

碳化硅MEMS压阻式压力传感器的结构设计及性能研究

赵 钊^{1*}, 许马会¹, 冯勇建², 刘新元¹, 陈川浩¹

¹江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州

²厦门大学航空航天学院, 福建 厦门

收稿日期: 2026年1月4日; 录用日期: 2026年1月27日; 发布日期: 2026年2月9日

摘 要

基于MEMS技术的硅基压力传感器因其体积小和精度高被广泛应用于多个领域。然而, 由于其固有材料属性的限制, 硅基传感器不适用于高压环境。为此, 本文提出了一种半岛-杆梁结构的碳化硅MEMS压阻式压力传感器, 通过在膜片表面加工半岛和杆梁结构, 可以增加感压膜片局部刚度, 提高传感器的整体性能。基于小挠度理论, 结合数学建模和仿真分析, 比较了传统圆形结构膜片和半岛-杆梁结构膜片的输出性能。结果表明, 所提出的半岛-杆梁结构传感器在0~10 MPa的压力范围内可以实现2.19 mV/V/MPa的灵敏度, 比传统圆形结构灵敏度提高了58.69%。通过设计新的膜片结构, 传感器的线性度和灵敏度得到了有效的改善, 为压阻式压力传感器在极端环境下的正常工作奠定了基础。

关键词

压阻式压力传感器, MEMS, 局部刚度, 碳化硅

Structural Design and Performance Research of Silicon Carbide MEMS Piezoresistive Pressure Sensor

Dian Zhao^{1*}, Mahui Xu¹, Yongjian Feng², Xinyuan Liu¹, Chuanhao Chen¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

²School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen Fujian

Received: January 4, 2026; accepted: January 27, 2026; published: February 9, 2026

*通讯作者。

文章引用: 赵钊, 许马会, 冯勇建, 刘新元, 陈川浩. 碳化硅 MEMS 压阻式压力传感器的结构设计及性能研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(2): 245-257. DOI: 10.12677/jsta.2026.142025

Abstract

Silicon-based pressure sensors based on MEMS technology are widely used in multiple fields due to their small size and high precision. However, due to the limitations of their inherent material properties, silicon-based sensors are not suitable for high-pressure environments. For this purpose, this paper proposes a peninsula-rod beam structure silicon carbide MEMS piezoresistive pressure sensor. By processing the peninsula and rod beam structure on the diaphragm surface, the local stiffness of the pressure-sensing diaphragm can be increased, and the overall performance of the sensor can be improved. Based on the small deflection theory, combined with mathematical modeling and simulation analysis, the output performance of the traditional circular structure diaphragm and the peninsula - rod beam structure diaphragm was compared. The results show that the proposed peninsula - rod beam structure sensor can achieve a sensitivity of 2.19 mV/V/MPa within the pressure range of 0~10 MPa, which is 58.69% higher than that of the traditional circular structure. By designing a new diaphragm structure, the linearity and sensitivity of the sensor have been effectively improved, laying a foundation for the normal operation of piezoresistive pressure sensors in extreme environments.

Keywords

Piezoresistive Pressure Sensor, MEMS, Localized Stiffness, Silicon Carbide

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微机电系统(MEMS)是一种微型加工制造技术,可以在半导体材料上加工出微米级大小的传感器芯片。随着相关工艺水平的提升,采用不同的传导机制可将机械信号转变为电信号并进行传输,如压阻式、压电式、电容式等[1]-[3]。压阻式压力传感器是以压敏电阻作为传导机制,通过压力作用在感压膜片上而使其产生形变,进而改变压敏电阻的电阻率,最终根据输出电压结果得出对应压力值的大小。压阻式压力传感器因其体积小、灵敏度高、响应时间短、制造简单等优点,广泛应用于汽车、航空航天、医疗器械等领域[4] [5]。

