

小量程高灵敏度压阻式表压压力传感器的设计

高雅 许高斌* 朱晓萌 张宇 关存贺 冯建国
(合肥工业大学微电子学院 安徽省 MEMS 工程技术研究中心 合肥 230009)

Design of Small-Range High-Sensitivity Piezoresistive Gauge Pressure Sensors

GAO Ya, XU Gaobin*, ZHU Xiaomeng, ZHANG Yu, GUAN Cunhe, FENG Jianguo
(Micro Electromechanical System Research Center of Engineering and Technology of Anhui Province,
School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract A high-sensitivity pressure sensor with small measurement range was investigated for the failure prediction and health management (PHM) of aircraft oxygen supply, hydraulic, environmental control and fuel systems. The pressure sensor working mechanism and mechanical simulation were carried out using ANSYS software. Based on the simulation results, a novel MEMS piezoresistive pressure sensor was proposed, consisting of a composite structure of curved membrane and metered beam. The membrane was supported by cambered silicon cups. We optimized the design parameters of the sensor and determined the position of the resistors, resulting in a high sensitivity and a good linearity in the measurement range of -2 KPa \sim 12 KPa. The sensitivity of the designed pressure sensor is obtained as 21.801 mV/KPa with a nonlinearity of 0.02% using ANSYS software simulation and analysis. Finally, we summarized the fabrication process of the designed pressure sensor based on the SOI substrate.

Keywords Piezoresistive pressure sensors, High sensitivity, Small range

摘要 针对飞机供氧、液压、环控和燃油等系统故障预测与健康管理(PHM)对小量程压力传感器的重大需求,设计了一种新型梁膜复合结构微电子机械系统(MEMS)压阻式压力传感器,该研究通过小量程、高灵敏度的压力传感器力学机理分析和力学仿真建模,提出一种具有弧形膜和米字梁复合型结构,采用弧形硅杯支撑,通过结构和尺寸的优化设计以及压敏电阻位置的确定,在 $-2\sim 12$ KPa 的量程内具有较高的灵敏度和线性度。利用 ANSYS 软件仿真分析得到设计的压力传感器灵敏度为 21.801 mV/KPa,非线性度为 0.02% 。然后基于 MEMS 加工工艺设计了 SOI 表压压力传感器的工艺流程。

关键词 压阻式压力传感器 高灵敏度 小量程

中图分类号: TP212 文献标识码: A doi: [10.13922/j.cnki.cjvst.202305016](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202305016)

压阻式压力传感器因尺寸小、响应快、集成度高、输出信号易处理、可批量制作以及成本低等优点被广泛应用于汽车制造、气象监测、生物医药等领域的检测设备中^[1]。特别是随着航空航天的发展,分布式传感器网络作为未来飞机系统故障检测和健康管理的工具,对小量程表压压力传感器的需求不断增加^[2-3]。

对于小量程压力传感器,主要参数即灵敏度和非线性度,一般通过增大膜片面积和减小膜片厚度来提高传感器的灵敏度,但这会导致传感器非线性度增大。如何在保证非线性度的同时提高灵敏度

是一个重要问题,解决此问题的方法如下:第一,使用新型材料,比如碳化硅^[4]、聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane,PDMS)薄膜^[5]、石墨烯^[6]、碳纳米管^[7]等材料制作压力传感器。但这些材料的应用还不够成熟,使用成本较高,制作工艺复杂,大规模生产应用存在一定的困难。第二,通过引入各种补偿电路和信号调理电路提高灵敏度,优化非线性度,通过算法和电路的优化设计提高测量精度^[8-9]。但此方法问题在于,增加电路的同时增大了工艺难度和制造成本,同时降低了器件整体的可靠性。第三,引入新结构,使传感器结构具有应力集中区和

