

钛合金纳米薄膜压力传感器非线性及灵敏度研究*

张龙赐^{1,2,3} 周国方^{1,2,3} 蓝镇立^{2,4}

(1. 中国电子科技集团公司第四十八研究所 长沙 410111; 2. 高性能智能传感器及检测系统湖南省重点实验室 长沙 410111; 3. 薄膜传感技术湖南省国防科技重点实验室 长沙 410111; 4. 湖南大学材料科学与工程学院 长沙 410082)

摘要:为了满足钛合金纳米薄膜压力传感器高精度测量要求,基于薄膜厚度、凸岛、电阻形状和排列位置对传感器非线性、灵敏度的影响分析,设计并优化了以钛合金薄膜为敏感元件的两种量程的压力传感器。结果表明,有无凸岛,传感器的最大应力均出现在膜片边缘处。增加凸岛后,最大应力降低,位置基本保持不变。增加凸岛或随着凸岛直径增大,非线性降低,灵敏度相应增加。理论上,为了保证传感器灵敏度不小于 2.5 mV/V, 2 MPa 量程时,增加 $\Phi 2$ mm 凸岛后,非线性降低至 0.05%,灵敏度约为 2.67 mV/V。4 MPa 量程时,增加 $\Phi 3$ mm 凸岛后,非线性降低至 0.02%,灵敏度约为 2.89 mV/V。制备了两种量程传感器并测试分析,2 MPa 量程时,其灵敏度及非线性与理论值最大偏差分别为 0.01 mV/V 及 0.01%。4 MPa 量程时,其灵敏度及非线性与理论值最大偏差分别为 0.16 mV/V 及 0.02%。本研究为钛合金纳米薄膜压力传感器关键参数设计提供重要依据。

关键词: 纳米薄膜; 敏感元件; 灵敏度; 非线性

中图分类号: TP212; TN405 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Study for the nonlinearity and sensitivity of the titanium alloy nano film pressure sensor

Zhang Longci^{1,2,3} Zhou Guofang^{1,2,3} Lan Zhenli^{2,4}

(1. The 48th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Changsha 410111, China; 2. The High Performance Intelligent Sensor and Testing System in the Key Laboratory of Hunan Province, Changsha 410111, China; 3. The Defense Key Laboratory for Thin Film Sensing Technology in Hunan Province, Changsha 410111, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to meet the high-precision measurement requirements of titanium alloy nanofilm pressure sensors, based on the influences of thin film thickness, convex islands, resistance shape and arrangement position to the nonlinearity and sensitivity of sensors, two range pressure sensors are designed and optimized using titanium alloy thin films as sensitive elements. The results indicate that whether there are convex islands or not, the maximum stress of the sensor occurs at the edge of the diaphragm. The maximum stress decreases and the position remains basically unchanged after adding convex islands. Adding convex islands or as the diameter of the convex island increases, the nonlinearity decreases and the sensitivity increases accordingly. To ensure that the sensitivity is not less than 2.5 mV/V in theory, 2 MPa sensor increasing convex islands with $\Phi 2$ mm, the nonlinearity decreases to 0.05% and the sensitivity is about 2.67 mV/V. 4 MPa sensor increasing convex islands with $\Phi 3$ mm, the nonlinearity decreases to 0.02% and the sensitivity is about 2.89 mV/V. Two ranges of sensors are prepared and tested, the results show that at a range of 2 MPa, the maximum deviations of the sensitivity and nonlinearity between actual values and theoretical values are 0.01 mV/V and 0.01%, respectively. At a range of 4 MPa, the maximum deviations of the sensitivity and nonlinearity between actual values and theoretical values are 0.16 mV/V and 0.02%, respectively. This study provides an important basis for the design of titanium alloy thin film pressure sensors.