压阻式压力传感器的研究重点在于其感压膜片和压敏电阻,感压膜片的结构尺寸以及材料属性都会对传感器的灵敏度和非线性产生影响,压敏电阻的形状、位置和掺杂浓度也会影响输出性能。研究表明[6] [7],感压膜片形状的改变会导致其变形效果产生差异,进而改变其在压力作用下的机械性能。Jena 等人[8]发现圆形感压膜片在其边缘处具有显著的应力集中现象且分布均匀,这使得它们适合在高应力范围内进行测量。因此,在相同的尺寸条件下,尽管方形和矩形感压膜片具有更高的应力集中性,但圆形膜片应力分布均匀且具有更高的固有频率以及更好的线性度,常常被作为压阻式压力传感器的首选研究对象[8] [9]。此外, Maliha 等人[10]通过调整条形压敏电阻的布局和硅连接臂的结构,优化了应力分布和信号传递效率,显著提高了传感器的灵敏度。Tian 等人[11]通过设计不同的压敏电阻形状以及改变压敏电阻的位置,验证了膜片的外边缘也具有较大的应力,通过比较多个压敏电阻结构,发现 U 型压敏电阻具有最高的灵敏度。

在 MEMS 压力传感器的研究中,灵敏度和非线性度是检验传感器性能的重要指标,通过改变感压膜

片的结构、采用不同的薄膜材料以及改变压敏电阻的性能等方式可以提高传感器灵敏度。通常而言,随着感压膜片宽厚比的增大,传感器的灵敏度会得到明显的提升,但是非线性度也会随之增大[12][13]。因此,如何平衡两者之间的综合性能一直以来是众多研究者探索的目标。为了改善灵敏度和非线性之间的矛盾关系,可以通过优化薄膜结构来进行改善,如空心增强膜、孤岛结构膜、杆梁膜等。Basov 等人[13]通过在压敏膜片表面集成刚性岛结构,使局部应力集中,有效抑制了非线性误差,实现了 34.5 mV/V/kPa 的灵敏度。郭小辉等人[14]提出了一种四叶膜结构,与传统的 C 型膜相比,改善了压阻区域的纵向和横向应力差,并采用多目标拓扑优化方法进一步改进了膜片结构,系统地平衡了灵敏度和线性度之间的矛盾,灵敏度达到了 5.2 mV/V/kPa 。与硅基材料相比,碳化硅(SiC)材料因其具有宽带隙、高击穿电场、高热稳定性和高化学特性等优异性能,广泛用于高温、高压等恶劣环境。金刚石同样作为宽带隙材料,具有更优的机械性能以及更低的非线性而被广泛应用,但其灵敏度远不如硅基和碳化硅材料[15][16]。因此,对于高压等极端环境,碳化硅(SiC)因其优异的机械性能,成为极端环境下传感器的首选研究材料。

在这项工作中,提出了一种半岛-杆梁结构的感压膜片,在感压膜片的上表面集成半岛和杆梁结构,并将“弹簧形”压敏电阻放置在半岛所在的高应力区域。通过杆梁结构增加了膜片的局部应力,使得感压膜片的变形不会过度增加,同时又可以承受更大的应力,以提高压力传感器的灵敏度和稳定性。在边缘夹紧的边界条件约束下,利用薄膜弯曲理论求解感压膜片的解析模型,并使用 MATLAB 软件计算其挠度、应力、和灵敏度等解析结果。通过 COMSOL Multiphysics 仿真软件对半岛-杆梁结构的压力传感器进行模拟分析,比较传统圆形结构和改进后的半岛-杆梁结构的仿真结果。综合比较二者之间的输出性能,确保所提出的设计结构性能满足预期要求,为后续加工制造奠定基础。

2. 压力传感器的理论与解析模型

2.1. 工作原理

压阻式压力传感器主要由感压膜片和附着在膜片上的压敏电阻构成,压阻式压力传感器的结构示意图如图 1 所示。当没有压力作用时,压敏膜片不发生变形,电桥处于平衡状态。当有压力作用时,感压膜片发生形变,进而改变压敏电阻的电阻率。基于压阻效应,电阻率的变化导致电桥失去平衡,并且在恒压源的作用下,得到对应于所施加压力的输出电压值。

