

Design, Fabrication and Test of a Monolithic Capacitive Pressure Sensor*

HUANG Xiaodong, WANG Bin, QIN Ming*, HUANG Qing'an
(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Nanjing 210096, China)

Abstract: a novel capacitive pressure sensor is presented. Under pressure applied, the capacitance changes due to the variation of the permittivity as well as the variation of the area, displacement between the electrodes. The interface circuits based on the principle of the conversion from capacitance to frequency are also introduced. The fabrication of the sensor is simple, and integrated with CMOS interface circuits. The sensor was fabricated by standard CMOS process plus some post-processing. The results show that the sensitivity is about 44 fF/hPa from the range of 800 hPa to 1 100 hPa, and the resolution of the circuit is 3.77 Hz/hPa.

Key words: monolithic; capacitive pressure sensor; interface circuit

EEACC: 7230; 7320 V

一种单片集成电容式压力传感器的设计、制造和测试*

黄晓东, 王斌, 秦明*, 黄庆安

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 提出了一种新型电容式压力传感器。在外加压力下, 该传感器的极板面积、间距以及介质层介电常数均发生改变, 并导致电容发生变化。同时介绍了接口电路的设计, 该电路基于电容-频率转换原理。该传感器结构简单, 实现了与 CMOS 接口电路集成。传感器采用标准 CMOS 工艺与后处理工艺相结合的方式制造。结果表明, 在 800 hPa 到 1 100 hPa 的压力范围, 传感器灵敏度约为 44 fF/hPa, 接口电路的分辨率为 3.77 Hz/hPa。

关键词: 单片集成; 电容式压力传感器; 接口电路

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)04-0578-03

硅压力传感器发展距今已有四十多年的历史, 它应用于工业控制、生物医疗、汽车系统以及环境检测等领域, 广阔的应用领域以及良好的性能也使硅压力传感器成为 MEMS 技术成功商业化的典型代表。目前应用较广的硅压力传感器主要有压阻式压力传感器和电容式压力传感器。压阻式压力传感器主要应用某些材料(如金属、硅等)的电阻率随应力变化而变化的原理, 并通过接口电路(如惠斯通电桥)检测压阻变化, 并最终反映压力变化^[1]。该类型传感器具有制作工艺简单、检测电路成熟以及便于和标准 CMOS 工艺兼容等优点, 然而压阻系数呈负温度特性的缺点, 使得它往往具有较大的温漂, 这为后续检测电路设计带来了困难^[2]。

电容式压力传感器是另一种应用广泛的硅压力传感器, 与压阻式压力传感器比较, 它具有低功

耗、低温漂等优点。一个典型的电容式压力传感器由一个固定极板和可动极板构成, 在压力作用下, 可动极板发生弯曲, 极板间距发生变化并引起电容变化。该结构传感器的一个缺点在于空腔中电极引出问题, 传统的方法是钻孔填充导电胶来实现电极的引出, 这种方法完全偏离硅基加工工艺, 而且容易引起接触等可靠性问题^[3]。A. V. Chavan 和 K. D. Wise 等人报道了一种基于硅基工艺实现空腔电极引出的方法, 但工艺较复杂^[4-5]。本文提出了一种新的电容式压力传感器结构, 该传感器主要用于气压检测, 传感器电容由多晶硅/栅氧/N 阱硅构成。在外加压力作用下, 电容极板面积、间距以及介质层介电常数均发生变化, 并导致传感器电容发生变化^[6]。该结构制作工艺简单, 完全与 CMOS 结构兼容。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助课题(90607002)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-02-26

1 单片集成电容式压力传感器设计

1.1 传感器结构设计

单片集成电容式压力传感器结构如图 1 所示。传感器电容由多晶硅/栅氧/N 阱硅组成。多晶硅和 N 阱硅构成电容上极板和下极板,栅氧则构成电容中介质层。通过标准 CMOS 工艺,实现电容上下极板电极正面引出。在外加压力作用下,传感器电容结构发生弯曲,极板面积和间距发生变化,同时依据电介质电致伸缩原理,介质层的介电常数也发生变化^[7]。

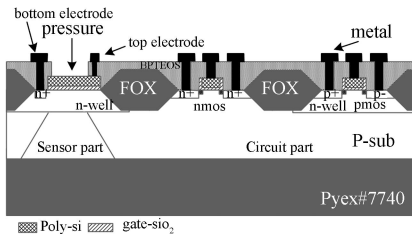


图 1 单片集成电容式压力传感器示意图

根据薄板理论,增大的电容边长以及减小其厚度,一方面有助于增加传感器灵敏度,另一方面又将降低传感器强度、增加版图面积和功耗。充分考虑上面因素,传感器电容确定为 800 μm × 800 μm,量程为 800 hPa 到 1 100 hPa,多晶硅/二氧化硅/N 阱硅的厚度分别为 0.35 μm/0.02 μm/5 μm。使用 ANSYS 对传感器的机械特性进行了分析,如图 2 所示,在 1.1 × 10⁵ Pa 下,膜的最大应力分布在侧边中心处,值约为 0.28 GPa,远小于硅的屈服强度(7 GPa)。