Keywords: nano film; sensitive element; nonlinearity; sensitivity

0 引言

薄膜压力传感器是利用现代薄膜制备技术,在金属弹性基体上沉积薄膜应变电阻,具有耐高温、精度高、稳定性高、蠕变性好、抗干扰力强等特点^[1-2]。金属弹性基体材料包括钢、钛合金等,金属合金薄膜材料包括镍铬合金及其改良型合金、铂钨合金、钯铬合金等^[3]。

文献[4]通过对大量薄膜压力传感器敏感元件数据统计分析,常温下准确度可以达到 0.1% FS 以内。长期稳定性方面,Trafag 公司相关数据表明,不锈钢为弹性元件的镍铬合金薄膜压力传感器 1 年内在温度为 90 °C 时几乎没有漂移^[5]。中国电科四十八所研制的薄膜压力传感器 5 年内在常温常压下持续通电工作,年平均零点漂移小于 0.05%FS^[6]。其高精度和高稳定性等性能,适合在航天航空、火箭卫星等领域应用。在小型化方面,Bosch 公司开发的高压薄膜压力传感器尺寸缩小为 10 mm 以内^[7],文献[8]提出了一种外径 4 mm 的高压薄膜压力传感器,传感器常温精度达到 0.058%FS。此外,还有大量学者在薄膜压力传感器制备工艺、材料及性能方面作了进一步研究。

钛合金具有重量轻、强度高、耐海水腐蚀、高低温下疲劳强度高、膨胀系数低等优点。广泛应用于腐蚀性环境及要求重量轻、强度高的场合^[9-12]。

钛合金作为基底材料用于压力测量时,钛合金膜片产生微小形变,该形变带动绝缘膜上的应变电阻膜层内应力发生变化,最终使电桥输出发生变化。这种传感器是将石英、蓝宝石等绝缘体与钛合金弹性膜片有效的结合在一起^[13-14]。对温度变化不敏感,抗辐射特性强,不仅能耐工业腐蚀性气体及海水腐蚀,由于其弹性模量较小,也能降低非线性^[15]。中国国家海洋技术中心研制的用于海洋深度测量的钛蓝宝石压力传感器,准确度均可达到 0.05%FS 以内^[16]。文献[17]通过信号调理芯片对传感器进行温度补偿和非线性化校正,提高精度。文献[18]在钛合金应力杯上制作硅蓝宝石应变片,实现了对 -55 °C ~ 400 °C 宽温区内压力的测量,在敏感元件上制作铂电阻,利用智能电路同时对非线性和温度变化进行补偿,从而提高精度。文献[19]设计了钛合金和蓝宝石耐高低温材料和结构的硅-蓝宝石压力传感器,通过选择适合膜片结构形式及参数设计,可以使产品在 -55 °C ~ 350 °C 温度范围的热漂移不大于 0.015%FS/°C。

本文研究了薄膜厚度、凸岛、电阻形状和排列位置对钛合金纳米薄膜压力传感器非线性和灵敏度的影响,对特殊场合的高精度测量很有必要。

1 工作原理

金属薄膜压力传感器采用应变式工作原理,如图 1 所示,压力作用到金属弹性膜片上使其发生变形,膜片上的敏感电阻的几何形状发生变化,通过电桥检测其引起的电信号输出变化量。

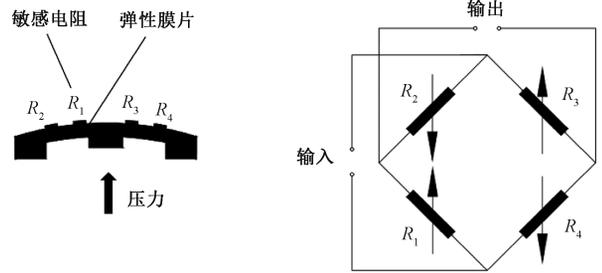


图 1 敏感元件工作原理

Fig. 1 Working principle of sensitive element

固体受到外力作用时,其电阻的相对变化为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad (1)$$

式中: ρ 为电阻率, L 为敏感电阻条长度, S 为电阻截面积, $\Delta \rho$ 、 ΔL 、 ΔS 为相应变化量。给敏感电桥施加精密基准电压可以产生毫伏电压输出,最终建立压力值与输出电信号之间的关系。

2 参数设计

2.1 膜厚设计

弹性元件的圆膜片厚度和半径决定了其量程、非线性及灵敏度。膜片中心处,具有最大挠度。

$$\omega_{\max} = \frac{3P(1-\mu^2)R_0^4}{16Eh^3} \quad (2)$$

式中: P 为作用在膜片上的均布压力,Pa; μ 为材料的泊松比; R_0 为膜片半径,mm; E 为材料的弹性模量,Pa; h 为膜片厚度,mm。

平膜片的非线性误差可以用大扰度理论进行分析,其最大绝对非线性误差发生在扰度为 $\Delta \omega_{\max}/\sqrt{3}$ 处,最大相对非线性误差为:

$$\frac{\Delta \omega_{\max}}{\omega_{\max}} = 0.385 \frac{0.611 \frac{\omega_{\max}^2}{h^2}}{1 + 0.611 \frac{\omega_{\max}^2}{h^2}} \quad (3)$$