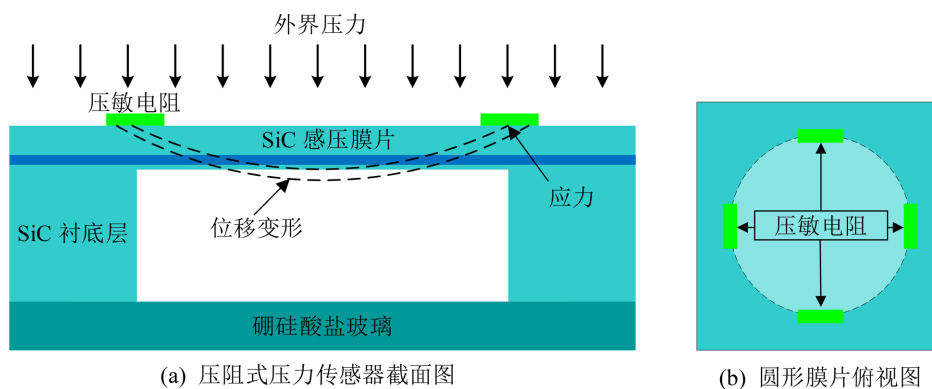


Figure 1. Diagram of the practical teaching system of automation major
图 1. 压阻式压力传感器的结构示意图

传感器的输出电压取决于施加的应力、输入电压和剪切压阻系数,通过在感压膜片表面放置四个电阻,膜片受压时电阻 R_1 和 R_3 承受纵向应力,电阻 R_2 和 R_4 承受横向应力。如图 2 所示,这些压敏电阻形成惠斯通电桥,由于每个压敏电阻的初始电阻相同,电桥是平衡的。与 N 型压敏电阻相比, P 型压敏电

阻具有更高的压阻系数, 所以压敏电阻类型往往采用 P 型。剪切压阻系数(π_{44})主要受掺杂浓度和掺杂类型的影响, P 型碳化硅的剪切压阻系数为 $18.1 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ 。压力传感器的感压膜片通常采用(100)晶面, 这是由于其优异的机械稳定性与微制造工艺的兼容性。对于集成在膜片上的 P 型 SiC 压敏电阻而言通常选择(110)晶向, 它可以使压阻效应最大化[8] [10] [11]。

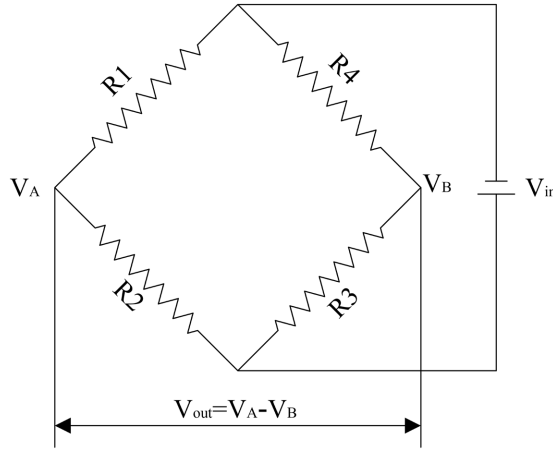


Figure 2. Wheatstone bridge circuit
图 2. 惠斯通电桥电路

2.2. 传感器的解析模型

在本工作中, 压阻式压力传感器是由圆形感压膜片和弹簧形压敏电阻组成, 采用边缘夹紧作为边界条件, 感压膜片边缘被固定在基板上表面, 四周被固定约束限制。根据小挠度理论, 在感压膜片上表面施加均匀压力 P , 圆形膜片的弹性曲面微分方程如下[17]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\omega}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{P}{D} \quad (1)$$

式中, D 为膜片的弯曲刚度, ω 为膜片在任意位置处的挠度, P 为施加的压力。

为满足上述边界要求, 取膜片挠度和位移的表达式如下[2]:

$$\omega_{(r)} = -\frac{Pr^4}{64D} + C_1 \frac{r^2}{4} + C_2 \ln r + C_3 \quad (2)$$

$$\varphi_{(r)} = \frac{d\omega_{(r)}}{dr} = -\frac{pr^3}{16D} + C_1 \frac{r}{2} + C_2 \frac{1}{r} \quad (3)$$

