

MEMS 电容式表压压力传感器研究

蒋沛奇, 周 聪, 张誉舰, 孟凡瑞, 杨振川, 高成臣
(北京大学集成电路学院 北京 100091)

摘要: 微型电容式压力传感器在生物医疗、无人机定位、可穿戴设备等领域有着重要的应用价值。本研究以 MEMS 电容式表压压力传感器为研究对象, 面向植入式生物医疗应用设计并制造了一款高精度的压力传感器。本器件由带固定极板的玻璃衬底和带膜片的 SOI 晶圆通过阳极键合形成。当存在压强差时, 膜片产生形变导致器件电容的变化, 进而读出电路通过检测变化电容计算出外界压强。在结构设计上, 本文提出了带膜片的凸台设计, 实现了对电容式压力传感器非线性问题的改善, 在 ANSYS 有限元仿真下, 非线性度由无膜片的约 17% 改善到 7%。凸台结构的制造工艺采用 TMAH 对硅的各向异性腐蚀而成, 并将 SOI 埋氧层作为停止层得到了较高的器件一致性。最后搭建了电容式压力传感器的封装测试平台, 并对输出结果进行标定。最终在 0~40kPa 相对大气压的压力值的测量范围下, 本器件实现了 0.30% 的测试精度、8% 的非线性度以及低至 0.09% 的重复性误差。

关键词: 电容式; 压力传感器; 表压传感器; 阳极键合; 各向异性湿法腐蚀

中图分类号: TP212; TH-39

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)03-0025-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250411001

CSTR: 32406.14.ycyk.20250411001

引用格式: 蒋沛奇, 周聪, 张誉舰, 等. MEMS 电容式表压压力传感器研究[J]. 遥测遥控, 2025, 46(3): 25-32.

Research on MEMS Capacitive Gauge Pressure Sensor

JIANG Peiqi, ZHOU Cong, ZHANG Yujian, MENG Fanrui, YANG Zhenchuan, GAO Chengchen
(School of Integrated Circuits, Peking University, Beijing 100091, China)

Abstract: Micro capacitive pressure sensors have important application value in fields such as biomedicine, drone positioning, and wearable devices. This study focuses on MEMS capacitive gauge pressure sensors. A high-precision capacitive pressure sensor is designed and fabricated for implantable biomedical applications. This device is formed by anodic bonding between a glass substrate with fixed electrodes and an SOI wafer with elastic membranes. The elastic membrane will deform when the pressure on both sides changes, resulting in a change in the capacitance of the device. The readout circuit calculates the external pressure by detecting changes in capacitance. This paper improved the nonlinearity of capacitive pressure sensors by designing a structure of a boss on the membrane. The result from ANSYS finite element simulation shows that the nonlinearity was improved from about 17% (flat membrane) to 7% (with boss structure). The structure of the boss was formed by anisotropic etching of silicon with TMAH, and the SOI buried oxide layer serves as the stop layer of etching to achieve high device consistency. Finally, a packaging and testing platform is built for capacitive pressure sensors and calibration. In the measurement range of 0 ~ 40kPa relative to atmospheric pressure, this device achieved a testing accuracy of 0.30%, nonlinearity of 8%, and repeatability error as low as 0.09%.

Keywords: Capacitive; Pressure sensor; Gauge pressure sensor; Anodic bonding; Anisotropic wet etching

Citation: JIANG Peiqi, ZHOU Cong, ZHANG Yujian, et al. Research on MEMS Capacitive Gauge Pressure Sensor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(3): 25-32.

0 引言

压力传感器是一种将环境压力信号转化为电信号或其他可用信号的器件, 在工业、农业、国防及民用领域都有广泛的应用。当前, 采用

MEMS(Micro-Electro-Mechanical System, 微机电系统)技术制造的微型压力传感器具有尺寸小、精度高、成本低的优势, 能够应对诸多领域如生物医疗、无人机高度定位、可穿戴设备、气象监测的自动化和智能化控制需求等。目前, MEMS 压