刚度加强区, 兼顾灵敏度和非线性度。通过这些特殊结构, 使薄膜在产生形变较小的同时产生的应变较大。目前研究中量程主要集中在 0~0.5 KPa、0~5 KPa 以及 100 KPa 以上。2016 年, Xu 等^[10] 提出了一种凸形膜和半岛相结合的结构, 在 0~0.5 KPa 的微小量程范围内灵敏度能达到 325 mV/KPa。2018 年, Li 等^[11] 提出了一种四束压阻膜结构, 在 0~5 KPa 的小量程内了灵敏度能达到 23.25 mV/KPa。2021 年, 单存良等^[12] 提出了一种基于 SOI 的压阻式压力传感器, 在 0~1.5 MPa 的范围内灵敏度能达到 0.0828 mV/KPa。

为解决目前压力传感器量程与飞机供氧系统不匹配、灵敏度和非线性度难以平衡等问题, 本文设计了一种用于飞机系统故障预测及健康管理的小量程表压压力传感器, 量程为 -2~12 KPa。采用新型梁膜复合结构创造应力集中区域并降低膜片形变, 达到平衡传感器非线性度的同时提高器件灵敏度的效果。

1 理论分析与工作原理

1.1 理论分析

以膜片周边固支作为约束条件, 当外加压力 p 作用于膜片表面时, 基于小挠度弯曲理论的基本假设, 可以得到弹性曲面微分方程:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2)$$

ω 为薄板弯曲挠度, D 为薄膜的弹性刚度, E 是硅的杨氏模量, h 是薄膜的厚度, μ 是硅的泊松比。

对不同几何形状膜片进行应力集中分析, 圆形隔膜在施压下能产生较大偏转, 但引起的应力较小, 其应力均匀分布于薄膜边缘。而正方形膜结构的应力则能集中在膜四边中心处, 此结构能明显提高压阻式压力传感器灵敏度^[13]。通过计算可得, 在相同负载时, 正方形膜片结构的最大应力要比圆形膜片大约三分之一。因此, 选择敏感结构建立在正方形膜片基础上。根据最小能量准则, 求得薄板中心位置产生的最大形变量为:

$$\omega_{\max} = \frac{0.0151pa^4}{Eh^3}(1-\mu^2) \quad (3)$$

为减小非线性度对器件的影响, 最大挠度应小于膜片厚度的 20%, 此时遵循小挠度变形理论。对

于方形敏感膜片, 膜上最大应力位置处于边长中心:

$$\sigma_{\max} = \frac{0.3078pa^2}{h^2} \quad (4)$$

其中, p 为传感器的最大量程, 取 12 KPa; a 为膜片的边长, 取 4000 μm ; E 取 190 GPa; μ 取 0.278; σ_{\max} 为硅的破坏应力。

当敏感膜片受力产生弯曲, 总应变在膜中存储的能量为:

$$U = \frac{1}{24} \frac{Eh^3}{(1-\mu^2)} A \left[\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

式中: A 为膜片面积。

敏感薄膜受力时, 假设沿硅膜膜厚方向的应力呈线性。则其应力分布应满足:

$$\int_0^h \sigma_h \left(y - \frac{h}{2} \right) dy = \int_0^h k_h \left(y - \frac{h}{2} \right)^2 dy = \frac{M_h}{W_h} y \in (0, h) \quad (6)$$

式中: K 是应力分布梯度, M 为弯矩, W 为应力分布区域宽度。

当薄膜尺寸和压力不变时, 弯矩几乎不变, 应力宽度分布区域约小, 应力越集中, 器件灵敏度越高。

综上所述, 通过增大膜片面积, 可以使总应变存储能量增加。通过形成应力集中区域, 减小应力分布区域宽度, 可以实现应力增大。

1.2 工作原理

MEMS 压阻式压力传感器基于压阻效应原理, 通过 p 型掺杂的压敏电阻组成惠斯通电桥电路, 将压力输入产生的膜片应变转换为电信号输出。电桥电路如图 1 所示。

电桥电压输出值为:

