析, 得出加速度和电容之间的非线性关系, 证明了该传感器在工艺设计上的可行性。设计合适的传感器结构参数和 MEMS 工艺流程, 制作出满足不同测量要求、有较高精度的加速度传感器。

Capacitive Micro Sensor of Acceleration

ZHENG Zhi-xia¹, FENG Yong-jian²

(1. Electronic & Information Engineering Department, Putian University, Putian 351100, China;

2. Micromech & Elctronic Centre, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Key words: acceleration; micro sensor; MEMS fabrication

Abstract: The Structure of a new type of capacitive acceleration micro sensor is introduced in this paper. In order to get the nonlinear relationship between the acceleration and capacitive signal, an effective method based on ANSYS was proposed, which explained the feasibility of the fabrication. The structural parameters and the fabrication process were designed to meet different test ranges.

随着微机电的发展, 传感器也不断地向小型化和微型化发展, 各种各样的微传感器应运而生。微传感器因其尺寸微小(达到微米数量级), 测量精度高而广泛应用于工程、医学、军事、生物各个领域^[1]。电容式微传感器因其结构简单, 成为微传感器中发展最快的一种。电容式微加速度传感器是基于微机械原理上的一种新传感器, 它采用被动原理, 因而具有真正的静态响应, 可以用来测量大型结构的稳定静态响应和超低频运动。电容式加速度传感器所具有的低噪声、高灵敏度、静态响应等特点, 是低幅、低频加速度测量的理想选择, 传感器的体积小、重量轻, 也是进行低频模态分析的有效工具。

1 电容式加速度微传感器的结构和原理

电容式加速度微传感器的模型是以平行板电容器为基础模型。平行板电容器是由两块彼此靠近的平行导体板组成, 设板的面积为 S , 板的间距为 d , 两板间的介电常数为 ϵ , 当满足条件 $S \gg d^2$ 时, 平行板电容器的电容为 $\epsilon S/d$ 。电容式加速度传感器的结构如图 1 所示, 上下电极分别为硼硅膜和玻璃电极, 产生惯性力的质量块在硼硅膜上。

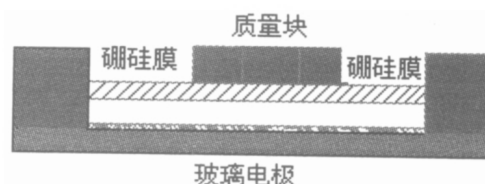


图 1 电容式加速度传感器结构图

收稿日期: 2004-01-08

作者简介: 郑志霞(1972-), 女, 福建莆田人, 讲师, 厦门大学硕士研究生。

当传感器测量加速度时,质量块具有同样的加速度,根据牛顿第二定律 $F = Ma$,这一加速度是由质量块的重量及硅膜和质量块间的相互作用力提供的。而这一相互作用力会使硼硅膜的梁发生变形,形状如图 2 所示。硼硅膜作为电容器的一个电极,而另一个电极是在玻璃上溅射的铝电极。当硼硅膜发生变形时,电容器两极板间的距离发生变化,电容器电容的大小也发生变化^[2]。通过测量电容器电容的变化,就可相应得出膜的受力情况,并进一步得出被测物体的加速度。

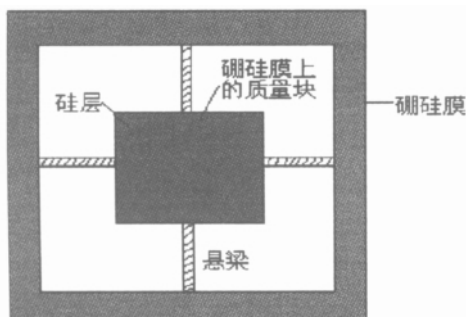


图 2 硼硅膜及梁的形状

2 传感器的受力分析

先对传感器的梁进行受力分析,取一根长度为 l 的悬梁,一端固定,另一端可上下自由运动,自由端受到的集中力为 F ,梁的重量忽略不计,各方向应力分别为 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$,梁的高度为 $2h$,厚度为 δ ,梁的边界条件为^[3]:

$$(\sigma_x)_{x=0} = 0, (\tau)_{y=\pm h} = 0, (\sigma_y) = 0, F = \int_{-h}^{+h} \tau_{xy} \delta dy$$