力传感器根据测量原理可以分为压阻式、电容式和谐振式三类。压阻式压力传感器利用单晶硅的压阻效应^[1]将外界的压力信号转化为电阻信号。这种方式可以通过简单的惠斯通电桥电路将压力信号转化为电压信号输出且器件工艺简单,线性度好^[2]。但压阻式压力传感器有温度系数大和功耗高的缺点,需要配合复杂的补偿电路才能实现更高精度的检测。谐振式压力传感器^[3]通过检测内部谐振结构共振频率的变化来检测外部的压力。这种测量方式有非常高的精度和灵敏度,但由于存在谐振结构复杂、封装困难和读出电路设计复杂的问题,使得这类传感器成本较高。电容式压力传感器的截面图如图 1 所示,其主要结构为一个单端可动的平行板电容器。当电容的可动极板两端存在压强差时,电容两个极板间的间距会发生变化造成电容值变化,由此可以通过测量电容值反映外界压强。电容式压力传感器根据实际应用可以分为绝压式(测量绝对压力)、差压式(测量两腔间压强差)、表压式(测量相对大气压的压力值)三类。电容式压力传感器有温度系数低^[4]、精度高、功耗低的优点^[5],且本身工艺较为简单^[6],成本较低,被广泛应用于对功耗和温度变化要求较高的领域。

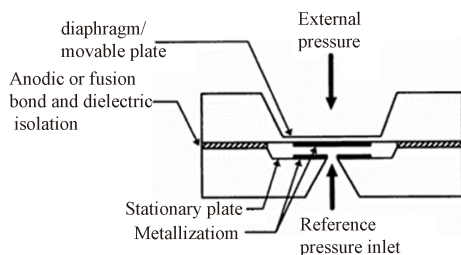


图 1 电容式压力传感器的截面图^[6]

Fig. 1 Sectional view of a capacitive pressure sensor

当前,国内外学者对电容式压力传感器技术展开了大量研究。VAISALA 公司^[7]和 VTI 公司^[8]均采用类似结构,实现了 30kPa~120kPa 区间的高精度、低功耗及高可重复性的电容式绝压传感器。KUNG^[9]等人利用表面牺牲层工艺,实现了单片集成电容式压力传感器和 CMOS 读出电路的芯片。图 1 所示的电容式压力传感器受到其测量原理的影响,电容输出曲线非线性较大^[10],因此改善电容式压力传感器的非线性也是主要的研究方向之一。

VTI^[11]的产品 SCP 1000 采用了曲面电极的设计改善了传感器的非线性度,但这种工艺存在较大的难度。SHARIFI^[12]等人采用差分输出的结构设计,使输出的两个电容的差值随压强线性变化。KO^[13]等人最早提出了在接触模式下工作的电容式压力传感器,并在此工作模式下得到了线性的输出曲线。但在接触模式下,可动电极与介质接触会产生较大的迟滞效应,限制了这类传感器的应用^[14]。

高精度低功耗的表压式压力传感器在生物医疗领域有重要的应用价值,但当前关于表压式电容压力传感器的设计与研究较少。本文设计并制造了一款面向植入式生物医疗应用的电容式表压力计。为了进一步改善传感器的非线性输出问题,本文采取了凸台电极结构方案^[15]。通过设计凸台结构增加敏感膜片中心区域的刚度让膜片整体挠度更加均匀,得以降低非线性。最终,这款传感器实现了在 0~40 kPa 的表压量程,0.30% 的精度,8% 的非线性度和低至 0.09% 的重复性误差的压强测量。

1 器件原理

1.1 薄膜形变理论^[16]

电容式压力传感器的基本模型可以简化为如图 2 所示。一个半径为 a ,厚度为 h 的薄膜两端在两端压强为 p 的情况下产生形变,其中 w 为挠度,代表了膜片上各点竖直方向的形变位移。当薄板的挠度远小于其厚度时,薄膜在压强差 p 的情况下满足以下微分方程:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \nabla^2 \nabla^2 w = p \quad (1)$$

其中, E 为材料的杨氏模量, ν 为材料的泊松比。

对于半径为 a 的周边固定的薄膜,可求解式(1)中的方程得到以下解:

$$w(r) = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (2)$$

其中, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$,且显然在中心处($r=0$)膜片的形变最大为 $\frac{pa^4}{64D}$ 。对于方形膜片,其各点挠度