式中, C_1 、 C_2 、 C_3 是由边界条件确定的常数, r 为膜片上圆心到任意点的距离。

在 $r=0$ 的初始条件下, 即 $\omega_{(0)} = \omega_{\max}$, 将挠度公式代入膜片的弹性曲面微分方程可得:

$$\omega_{\max} = \frac{3Pa^4(1-\mu^2)}{16Et^3} \quad (4)$$

$$\omega_{(r)} = \frac{3P(1-\mu^2)(a^2-r^2)^2}{16Et^3} \quad (5)$$

式中 $\omega_{\max}$ 为最大挠度, a 为圆形膜片的半径, μ 为材料的泊松比, t 为膜的厚度, E 为材料的杨氏模量。

膜片表面的纵向应力和横向应力可分别表示如下[11]:

$$\sigma_r = \frac{Et}{(1-\mu^2)} \left(\frac{d^2\omega}{dr^2} + \frac{\mu}{r} \frac{d\omega}{dr} \right) = \frac{3Ph}{4t^3} [r^2(3+\mu) - (1+\mu)a^2] \quad (6)$$

$$\sigma_t = \frac{Et}{(1-\mu^2)} \left(\mu \frac{d^2\omega}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\omega}{dr} \right) = \frac{3Ph}{4t^3} [r^2(3\mu+1) - (1+\mu)a^2] \quad (7)$$

压敏电阻通常需要放置于应力结果最大的区域,以便获得更高的灵敏度结果。这些公式可以用于分析圆形膜片表面的受力情况,通过感压膜片表面的受力和变形情况选择压敏电阻的位置。

当施加压力时,感压薄膜发生变形使得压敏电阻的电阻率发生变化,其变化规律为[18][19]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma_r \pi_r + \sigma_t \pi_t = \frac{3\pi_{44}}{4} \frac{Pa^2}{t^2} (1-\mu) \quad (8)$$

最后,压力传感器的输出电压由下式给出:

$$V_{out} = \frac{3Pa^2}{4t^2} (1-\mu) \pi_{44} V_{in} \quad (9)$$

式中, V_{in} 为输入电压, π_{44} 为压敏电阻的剪切压阻系数。

推导半岛-杆梁结构的数学模型较为复杂性,首先需要基于薄板弯曲理论公式建立相关的数学函数,本文建立的半岛-杆梁结构感压膜片的数学模型函数关系式如下:

$$\omega_{(r)}^* = \frac{KPatB^{n1}W^{n2}M^{n3}N^{n4}}{E} \quad (10)$$

式中, $\omega_{(r)}^*$ 是半岛-杆梁结构的挠度变形结果; a 代表感压膜片的半径; t 代表感压膜片的厚度; B 代表感压膜片中杆梁的厚度; W 代表感压膜片中杆梁的宽度; M 代表半岛结构的长度; N 代表半岛结构的宽度; K 是函数需要计算求解的待定系数。 $n1$ 、 $n2$ 、 $n3$ 、 $n4$ 是待求解的尺寸参数曲线的拟合系数。

Table 1. The initial geometric dimension parameter range of the peninsula-bar and beam structure

表 1. 半岛-杆梁结构初步几何尺寸参数范围

尺寸参数名称	参数范围
感压膜片半径(a)	$400 \mu\text{m} \leq a \leq 600 \mu\text{m}$
感压膜片厚度(t)	$33 \mu\text{m} \leq t \leq 50 \mu\text{m}$
杆梁厚度(B)	$5 \mu\text{m} \leq B \leq 15 \mu\text{m}$
杆梁宽度(W)	$45 \mu\text{m} \leq W \leq 55 \mu\text{m}$
半岛长度(M)	$100 \mu\text{m} \leq M \leq 200 \mu\text{m}$
半岛宽度(N)	$50 \mu\text{m} \leq N \leq 150 \mu\text{m}$

