

Design and Simulation of Sensitivity Diaphragm of Untouched-Mode Capacitive Pressure Sensor *

S H A N G Yong-hong¹, L I Yan-qi^{1,2*}, Y U Hong-yun^{1,3}, S U N Hong-guang¹, S U B o¹

1. Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Central island structure of the sensitive diaphragm used in untouched-mode capacitive pressure sensor solved the problem of the different, nonlinear, compensation circuit complexity. Through the optimization structural design for polysilicon sensitivity diaphragm, flexibility, stress and other mechanical properties also be analyzed. Capacitance values, sensitivity and linearity of the sensitive diaphragm are calculated at different applied pressure. According to the optimizing design, when applied pressure varying between $0.2 \sim 1.4 \times 10^5$ Pa, capacitance value changed between 0.0251 ~ 0.0281 pF. By analyzing rate of flexibility in XY plane at the same position of the two different diaphragm structure. Central island structure is 49.4% below the plane diaphragm 1.7%. Central island structure has a better sensitivity and linear.

Key words: untouched-mode capacitive pressure sensor; sensitivity diaphragm; MEMS

EEACC: 7230; 7320 V

非接触式电容压力传感器敏感元件的设计及性能分析 *

尚永红¹, 李艳秋^{1,2*}, 于红云^{1,3}, 孙红光¹, 苏波¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 北京理工大学, 北京 100081; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 将中心岛膜结构的压力敏感膜用在非接触式电容式压力传感器中, 解决了平膜结构带来的各点挠度不同、非线性和需要后续补偿电路的问题。通过对材料为多晶硅的中心岛膜进行结构优化设计和挠度、应力等力学性能分析。计算了在不同外加压力条件下压力敏感膜的电容数值、灵敏度和线性度。根据优化设计, 外加压力在 $0.2 \sim 1.4 \times 10^5$ Pa 间变化时, 电容值在 0.0251 ~ 0.0281 pF 间变化; 通过分析两种结构敏感膜在 XY 面内同一位置与中心挠度差的变化率, 中心岛膜结构的变化率为 49.4% 低于平膜结构 1.7%。因而中心岛膜结构比平膜结构有更好的灵敏度和线性。

关键词: 非接触式电容压力传感器; 敏感元件; MEMS

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)02-0276-04

电容式压力传感器是以具有可动极板的电容器作为压力传感元件, 将外部压力转化为电容值变化的器件。它具有灵敏度高、低功耗、低温漂、动态范围较大、信噪比高等优点, 被广泛用于工程、医疗、工业和航空航天各个领域^[1-2]。而其中, 设计和制作具有良好力学性能的压力敏感元件, 对于制作出性能优良的电容式压力传感器是至关重要的。具体可通

通过对压力敏感元件进行了设计, 改善接触式压力传感器线性度差、测量范围小等问题, 提高非接触式电容压力传感器的灵敏度和动态特性。

在非接触式电容压力传感器的敏感元件中, 中心岛膜结构比平膜结构有更好的线性。中心岛膜结构在外界压力作用下可平行移动, 解决了平膜出现的各点挠度不同、非线性、后续补偿电路复杂的问

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50677068); 国家高技术研究发展计划 863 项目资助(2006AA04Z345); 教育部长江学者和创新研究团队计划项目资助(PCSIRT)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-01-08

题^[3-4]。传感器压力敏感元件的变形与外加载荷、元件结构、元件形状、材料以及结构尺寸相关,文章使用 MEMS 仿真分析软件 CoventorWare,对材料为多晶硅的中心岛膜结构的传感器敏感元件进行了结构设计和挠度、应力等力学性能分析;同时,结合传感器测量范围和灵敏度的设计要求,对中心岛膜的结构、形状和尺寸进行了设计优化。根据设计的传感器敏感元件,计算了在不同外加压力条件下该敏感膜的电容数值和非线性。

1 电容式压力工作原理和结构设计

1.1 电容式压力工作原理

非接触式电容压力传感器是由基片、底电极、绝缘层和上电极构成的,图 1 是非接触式电容压力传感器的结构示意图。膜片结构的弹性元件受外界压力作用发生形变,从而改变电容器间距及输出电容,再通过接口电路将其转化为电压输出。在两个平行的导电板之间绝缘且不考虑边缘电场效应条件下,电容式压力传感器形成的电容值为:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (1)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为电容介质相对介电常数, S 为极板相对面积, d 为两极板的距离。