不存在解析解,只能使用幂级数的方法近似求解^[17]。对于一个边长为 $2a$ 的方形膜片,一个简单的近似表达式为:

$$w(x,y) = \frac{pa^4}{47D} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^2 \left(1 - \frac{y^2}{a^2}\right)^2 \quad (3)$$

已知膜片每一点的位移量后，对于一个初始间距为 d 的电容式压力传感器，把膜片细分为许多小块，每一块都当作一个平行板电容，这些电容相互之间并联，因此得出总输出电容的表达式：

$$C = \iint_s \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d - w(x,y)} dS \quad (4)$$

以上公式可以实现对实际电容值的估算，但由于解析表达的复杂性，对于实际的设计尺寸，本文采用 ANSYS 软件进行有限元仿真分析。

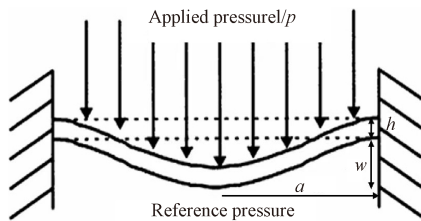


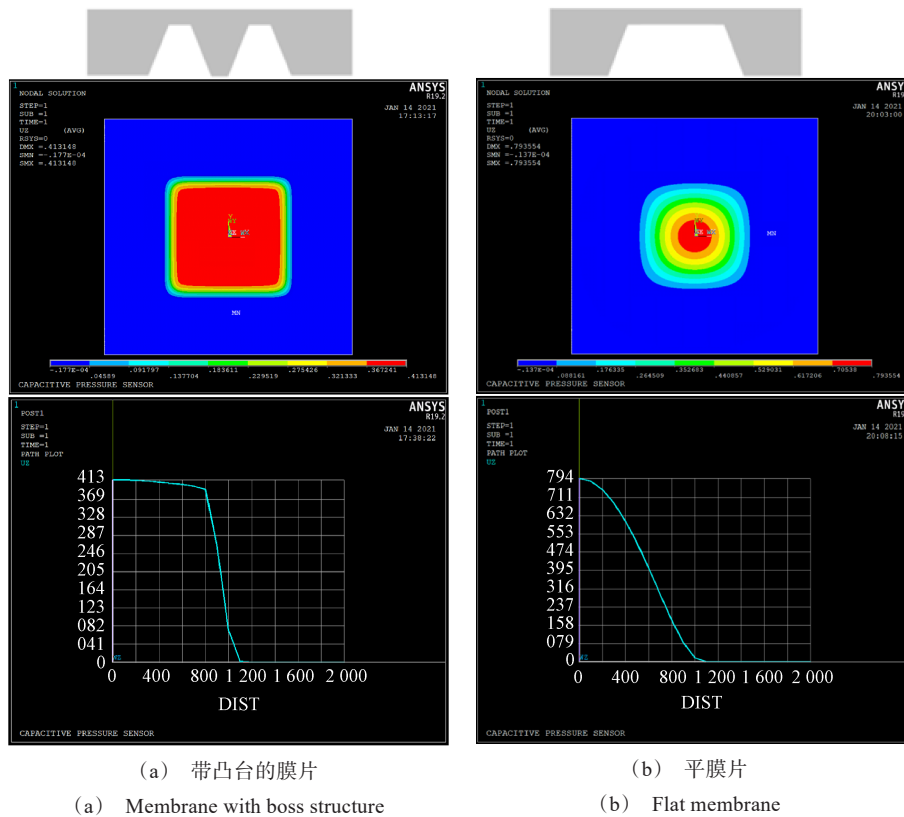
图 2 弹性膜形变示意图

Fig. 2 Schematic diagram of elastic membrane deformation

1.2 ANSYS有限元仿真分析

图 3 展示了平底膜片和带凸台的膜片形变随压强变化的仿真结果。具有凸台结构的膜片由于中心部分刚度较大，因此在同等压强下，中心部分的最大位移量明显小于平底膜片的且位移量相近。这样的设计能够防止两极板间距迅速变小导致电容剧烈变化甚至出现两极板相碰的现象，实现更好的线性度和较大的量程。

