

# 新型接触式电容压力传感器

郭强, 吕浩杰, 胡国清

(厦门大学机电工程系, 福建厦门 361005)

**摘要:** 与其他类型压敏器件相比, 接触式电容压力传感器 (TMCPS) 有着明显的优点, 例如较好的线性, 高灵敏度和大过载保护能力等。为了达到更好的性能, 设计了一种新型的接触式电容压力传感器 (DIMCPS), 这种新型的结构是在传统的 TMCPS 的底部电极上刻蚀了一个浅槽。与现有的接触式电容压力传感器相比, 这种结构可以实现更好的线性和更大的线性范围。使用有限元分析软件对膜片的变形进行了分析并阐述了传感器的结构和工艺过程。分析结果表明这种新型结构的传感器可以在保持传统结构优点的同时实现更高的灵敏度, 更好的线性和更大的线性范围。

**关键词:** 接触式电容压力传感器 (TMCPS); 有限元分析; DIMCPS

中图分类号: TP216 文献标识码: B 文章编号: 1002-1841(2008)03-0001-03

## New Kind of Touch Mode Capacitive Pressure Sensor

GUO Qiang LU Haojie HU Guoqing

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** Touch mode capacitive pressure sensor (TMCPS) has distinct advantages over other pressure sensors. To achieve better characteristics, a new type of touch mode capacitive pressure sensor named DIMCPS was devised, which had an additional thin notch on the bottom electrode of traditional TMCPS. Compared to present touch mode capacitive pressure sensors, the new sensor is characterized by better linearity and large linear operation range. Finite element analysis (FEA) was employed to model the structural deformation of this device. After that, the structure and fabrication process of the sensor were given.

**Key words** touch mode capacitive pressure sensor (TMCPS); finite element analysis (FEA); DIMCPS

### 0 引言

电容式传感器对于输入量变化的输出是非线性的, 而且它的灵敏度偏低, 无法忽略寄生电容的影响<sup>[1]</sup>。为克服电容式传感器的非线性缺陷, 人们提出很多种解决方案, 例如接触式, 差动式, 梳齿式等。这些不同的结构从不同的层面上大大提高了电容式传感器的性能, 但是这些结构往往相对复杂, 加大了工艺过程的难度。如果在工作范围内, 传感器的膜片可以接触到带有薄绝缘层的底部电极, 那么这种传感器被称为接触式电容压力传感器 (Touch Mode Capacitive Pressure Sensor, TMCPS)<sup>[2]</sup>。因为接触式传感器具有良好的过载保护, 简单的结构和高灵敏度等优点, 越来越多的人致力于对它的研究。为了提高传感器的性能, 人们提出了很多在结构上改进的方法, 例如双边接触结构<sup>[3]</sup>和双膜片结构<sup>[4]</sup>。经过对 TMCPS 进行分析后发现: 在压力逐渐增大的过程中, 当传感器的上膜片接触到下膜片以后, 压力在很小的范围内与电容呈线性关系, 之后马上进入饱和区。这是因为随着压力的增大, 膜片的变形量会不断减小, 电容的变化量也会随之减少, 相应的灵敏度也会大幅下降。为了增大线性范围, 而又不致使灵敏度下降, 引入了一种新的结构))) 双凹槽接触式电容压力传感器 (Double-notch Touch Mode Capacitive Pressure Sensor, DIMCPS)。这种结构因为有两个凹槽, 使传感器的线性范围成倍延伸; 同时, 当触点压力一定时, DIMCPS 比 TMCPS 具有高得多的灵敏度。

利用 ANSYS 对传感器的硅膜片在压力作用下的接触和大

变形进行分析。在工艺设计方面, 由于 SOI 材料的制备技术日臻成熟, 利用 SOI 材料对温度敏感度低以及寄生电容小等特点, 制作性能更加优良、稳定性更好的新型传感器已成为国内外研究的重点<sup>[5]</sup>。选择基于硅-硅直接键合技术的 SOI 材料制作该传感器<sup>[6]</sup>。

### 1 结构和工作原理

DIMCPS 的结构如图 1, 图 1(a) 为常态, 图 1(b) 为受压状态。对于同样面积的膜片, 圆形比矩形 (或方形) 膜片所承受的载荷大, 在相同载荷情况下, 圆形膜片所表现出来的最大应力较小。实际使用中多采用圆形膜片, 因此选取圆形膜片进行分析。图 1 中,  $h$  为上膜片厚度,  $g$  为第 1 个凹槽厚度,  $g_n$  为第 2 个凹槽厚度,  $t_n$  为绝缘层厚度,  $r$  为第 1 个凹槽的半径,  $r_n$  为第 2 个凹槽的半径。

