

基于 MEMS 技术的微电容式加速度传感器的设计

程 未, 曾晓鹭, 卞剑涛, 冯勇建

(厦门大学 萨本栋微机电研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 给出了一种基于 MEMS 技术制作的微电容式加速度传感器的结构及工艺。为了准确地把握这种微电容式加速度传感器的力学和电学特性, 仔细地建立了它的力学模型。在此基础上, 详细分析了它的动态特性——模态。并用有限元的方法分析和计算了微电容式加速度传感器的加速度与电容信号的非线性输入输出关系, 并结合实测参数验证了模型的有效性。最后提出了一种详细的有效的基于 MEMS 技术的微电容式加速度传感器的结构以及加工工艺流程。基于 MEMS 技术制作的微电容式加速度传感器具有结构简单、工作可靠和工作范围大的特点。根据这套方法, 可以比较方便地设计并加工不同测量要求的加速度计。

关键词: 微电容; 微机电系统; 有限元分析; 加工工艺

中图分类号: TP212 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-9787(2003)08-0075-03

Design of a micro capacitive acceleration sensor based on MEMS

CHEN G Wei, ZEN G Xiao-lu, BIAN Jian-tao, FEN G Yong-jian

(Sah Pen-Tung MEMS Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Structure and process of a micro capacitive acceleration sensor based on MEMS technology were given. So did the fabrication process. With the purpose of grasping the sensor's characters of mechanics and electrics, its mechanics model was discussed. On this basis the sensor's modal analysis was made. In order to get the nonlinear relationship between the acceleration and capacitive signal, an effective method based on FEA was proposed. The detail processing steps was designed, which explained the feasibility of the fabrication. The sensor has advantages of simple structure, operation reliability and the wide work range. Using this set of method, sensors with different test ranges can be designed and fabricated.

Key words: micro capacitance; MEMS; finite element analysis (FEA); fabrication process

0 引言

随着微机械系统和微加工技术的发展, 微型传感器也随之迅速发展。微传感器因其尺寸微小, 测量准确度和灵敏度高而广泛应用于工程、医学、生物等各个领域。微电容式传感器因其结构简单, 是微传感器技术领域中发展最快的一种传感器。

1 传感器的模型及其原理

电容式加速度传感器的结构示意图如图 1 所示。

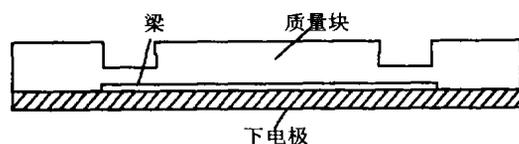


图 1 传感器的示意图

Fig 1 Schematic diagram of sensor

微电容式加速度传感器的工作原理是: 当传感

器的质量块受到加速度作用的时候, 会产生惯性力, 这个惯性力会使梁发生变形。把梁作为电容器的一个电极, 当梁发生形变时, 电容器两极板之间的距离将会发生变化。根据平板电容关系式为

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

式中 ϵ , A , d 分别是电极间的介电常数、有效面积和极板间距。所以压力载荷引起的极板间距 d 的变化必然会使电容 C 发生相应的变化。只要通过测得电容的变化量, 就能求出加速度的大小。

把传感器的质量块的尺寸作为变量, 相应地 4 根梁的尺寸随着变化, 假设梁的质量忽略不计, 而质量块的质量平均分布到 4 根梁上。对于这种简单载荷, 可以根据悬臂梁模型的曲线方程求出梁的

挠度^[1], 将其等效为质量块的最大形变, 从而可以估算出电容极板间距的要求。

弹性曲线方程

$$y = -\frac{Fx^2}{6EI}(3l-x),$$

$$\text{挠度 } f = \frac{Fl^3}{3EI},$$

式中 力 F 为传感器质量块的 $1/4$, 即 $F = \frac{mg}{4}$; E 为梁的弹性模量; l 为梁的长度; I 为梁的惯距。由此可以算出梁的最大变形量, 即约等于等效梁模型的挠度。这里近似地认为梁的最大变形量也就是电容极板间距的最大变化量, 由此可以推断出所能测量的最大加速度。反之, 根据所需要的加速度的测量要求, 可以相应地调整质量块的尺寸来满足设计要求。