本文进一步分析了在初始间距为 $2.5 \mu\text{m}$ 情况下器件的电容特性。通过设置合适的平膜片和带凸台膜片的厚度、凸台大小等参数，使两种器件在 $0 \sim 60 \text{ kPa}$ 的压强下电容变化相近，如图 4 所示。仿真参数如下：膜片边长为 $2000 \mu\text{m}$ ；凸台边长为 $1250 \mu\text{m}$ ，高度 $200 \mu\text{m}$ ；凸台器件膜厚 $22 \mu\text{m}$ ；平膜片厚度 $40 \mu\text{m}$ 。在此参数下，两器件的电容变化范围为 $14.7 \text{ pF} \sim 19.5 \text{ pF}$ 。进一步计算仿真结果的非线性度可知：凸台的设计可以大大改善传感器的非线性，可由原来的平膜片时的约 17% 降低到 7%。



(a) 带凸台的膜片

(a) Membrane with boss structure

(b) 平膜片

(b) Flat membrane

图 3 不同膜片挠度对比

Fig. 3 Comparison of different membrane deflection

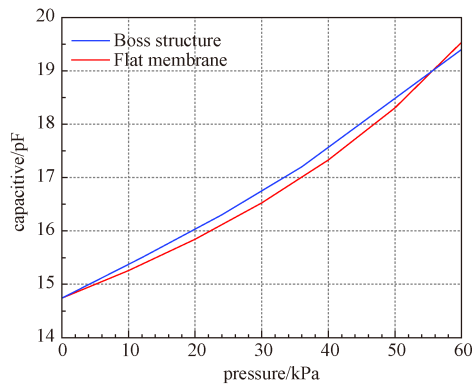


图 4 平膜片和带凸台膜片输出特性对比

Fig. 4 Comparison of output characteristics between flat and boss structure membrane

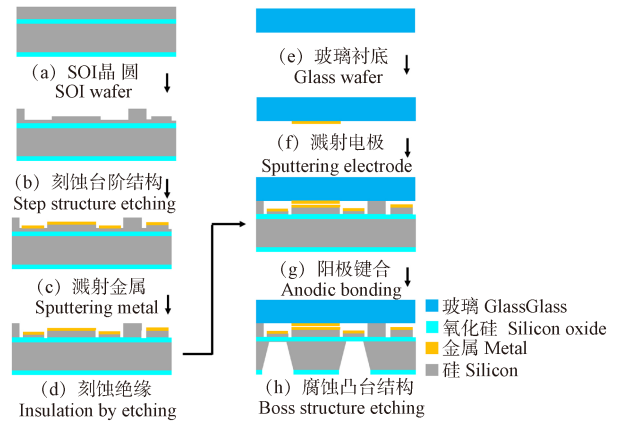


图 5 工艺流程

Fig. 5 Manufacturing process

2 工艺制备

图 5 展示了压力传感器的加工工艺流程图, 器件主体由一个 SOI(Silicon-On-Insulator 绝缘体上硅晶圆片)和玻璃片通过键合形成。使用 SOI 晶圆制作压力传感器能得到更精确的膜厚控制、更低的温度漂移和更低的漏电流^[18]。在玻璃衬底上, 通过光刻-溅射-剥离的方式图形化钛金电极结构, 完成对传感器的固定极板和互连金属的图形化。另一侧 SOI 晶圆的器件层上通过两步刻蚀定位电容间隙和弹性膜厚度, 之后使用相同的方法在膜片上图形化可变电极和绝缘环, 最后通过刻蚀至埋氧层实现金属间相互绝缘。两片晶圆均加工好后, 进行阳极键合实现极板间的固定, 利用 TMAH 腐蚀出凸台结构, 最后切片得到器件。

两片晶圆的互联金属版图如图 6 所示, 紫色和绿色区域分别对应 SOI 晶圆和玻璃片上的金属图形。屏蔽环结构溅射在 SOI 晶圆的第二级台阶上, 其作用类似于同轴电缆中的金属屏蔽层, 可以减小表压式压力计在介质中工作时漏电流的影响^[19]。固定电极的搭接点的高度和阳极键合面的高度一致, 在之后的阳极键合过程中同时实现上下极板的搭接, 实现固定电极到焊点的电学引出。蛇形流道将腔室和外界大气相通, 实现阳极键合之后工艺器件内外压强平衡。又由于流道口径小, 湿法工艺中的溶液不容易进入内部腔室对器件产生破坏。阳极键合过程中, 硅片和玻璃片被加热到 300 °C ~ 500 °C, 并将玻璃接到负极接入 500 V ~ 1 000 V 的电压。由于阳极键合具有键合强度高、对键合界面平整度容忍度高、密封性强等优势, 因此, 本工作采用阳极键合, 对压力传感器的上下极板的位置进行对准固定与固定电极的搭接。