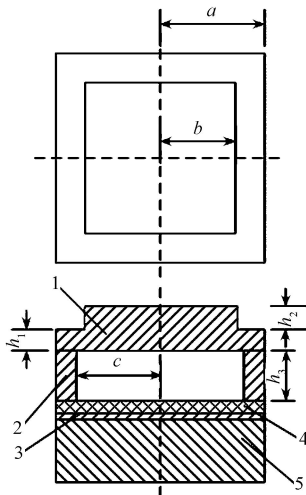


图 1 非接触式电容压力传感器结构示意图

1,2-多晶硅;3-底电极;4-绝缘层;5-基底

这种通过改变极板间距变化的电容式压力传感器的优点是可以进行非接触测量,对被测系统的影响小、灵敏度高,适用于较小位移(0.01 μm ~ 100 μm)的测量。但这种工作方式的缺点是存在线性误差,杂散电容对灵敏度和测量精确度有影响,与传感器配合使用的电子线路比较复杂。

1.2 传感器的结构参数

为了提高非接触式电容压力传感器的灵敏度和

线性度,文章所设计的非接触式压力敏感膜采用中心岛膜结构,如图 1 所示。

传感器压力敏感膜的变形是外加压力、膜厚度和膜外形尺寸的函数。压力敏感膜的设计要综合考虑测量范围的要求、灵敏度、强度和工艺参数。

$$\nabla^4 = \nabla^2 (\nabla^2 w) = \frac{P}{D} \quad (2)$$

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

式(3)是膜的刚性强度。 P 和 w 分别为外加压力和形变挠度, E 是杨氏模量, h 是膜的厚度, ν 为泊松比。文中采用的压力敏感膜片材料为多晶硅,杨氏模量 $E=150 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.22$ 。

非接触式电容压力传感器设计工艺要求两极板间距不超过 1 μm ,传感器敏感膜的厚度应不低于 0.4 μm 。因此,选取正方形的压力敏感膜,膜片边长选取为 50 μm ,传感器两极板空腔间距为 1 μm ^[5]。

文献[3]和[6]对中心岛膜结构的压力敏感元件进行了机械性能和电性能分析,确定了中心岛膜结构的敏感膜各部分边长和厚度。本文设计的中心岛膜尺寸比为:岛边长/膜边长=5/7,其中正方形膜的边长为 50 μm ,因此根据比例计算中心岛的边长为 35 μm 。压力敏感膜的总厚度这里取 0.5 μm ,而岛厚度和膜厚度将在 2.1 节中进行讨论。

1.3 差动电容

由于外加压力会引起可动极板中心的变形移动,这种变形将使得两极板的间隙发生改变,从而电容数值发生变化。因此可以设计两个电容,一个作为传感器敏感电容,一个作为固定参考电容,这个参考电容不会随着外界压力变化而产生电容变化。采用差动电容结构可以大大减小传感器输出的非线性,同时消除了寄生电容的影响。

$$\frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (4)$$

式中, C_1 是参考电容, C_2 是传感器敏感电容, d_0 是两极板空腔间距, Δd 是两极板空腔间距变化量。

从式(4)可以看出,电容差除和只受电容极板间距和间距变化的影响。同时,将参考电容几何形状设计与敏感电容一致,这样可以减小小寄生电容和残余应力的影响,减小传感器非线性和提高传感器性能^[7]。

2 分析和结果

2.1 结构优化设计

根据 1.2 节中的分析,模拟仿真分析中中心岛膜敏感元件的形状选择为正方形,膜片的边长为 50

$\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。中心岛膜的形状也为正方形,中心岛膜的边长为 $36 \mu\text{m} \times 36 \mu\text{m}$ 。为了寻找最优化的中心岛膜结构尺寸,分析中选取了不同尺寸的中心岛膜和底部平膜的高度,通过分析外加变化压力条件下膜中心截面内各点挠度变化和电容变化数值,寻找线性度和灵敏度较好的中心岛膜结构尺寸。如图 1 所示,分别选取了中心岛膜厚度与底部平膜厚度比为 1:1 和 4:1 两种结构的压力敏感膜进行分析。

图 2 是外加变化压力条件下膜中心截面内各点挠度变化图,文中采用的压力敏感膜为正方形即 x 、 y 方向的对称,并且外加压力和边界约束是均匀施加在敏感膜上,因此膜的受力为对称。这里分析结果是只选取压力敏感膜中心截面处的挠度进行分析。图 2 中, $0 \mu\text{m}$ 处是膜的边缘位置, $25 \mu\text{m}$ 处是中心岛膜的中心位置。外加的压力是在 $0.02 \sim 0.14 \text{ MPa}$ 间变化,可以明显看出,中心岛膜与底部平膜的高度比为 $h_1:h_2 = 1:1$ 的较高度比为 $h_1:h_2 = 4:1$ 的挠度大。这是由于底部平膜较薄,对压力反应灵敏,因而这种结构的压力传感器的灵敏度较高。