2 有限元模型分析与实测参数

有限元分析 (FEA) 法是目前工程技术领域中实用性最强, 应用最为广泛的数值模拟方法。它的基本思想是将问题的求解域分为一系列单元, 单元之间仅靠节点连接。单元内部点的待求物理量可由单元节点物理量通过选定的函数关系插值求得。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。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 FEA 法一致。本文就是利用 ANSYS 来对结构进行分析的。首先进行静态分析, 所选择的加速度的测量范围从 $2m_{g_n}$ 到 $20g_n$, 根据模拟结果, 得到电容与加速度之间的关系, 如图 2 曲线所示。

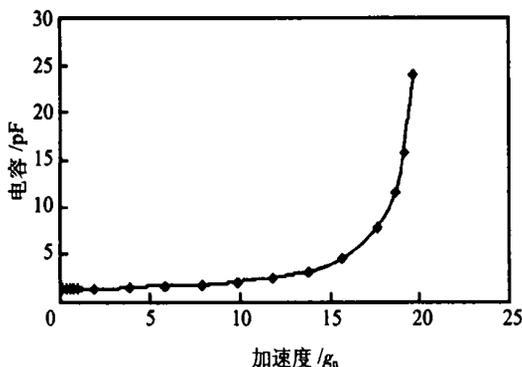


图 2 电容和加速度关系仿真曲线

Fig 2 Simulation relation curve of capacitance and acceleration

同时采用 ANSYS 软件来进行模态分析。表 1 列出各种振型 (从模态振型 1 到模态振型 20) 的模态频率。

表 1 各种振型的模态频率

Tab 1 Mode frequency of various vibration shapes

振型	频率 (Hz)	振型	频率 (Hz)	振型	频率 (Hz)
1	510.44	8	64 752	15	361 453
2	1 373.2	9	99 102	16	361 469
3	1 373.3	10	99 102	17	361 486
4	24 994	11	180 869	18	361 486
5	64 706	12	180 884	19	559 685
6	64 721	13	180 906	20	559 685
7	64 752	14	180 906		

在以上的振型中, 取几个具有典型意义的振型, 来分析它们的变形情况。在求得该传感器的各阶模态参数后, 有助于对其动态特性进行评价和修改, 并验证了该种传感器的有效性^[2]。图 3 为两个振型图。

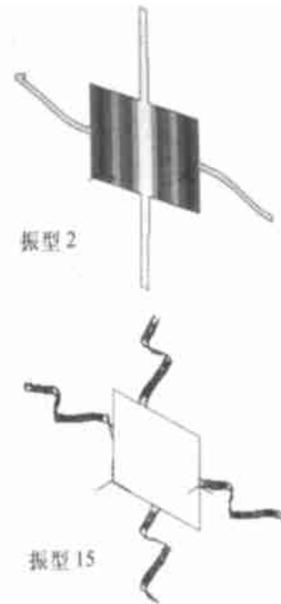


图 3 两个振型图

Fig 3 Two vibration shape diagrams

3 工艺流程设计

所提出的这种微电容式加速度传感器是基于 MEMS 技术的, 所以它应该符合 MEMS 的标准工艺。MEMS 工艺是建立在 IC 工艺基础上的, 主要包括: 清洗、氧化、光刻、腐蚀、溅射、扩散、键合、引线与封装等。根据要加工的器件, 本文设计了这种 MEMS 微变电容的整个制造工艺流程:

(1) 和 (2) 选取 P 型 $<100>$ 单晶硅片生长二氧化硅掩模。硅晶片主要是为了制作重掺杂的硼硅膜, 用做电容的一个电极。先在硅片的两面氧化出 $5\sim 6\mu\text{m}$ 的氧化层, 光刻相应的沟槽形状, 然后用 TMAH (四甲基氢氧化氨水) 溶液腐蚀得到 $2\mu\text{m}$ 的沟槽 (真空腔) 的形状;

(3) 选用固态硼源硼扩。然后用 BHF 液 (NH_4F HF DI=34.6% 6.8% 58.6%) 除去硅片另一面用作保护的氧化层。浓硼扩散其实首先是在 (2) 所刻出的槽中采用套刻出二氧化硅的掩模来;

(4) 玻璃是传感器的衬底,也是电容的另一个电极。本设计选用 7740# 玻璃,玻璃上面的电极采用磁控溅射的方法实现。为了加强金属电极与玻璃之间的结合效果,可以采用两种金属,先溅射大约 50 nm 的钛,然后再溅射 200 nm 左右的铝;