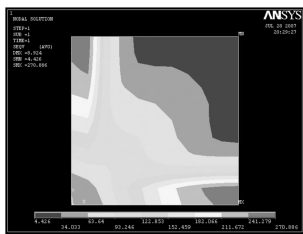


图 2 1.1 × 10⁵ Pa 下应力分布图,根据对称边界条件,只给出完整结构的四分之一

1.2 传感器接口电路设计

压力传感器接口电路原理图如图 3 所示。该电路基于电容 - 频率转换原理,并通过“差频”,消除了温度漂移和工艺波动的影响,提高了电路精度。该接口电路主要包含两部分:电容 - 频率转换电路和差频电路。电容 - 频率转换电路用于实现电容 - 频率转换。该部分电路主要包含以下模块:恒流源、施密特触发器、反相器以及 CMOS 传输门。电容 - 频率转换电路工作原理如下:假设 V_{out} 最初为高电平,则 S_{11} 闭合, S_{12} 断开,电流源 I 对电容 C_s 充电, V_{cs} 线性增加,当 V_{cs} 达到施密特触发器的高阈值电平 V_H 时,施

密特触发器输出翻转, V_{out} 变为低电平,并控制 S_{11} 断开, S_{12} 闭合,此时恒流源 I 对电容 C_s 放电,当 V_{cs} 降低至施密特触发器低电平 V_L 时,施密特触发器再次翻转,通过以上不断的充放电过程,最终 V_{out} 输出了一系列频率与电容 C_s 相关的方波。电容 - 频率转换电路由两个完全相同的电路模块构成,其中一个模块用于实现传感器敏感电容 C_s 到频率 f_s 转换,另一个则用于实现参考电容 C_r 到参考频率的转换。D 触发器用于实现信号频率 f_s 与参考频率 f_r 的差值^[8]。接口电路最后输出频率为:

$$f_{out} = f_s - f_r = \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_r} = \frac{I}{2C_s(V_H - V_L)} - \frac{I}{2C_r(V_H - V_L)} \quad (1)$$

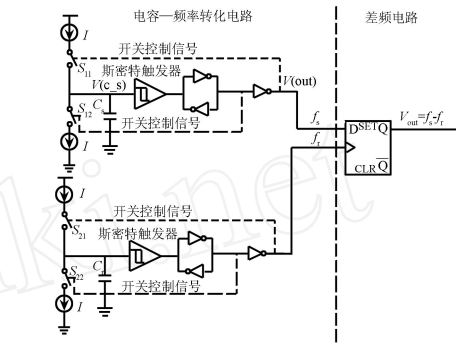


图 3 接口电路原理图

使用 PSPICE 仿真,图 4 给出了该接口电路误差特性曲线,仿真表明:当参考频率设置在 90 kHz 左右且 f_s 与 f_r 差值在 2 kHz 以内时,电路输出误差较小。设计电路参数时,通过调整电流源充放电电流 I 、参考电容 C_r 及传感器敏感电容 C_s 的大小。

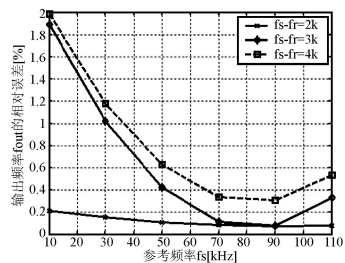


图 4 接口电路误差特性曲线

2 工艺

传感器采用标准 CMOS 工艺与后处理工艺相结合的方式制造。标准 CMOS 工艺采用 1 μm 双金属 N 阱工艺,该工艺步骤实现压力传感器电容结构(多晶硅/栅氧/n 阱硅)以及接口电路的制造。后处理工艺主要包括各向异性湿法刻蚀、电化学自停止腐蚀和阳极键合。体硅刻蚀和电化学结腐蚀自停止用于释放多层膜和精确控制膜的厚度^[9],腐蚀液采用 40% KOH 溶液,腐蚀温度为 80 °C,对应的腐蚀速