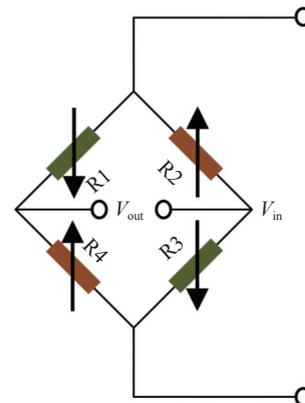


图1 惠斯通电桥电路图

Fig. 1 Circuit diagram of Wheatstone bridge

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_{in} \quad (7)$$

半导体材料中,电阻值的变化和压敏电阻所受应力 σ 成正比,压阻系数 π 即是二者之间的比例系数。由于压敏电阻厚度较小,其剪切分力可以忽略,则压敏电阻的相对变化可表示为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (8)$$

其中, σ_l 为压敏电阻的纵向应力; σ_t 为压敏电阻的横向应力, π_l 为纵向有效压阻系数; π_t 为横向有效压阻系数。

由此,可以根据应力得出输出电压:

$$V_{out} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_l - \sigma_t) V_{in} \quad (9)$$

其中, $\pi_l = \pi_{44}/4$, $\pi_t = -\pi_{44}/4$, π_{44} 为压阻系数, 值为 $138.1 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, V_{in} 为输入电压, 取 5 V。

综合上式可以计算出传感器灵敏度公式:

$$S = \frac{V_{out}}{\Delta p} = \frac{1}{\Delta p} \times \frac{\pi_{44}}{2} \times (\sigma_l - \sigma_t) V_{in} \quad (10)$$

其中, Δp 为总量程。

2 器件设计与仿真分析

2.1 敏感薄膜的设计

为选取合适尺寸,对敏感膜片各参数进行控制变量,观察膜片最大应力差和最大位移变化。选择米字梁宽度从 140 μm 开始,以 20 μm 为间隔增加至 220 μm ,结果如图 2 所示。可以看出随着梁宽增加,膜片最大位移出现降低,说明增加米字梁宽度可以一定程度降低膜片应变。而最大应力差在 160 μm 时达到最大,因此梁宽选择 160 μm 。

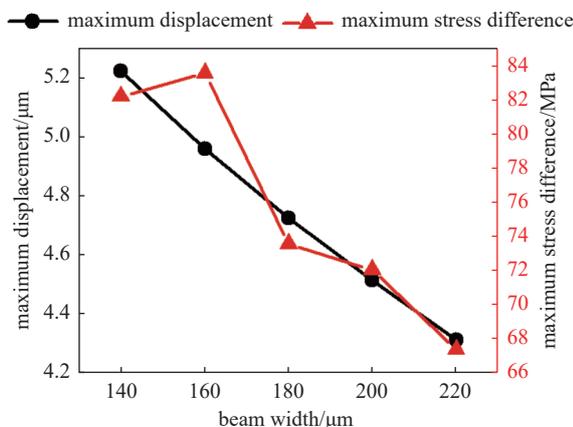


图2 梁宽与最大位移、最大应力差关系

Fig. 2 The relationship between beam width and maximum displacement and maximum stress difference

选择弧半径从 1200 μm 开始,以 200 μm 为间隔增加至 2000 μm ,结果如图 3 所示。可以得出随着弧半径增加,膜片最大位移出现降低,说明增加弧半径可以一定程度降低膜片应变。而最大应力差在 1400 μm 时达到最大,因此弧半径选择 1400 μm 。

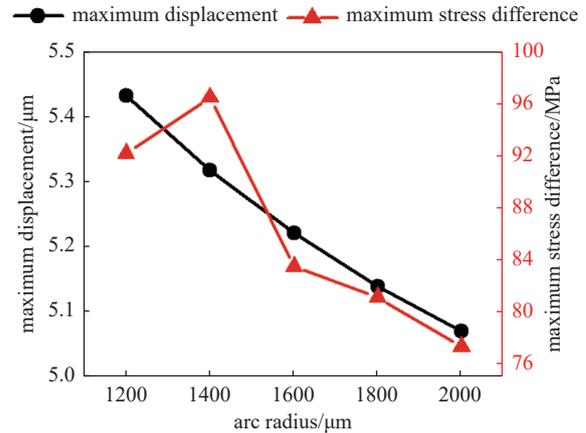


图3 弧半径与最大位移、最大应力差关系

Fig. 3 The relationship between the radius of the arc and the maximum displacement and maximum stress difference

