

文章编号 1004-924X(2012)03-0550-06

## 适用于恶劣环境的 MEMS 压阻式压力传感器

伞海生<sup>1,2\*</sup>, 宋子军<sup>1</sup>, 王翔<sup>1</sup>, 赵燕立<sup>1</sup>, 余煜玺<sup>3</sup>

- (1. 厦门大学 物理与机电工程学院 机电工程系, 福建 厦门 361005
2. 厦门大学 萨本栋微纳米技术研究院 微机电中心, 福建 厦门 361005
3. 厦门大学 材料学院 材料科学与工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:**为了消除潮湿、酸碱、静电颗粒等恶劣环境对压力传感器压敏电阻的影响,提出了一种新型结构的压阻式压力传感器。该传感器将压敏电阻置于应力薄膜的下表面并通过阳极键合技术密封在真空压力腔中,从而减少了外界环境对压敏电阻的影响。介绍了此种压力传感器的工作原理,使用 ANSYS 软件并结合有限元方法模拟了压敏薄膜在压力作用下的应力分布情况。最后,利用微机电系统(MEMS)技术成功制作出了尺寸为  $1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 500\text{ }\mu\text{m}$  的压阻式压力传感器。用压力检测平台对该压力传感器进行了测试,结果表明,在  $25\sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ ,其线性度小于  $2.73\%$ ,灵敏度约为  $20\text{ mV/V-MPa}$ ,满足现代工业使用要求。

**关键词:**微机电系统;压阻式压力传感器;恶劣环境;可靠性

**中图分类号:**TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122003.0550

## Piezoresistive pressure sensors for harsh environments

SAN Hai-sheng<sup>1,2\*</sup>, SONG Zi-jun<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, ZHAO Yan-li<sup>1</sup>, YU Yu-xi<sup>3</sup>

- (1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, School of Physical and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China
  2. MEMS Center, Pen-Tung Sah Micro-Nano Technology Institute, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
  3. Department of Material Science and Engineering, College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China)
- \* Corresponding author, E-mail: sanhs@xmu.edu.cn

**Abstract:** To increase the stabilization and reliability of piezoresistive pressure sensors working in harsh environments with harsh acids, alkalis, corrosive salts, and other destructive substances such as electrostatic particles and damp, a novel piezoresistive pressure sensor was presented. The innovation of the sensor was that the sensing elements of the sensor were fabricated in the lower surface of a silicon diaphragm and were sealed in a vacuum pressure cavity by silicon-glass bonding process. The work principle of this pressure sensor was introduced. Then, Finite Element Method and ANSYS soft were used to simulate the stress distribution of the diaphragm. Finally, the micro-electro-mechanical System(MEMS) technology was used to fabricate a pressure sensor with the dimension of  $1.5\text{ mm} \times$

收稿日期:2011-10-21;修订日期:2011-11-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075344;No. 51175444)

1.5 mm×500 μm. The measurement results by a pressure test platform show that the sensitivity of the sensor is about 20 mV/V-MPa, and its maximum nonlinearity is 2.73% FSS, which meets the requirements of the modern industrial applications.

**Key words:** Micro-electro-mechanical System (MEMS); piezoresistive pressure sensor; harsh environment; reliability

## 1 引言

随着工业技术的发展,越来越多的 MEMS 传感器工作于潮湿、酸碱腐蚀溶液或者充满静电颗粒和粉尘等恶劣环境中<sup>[1-2]</sup>。如传统硅压阻式压力传感器,基本都把电阻排布在硅膜外表面直接与外界环境接触,器件在工作过程中,外界环境物质的腐蚀和静电颗粒等都会使器件的性能和寿命大打折扣。

为了提高器件在恶劣环境下的可靠性,目前普遍采用的是压力变送的封装技术,将压力传感器芯片封装于充满硅油的密闭结构中,外加压力通过硅油从不锈钢膜片传递到压力传感器芯片上。但是,硅油的化学稳定性和耐温性能不够好,硅油长期在高温下工作会发生变化,如果新分解的化学成分里面有小颗粒的导电物质,这种物质可能会穿过芯片的钝化层破坏芯片或者介入扩散电阻条中间,形成短路或污染,造成传感器高温输出信号不稳定,这些问题将影响传感器的长期可靠性<sup>[3]</sup>。此外,在一些气压传感器中,例如汽车轮胎压力传感器,为了保护薄膜上面的压敏电阻,在封装时用硅胶包裹压力传感芯片,以隔绝测试气体的影响<sup>[4]</sup>。这种方案不仅增加了制造成本,而且温度的变化会引起硅胶的膨胀或收缩,进而影响压力传感器的输出特性和稳定性。