率约为 60 μm/h。阳极键合则用于实现腔的真空密封。图 5 给出了单片集成电容式压力传感器芯片。

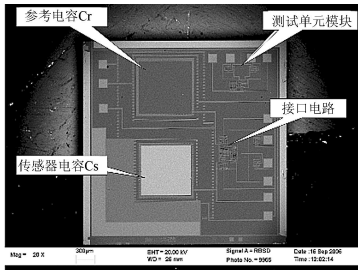


图 5 单片集成压力传感器 SEM 照片

3 结果

3.1 传感器结构测试

使用 LCR 数字电桥对传感器初值电容进行测量,测量结果为 1 103.2 pF,与理论计算值 1 104.48 pF 基本接近。室温下,在 800 hPa 到 1 100 hPa 压力范围内,电容变化范围为 1 207 pF 到 1 220 pF,传感器灵敏度约为 44 fF/hPa。

3.2 传感器接口电路测试

施密特触发器是电容-频率转换电路的核心模块,图 6(a)给出了施密特触发器的传输特性,测试结果为低阈值电平 VL = 1.1 V,高阈值电平 VH = 3.05 V,与设计值相符。图 6(b)给出了差频电路的测试结

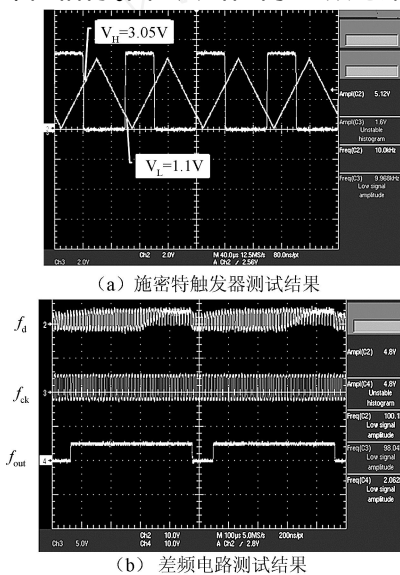


图 6 接口电路测试结果

果,在 D 输入端频率 f_d = 100.1 kHz,参考频率 f_ck = 98.04 kHz 的条件下,测得输出频率 f_out = 2.06 kHz, f_out 与 f_d - f_ck (2.062 kHz) 的值近似,差频电路很好实现了差频功能。测试结果与 PSPICE 仿真结果相符。接口电路的精度约为 3.77 Hz/hPa。

4 小结

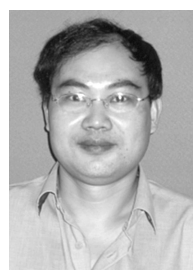
本文提出了一种新型单片集成电容式压力传感器。该压力传感器制作工艺简单,解决了传统电容式压力传感器电极引出问题,并实现了与 CMOS 接口电路集成,有效地抑制了寄生效应,提高了传感器精度。同时设计了电容接口电路,针对电容-频率转换电路频率稳定性差的缺点,提出了通过使用差频电路,消除温度波动的影响,提高了电路精度,实验结果与仿真相符。

参考文献:

- [1] 刘泽文等译. 微系统设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [2] Tsutomu Ishihara, Kenichiro Suzuki, et al. CMOS Integrated Silicon Pressure Sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, VOL. SC-22, NO. 2, APRIL 1987.
- [3] M. Esashi, S. Sugiyama, K. Ikeda, et al. Vacuum Sealed Silicon Micro-Machined Pressure Sensors[C]// Proc. IEEE, vol. 86, pp. 1627-1639, 1998.
- [4] A. V. Chavan, K. D. Wise. A Batch-Processed Vacuum Sealed Capacitive Pressure Sensor[C]// Proceedings of IEEE Intl. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 97), pp. 1449-1452, June 1997.
- [5] A. V. Chavan, K. D. Wise. Batch-Processed Vacuum Sealed Capacitive Pressure Sensors[J]. IEEE J. Microelectromech. Syst., vol. 10, pp. 580-587, 2001.
- [6] M. X. Zhou, Q. A. Huang, M. Qin. A Novel Capacitive Pressure Sensor Based on Sandwich Structures[J]. Microelectromech. Syst., vol. 14, no. 6, pp. 1272-1282, 2005.
- [7] Y. M. Shkel, N. J. Ferrier, "Electrostriction Enhancement of Solid-State Capacitance Sensing," IEEE Trans. Mechatronics, 8(3):318-325, 2003.
- [8] 程坤. MEMS 电容式传感器接口集成电路研究[D]. 南京:东南大学硕士学位论文,2003.
- [9] 徐义刚,王跃林,曾令海等. 四电极系统 PN 结自停止腐蚀研究[J]. 半导体学报,1994,11:15-11.



黄晓东(1982-),男,东南大学在读硕士,主要从事 CMOS MEMS 方向研究, hxd-fj@163.com.



秦明(1967-),男,东南大学教授,主要从事 CMOS MEMS 及片上电路的研究, mqin@seu.edu.cn.