传感器在膜片边缘处出现最大综合应力,为:

$$\sigma_{ra} = \frac{3PR_0^2}{4h^2} \sqrt{1 + \mu^2} \quad (4)$$

根据小挠度理论,膜片中心处的最大挠度应小于膜片厚度的 1/3,设计传感器非线性误差不超过 0.08%,可承受 3 倍量程的过载压力,联合式(2)~(4)可求得压力量程与膜片厚度的关系。

弹性元件材料选用钛合金 TC4,弹性模量 E 为 116 GPa,弹性极限 σ_e 为 895 MPa,泊松比取 0.34,弹性元件基本参数如表 1 所示。

表 1 弹性元件基本参数

Table 1 Basic parameters of elastic elements

量程 P/MPa	膜片厚度/mm	倒角	膜片半径/mm
2	0.51	R0.5	6
4	0.62	R0.8	6

图 2 为量程 2 MPa、倒角 R0.5 时平膜片的应力云图,最大应力出现在膜片边缘倒角处,其倒角处的最大应力为 219.80 MPa。如图 3 所示,增加 $\Phi 2$ mm 凸岛后,最大应力降低至 198.68 MPa,位置基本保持不变。量程 4 MPa 时,最大应力变化趋势及位置基本与此相同。

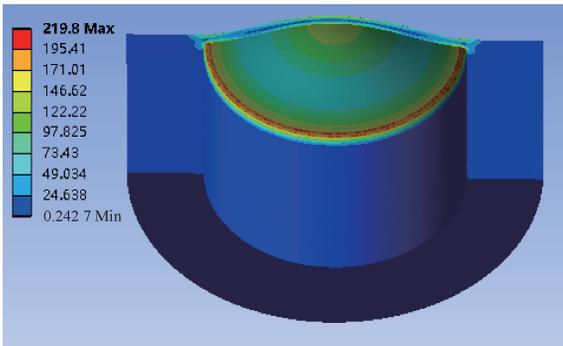


图 2 量程 2 MPa、倒角 R0.5 时平膜片应力云图

Fig. 2 Stress cloud of the flat diaphragm with chamfer R0.5 under 2 MPa

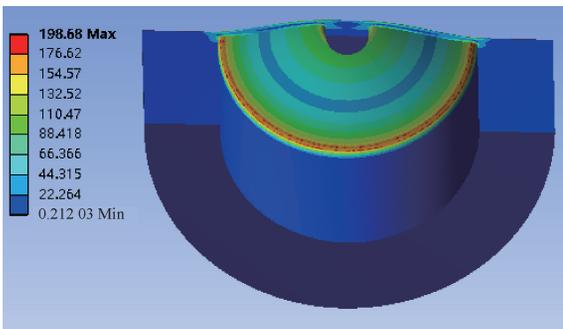


图 3 量程 2 MPa、倒角 R0.8 时带 $\Phi 2$ mm 凸岛应力云图

Fig. 3 Stress cloud of the flat diaphragm with $\Phi 2$ mm convex island with chamfer R0.8 under 2 MPa

2.2 灵敏度设计

对于长度为 L ,宽度为 a ,厚度为 h 的电阻,假设其长度方向沿膜片直径方向布置时。在高压下,由金属导线性能可知,导线的电阻率随体积变化而变化的^[20]。即:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = c \frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

式中: c 为金属材料系数, V 为电阻体积。

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{a\Delta h + \Delta ah}{ah} \quad (6)$$

由式(1)、(5)、(6)可知:

$$\frac{\Delta R}{R} = (c + 1) \frac{\Delta L}{L} + (c - 1) \left(\frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta a}{a} \right) \quad (7)$$

式中: Δh 、 Δa 为电阻在厚度和宽度方向上的变化量,进而求得:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_r(c + 1 + \nu - c\nu) + \varepsilon_t(c - 1) \quad (8)$$