本文提出了一种新的设计方案,把压敏电阻安置在敏感薄膜下方,并通过阳极键合技术把它们封装在密闭环境里面。通过键合面上预埋的电极把内部电信号传输到外部电路<sup>[5]</sup>,形成一个完整的压阻式压力传感器。器件的设计保证了敏感单元与外界恶劣环境的隔离,从而极大地提高了器件的可靠性和稳定性。

## 2 传感器设计

压阻式压力传感器是基于半导体材料(单晶硅)的压阻效应原理制成的,利用集成电路工艺直

接在硅平膜片上按一定晶向制成压敏电阻。当硅膜片受压时,膜片的变形将使压敏电阻的阻值发生变化。硅平膜片上的扩散电阻通常构成惠斯通电桥测量电路,桥臂电阻变化时,电桥输出电压与膜片所受压力成对应关系。本文把压敏电阻安置在敏感薄膜下方,并通过阳极键合技术将其封装在密闭环境里面,其原理如图 1 所示。

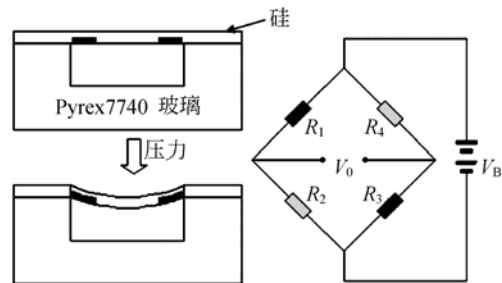
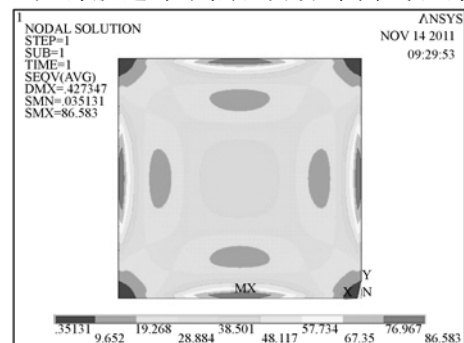


图 1 压力传感器原理图

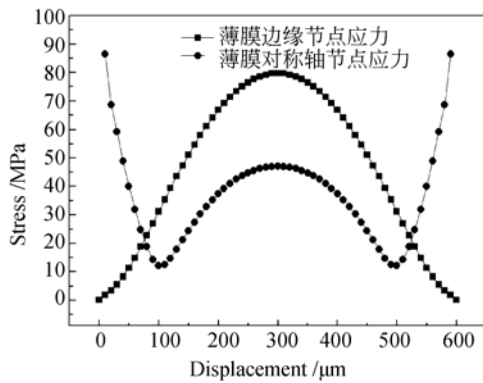
Fig. 1 Principle diagram of pressure sensor

很多文献已经提到,压阻式压力传感器薄膜形状为正方形时传感器的灵敏度最大<sup>[6-8]</sup>。因此,本文选择方形薄膜作为传感器的敏感薄膜。在压阻式压力传感器的芯片设计中,一般由 4 个压敏电阻构成惠斯通电桥。为了获得最大灵敏度,这里将 4 个桥臂电阻沿着[110]晶向排布在方形薄膜应力最大的区域,如图 2 所示,图 2(a)是敏感薄膜在 0.6 MPa 外载荷作用下的等效应力图。图 2(b)是薄膜边缘节点应力分布曲线和薄膜竖



(a) 薄膜应力 ansys 仿真图

(a) Ansys simulation diagram of the film



(b)应力与节点偏移的关系  
(b)Dependence of stress on node deflection

图 2 膜片应力分布图

Fig. 2 Stress distribution in diaphragm

直对称轴上节点应力分布曲线图。为了最大限度利用以上模拟得到最大应力分布区域,将压敏电阻条设计成图 3 所示的折叠形式。在拐角处加宽并进行重掺杂以减小负阻效应<sup>[9]</sup>。