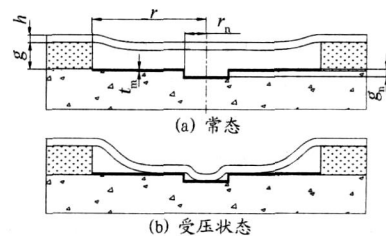


图 1 DIMCPS 结构图

常见的平板电容表达式为

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

只要介电常数  $\epsilon$ , 极板间距  $d$ , 极板相互覆盖的有效面积  $A$

三者中的任何一个发生变化,就会引起电容  $C$  的变化。当电容式压力传感器的膜片受压力作用时,产生一定的变形,因此硅膜片与底部电极之间的间隙大小发生变化,测量电容的电容值也将发生变化。在接触式电容微传感器中,电容主要由 2 部分组成,即非接触电容和接触电容。在压力达到接触点压力(即使膜片中心刚好接触到绝缘层时的压力)之前,如图 1(a)所示,测量电容值由非接触电容决定;在压力达到接触点之后,如图 1(b)所示,测量电容则由非接触电容和接触电容决定。DT2 MCPS 电容求解表达式为

$$C = \int_0^{r_1} \frac{2PE_0E_aE_i r_1 dr_1}{\epsilon_a t + E_i(g_n + g - w(r_1))} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{2PE_0E_aE_i r_2 dr_2}{\epsilon_a t + E_i(g - w(r_2))} \quad (2)$$

式中:  $C$  为电容;  $E_0$  为真空介电常数;  $E_a$  和  $E_i$  分别为空气和绝缘体的相对介电常数;  $r$  与  $r_n$  分别为第 1 个和第 2 个凹槽的半径;  $g$  与  $g_n$  分别为第 1 个和第 2 个凹槽的初始间距;  $t$  为绝缘体的厚度;  $w(r)$  为上电极膜片的法向挠度;  $w(r_1)$  和  $w(r_2)$  分别为  $0 \sim r_n$  和  $r_n \sim r$  范围内的法向挠度。

由上面的分析可以看出,要得到传感器的输入压力  $p$  与输出电容  $C$  之间的关系,就必须知道在受到不同压力  $p$  时膜片的变形情况。由板壳理论可知,在大变形条件下,膜片变形量的表达式为

$$\frac{5^4 F}{5x^4} + 2 \frac{5^4 F}{5x^2 5y^2} + \frac{5^4 F}{5y^4} = E \left[ \left( \frac{5^2 w}{5x5y} \right)^2 - \frac{5^2 w}{5x^2} \# \frac{5^2 w}{5y^2} \right] \quad (3)$$

$$\frac{5^4 w}{5x^4} + 2 \frac{5^4 w}{5x^2 5y^2} + \frac{5^4 w}{5y^4} = \frac{h}{D} \left[ \frac{p}{h} + \frac{5^2 F}{5y^2} \# \frac{5^2 w}{5x^2} + \frac{5^2 F}{5x^2} \# \frac{5^2 w}{5y^2} - 2 \frac{5^2 F}{5x5y} \# \frac{5^2 w}{5x5y} \right] \quad (4)$$

式中:  $D$  为弯曲刚度,  $D = Eh / [12(1 - \nu^2)]$ ;  $p$  为薄板两面的压力差;  $w$  为  $(x, y)$  点处的变形量;  $E$  为杨氏模量;  $\nu$  为泊松系数;  $h$  为薄板厚度;  $F$  为应力函数<sup>[7]</sup>。

虽然上述数学方法可以求出不同压力下膜片的变形量,但是在变化的条件下求解非线性方程组却非常困难。另外,由于双凹槽结构的引进,上述方程的求解变得更加复杂。因此应用 FEA 方法,借助 ANSYS 软件的强大功能,来求解膜片的变形就变得非常重要。

## 2 有限元分析与电容量的计算

(1) 对传感器进行建模。由于膜片是圆形的,因此采用轴对称的方法,对整个膜片某个半径上的剖面进行分析。这样就将三维变形的分析简化为平面变形的分析,大大简化了计算过程。定义单元类型为平面单元 SOLID42。根据单晶硅材料的性质定义材料的弹性模量为 130 GPa 泊松比为 0.13。