式中: ε_r 为径向应变, ε_t 为切向应变。 ν 为泊松比,对于敏感薄膜为镍铬合金时,金属材料常数取 2,泊松比取 0.3。则电阻某处的总应变为:

$$\frac{\Delta R}{R} = 2.7\varepsilon_r + \varepsilon_t \quad (9)$$

设计传感器的 4 个敏感电阻如图 4 所示,受拉、受压电阻纵栅均沿直径方向分布,长度为 L_1 ,横栅沿切向方向分布,长度为 L_2 。

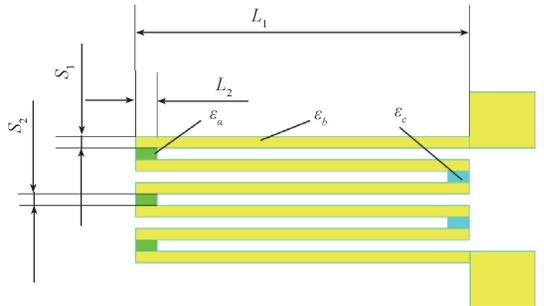


图 4 敏感电阻布局示意图

Fig. 4 Sketch of sensitive resistance layout

S_1 、 S_2 为纵栅、横栅截面积, m 为纵栅条数。金属敏感电阻为:

$$R = \rho \left(\frac{mL_1}{S_1} + \frac{(m - 1)L_2}{S_2} \right) \quad (10)$$

纵栅长度取 750 μm ,横栅长度取 60 μm 。设计两者截面积均为 6 μm^2 。4 个桥臂电阻相等,且受拉、受压电阻沿膜片中心对称分布,则传感器灵敏度可表示为:

$$s = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \quad (11)$$

式中: R_1 为受拉电阻, R_2 为受压电阻。求得 R_1 、 R_2 电阻处径向应变 ε_r 和 ε_t 切向应变,即可求得灵敏度。

假设外侧横栅处的平均总应变为 ε_a , 纵栅处的平均总应变为 ε_b , 内侧横栅处的平均总应变为 ε_c , 由式(9)可知, ε_a 、 ε_b 、 ε_c 为径向应变 ε_r 与切向应变 ε_t 的函数, 电阻布置后径向坐标确定后可求得。则该处电阻总应变为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{mL_2\varepsilon_a + 2mL_1\varepsilon_b + (m-2)L_2\varepsilon_c}{2mL_1 + 2mL_2 - 2L_2} \quad (12)$$

2.3 凸岛设计

由式(3)可知, 传感器的最大非线性误差随最大挠度 ω_{\max} 减少而变小, 弹性元件中心增加凸岛时, 其应力集中在膜片边缘和凸岛边缘位置, 与传统的平膜片相比, 挠度减少, 非线性降低。最大应变减小, 牺牲了一定的灵敏度, 通过将应变电阻沿径向应变最大区域布置, 可使灵敏度牺牲得较小。

设计不同的凸岛厚度及直径对非线性、灵敏度的影响。以 2 MPa 量程为例, 凸岛直径 $\Phi 2$ mm 时, 分别设计凸岛厚度为膜片厚度值、1 mm、2 mm、3 mm, 结果表明, 弹性元件的挠度及最大应变变化较小, 对非线性、灵敏度的影响可以忽略。

图 5 为电阻布置位置示意图, 图中黑色方块为敏感电阻, 凸岛边缘对应的膜片表面往往布置受拉电阻。0.577 ω_{\max} 对应膜片上的位置为最大非线性区, 电阻布置时应避开。为保证具有最大灵敏度, 由式(9)可知, 尽量在总应变最大区域, 总应变为 $2.7\varepsilon_r + \varepsilon_t$ 。此时, 由式(11)、(12)可求得其灵敏度。