选择梁高从 14 μm 开始,以 2 μm 为间隔增加至 22 μm ,结果如图 4 所示。可以得出随着梁高度的增加,膜片最大位移出现降低,说明增加梁高度可以一定程度降低膜片应变。最大应力差在 20 μm 时达到最大,因此梁高选择 20 μm 。

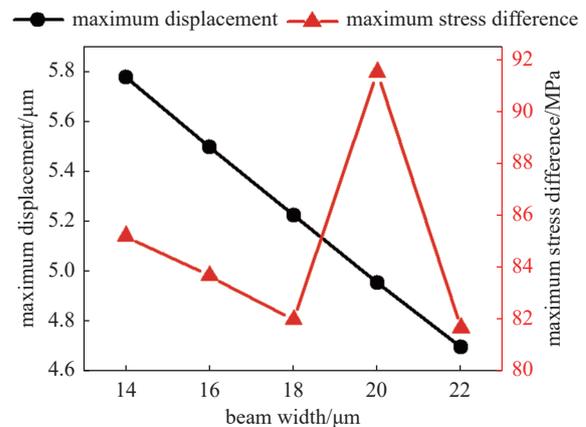


图4 梁高与最大位移、最大应力差关系

Fig. 4 The relationship between beam height and maximum displacement and maximum stress difference

通过改进梁膜结构,膜片形变被降低,在保证最小挠度原则同时,膜片厚度可以进行优化。选择膜厚从 28 μm 开始,以 1 μm 为间隔增加至 32 μm ,仿真结果如图 5 所示。当膜厚大于等于 30 μm ,此时最大位移小于五分之一膜厚,满足小挠度条件,

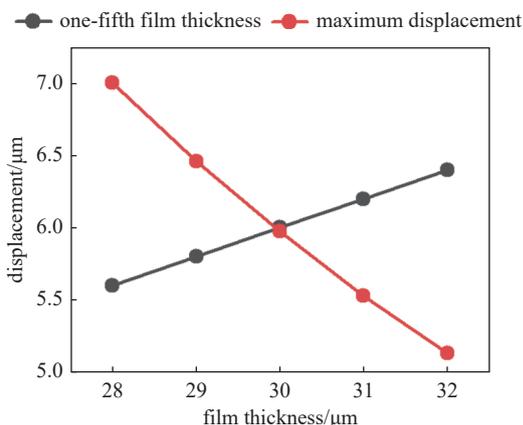


图5 膜厚与最大位移、最大应力差关系

Fig. 5 The relationship between film thickness and maximum displacement and maximum stress difference

由此确定膜厚选择 30 μm 。

通过改进结构设计,新型传感器结构在平衡非线性度的同时提高了灵敏度。传感器膜片结构如图6所示。

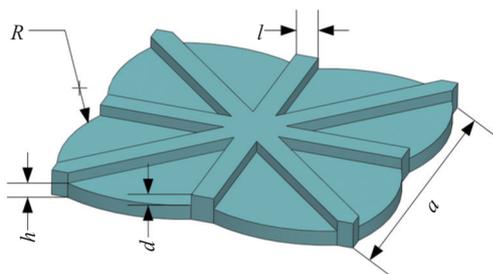


图6 传感器膜片结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sensor diaphragm structure

通过有限元分析优化传感器结构参数并结合工艺条件,最终确定了传感器膜片结构尺寸如表1。

表1 传感器膜片结构尺寸

Tab. 1 Sensor diaphragm structure size

	长度/ μm
米字梁宽度 (l)	160
米字梁高度 (d)	20
圆弧半径 (R)	1400
膜片厚度 (h)	30
膜片边长 (a)	4000

2.2 仿真建模

为了验证结构的合理性,利用 ANSYS 仿真软件对敏感膜片进行应力、弹性形变、横纵应力差仿真。模型参数为:泊松比: 0.278; 密度: 2330 kg/m^3 ;

杨氏模量: 190 GPa

压力垂直均匀施加在膜表面时,四周应力近似为零,敏感膜可等效成一个四周固定的薄板。在膜的四边施加固定约束,表面施加-2~12 KPa 的压力,为了简化仿真过程,将 SOI 材料简化为硅。