为了确定出式(10)中的各类系数,首先需要确定感压膜片的几何参数的初步尺寸范围,然后在尺寸范围内选择一组合适的名义尺寸进行几何建模。基于感压膜片的小挠度变形理论,得出压力传感器感压膜片几何结构的初步尺寸参数范围如表 1 所示。取一组名义尺寸对所提出的半岛-杆梁结构进行几何建模,具体的尺寸参数为: $a = 500 \mu\text{m}$ 、 $t = 40 \mu\text{m}$ 、 $B = 10 \mu\text{m}$ 、 $W = 50 \mu\text{m}$ 、 $M = 150 \mu\text{m}$ 、 $N = 100 \mu\text{m}$ 。然后,通过参数化扫描分析感压膜片各尺寸参数的变化对压力传感器机械性能的影响。通过数学分析软件,绘

制参数影响曲线图，进行函数关系的曲线拟合。最后用待定系数法计算每个待定系数，得到数学模型的具体函数值，半岛 - 杆梁结构的数学模型方程式如下：

$$\omega^* = \frac{149.6PatB^{0.25154}W^{-0.04822}M^{-0.32948}N^{-0.2143}}{E} \tag{11}$$

最后，在尺寸参数范围内利用非线性条件下求极值的方法，根据拟合公式(11)对半岛 - 杆梁结构感压膜片的各几何尺寸进行优化。在优化时需要确保其他尺寸参数应设定为名义尺寸，从而降低优化的难度，提升优化的效率。

3. 传感器的结构与仿真分析

3.1. 传感器的结构设计

为了在特定压力环境下获得稳定性能，感压膜片和压敏电阻均选用耐高压的 SiC 材料，选择高导电硅(Si)作为连接结构，材料特性如表 2 所示。SiC 衬底用于确保整个传感器牢固可靠的电气连接，从而提高传感器整体性能和可靠性。

Table 2. The material properties of sensors
表 2. 传感器的材料特性

参数	SiC (N 型)	SiC (P 型)	硅
π_{11} [Pa^{-1}]	-9.6×10^{-11}	1.5×10^{-11}	-102.2×10^{-11}
π_{12} [Pa^{-1}]	5.8×10^{-11}	-1.4×10^{-11}	53.4×10^{-11}
π_{44} [Pa^{-1}]	1.6×10^{-11}	18.1×10^{-11}	-13.6×10^{-11}
Resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}$]	0.7	0.14	11.7
Density [g/cm^3]	3.23	3.23	2.33
Young's modulus [GPa]	445	445	170
Poisson's ratio	0.19	0.19	0.22

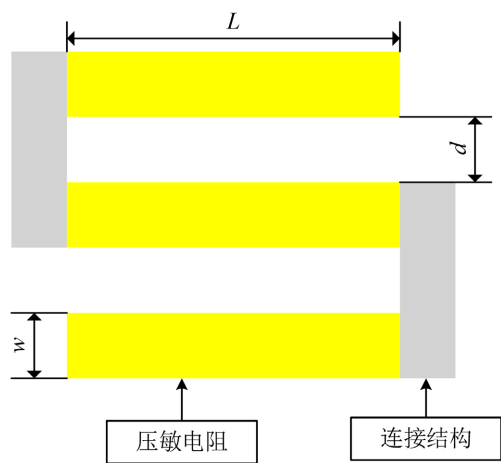


Figure 3. Dimensions of the spring-shaped piezoresistor
图 3. 弹簧形压敏电阻的尺寸

采用弹簧形压敏电阻可以使电阻率变化更加明显，有利于优化压阻式压力传感器的输出性能。如图

3 所示,这项工作采用了“S”形双匝压阻结构。压敏电阻的总长度为 150 μm , 宽度为 10 μm (w), 厚度为 2 μm 。压敏电阻被分成 3 个 50 μm (L)长的压敏电阻段, 中间以 10 μm (d)的间隙隔开, 并将它们串联连接。压敏电阻的掺杂浓度为 $1.38 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 对应于图 3 中的黄色区域。连接材料硅对应于图 3 中的灰色区域, 用作电路的互连介质。