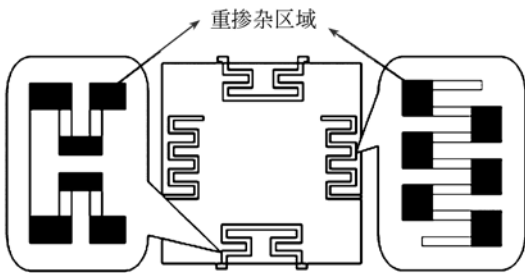


图 3 折叠型电阻

Fig. 3 Folding resistance

### 3 传感器制作

目前广泛使用的压阻式压力传感器制备技术是:使用 SOI 材料并采用 Si-Si 键合方法来制作压力传感器,通过硅片减薄和扩散工艺或离子注入的方法在薄膜上制作压敏电阻。由于 Si-Si 键合工艺对硅片质量和键合前硅片化学处理要求严格,大面积的 Si-Si 键合质量和成功率很难得到保证,增大了器件的成本。如果采用低成本的硅-玻璃键合材料制备压力传感器,则制备工艺受制于玻璃的耐高温性能(由于扩散温度和离子注入后的退火一般要高于 1 000℃,远远超过了玻璃的熔点。)

为了降低压阻式压力传感器成本,提高制备成功率,作者将压敏电阻安放在薄膜的下方,采用先扩散或者离子注入的方法制作压敏电阻,然后,再键合、减薄形成敏感薄膜。因此,可以使用硅-玻璃键合、减薄来制作敏感薄膜,由此降低了工艺难度,提高了器件的可靠性。为了精确控制薄膜厚度,采用 n(100)型 10 cm(4 in)SOI 硅片制作压敏薄膜。SOI 硅片具体参数为:器件层(Si)厚度 25 μm;绝缘层(SiO<sub>2</sub>)厚度 1.5 μm;支撑层(Si)厚度 450 μm;电阻率为 2~3 Ω·cm。考虑到器件工作温度是-40~125℃,如此温度下 Pyrex7740 玻璃与硅的热匹配性良好。因此选择了 Pyrex7740 玻璃和 SOI 键合来制作压力传感器。传感器具体工艺流程如图 4 所示。

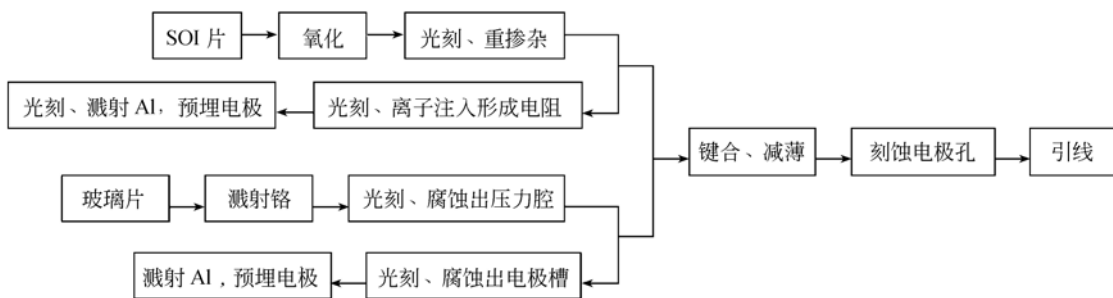


图 4 传感器工艺流程框图

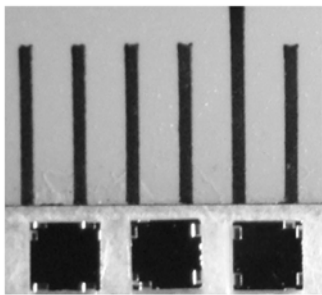
Fig. 4 Process flow diagram of the sensor