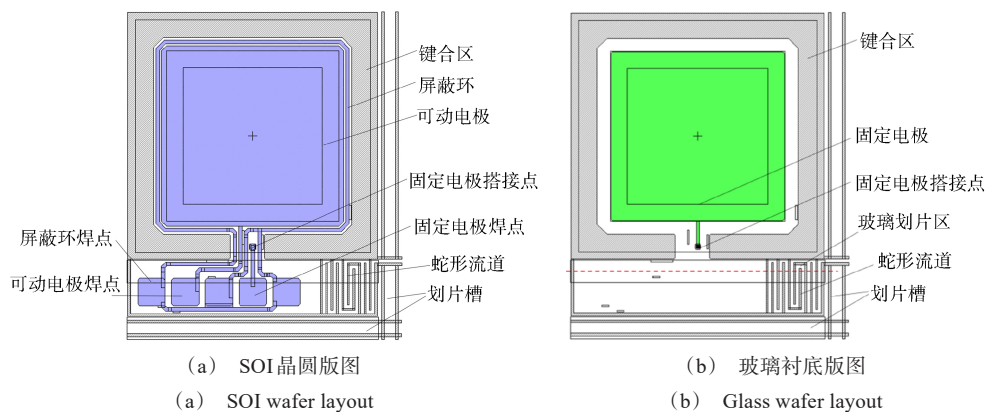


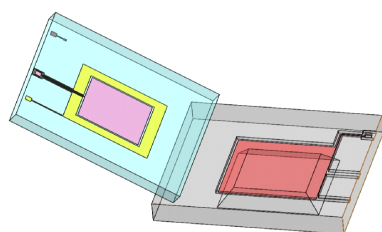
图 6 传感器部分版图

Fig. 6 Partial layout of sensors

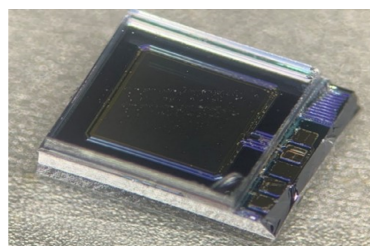
使用 TMAH(Tetramethylammonium hydroxide, 四甲基氢氧化铵)利用硅的各向异性腐蚀的特性腐蚀出膜片区域和背腔的凸台图形^[20]。TMAH对单晶硅的腐蚀因晶向的不同而导致腐蚀速率的不同,这一特性使 TMAH 被广泛用于集成电路制造和 MEMS 器件加工之中。TMAH 溶液几乎不腐蚀单晶硅的(111)晶面,因此在<100>型硅晶圆表面制作一个由四条<110>晶向围成的正方形热氧掩膜,即可形成由四个<111>晶面为侧壁的台体形状。由于凸台的侧棱处的硅原子与 TMAH 腐蚀液的接触面更大且悬挂键较多,更容易受到腐蚀而产生削角。为了抑制削角现象的发生,在腐蚀过程中加入了体积分数 0.1% 的曲拉通(Triton)X-100 溶液^[21]。曲拉通 X-100 是一种非离子表面活性剂,可以和凸台

侧棱处硅原子的悬挂键产生反应,显著减缓削角的速率。另一方面, TMAH 对硅和氧化硅的腐蚀选择性非常高,因此 TMAH 腐蚀 SOI 的埋氧层时会自动停止腐蚀,这一设计可以大大提升工艺的可重复性和器件一致性。