建立三维有限元仿真模型,弹性膜片应力仿真结果如图7所示,由仿真结果可以看出外加载荷为 12 KPa 时,最大应力区域位于米字梁的根部位置,弹性膜片表面最大综合应力为 158.66 MPa,远远小于材料的屈服应力,表明弹性元件可靠。弹性膜片位移仿真结果如图8所示,最大位移位于膜片中心位置,为 5.9732 μm 。外加应力时, X 轴方向上的最大应力差为 99.457 MPa。

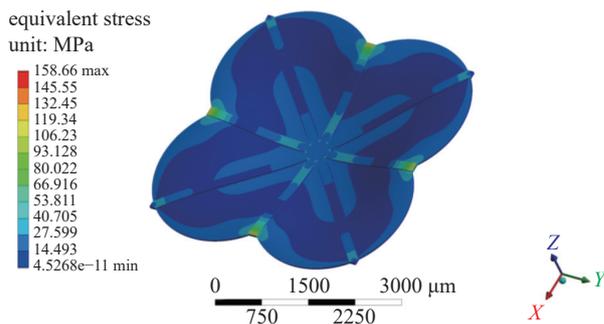


图7 膜片应力仿真结果图

Fig. 7 Diaphragm stress simulation results graph

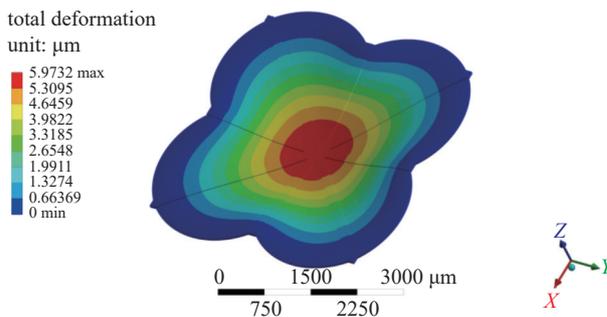


图8 膜片位移仿真结果图

Fig. 8 Diaphragm displacement simulation results graph

2.3 电阻位置确定

对于压阻式压力传感器,将压敏电阻放置于高应力集中区域有利于改善输出特性^[14]。为在适当位置取压敏电阻,对膜上应力集中的对称区域即距离膜片边缘 0~200 μm 的位置进行应力分析,路径下的横向应力和纵向应力差分布如图9所示,取其中的线性区间,即距离膜片边缘 32 μm 以上的位置。

压敏电阻每段长 100 μm ,其分布位置如图10所示。以膜片正中心为原点, R1 中点位于(-1968,

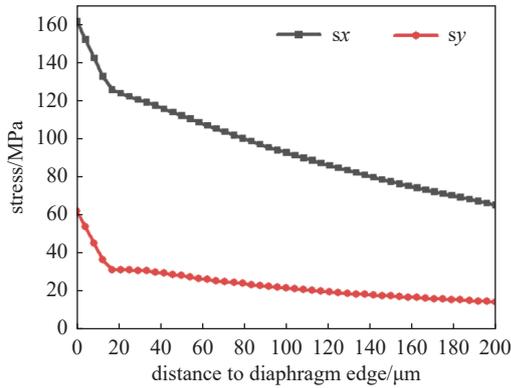


图9 应力集中区域纵横应力差

Fig. 9 Transverse and longitudinal stress difference in the stress concentration area

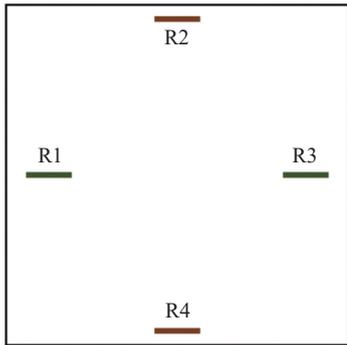


图10 压敏电阻分布位置

Fig. 10 Distribution position of varistors

0)~(-1868, 0)。

R1 和 R3 对称分布, R2 和 R4 对称分布, 呈对称分布的电阻受力情况基本一致, 因此只需分析 R1、R2 位置的受力情况, 计算出平均应力差为 75.776 MPa。通过合理放置 R2 可以使其应力差和 R1 几乎相等, 仿真得出 Y 轴方向应力差, 如图 11 所示,