该传感器的制作难点在于如何将密闭腔中的电信号引出来。其他文献中提到的电信号引出工艺大部分是在敏感薄膜的上方打孔,然后溅射金

属引出电信号。这种方法会造成孔周围出现不粘胶的现象,无法进行后续工艺。而且,孔底部的重掺杂区域掺杂浓度比较低<sup>[10]</sup>,可能达不到欧姆接

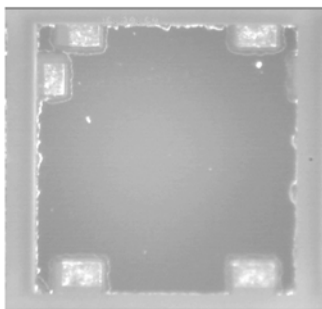
触的标准,从而无法形成欧姆接触,使信号无法引出。

为了解决上述问题,本文设计了一种新的工艺方案。该方案直接把信号输出电极预先镶嵌在硅与 Pyrex7740 的键合面上,通过阳极键合制备出电极的内连接技术。通过使用干法刻蚀,在薄膜上刻出电极孔,露出 Al 电极表面。最后在每一个电极上焊金丝,这样就可以将电信号从键合面之间引出来。图 5 是制作完成的压阻压力传感器芯片实物图。



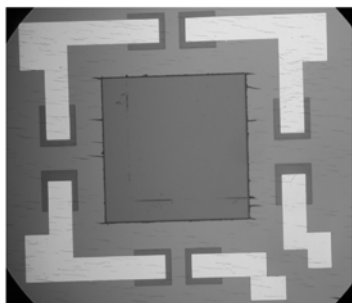
(a)传感器实物图与尺子的对比图

(a)Comparison diagram of fabricated sensor and ruler



(b)传感器正面图

(b)Top view of pressure sensor



(c)内部预埋电极

(c)Photo of embedded electrodes

图 5 压阻式压力传感器实物图

Fig. 5 Photos of piezoresistive pressure sensor

#### 4 压力传感器的测试

在没有补偿的情况下,采用 5 V 恒压源作为激励电压,并对压力传感器施加 0~600 kPa 的压力,最后用最小二乘法对测试数据进行拟合,压力传感器在不同温度环境下的输出特性如图 6 所示。压力传感器的一些主要参数如表 1 所示。

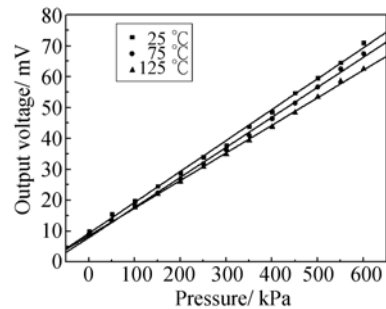


图 6 不同温度下的压力-输出电压关系

Fig. 6 Dependence of output voltage on pressure under different temperatures

表 1 压力传感器主要参数

Tab. 1 Main parameters of pressure sensor

量程/ MPa	最高工作 温度/°C	灵敏度/ mV/V-MPa	线性度/ %	迟滞/ %	重复性/ %
0.6	125	20	2.73	0.2	0.6

#### 5 结论

设计了一种新型结构的微压阻式压力传感器,采用离子注入的方法在 SOI 上制作压敏电阻,再与有正方形空腔结构的 Pyrex7740 进行阳极键合,制作出了芯片尺寸为 1.5 mm×1.5 mm×500 μm 的压阻式压力传感器。该传感器将压敏电阻安置在敏感薄膜下方,并通过阳极键合技术把它们封装在密闭环境中,解决了外界环境对压敏电阻的影响;通过从键合面之间引出电极,解决了电信号内外连接的工艺难点,从而降低了成本和工艺难度,提高了成品率。经压力检测平台测试,该压力传感器在 25~125 °C 的线性度小于 2.73%,灵敏度为 20 mV/V-MPa,达到了设计和应用的要求。