梁的约束条件为:

$$u_{x=l,y=0} = v_{x=l,y=0} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

传感器模型梁的位移与作用于自由端的力的关系为:

$$y = \frac{fl^2}{\sigma EI} - \frac{Fl^2x}{2EI} + \frac{Fl^3}{3EI} \quad (1)$$

由于质量块对硼硅膜的作用力 $F = m(a \pm g)$,而这一力由四根梁承担,所以作用在每根梁上的力均为 $F/4$,所以梁在 y 方向的位移与加速度的关系为:

$$y = \frac{m(a \pm g)}{4} \left(\frac{x^2}{\sigma EI} - \frac{l^2x}{2EI} + \frac{l^3}{3EI} \right) \quad (2)$$

梁绕端点转动的转动惯量为 $I = \frac{ml^3}{3}$,硅的杨氏模量为 $E=169E9$,重力加速度为 $g = 9.8m/s^2$, a 为被测系统的加速度。平行板电容器的电容为 $C = \epsilon \frac{S}{d}$,当板间距发生变化时,电容也发生变化,现选质量块的体积为 $V=500 \times 500 \times 190 \times 10^{-18}m^3$,密度为 $2332kg/m^3$,悬梁长度 $l=500 \times 10^{-6}m$,被测加速度为 $2g$ 时,可得出电容约为 $20pF$ 。

3 利用 ANSYS 进行有限元分析

由于硼硅膜在变形后,极板间的距离发生了变化,在不同的加速度下的变形量不同,加速度和电容之间的非线性关系,用上述求解的方法比较麻烦,而且精度不够。现在工程分析,最实用的是有限单元法。其基本思想是将问题的求解域分为一系列单元,单元之间靠节点接连。单元内部点的待求量可由单元节点量通过选定的函数关系插值得。由于单元形状简单,易于由平衡关系或能量关系建立节点量之间的方程式,然后将各个单元方程组合在一起而形成总体代数方程组,加入边界条件后即可对方程组求解。随着工程软件的开发应用,有限元分析变得简单快捷。ANSYS 是一种基于有限元分析法的大型软件,其基本步骤与常规的有限元法一致,本文利用 ANSYS 对传感器进行分析设计。

3.1 传感器不同结构参数与电容变化量的关系

传感器的悬梁长度或质量块大小发生变化时,传感器的灵敏度随之发生变化。根据要求设计合理的尺寸是传感器设计的重要前提。用 ANSYS 进行静态分析可得出当电容两极板间的距离为 $1\mu m$ 、悬梁的厚度为 $2\mu m$ 、宽度为 $20\mu m$ 、加速度变化为 $0.002g$ 、质量块长度和宽度均为 $400\mu m$ 时,悬梁长度、质量块高度与电容变化量的关系,见表 1。

表 1 悬梁长度、质量块高度与电容变化量的关系

悬梁长度 / μm	600	800	1000	1200	1000	1000	1000	1000
质量块高度 / μm	200	200	200	200	100	200	300	400
电容变化量 / $10^{-16}F$	1.00	1.02	1.06	1.11	0.75	1.06	3.46	4.63

考虑到传感器尺寸、制作工艺、测量精度上的限制，选择最合适的结构参数为：梁的长度为 1000 μm，质量块的高度为 300 μm(二寸硅片厚度一般为 300 μm，设计削角补偿，可湿法腐蚀得到 300 μm 厚的质量块)。