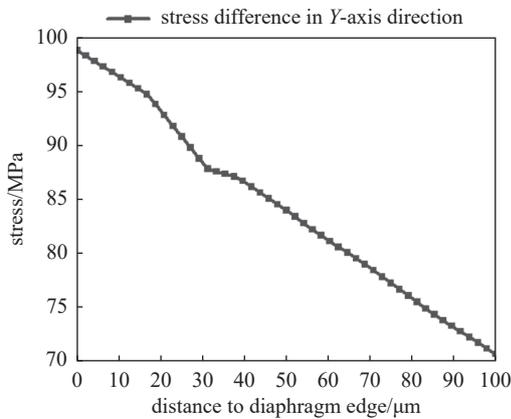


图11 Y轴方向纵横应力差

Fig. 11 Transverse and longitudinal stress difference in the Y-axis direction

由此可确定 R2 的中心位置为(0,1919)。

2.4 输出结果

通过式(9)计算可得满量程即压力为 12 KPa 时的输出电压为 261.617 mV。再将输出电压代入式(10), 可得到压力传感器的灵敏度为 21.801 mV/KPa, 并绘制出该压力传感器的输出电压曲线, 如图 12 所示。

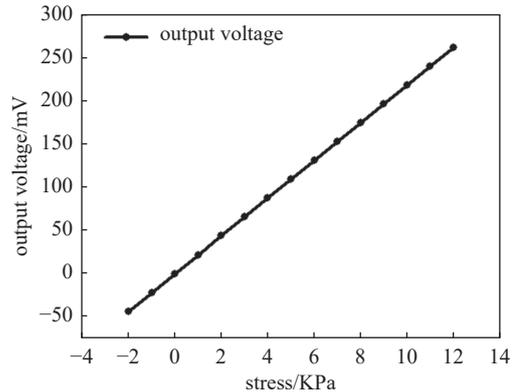


图12 压力与输出电压的关系

Fig. 12 Relationship between pressure and output voltage

通过各电阻位置应力差计算出不同压力下传感器输出, 对传感器输出进行直线拟合计算, 可以得出其非线性度为 0.02%。

将梁膜复合结构与其他结构进行同尺寸仿真比较, 不同形状膜片受 12 KPa 压力时, 膜片产生应力与位移如表 2 所示。通过对比可以得出, 对于相同厚度的膜结构, 弧形膜比平膜结构最大应力提升了 234.09%。对于相同厚度相同形状的膜片, 相比于单纯弧形结构, 增加米字梁之后, 其位移降低至原来的 77.8%。梁膜复合结构能有效集中应力, 灵敏度也高于其他结构。

表 2 不同形状膜片比较

Tab. 2 Comparison of different diaphragm shapes

	最大应力/ MPa	应力差/ MPa	最大位移/ μm	灵敏度/ (mV/Kpa)
方形平膜	49.058	32.819	6.307	9.442
弧形平膜	163.9	43.761	7.9132	12.590
米字梁方形膜	60.121	57.537	4.9073	16.554
米字梁弧形膜	158.66	75.776	5.9733	21.801

考虑具体应用场景, 对压力传感器进行过载能力仿真分析, 对传感器膜片施加 120 KPa 压力, 膜片产生的应力为 907 MPa, 远小于硅片的屈服应力, 说明传感器过载能力为 10 倍以上, 适用于高压情况。

同时,对传感器进行瞬态冲击仿真,模拟正常飞机起飞加速度(1 g)时,传感器膜片所受压力值为 6.82 KPa,对传感器输出影响较小,在加速度为 10000 g 情况下,膜片产生的应力为 68.2 MPa,远小于硅片的屈服应力,所设计传感器膜片不会出现断裂情况。在-55℃~75℃ 温度范围内,由于硅材料限制,输出有明显变化,因此制作过程中增加温度补偿电阻,并通过引线接入温度补偿电路,使得器件高温可靠。