## 参考文献:

- [1] 王宏亮,宋娟,冯德全,等. 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(3):545-550.  
WANG H L, SONG J, FENG D Q, *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 545-550. (in Chinese)
- [2] 阙瑞义,朱荣,刘鹏,等. 组合热膜式流速矢量传感器[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1):103-109.  
QUE R Y, ZHU R, LIU P, *et al.*. Combined hot-film anemometers for measuring flow speed vectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 103-109. (in Chinese)
- [3] 关荣锋. MEMS 机油压力传感器可靠性研究[J]. 微纳电子技术, 2007, 7(8):176-202  
GUAN R F. Research on the reliability of MEMS oil pressure sensor [J]. *Micronano Electronic Technology*, 2007, 7(8):176-202. (in Chinese)
- [4] TSUNG L C, CHEN H C, CHUN T L, *et al.*. Sensitivity analysis of packaging effect of silicon-based piezoresistive pressure sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 152(1): 29-38.
- [5] LIN H, STEVENSON J T M, GUNDLACH A M, *et al.*. Direct Al-Al contact using low temperature wafer bonding for integrating MEMS and CMOS devices [J]. *Microelectronic Engineering*, 2008, 85(5-6):1059-1061.
- [6] YOZO K, AKIO Y. Optimum design considerations for silicon piezoresistive pressure sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, 62: 539-542.
- [7] LIN L W, HUEY C C, YEN W L. A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors [J]. *Journal of Micro Electro-mechanical Systems*, 1999, 8(4):514-522.
- [8] HERMANN S, KARL K. A square-diaphragm piezoresistive pressure sensor with a rectangular central boss for low-pressure ranges [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, 40(10):1754-1759.
- [9] 修显武. 扩掺杂区晶体管负阻效应的研究[D]. 山东: 山东师范大学, 2003.  
XIU X W. *Investigation of negative resistance in ga-diffusion transistor* [D] Shandong: Shandong Normal University, 2003. (in Chinese)
- [10] ALVIN B, WOO T P, JOSEPH R M, *et al.*. Review: semiconductor piezoresistance for microsystems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(3):513-552.

## 作者简介:



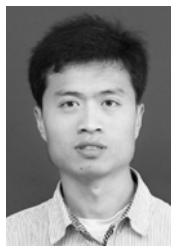
伞海生(1970—),男,吉林榆树人,副教授,硕士生导师,1993 于西南科技大学获得学士学位,2006 年于兰州大学材料物理专业获得博士学位,主要研究方向为 MEMS 传感器、射频 MEMS 器件、微光机电系统及器件、微能源器件及系统、微波光电子、光纤光学、材料物理等。E-mail:sanhs@xmu.edu.cn



宋子军(1988—),男,江西吉安人,硕士研究生,2010 年于南昌航空大学获得学士学位,主要研究方向为 MEMS 传感器。E-mail:songzijun1018@126.com



王翔(1987—),男,河北邯郸人,硕士研究生,2011 年于中北大学获得学士学位,主要研究方向为 MEMS 能量收集器。E-mail: 03107866335.ok@163.com



赵燕立(1987—),男,山东济宁人,硕士研究生,2010 年于山东科技大学获得学士学位,主要研究方向为低温硅硅键合技术。E-mail:yanli48@126.com



余煜玺(1974—),男,湖南攸县人,副教授,硕士生导师,2005 于国防科技大学获得博士学位,2008 于厦门大学化学博士后流动站博士后出站并留校任教,主要从事高温聚合物陶瓷材料、高温 MEMS 传感器方面的研究。E-mail: yu\_heart@xmu.edu.cn

● 下期预告

## 红外双波段视景仿真器光学系统设计

杨 乐<sup>1,2</sup>, 孙 强<sup>1</sup>, 方 伟<sup>1</sup>, 李 淳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

针对红外双波段成像系统性能测试与评估的应用需求,利用谐衍射透镜独特的温度和色散特性,设计了一套基于数字微镜器件的消热差的  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  和  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  双波段红外视景仿真器光学系统。探讨了红外双波段视景仿真用投影光学系统的像差特性和设计方法,并对系统的无热化进行了分析。采用分光板和补偿板,解决了大相对孔径条件下投影系统的远心照明分光和像差平衡问题,提高了分辨率和均匀性,增大了视场。系统由远心投影光学系统和像面倾斜的柯勒照明光学系统组成,仅使用锗和硫化锌两种普通红外材料,并引入谐衍射元件,实现红外双波段远心投影光学系统的光学被动消热差,提高了系统的稳定性。系统焦距为 255 mm,  $F\#$  为 2.6, 视场角为  $5.1^\circ$ , 出瞳距为 240 mm, 在空间频率 16 lp/mm 处,  $-20\sim 60\ ^\circ\text{C}$  下, 中波红外  $\text{MTF}>0.6$ , 长波红外  $\text{MTF}>0.3$ , 均接近衍射极限。系统具有良好的复消色差和减热差特性,并具有分辨率高、均匀性好、结构紧凑等优点,满足设计要求。