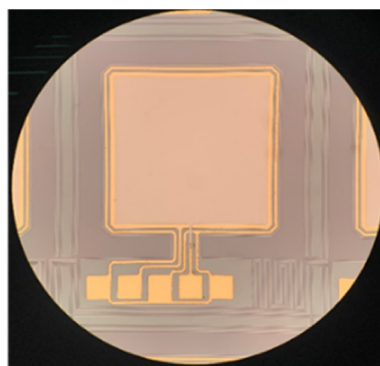
流片结束后的传感器如图 7 所示,器件焊点上的玻璃使用划片的方式进行移除。划片过程中,在将器件划片分割之前,在图 6 虚线处先进行一次额外划片。此次划片,控制划片刀高度高于玻璃片底面微米,保障划片不会伤到金属,又由于划片分离后的区域有效的键合面积较少,因此这一块玻璃较容易被分离。当最终划片结束,将单个器件的这一小块玻璃用镊子掰开,使焊盘暴露出来,最终使用引线键合将传感器和读出电路实现电学连接。



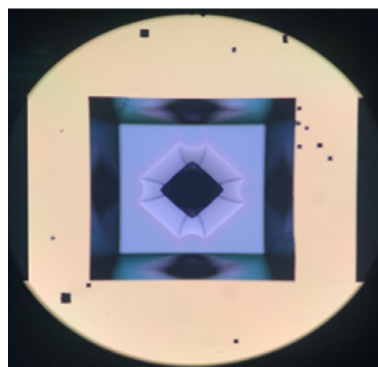
(a) 器件示意图
(a) Schematic of device



(b) 器件实物
(b) Manufactured devices



(c) 器件正面
(c) Front side of devices



(d) 器件背面
(d) Back side of devices

图 7 实际器件

Fig. 7 Fabricated devices

3 封装与测试

3.1 器件封装

图 8 展示了表压式电容压力传感器的封装示意

图和实物图。本传感器使用粘胶的方式将传感器的 SOI 衬底面与 TO 底座进行固定。之后使用超声热压焊技术将传感器焊点和引线柱实现引线键合,导出电学信号。引线柱与包含读出电路芯片的

PCB 板相连, 这样的设计可以使读出电路内部的温度传感器的温度和压力计的温度基本一致, 有利于之后的温度补偿。在气体隔绝方面, 使用 O

型圈实现两个进气口之间的气体隔绝。另一方面, 所有的封装外壳均采用金属材质, 能起到静电屏蔽的作用保证电容读数的稳定。

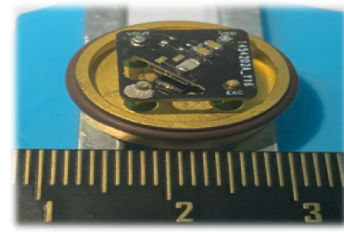
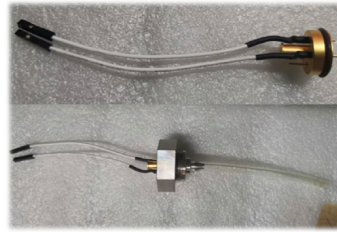
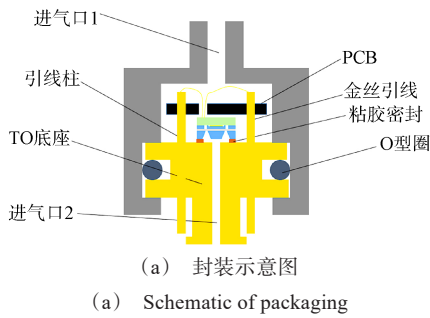
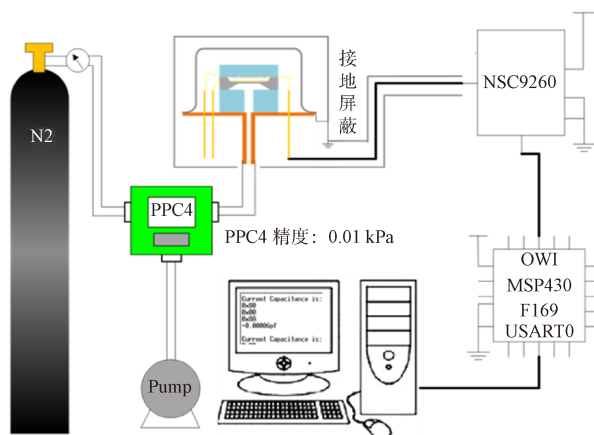