3 制作工艺

为对掺杂厚度进行方便准确地控制,传感器制作选择绝缘体上硅(Silicon On Insulator; SOI)基片作为衬底,其制备工艺流程如图 13 所示。

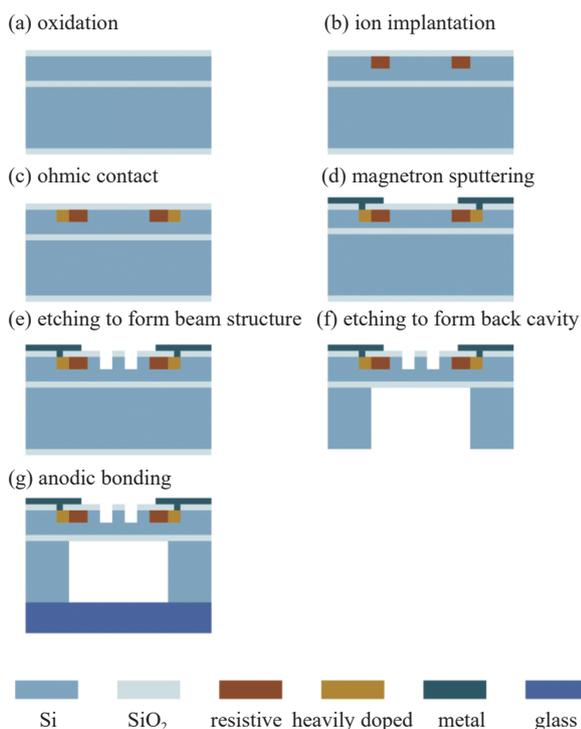


图13 传感器工艺流程图。(a) 氧化, (b) 离子注入, (c) 欧姆接触, (d) 磁控溅射, (e) 刻蚀形成梁结构, (f) 刻蚀形成背腔, (g) 阳极键合

Fig. 13 Process flow diagram of the sensor. (a) Oxidation, (b) ion implantation, (c) ohmic contact, (d) magnetron sputtering, (e) etching to form beam structure, (f) etching to form back cavity, (g) anodic bonding

1.首先选择 n 型 (100)SOI 晶片作为衬底并对晶片进行标准清洗,去除表面自然氧化。通过热氧化在衬底两侧生成二氧化硅薄膜,如图 13(a);

2.刻蚀出压敏电阻条,然后离子注入使其变为 p 型,如图 13(b);

3.通过高浓度硼离子注入形成良好的欧姆接触窗口,如图 13(c);

4.先用反应性离子刻蚀 (Reaction Ion Etching; RIE) 工艺刻蚀接触孔,再使用磁控溅射产生 Ti-Pt-Au 复合层制备金属连线,如图 13(d);

5.在晶圆正面进行 RIE 工艺,刻蚀米字梁结构完成正面梁结构释放,如图 13(e);

6.通过深反应离子刻蚀 (Deep Reactive Ion Etching; DRIE) 刻蚀弧形背腔,刻蚀到中间 SiO₂ 层停止。之后去除背面多余 SiO₂,如图 13(f);