(2) 对模型划分网格。经过多次试验,在半径方向上取 20 个单元时可同时保证较快的计算速度和良好的计算精度;用接触分析向导生成接触对。考虑到共有 2 个凹槽,所以必须定义 2 对接触对,单元类型分别为 TARGET169 和 CONTACT172。TARGET169 用来定义接触中的刚性目标面,CONTACT172 用来定义柔性接触面。

(3) 定义分析类型。针对膜片在压力作用下的大变形情况,打开大变形选项,让程序在分析过程中考虑大变形的影响。定义对膜片的约束为四周固定。

(4) 在受力面上加载。使用 ANSYS 求解器计算膜片因受

力引起的变形。使用通用后处理从 ANSYS 中导出每个节点的变形情况,即半径方向上节点的变形量。图 2 为完整的膜片变形图。

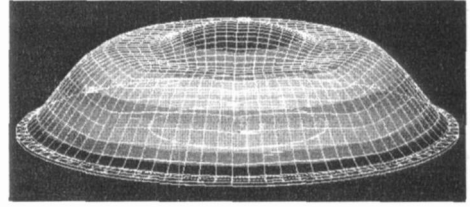


图 2 膜片变形示意图

(5) 采用 MATLAB 的数学方法计算电容。将 ANSYS 分析得到的节点变形数据导入 MATLAB 在计算过程中,使用 3 次样条插值对得到的节点形变向量进行插值运算,然后代入式(2)计算电容,从而得到变形后传感器两电极间的电容。

## 3 计算结果分析与结构的确定

为了求得浅槽的理想尺寸,以实现较好的性能,初定  $r$  为 250  $\mu\text{m}$ ,  $h$  为 4  $\mu\text{m}$ ,  $g$  为 4  $\mu\text{m}$ ,  $g_n$  为 1  $\mu\text{m}$ ,  $t$  为 0.135  $\mu\text{m}$ 。针对  $r_n$  取不同的值进行计算,得到 1 组  $p-C$  (压力-电容) 曲线,如图 3。曲线 1 中,  $r = 250 \mu\text{m}$ ,  $h = 4 \mu\text{m}$ ,  $g = 5 \mu\text{m}$ ; 曲线 2~5 中,  $r_n$  分别为 100, 75, 50, 25  $\mu\text{m}$ ,  $g_n = 1 \mu\text{m}$ , 图中,  $1 \text{ psi} = 68.95 \text{ kPa}$ 。

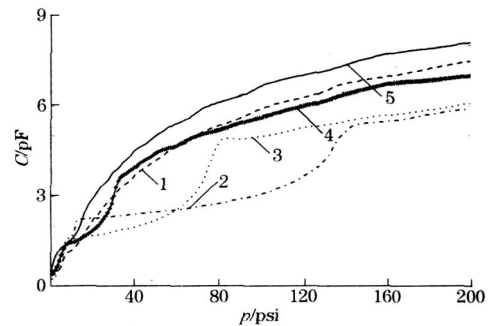


图 3 压力-电容曲线

对  $r_n$  分别取 100, 75, 50, 25  $\mu\text{m}$ , 以及  $g = 5 \mu\text{m}$  的曲线进行分析发现:  $r_n = 50 \mu\text{m}$  的曲线,其线性范围和灵敏度(曲线斜率)都是比较好的,因此,对  $r_n = 50 \mu\text{m}$  的膜片进行单独分析。

$r_n = 50 \mu\text{m}$  膜片的  $p-C$  曲线如图 4。其中,  $r = 250 \mu\text{m}$ ,  $h = 4 \mu\text{m}$ ,  $g = 4 \mu\text{m}$ ,  $t = 0.135 \mu\text{m}$ ,  $g_n = 1 \mu\text{m}$ 。