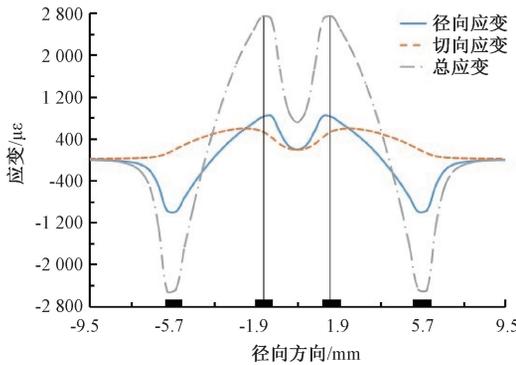


图 5 电阻布置位置示意图

Fig. 5 Schematic of the position of resistor arrangement

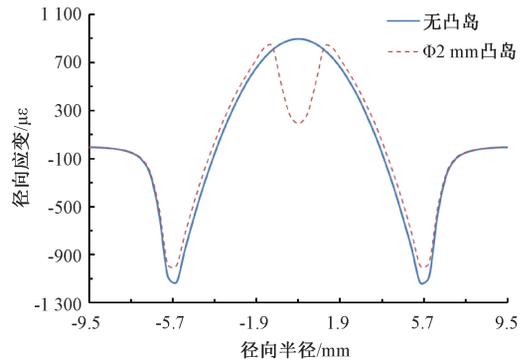
由两种量程的挠度曲线可知, 为了使受拉电阻避最大非线性区域, 凸岛直径应不超过 $\Phi 6$ mm, 考虑膜片边缘倒角加工位置, 设计凸岛直径为 $\Phi 1$ mm ~ $\Phi 4$ mm。凸岛厚度取 1 mm, 分析不同凸岛直径对非线性、灵敏度的影响。

由图 6 可知, 增加凸岛后, 最大压应变减少, 位置基本不变。最大拉应变减少, 出现在凸台边缘处。2 MPa 量程、无凸岛时, 最大拉应变和压应变分别为 896.3 和

1 131.7 $\mu\varepsilon$, 增加 $\Phi 2$ mm 凸岛时, 最大拉应变和压应变分别减少 12.3% 和 6.6%。4 MPa 量程、无凸岛时, 最大拉应变和压应变分别为 1 225.0 和 1 473.7 $\mu\varepsilon$, 增加 $\Phi 3$ mm 凸岛时, 最大拉应变和压应变分别减少 22.6% 和 26.8%。

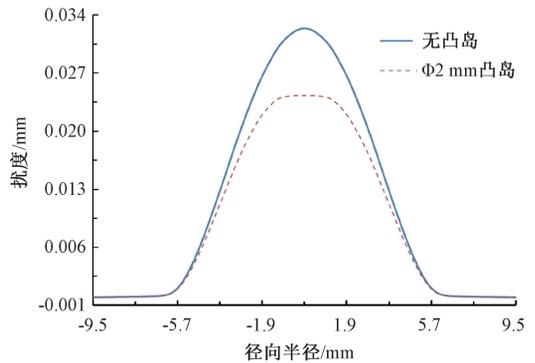
增加凸岛使最大扰度减少。由式(3)可求得非线性值, 2 MPa 量程时, 增加 $\Phi 2$ mm 凸岛可使非线性降低至 0.05%。4 MPa 时, 增加 $\Phi 3$ mm 凸岛可使非线性降低至 0.02%。

由图 7 可知, 为了使传感器灵敏度大于 2.5 mV/V, 2 MPa 量程时, 凸岛直径取 2 mm。4 MPa 量程时, 凸岛直径取 3 mm, 其设计参数如表 2 所示。