图 8 器件封装
Fig. 8 Devices package

3.2 器件测试

图 9 为本工作中的压力传感器的测试平台。本测试平台主要包含两部分: 其一是提供稳定、高精度的气压源, 用于给传感器提供不同的标准压力; 其二是高精度的电容检测系统, 用于读取传感器的电容信号。标准气压源由氮气罐、真空泵与 PPC4 压力控制仪器组成, 为系统提供稳定的气压环境。电容检测系统以 NSC9260 集成电容数字转换芯片为核心, 采用 MSP430 单片机作为通信中枢, 计算机作为监视器与数字信号处理器, 实现对电容的精准读取和对传感器的标定。



为满足关键芯片和技术国产化的需求, 选用国产 NSC9260 芯片作为电容读出芯片。NSC9260^[22]主信号测量通道由 C/V 转换器和一个 24 位 ADC 构

成。辅助温度测量通道由一个 24 位 ADC 构成, 通过内置的 MCU, 支持对传感器提供最高三阶的非线性校准以及二阶温度漂移校准。同时, NSC9260 芯片的共模输入电容值高达 76.8 pF, 动态范围分为四档可选(±4 pF、8 pF、12 pF、16 pF), 在低输出速率(5 Hz)的情况下具有 20 位的有效位数, 满足对传感器高精度测量的要求。

3.3 测试结果

电容压力传感器芯片样品及检测电路制作完成后, 对传感器电容与压力(C-P)对应关系进行测试与分析, 计算得出电容压力传感器所需要的拟合参数, 对传感器进行标定。图 10 展示了测试得到的 C-P 关系曲线, 由于封装等因素带来的额外寄生电容, 传感器在 0~40 kPa 的压强差下, 电容变化范围变为 22.6 pF~26.9 pF, 相较仿真值整体增加

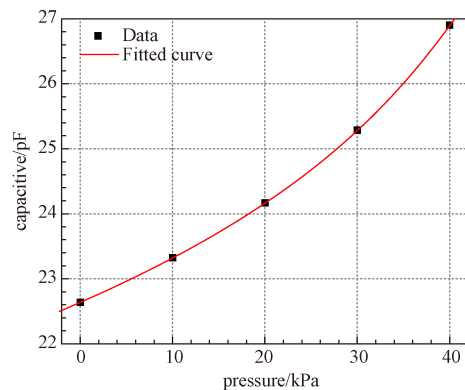


图 10 传感器输出特性
Fig. 10 Sensor output characteristics

了约 8 pF。根据表 1 中的原始数据, 可以计算得到传感器的非线性度为 8.01%, 并且在 3 个正反压力行程的测试中展现了非常好的可重复性, 重复性误差低至 0.09%。进一步对压强和电容的关系进行了三次方多项式拟合, 得到图 10 中的三次方拟合

曲线:

$$P = 0.13421C^3 - 11.2515C^2 + 319.146C - 3015.69 \quad (5)$$

计算结果和实际压力的最大偏差为 0.121 kPa, 为满量程的 0.30%。

表 1 传感器测试数据
Table 1 Sensor test data

压力(kPa)	输出/pF					
	正行程 1	反行程 1	正行程 2	反行程 2	正行程 3	反行程 3
0	22.641 20	22.640 48	22.641 16	22.640 50	22.640 10	22.641 18
10	23.325 20	23.324 77	23.323 57	23.321 40	23.321 94	23.321 52
20	24.168 56	24.169 23	24.166 95	24.167 31	24.165 27	24.165 66
30	25.285 56	25.287 27	25.287 58	25.285 90	25.286 14	25.285 41
40	26.903 06	26.903 06	26.900 44	26.900 44	26.902 27	26.902 27

4 结束语

本文设计并制造出一款带凸台结构的电容式表压压力传感器, 通过对输出信号的标定实现了对压强差的精确测量。在膜片设计方面, 设计了传感器背腔的图案, 实现了对输出非线性度的改善, 仿真条件下从平膜片的约 17% 降低到 7%。使用阳极键合工艺对两个电容极板的位置进行固定并使用 TMAH 对硅的各向异性腐蚀完成对膜片和凸台的制造。最后经过搭建的测试平台标定后, 该传感器实现了在 0~40 kPa 压强差下对压强的精准测量, 测量精度达 0.30%, 非线性度为 8%, 重复性误差低至 0.09%。该传感器在生物医疗领域有非常好的应用前景。