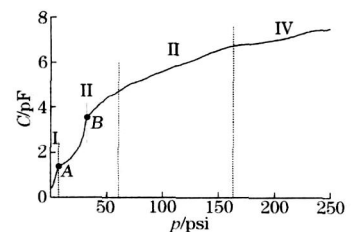


图 4  $r_n = 50 \mu\text{m}$  时得到的压力-电容曲线

对于传统的 IMCPS 结构,在确定的工作范围内,传感器的灵敏度和触点压力成反比关系,而线性范围与触点压力成正比关系<sup>[8]</sup>。为了获得较高的灵敏度,触点压力应该尽量选得小一些。然而,要得到长的线性范围,触点压力应该尽量大一些。从图 4 可以看出:与传统结构的 IMCPS 不同, DIMCPS 有 2 个触点压力,分别在 A、B 两点。它的真实触点压力 B 点为 32 psi。

线性范围达到了 165 psi 比传统的结构提高了很多, 而灵敏度下降却很少, 很好地解决了上述矛盾。

为了进一步分析 DIMCPS 与 TMCPS 在线性范围和灵敏度上的差异, 同时考虑到当  $g/h \ll 1$  时, 传感器的灵敏度最大<sup>[8]</sup>, 选取 3 组不同尺寸但触点压力相同的 TMCPS 与上述  $r_n = 50 \mu\text{m}$  传感器比较, 结果如表 1 所示。从表 1 可以看出:  $r_n = 50 \mu\text{m}$  的这种双凹槽结构的灵敏度比传统结构有了成倍的提高, 线性度和线性范围也有所提高。

表 1 DIMCPS 与 TMCPS 的性能比较

膜片尺寸 / $\mu\text{m}$	触点压力 /psi	线性范围 /psi	灵敏度 / (pF# psi <sup>-1</sup> )
$r = 150 \mu\text{m} \quad h = 4 \mu\text{m} \quad g = 4 \mu\text{m}$	32	90~130	0.1055
$r = 200 \mu\text{m} \quad h = 5 \mu\text{m} \quad g = 5.15 \mu\text{m}$	32	80~135	0.1102
$r = 250 \mu\text{m} \quad h = 6.15 \mu\text{m} \quad g = 6.15 \mu\text{m}$	32	70~130	0.1153
$r = 250 \mu\text{m} \quad h = 4 \mu\text{m} \quad g = 4 \mu\text{m} \quad r_n = 50 \mu\text{m} \quad g_n = 1 \mu\text{m}$	32	60~160	0.1227

#### 4 工艺设计

双凹槽结构的电容式压力传感器的 2 个膜片采用了硅-硅直接键合技术。在一个硅片上刻蚀凹槽, 并确定两个极板的间距, 同时在凹槽表面进行硼掺杂, 形成下膜片。在另一个硅片上进行浓硼扩散, 并刻蚀, 形成 P<sup>+</sup> 膜片, 作为上膜片电极。

##### 4.1 下膜片

准备  $\langle 100 \rangle$  方向的 N 型硅片 A。在进行了标准的清洗之后, 首先在硅片上热生长一层氧化层, 作为硅刻蚀掩蔽层。然后利用不同的掩模分别刻蚀  $0.1 \mu\text{m}$  的浅槽、第 1 个凹槽 ( $4 \mu\text{m}$ ) 和第 2 个凹槽 ( $1 \mu\text{m}$ )。3 次刻蚀均采用等离子刻蚀工艺, 如图 5(a), 图 5(b); 形成凹槽之后, 以固态  $\text{B}_2\text{O}_3$  为硼源在  $1150 \text{ e}$  下对硅片进行 6 h 硼扩散, 扩散深度为  $4 \mu\text{m}$  左右, 形成底部电极, 如图 5(c); 用氢氟酸缓冲液 (BHF) 除去残余氧化层以及由于扩散形成的硼硅玻璃, 然后用湿氧化法在  $920 \text{ e}$  下氧化 11.5 h 生成一层  $0.135 \mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  绝缘层, 如图 5(d)。

##### 4.2 上膜片

准备 N 型的硅片 B 首先表面氧化, 然后除去单边的氧化层。依据膜片的厚度 ( $4 \mu\text{m}$ ), 对硅片进行 6 h 的硼扩散, 温度为  $1150 \text{ e}$ , 然后除去硼硅玻璃及背部的氧化层。最后用化学机械抛光工艺将硅片表面变得平整, 以便于后续的硅-硅直接键合操作。