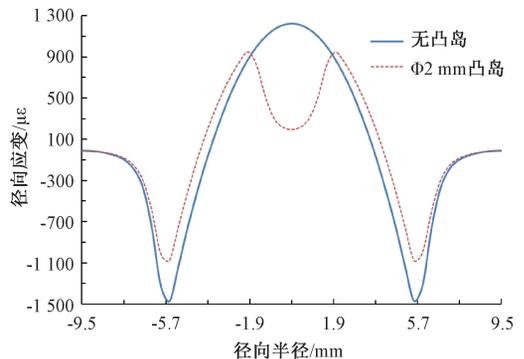
(a) 2 MPa 有无凸岛时径向应变曲线

(a) Radial strain curve with (without) convex islands at 2 MPa



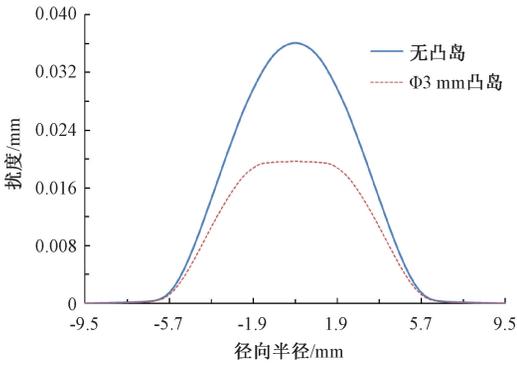
(b) 2 MPa 有无凸岛时挠度曲线

(b) Deformation curve with and without convex islands at 2 MPa



(c) 4 MPa 有无凸岛时径向应变曲线

(c) Radial strain curve with (without) convex islands at 4 MPa



(d) 4 MPa有无凸岛时扰度曲线

(d) Deformation curve with and without convex islands at 4 MPa

图 6 不同凸岛时径向应变及扰度曲线

Fig. 6 Radial strain and deformation with different convex island

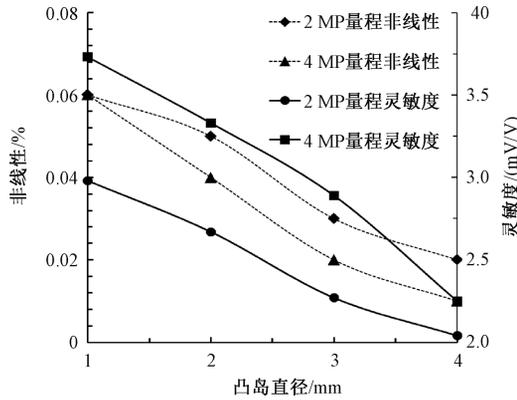


图 7 不同凸岛直径时的非线性及灵敏度

Fig. 7 Curves of the nonlinear and sensitivity for different convex islands

表 2 传感器设计参数及性能表

Table 2 Design parameters and performances of sensors

量程 P/MPa	倒角	凸岛/mm	非线性	灵敏度/(mV/V)
2	R0.5	Φ2	0.05%	2.67
4	R0.8	Φ3	0.02%	2.89

3 敏感元件制备

弹性元件结构如图 8 所示,倒角由圆弧刀具加工而成,凸岛为圆柱形,位于膜片中心位置。凸岛与膜片由机械加工一体成型。膜片表面粗加工后,通过研磨、抛光等精加工工艺,获得沉积薄膜所需的粗糙度。

设计功能膜层时,将 2 个受拉电阻分布在凸岛边缘区域,2 个受压电阻分布在膜片靠近固支的应变区,为了能对传感器零点、温漂进行补偿,4 个电阻形成开环的惠斯通电桥,同时,在膜片上设计温度补偿的铂电阻,与敏

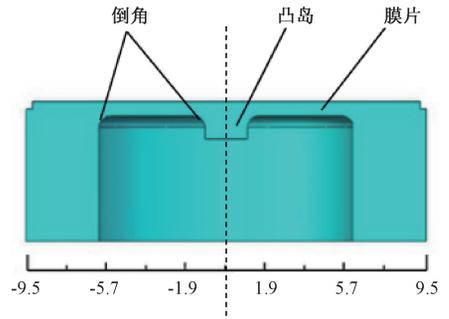


图 8 倒角及凸岛示意图

Fig. 8 Location of chamfer and convex island

感电阻在同一温度场,有利于提高传感器的热零点温漂和热灵敏度温漂的补偿精度。图 9 为功能膜层示意图。

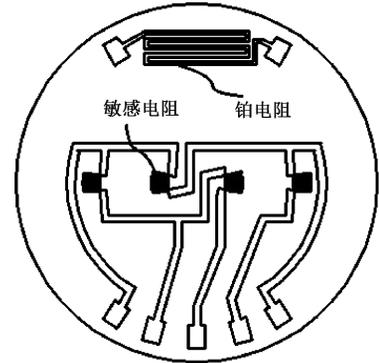


图 9 功能膜层示意图

Fig. 9 Sketch of functional film

4 测试分析

制备 2 和 4 MPa 钛合金纳米薄膜压力传感器各 2 只并进行测试,图 10 为传感器实物图。



图 10 传感器实物图

Fig. 10 Material object of the sensor

实际测试均在常温常压下对其进行多点测试,传感器供电为 5 V。由表 3 可知,2 MPa 量程传感器的灵敏度分别为 2.67 及 2.66 mV/V,非线性分别为 0.05% 及 0.04%。与理论值最大偏差分别为 0.01 mV/V 及 0.01%。4 MPa 量程传感器的灵敏度为 2.75 及 2.73 mV/V,非线性分别为 0.03% 及 0.04%。与理论值最大偏差分别为 0.16 mV/V 及 0.02%。