7.在大气压环境中将衬底与硼硅玻璃阳极键合,形成表压参考腔,如图 13(g)。

4 结论

本文针对一般飞机的供氧、液压、环控和燃油等系统故障预测与健康研究了一种新型梁膜结合的压阻式压力传感器。仿真结果表明,结构优化不仅能够集中应力,同时也能增加膜片刚度。对各项尺寸进行对比和优化,通过 ANSYS 有限元分析仿真确定了合适的压敏电阻位置,传感器在-2~12 KPa 量程内得出传感器灵敏度为 21.801 mV/KPa,非线性度为 0.02%,过载为总量程 10 倍以上。此传感器量程适用于一般航空航天分布式传感器网络,非线性度良好,过载能力强,满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] Fiorillo A S, Critello C D, Pullano S A. Theory, technology and applications of piezoresistive sensors: A review[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2018, 281: 156-175
- [2] Liu Xiangyang, Leng Chunxue, Huang Qitao, et al. The current situation and development trend of automatic test technology in aerospace[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2018, 38(01): 1-5 (刘向阳, 冷春雪, 黄启陶, 等. 自动测试技术在航天中的应用现状及发展趋势 [J]. *宇航计测技术*, 2018, 38(01): 1-5(in chinese))
- [3] Liu, Jinchang, Liu, Zhenzhong, Zhang, Jian. Current status and trends of MEMS sensor technology development [J]. *Scitech in China*, 2018(06): 8-10 (刘进长, 刘振忠, 张建. MEMS 传感器技术发展现状与趋势 [J]. *科技中国*, 2018(06): 8-10(in chinese))
- [4] Ren Xiangyang, Zhang Zhiguo, Liu Hongwei, et al. Research progress of silicon carbide-based high-temperature pressure sensor chip in China[J]. *Electronics World*, 2022(01): 39-40 (任向阳, 张治国, 刘宏伟, 等. 基于碳

- 化硅的高温压力传感器芯片在国内的研究进展 [J]. 电子世界, 2022(01): 39-40(in chinese))
- [5] Yang Yunpeng, Zhang Jie. Flexible pressure sensors based on microstructured conductive films[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(02): 64-67+79 (杨云鹏, 张婕. 基于微结构导电薄膜的柔性压力传感器 [J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(02): 64-67+79(in chinese))
- [6] Zheng Shiyu, Hou Wen, Wang Junqiang, et al. Design of high frequency response MEMS graphene pressure sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2023(01): 12-16 (郑士瑜, 侯文, 王俊强, 等. 高频响 MEMS 石墨烯压力传感器设计 [J]. *仪表技术与传感器*, 2023(01): 12-16(in chinese))
- [7] Liu Yuhui, Liu Shilin, Wu Congying, et al. Research progress on multidimensional flexible strain/pressure sensors based on carbon materials[J]. *Materials Reports*: 1-23[2023-03-27] (刘玉慧, 柳仕林, 吴聪影, 等. 基于碳材料的多维度柔性应变/压力传感器的研究进展 [J]. *材料导报*: 1-23[2023-03-27](in chinese))
- [8] Zhou Zhiwei, Deng Tianyu, Shi Liang, et al. Temperature compensation and field calibration method for piezoresistive pressure sensors[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(10): 145-148 (周志炜, 邓天雨, 师亮, 等. 压阻式压力传感器的温度补偿及现场校准方法 [J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(10): 145-148(in chinese))
- [9] Ren Yongfeng, Cheng Xinyi, Jia Xingzhong. Optimal design of a miniature pressure sensor conditioning circuit[J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(17): 50-54 (任勇峰, 程心怡, 贾兴中. 一种微型压力传感器调理电路的优化设计 [J]. *电子设计工程*, 2021, 29(17): 50-54(in chinese))
- [10] Xu T, Zhao L, Jiang Z, et al. A high sensitive pressure sensor with the novel bossed diaphragm combined with peninsula-island structure[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2016, 244: 66-76
- [11] Li C, Cordovilla F, Ocaña J L. Design optimization and fabrication of a novel structural piezoresistive pressure sensor for micro-pressure measurement[J]. *Solid-State Electronics*, 2018, 139: 39-47
- [12] Shan Cunliang, Liang Ting, Wang Wentao, et al. SOI-based MEMS high-temperature piezoresistive pressure sensor[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2021, 58(04): 325-331 (单存良, 梁庭, 王文涛, 等. 基于 SOI 的 MEMS 高温压阻式压力传感器 [J]. *微纳电子技术*, 2021, 58(04): 325-331(in chinese))
- [13] Jena S, Pandey C, Gupta A. Mathematical modeling of different diaphragm geometries in MEMS pressure sensor[J]. *Materials Today:Proceedings*, 2021, 44: 1243-1248
- [14] Tian B, Shang H, Zhao L, et al. Performance optimization of SiC piezoresistive pressure sensor through suitable piezoresistor design[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27: 3083-3093