##### 4.3 硅-硅直接键合及后续工艺

键合之前, 先清洗 2 个膜片。将贴合好的硅片放入炉中, 在  $\text{N}_2$  环境下加热到  $1000 \text{ e}$  后高温退火完成键合操作, 如图 5(e); 将硅片放在 EDP 溶液中进行 P<sup>+</sup> 的自停止腐蚀, 在温度为  $105 \text{ e}$  下腐蚀 4 h 如图 5(f); 利用等离子刻蚀技术, 在下膜片的一侧开引出导线的电极板窗口, 如图 5(g); 在浅槽上淀积一层  $1 \mu\text{m}$  厚的低温氧化物 (LTO) 以完成腔室的密封, 如图 5(h); 用 BHF 腐蚀掉受力窗口和接触窗口的 LTO 和氧化层, 如图 5(i); 在电极板上溅射一层  $0.175 \mu\text{m}$  厚的  $\text{Al/Si/Cu}$  形成欧姆接触, 如图 5(j); 最后切片测试。

#### 5 结束语

DIMCPS 不仅在线性范围和灵敏度等特性方面较 TMCPS 有明显的提高, 而且它能够很好地解决在选择触点压力时, 为

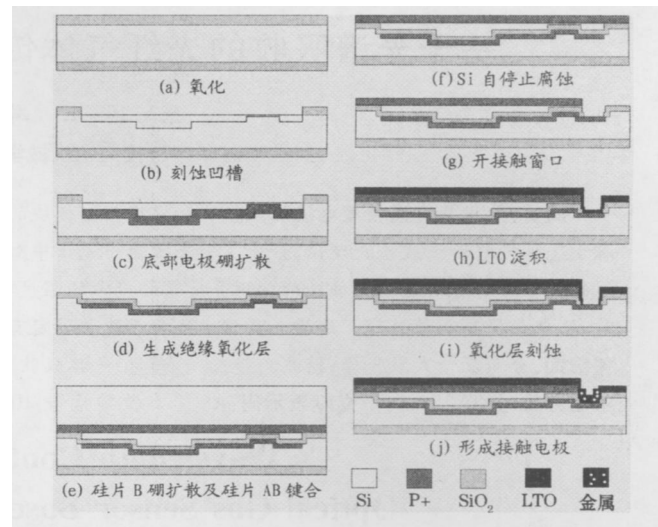


图 5 工艺流程图

得到了长线性和高灵敏度所产生的矛盾。另外, DIMCPS 结构简单, 在提高性能的同时并没有使加工过程复杂化, 从而未明显地增加加工成本。可见, 它是一种很有发展前途的传感器。

在分析过程中发现, 由于双凹槽结构有 2 个接触面, 上电极膜片在受压变形过程中将会先后 2 次与底部电极接触, 对应压力-电容曲线的 2 个触点压力。因为触点压力与传感器的线性范围和灵敏度有着密切的关系, 所以第 2 次接触应该在何时发生对传感器的性能起着决定性的作用。此外, 双凹槽结构在提高传感器性能的同时也引入了一定的未知因素, 增大了数据分析的难度。如何高效合理地选择第 2 次接触点 B 的真实触点压力的大小 (由第 2 个凹槽的半径和深度决定) 将成为今后研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] WEN H K, WANG Q. Touch mode capacitive pressure sensors Sensors and Actuators 1999, 75: 242-251.
- [2] MENG G Q, WEN H K. Modeling of circular diaphragm and spread sheet solution programming for touch mode capacitive sensors Sensors and Actuators 1999, 75: 45-52.
- [3] XU G P, CHEN G W, HU G Q. Surface micromachined double-sided touch mode capacitive pressure sensor Micromachining and Microfabrication Process Technology and Devices 2001, 4601: 25-30.
- [4] JIAO Y Z. Analysis and design of touch mode capacitive pressure sensor [D]. Xiamen University 2001.
- [5] ZHANG S, ZHANG W L, ZHANG S C, et al. The research status of SOI high temperature pressure sensor. Journal of Hebei University of Technology 2005, 34(2): 14-19.
- [6] WANG Q, WEN H K. Si2to2Si fusion bonded touch mode capacitive pressure sensors Mechatronics 1998, 8: 476-484.
- [7] TMOSCHENKO S. Theory of Plates and Shells 2nd ed. New York: McGraw-Hill 1940: 425-458.
- [8] WANG Q, WEN H K. Modeling of touch mode capacitive sensors and diaphragms Sensors and Actuators 1999, 75: 230-241.

作者简介: 郭强 (1981), 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 传感器。

E-mail: dyqn\_guo@yahoo.com.cn