表 3 薄膜压力传感器测试数据

Table 3 Testing data of thin-film pressure sensors

编号	量程 P/MPa	常压输出/mV	0.2 P 输出/mV	0.4 P 输出/mV	0.6 P 输出/mV	0.8 P 输出/mV	P 输出/mV
1	2	2.33	5.00	7.68	10.35	13.02	15.68
		2.31	4.99	7.67	10.34	13.01	15.68
2	2	2.35	5.02	7.67	10.34	13.00	15.66
		2.32	4.99	7.66	10.33	13	15.66
3	4	2.34	5.07	7.81	10.54	13.28	16.01
		2.34	5.07	7.80	10.54	13.27	16.01
4	4	2.31	5.06	7.80	10.56	13.30	16.05
		2.31	5.05	7.80	10.56	13.31	16.05

5 结 论

设计、制备和测试了 2、4 MPa 两种量程的以钛合金为弹性元件的纳米薄膜压力传感器。通过仿真分析和计算,研究了薄膜厚度、凸岛、电阻形状和排列位置对传感器非线性和灵敏度的影响。实验测试结果表明,制备的两种压力传感器的非线性和灵敏度与理论设计值具有很好的一致性。本研究为钛合金纳米薄膜压力传感器的设计分析提供重要依据。所提出的设计方案和思路对应变式薄膜压力传感器领域的研究具有一定的参考价值和借鉴意义。

参考文献

- [1] 虞沛蒂,李伟. 薄膜压力传感器的研究进展[J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41(2):47-54.
YU P F, LI W. Research progress of thin film pressure sensors[J]. Nonferrous Metal Material and Engineering, 2020, 41(2):47-54.
- [2] 蒋传生,章恺. 溅射薄膜压力传感器敏感元件的制作工艺研究[J]. 机械制造与自动化,2016, 45(4):37-39,68.
JIANG CH SH, ZHANG K. Research on processing technology of sensitive element of sputtering thin-film pressure sensor [J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2016, 45(4): 37-39,68.
- [3] 谭苗苗. 耐高温合金薄膜压力传感器的设计及仿真分析[J]. 机械工程师, 2017,(6):33-34.
TAN M M. Design and simulation analysis of high temperature alloy thin film pressure sensor [J]. Mechanical Engineer, 2017,(6):33-34.
- [4] 金忠,谢锋,何迎辉,等. 高精度薄膜压力传感器的研制[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(7):79-88.
JIN ZH, XIE F, HE Y H, et al. Development of high precision thin film pressure sensor[J]. Automation and Instrumentation, 2020, 35(7):79-88.
- [5] BELOZUBOV E M, VASILEV V A, GROMKOV N V.

Problems and basic research directions in the field of thin-film nano and microelectromechanical systems of pressure sensors [J]. Automation and Remote Control, 2011, 72(2):417-424.

- [6] 何迎辉,石慧杰,金忠,等. 溅射薄膜压敏芯体长期稳定性研究 [J]. 电子工艺技术, 2020, 41 (4): 215-215.
HE Y H, SHI H J, JIN ZH, et al. Research on long term stability of sputtering thin film pressure sensitive element [J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(4):215-215.
- [7] STOETZLER A, DITTMANN D, HENN R, et al. A small size high pressure sensor based on metal thin film technology [C]. Sensors, 2007 IEEE. Atlanta. IEEE, 2007:825-827.
- [8] 蓝镇立,杨晓生,周国方,等. 小尺寸高精度薄膜压力传感器研制 [J]. 传感器世界, 2022, 28 (10): 20-25.
LAN ZH L, YANG X SH, ZHOU G F, et al. Development of thin film pressure sensor with small size and high accuracy [J]. Sensor World, 2022, 28 (10): 20-25.
- [9] 许国琛,邓江勇,陈振华,等. 钛合金疲劳裂纹的线性和非线性超声综合定量检测技术 [J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(2):196-202.
XU G CH, DENG J Y, CHEN ZH H, et al. The combination detection technology of the linear and the nonlinear ultrasound for fatigue cracks in titanium alloys [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2):196-202.
- [10] ROHITH K, SHREYAS S, VISHNU A K B, et al. Recent material advancement for marine application [J]. Material Today, 2020,(18): 4854-4859.
- [11] ORYSHCHENKO A S, GORYNIN I V, LEONOV V P, et al. Marine titanium alloys: Present and future [J]. Inorganic Materials: Applied Research, 2015,(6): 571-579.