3.2 被测物体加速度与传感器电容的关系

根据上述选定的参数，加速度的测量范围从 0.002g 到 2g，得到电容与加速度之间的关系，结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，被测物的加速度和电容器的电容不成线性关系，加速度范围在 0.1g 到 1g 时有较好的线性。对传感器进行实际的测量，发现加速度在 1g 内时，加速度与电容关系的仿真值与实测值基本一致，超出该范围时测量结果不理想。在实际测量中，传感器灵敏度为 0.173pF/g。

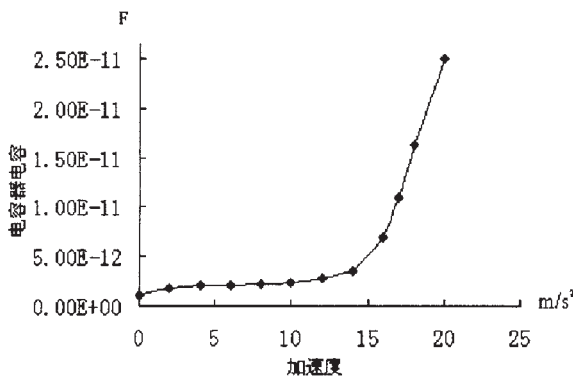


图 3 电容器电容与加速度关系

3.3 应力和形变分布

应用 ANSYS 对不同加速度的情况进行分析，可以得到形变及应力变化的信息，由此可以对所设计的结构进行强度校验。这是利用有限元软件来解决实际工程问题相当有效的方法。应用 ANSYS 对具有不同结构参数的模型进行分析，可以得到各种参数条件下的加速度与梁变形之间的关系^[4]。设传感器上下电极初始间距 1 μm；硼硅膜片厚度为 2 μm，悬臂梁的宽度为 20 μm，悬臂梁的长度 1000 μm，质量块长、宽均为 400 μm，高度为 300 μm。当加速度从 0 开始增大时，膜的变形量和剪应力不断增大，当加速度为 10 m/s² 时，膜在 XY 方向的剪应力如图 4 所示，Z 方向的变形量如图 5 所示。从图 4、5 可知，当加速度为 10 m/s² 时，膜在 Z 方向的变形量最大为 0.765 μm，应力在悬梁处相

对集中，但仍在弹性形变范围内，不会发生断裂。

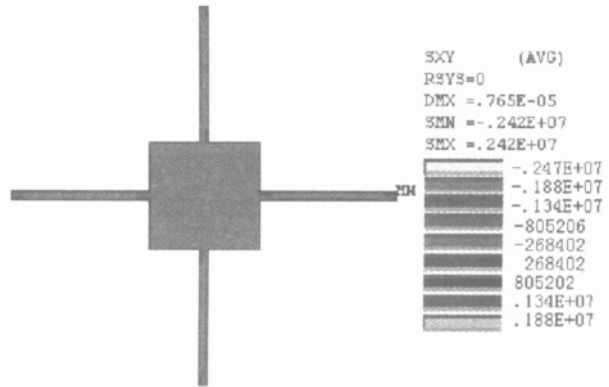


图 4 硼硅膜 XY 方向的剪应力

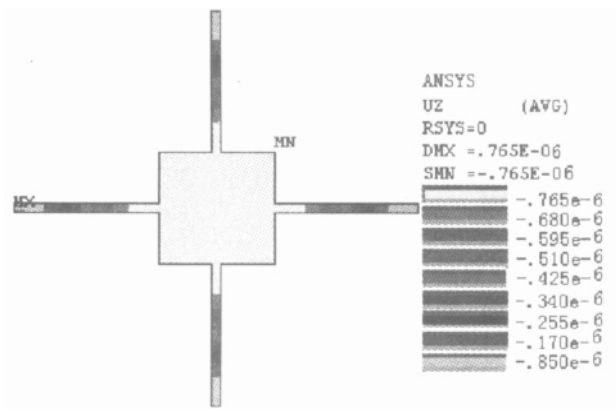


图 5 硼硅膜 Z 方向变形

4 传感器制作工艺

加速度微传感器是基于 MEMS 技术的，它符合 MEMS 的标准工艺。MEMS 工艺是建立在 IC 工艺基础上的，主要包括：1)清洗；2)氧化；3)光刻；4)溅射；5)PECVD；6)硼扩；7)湿法腐蚀；8)键合；9)封装等^[5]。本文给出这种 MEMS 微加速度传感器的整个制造工艺流程，主要流程如图 6 所示。