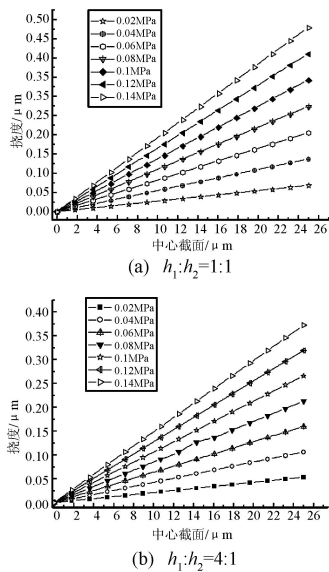


图 2 外加变化压力条件下中心截面各点挠度变化

图 3 是当外加压力为 0.14 MPa 时,中心岛膜结构的 2D 挠度分布图。从图中可看出,由于图 3(a) 中心岛膜与底部平膜的高度比图 3(b) 的大,因此图 3(a) 的中心岛膜处的挠度分布较图 3(b) 中的均匀。

电容值与电容极板间距呈反比,当外界压力变化时,电容值是呈非线性变化的,非线性越小,传感器特性越好,后续电路的处理越容易。

$$N \% = \frac{C_{\text{linear}} - C_{\text{non-linear}}}{C_{fs} - C_0} \quad (5)$$

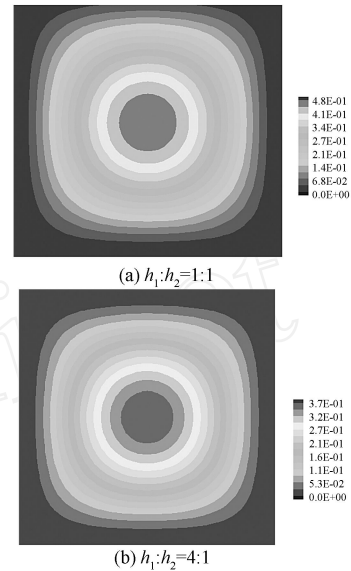


图 3 外加 0.14 MPa 压力条件下膜挠度变化图

式中, $C_{fs} - C_0$ 表示全量程电容变化, C_{linear} 和 $C_{\text{non-linear}}$ 表示电容的线性变化和非线性变化函数^[7]。

图 4 是在不同外加压力条件下传感器单元电容值随着压力变化曲线。从图 4 的比较和通过公式(5)的计算可以看出,两种不同高度比的敏感膜的非线性度均在 $8 \sim 9 \%$,无明显的差别。

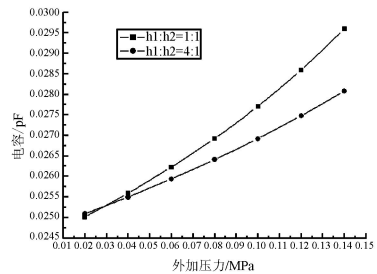


图 4 不同外加压力条件下传感器单元电容值

2.2 与平膜性能比较

从 2.1 的分析和图(3)、(4)中可以看出,对于中心岛膜结构的压力敏感膜,中心岛膜与底部平膜的高度比为 $h_1:h_2 = 1:1$ 的平膜部分较薄,对压力反应较为灵敏,因而这种结构的压力传感器灵敏度较 $h_1:h_2 = 4:1$ 高。而两种高度比的非线性度并无太大的区别。但从压力膜片的强度、制备工艺、测量范围等因素考虑,采用中心岛膜结构为 $h_1:h_2 = 4:1$ 压力传感器敏感膜设计。

文中还将中心岛膜与底部平膜的高度比为 $h_1:h_2 = 4:1$ 的敏感膜与相同形状和平膜做一性能比较。平膜也为正方形设计,厚度为 $0.5 \mu\text{m}$,边长也为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。图 5 为对两种结构敏感膜施加相同压力条件下,两种膜的中心挠度变化曲线。可以从图中看出,中心岛膜结构的对压力反应较为