- [12] SCHUTZ R W, SCATURRO M R. An overview of current and candidate titanium alloy applications on U. S. navy surfaced ships [J]. Naval Engineers Journal, 1991, 103(3): 175-191.
- [13] 邹兴, 黄漫国, 李欣, 等. 温度对硅-蓝宝石压力传感器影响研究[J]. 测控技术, 2019, 38(6): 22-27.
ZOU X, HUANG M G, LI X, et al. Research on thermal influence to silicon-on-sapphire pressure sensor [J]. Measurement and Control Technology, 2019, 38(6): 22-27.
- [14] 卢超, 黄漫国, 李欣, 等. 硅-蓝宝石压力传感器温度补偿研究[J]. 测控技术, 2017, 36(4): 113-116.
LU CH, HUANG M G, LI X, et al. Research on temperature compensation for silicon on sapphire pressure sensors [J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(4): 113-116.
- [15] 李亚萍, 曲鸣飞. 硅蓝宝石压力传感器的原理及应用探析[J]. 中国新通信, 2019, 13(1): 216.
LI Y P, QU M F. Principle and application analysis of silicon sapphire pressure sensor [J]. China New Telecommunications, 2019, 13(1): 216.
- [16] LI H Z, JIA W J, WU S, et al. Investigation of high precision marine pressure sensor based on silicon-on-sapphire [J]. Sensors & Transducers, 2016, 202(7): 46-50.
- [17] 党瑞荣, 张宏伟, 宋楠, 等. 高温高压井下压力传感器的补偿与校正[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 737-743.
DANG R R, ZHANG H W, SONG N, et al. Compensation and calibration of the high temperature and pressure downhole pressure sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 737-743.
- [18] 段磊. 新型宽温区压力传感器技术[J]. 仪表技术与传感器, 2009, (12): 17-18.
DUAN L. Technology of new wide temperature range pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2009, (12): 17-18.
- [19] 姚东媛, 谢胜秋, 王俊巍, 等. 宽温区工作压力传感器热力学研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(6): 28-31.
YAO D Y, XIE SH Q, WANG J W, et al. Study on thermodynamics of pressure sensor in wide temperature range [J]. Transducer and Microsystem Technologies,

2017, 36(6): 28-31.

- [20] 颜鹰. MEMS 高温压力传感器若干关键技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
YAN Y. Research on some key techniques of MEMS high temperature pressure transducer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

作者简介



张龙赐(通信作者), 分别在 2010 年和 2013 年于中南大学获得学士和硕士学位, 现为中国电子科技集团公司第四十八研究所高级工程师, 主要研究方向为传感器设计及制备。

E-mail: zhanglc@cetc48.com

Zhang Longci (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Center South University, China, in 2010 and 2013, respectively. Now he is a senior engineer in China Electronics Technology Group Corporation 48th Research Institute. His main research interests include design and preparation of MEMS, design and manufacturing of pressure sensors and gas sensors.



周国方, 分别在 2010 年和 2013 年于合肥工业大学获得学士和硕士学位, 现为中国电子科技集团公司第四十八研究所高级工程师, 主要研究方向为薄膜器件设计及制备。

E-mail: zhou3fen@outlook.com

Zhou Guofang received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Hefei University of Technology, China, in 2010 and 2013, respectively. Now he is a senior Engineer in China Electronics Technology Group Corporation 48th Research Institute. His main research interests include MEMS and sensors, design and fabrication of thin film devices.



蓝镇立, 2004 年于北京交通大学获得学士学位, 2007 年于北京交通大学获得硕士学位, 现为湖南大学在读博士, 主要研究方向为 MEMS 压力传感器设计及制备。

E-mail: lizhlan@sina.com

Lan Zhenli received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Beijing Jiaotong University in 2004 and 2007, respectively. Now he is a Ph. D. candidate at the School of Materials Science and Engineering, Hunan University, China. His main research interests include design and process of MEMS pressure sensors.