(5) 把经浓硼扩散的硅片和做好电极的玻璃用静电法键合;

(6) 打薄硅片使得其厚度为 200 μm (忽略上下电极间隔 2 μm ,也就是使得其厚度等于所设计质量块厚度)。生长二氧化硅保护层;

(7) 再次光刻腐蚀氧化掩模;

(8) 而后可以得到梁的形状。这里要说明的是,由于在第三步浓硼扩散得到的是梁的形状,因而最后,没有二氧化硅掩模保护的硅被腐蚀掉,而被二氧化硅掩模所保护的硅和抗腐蚀的硼硅玻璃保留下来,而得到了质量块、梁、以及梁的基座。

4 试验测试结果

根据 ANSYS 模拟曲线发现在 12 g_n 以下有较好的线性度,所以实际测量时对于准确度的测量是在小于 12 g_n 的这段范围内进行的。参看图 4,在 12 g_n 的范围内加速度和电容的关系基本上与仿真得到的关系一致,从而可以看出设计仿真基本正确。另外根据实测数据计算,其灵敏度为 0.1249 pF/ g_n 。

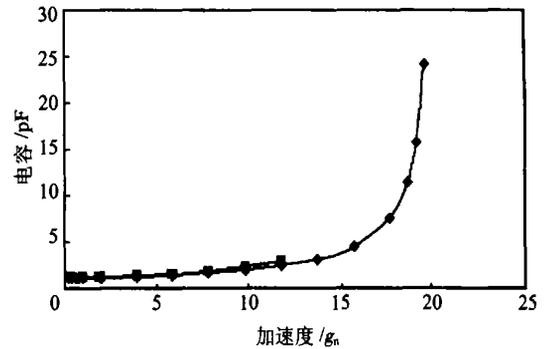


图 4 电容和加速度关系曲线(实际与仿真)

Fig 4 Relation curve of capacitance and acceleration (real and simulation)

5 结论

通过对该传感器的原理以及工艺流程分析并结合实测数据,说明了该种基于 MEMS 技术的微电容式传感器的原理可行性和工艺可实现性。使用有限元分析的方法,借助有限元软件分析得到了 $C-U$ 关系,与实际测量参数相比较,可以看到建立的模型是比较有效的。从 $C-U$ 关系可以看出,这种微电容式加速度传感器具有非常大的测量范围,另外它也能达到较满意的灵敏度。

参考文献:

- [1] 杨桂通. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999. 76 - 92.
- [2] 傅志方,华宏型. 模态分析理论与应用[M]:上海,上海交通大学出版社,2000. 50 - 150.

作者简介:

程 未(1980 -),男,湖北武汉人,厦门大学机电工程系毕业后留校任教,研究方向为基于 MEMS 技术的传感器和 IC 设计。

(上接第 74 页)

- [9] Baker B E, Kline N I, Treado P J, *et al*. Solution-based assembly of metal surfaces by combinational methods [J]. J American Chemical Society, 1996, 118: 8721 - 8722.
- [10] Lyon L A, Musick M D, Natan M J. Colloidal Au-enhanced surface plasma resonance immunosensing[J]. Anal Chem, 1998, 70: 5177 - 5183.
- [11] 赵红秋,林琳,唐季安,等. 利用纳米金颗粒增强 DNA 探针固定在传感器上的固定程度和识别能力[J]. 科学通报, 2001, 46(4): 292 - 295.
- [12] 裴仁军,胡继明,胡毅,等. 用于乙肝表面抗原检测的压电免

疫传感器的研制[J],分析测试学报,1997,16(5):11 - 13.

- [13] Park In-Seon, Namsoo Kim. Thiolated salmonella antibody immobilization onto the gold surface of piezoelectric quartz crystal [J]. Biosensors & Bioelectronics, 1998, 13: 1091 - 1097.
- [14] 张波,府伟灵,汤万里. 压电石英晶体生物传感器应用研究进展[J]. 传感器技术, 2002, 21(5): 58 - 61.

作者简介:

陈志敏(1979 -),女,河南郑州人,华南理工大学食品与生物工程学院在读硕士研究生,目前主要从事石英晶体生物传感器的研究工作。