敏感,挠度变化较大,因而这种结构的压力传感器灵敏度较高。

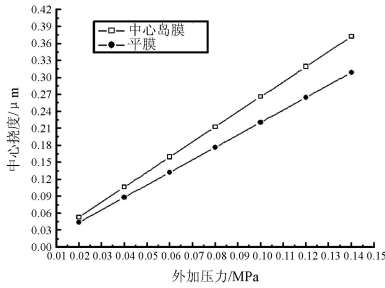


图 5 外加变化压力情况下两种膜结构的中心挠度变化曲线

图 6 是外加变化压力变化条件下两种膜结构的电容数值曲线^[8]。根据非线性表达式(5)计算可知,中心岛膜的非线性度是 8~9%,而平膜的非线性度是 10%^[5]。非线性度越小,传感器特性越好,后续电路的处理越容易。并且,通过分析中心岛膜和平膜两种结构的敏感膜,在 XY 面内同一位置与敏感膜中心位置处挠度差的变化率,中心岛膜结构的变化率为 49.4% 低于平膜结构 1.7%。但是考虑到在非线性度差别不是很多的条件下,中心岛膜结构将压力传感器的灵敏度提高较大,因而采用中心岛膜结构的压力传感器敏感膜设计。

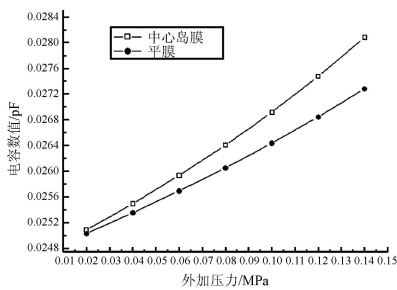


图 6 外加变化压力情况下两种膜结构的电容变化曲线

2.3 多晶硅薄膜的材料强度

为了保证电容式压力传感器在测量范围内正常工作,还应该考虑多晶硅敏感压力薄膜在外界施加最大压力时,材料是否超越其强度范围。

表 1 给出的是外加压力为 1.4×10^5 Pa 时,多晶硅压力敏感膜在 X、Y、Z 方向最大应力数值,可看

出它们的数值均小于多晶硅薄膜的极限强度 1 GPa,因而文章所设计的压力敏感膜能够承受最大外加压力而不会产生膜的破坏。

表 1 X、Y、Z 方向最大应力数值

单位	F_x MPa	F_y MPa	F_z MPa
数值	100.96	100.96	87.53

3 结论

通过对材料为多晶硅的中心岛膜结构的传感器敏感元件进行结构设计和挠度、应力等力学性能分析;确定了中心岛膜的结构、形状和尺寸。根据设计的传感器敏感元件,计算了在不同外加压力条件下该敏感膜的电容数值、灵敏度和线性度。根据优化设计,在外界压力变化范围为 $0.2 \sim 1.4 \times 10^5$ Pa 时,单个传感器的电容值变化为 $0.0251 \sim 0.0281$ pF;同时验证了多晶硅膜在最大外加压力条件下也不会产生破坏;中心岛膜的非线性度是 8~9%,并且在 XY 面内同一位置与膜中心挠度差的变化率,中心岛膜结构的变化率为 49.4% 低于平膜结构 1.7%。因而中心岛膜结构比平膜结构有更好的灵敏度和线性。

参考文献:

- [1] Fujimori, T, Hanaoka, Y, Fujisaki, K, Solid-State Sensors [J]. Actuators and Microsystems[C]. 2005, 1: 37-40.
- [2] Soim, N, Majlis, B. Y, Semiconductor Electronics[J]. 2002: 505-510.
- [3] 褚丹雷,微纳电子技术[J]. 2002,(2):34-37.
- [4] Beeby, S. P,Stuttle, M,White, N. M,Science, Measurement and Technology[J]. 2000,147(3):127-130.
- [5] 周阅新,秦明,黄庆安. 微纳电子技术[J]. 2003,(7/8):470-473.
- [6] 王中文,王丽娟. 辽宁大学学报,自然科学版. 2005,32(2): 131-134.
- [7] 张治国,褚斌,李颖等. 微纳电子技术[J]. 2004,11:9-42.
- [8] MEMS Design and Analysis Tutorials, Volume I, Physical and System-Level Design[M]. CoventorWare,2005.



尚永红(1978-),女,中国科学院电工研究所助理研究员。主要从事微纳技术及其应用方面的研究工作,shangyh@mail.iee.ac.cn.



李艳秋(1962-),女,现任北京理工大学信息学院院长特聘教授,博士生导师。主要科研方向有微纳加工与检测技术、微能量转换技术和 65 nm~32 nm 光刻技术,yanqiuli@hotmail.com.