(1)将 7740 玻璃作为微传感器的衬底，并在玻璃上做电容器的下电极。将玻璃作标准清洗后烘干 1 个小时后双面涂胶，单面光刻，腐蚀 1.5 μm 深的槽。

(2)在玻璃槽内光刻电极图形，再溅射 200 Å 的钛和 3000 Å 的铝作为传感器的金属电极。

(3)用 PECVD 法在金属电极上淀积 N₄Si₃ 膜作为上下电极的绝缘层，再用丙酮去胶。

(4)用两英寸(100)面硅片作标准清洗后进行浓硼扩散，扩散炉温度 1000℃，氮气流量为

1.25L/min, 氧气流量为 30mL/min, 扩散时间为 5 个小时, 得到硼硅膜厚度约为 $2\mu\text{m}$ 。

(5) 在硼扩过的一面光刻悬梁和上电极的图形, 再用干法刻蚀得到悬梁和上电极。

(6) 玻璃电极和硅片键合, 玻璃上溅射金属面和硅片硼扩面键合。

(7) 硅片背面光刻质量块图形, 用湿法腐蚀得到 $400\mu\text{m}\times 400\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$ 的质量块。

(8) 光刻硼硅膜上的上电极引线孔, 并引线封装。

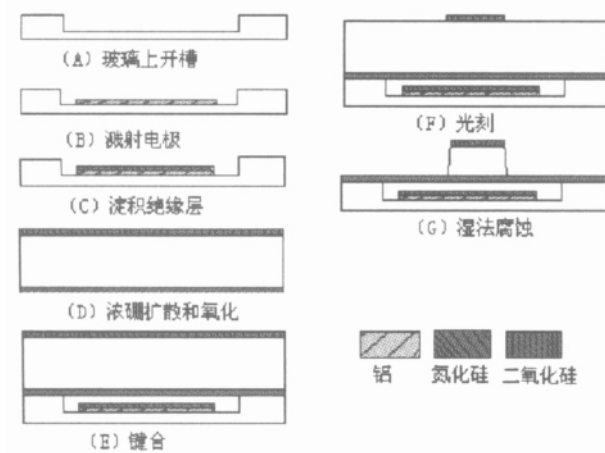


图6 工艺流程图

5 结束语

作为未来传感器发展主导方向的半导体微传感器, 它的分析与设计将涉及半导体物理与工艺、材料力学、弹性力学等多门学科, 特别是传感器与其测量电路的集成还将涉及到微电子学的许多方

面。本文以电容式加速度微传感器为基础, 从弹性力学的角度对传感器的力学模型进行分析, 并应用 ANSYS 有限元软件对其求解, 得出加速度和微电容之间的关系。说明利用 MEMS 技术的微加速度传感器的物理可行性。加速度微传感器工艺过程包括氧化、光刻、腐蚀、浓硼扩散、溅射、引线、封装等。它的静态特性和性能的稳定将成为加速度传感器的主流。

参考文献:

- [1] K Wise, K Najafi. Microfabrication techniques for integrated sensor and Microsystems[J]. Sciences, 1991, 1254: 1335-1342.
- [2] Wen H Ko, Qiang Wang. Touch mode capacitive pressure sensor[J]. Sensor and Actuarors, 1999, 75: 242-251.
- [3] 杨桂通. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 70-105.
- [4] Meng Guangqing, Wen H Ko. Modeling of circular diaphragm and spreadsheet solution programming for touch mode capacitive sensors [J]. Sensors and Actuators, 1999, 75: 45-52.
- [5] 黄庆安. 硅微机械加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 207-229.

[责任编辑 林振梅]