参考文献

- [1] KUMAR S S, PANT B D. Design principles and considerations for the 'ideal' silicon piezoresistive pressure sensor: A focused review[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(7): 1213-1247.
- [2] BARLIAN A A, PARK W T, MALLON J R, et al. Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(3): 513-552.
- [3] REN S, YUAN W, QIAO D, et al. A micromachined pressure sensor with integrated resonator operating at atmospheric pressure[J]. *Sensors*, 2013, 13(12): 17006-17024.
- [4] SPENDER R R, FLEISCHER B M, BARTH P W, et al. A theoretical study of transducer noise in piezoresistive and capacitive silicon pressure sensors[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1988, 35(8): 1289-1298.
- [5] CLARK S K, WISE K D. Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, 26(12): 1887-1896.
- [6] EATON W P, SMITH J H. Micromachined pressure sensors: Review and recent developments[J]. 1997.
- [7] Vaisala BAROCAP® PTB210: <https://docs.vaisala.com/r/M210669EN-E/en-US>.
- [8] RUSSELL, RICK, ULF MERIHEINÄ. Absolute pressure measurement using 3D-MEMS technology[R]. 2005.
- [9] KUNG J T, LEE H S. An integrated air-gap-capacitor pressure sensor and digital readout with sub-100 attofarad resolution[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(3): 121-129.
- [10] JELODAR M N, GANJI B A. Design and analysis of a novel MEMS capacitive tire pressure sensor with high sensitivity and linearity[J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 5(2): 2371-2379.
- [11] RUOHIO J, MUTIKAINEN R. CAPACITIVE SENSOR AND A METHOD FOR MANUFACTURING THE CAPACITIVE SENSOR: US7555950B2[P]. 2009-07-07.
- [12] SHARIFI M J, NEMATI N, ABEDI A. A new MEMS based capacitive differential pressure sensor with acceptable sensitivity and improved linear region[C]//2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Tehran, Iran: IEEE, 2014: 29-32.

- [13] KO W H, WANG Q. Touch mode capacitive pressure sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 75 (3): 242-251.
- [14] PEDERSEN T, FRAGIACOMO G, HANSEN O, et al. Highly sensitive micromachined capacitive pressure sensor with reduced hysteresis and low parasitic capacitance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 154(1): 35-41.
- [15] KÁRPÁTI T, PAPA, KULINYI S. Prototype MEMS capacitive pressure sensor design and manufacturing[J]. Periodica Polytechnica Electrical Engineering, 2013, 57 (3): 3-7.
- [16] TIMOSHENKO S, WOINOWSKY - KRIEGER S. Theory of plates and shells[M]. New York: McGraw - hill, 1959.
- [17] BAO M H. Micro mechanical transducers - pressure sensors, accelerometers and gyroscopes: Vol. 8 [M]. Elsevier, 2000.
- [18] DIEM B, REY P, RENARD S, et al. SOI "SIMOX" from bulk to surface micromachining, a new age for silicon sensors and actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1995, 46(1-3): 8-16.
- [19] YANG K J, C M MOS capacitance measurements for high - leakage thin dielectrics[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1999, 46(7):1500 - 1501.
- [20] PAL P, SATO K, CHANDRA S. Fabrication techniques of convex corners in a (100)-silicon wafer using bulk micromachining: A review[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(10): R111-R133.
- [21] PAL P, SATO K, SHIKIDA M, et al. Study of corner compensating structures and fabrication of various shapes of MEMS structures in pure and surfactant added TMAH[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 154 (2): 192-203.
- [22] 纳芯微电子. NSC9260 数据手册 [EB/OL].[2025-3-1]. https://www.novosns.com/Public/Uploads/uploadfile/files/20240102/NSC9260_Datasheet_EN_1.0.pdf

[作者简介]

- 蒋沛奇 2001年生, 硕士研究生。
周 聪 1998年生, 博士研究生。
张誉舰 2001年生, 硕士研究生。
孟凡瑞 1989年生, 工程师。
杨振川 1976年生, 教授, 博士生导师。
高成臣 1966年生, 正高级工程师, 硕士生导师。

(本文编辑: 杨秀丽)