传统圆形结构和半岛-杆梁结构的压阻式压力传感器如图 4 所示。对于半岛-杆梁结构而言, 压敏电阻沿膜片的边缘放置在半岛形结构上, 形成局部高应力区。这种设计策略保证了传感器在高压环境下的可靠性能和精度, 有助于更均匀地分布应力, 并避免过度变形。压力传感器的三维结构通过 COMSOL Multiphysics 软件在 0~10 MPa 范围内进行仿真分析, 用于模拟和分析的传感器参数如表 3 所示。

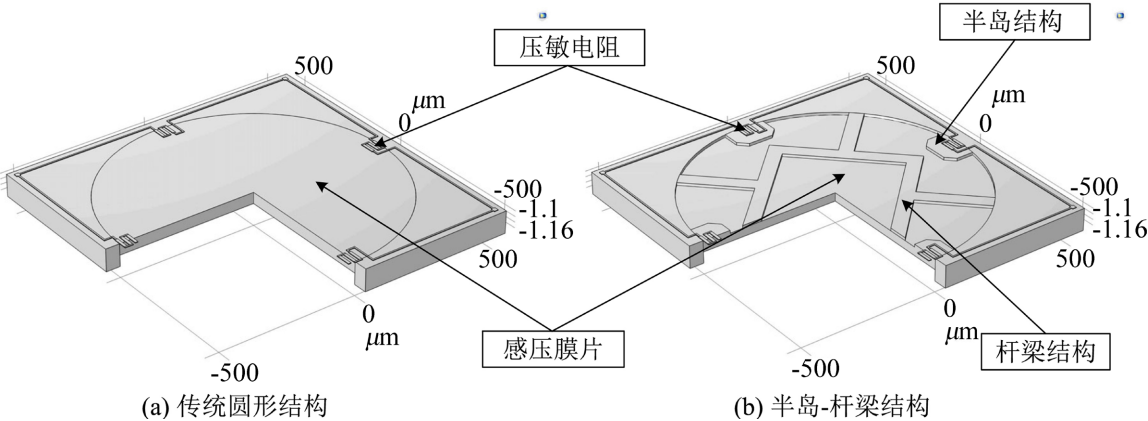


Figure 4. Schematic diagrams of pressure sensors with different structures
图 4. 不同结构的压力传感器示意图

Table 3. Structural parameters used for simulation
表 3. 用于模拟的结构参数

参数	数值
圆形膜片半径(k)	500 μm
膜片厚度(t)	40 μm
压敏电阻长度(L)	50 μm
压敏电阻宽度(w)	10 μm
压敏电阻厚度	2 μm
杆梁厚度(B)	10 μm
杆梁宽度(W)	50 μm
半岛长度(M)	150 μm
半岛宽度(N)	100 μm
压力范围	0~10 MPa

3.2. 传感器的仿真与分析

通过 COMSOL Multiphysics 软件在 0~10 MPa 范围内以 1 MPa 的步长进行了仿真分析, 得到了半岛-杆梁结构和传统圆形结构膜片挠度的变形结果如图 5 所示。其中, 网格是通过 COMSOL Multiphysics

内置的自适应网格模块实现, 采用自适应非结构化线性四面体网格, 并将压敏电阻、膜片边缘和半岛-杆梁连接的局部区域进行网格细化处理。图 5(a)和图 5(b)中的仿真云图显示, 半岛-杆梁结构和传统圆形结构的最大挠度出现在膜片的中心, 幅度分别为 $7.45\ \mu\text{m}$ 和 $4.13\ \mu\text{m}$, 并且向边缘逐渐减小。图 5(c)显示了在 $10\ \text{MPa}$ 的压力下, 传统圆形结构和半岛-杆梁结构沿穿过膜片中心区域的位移曲线图。

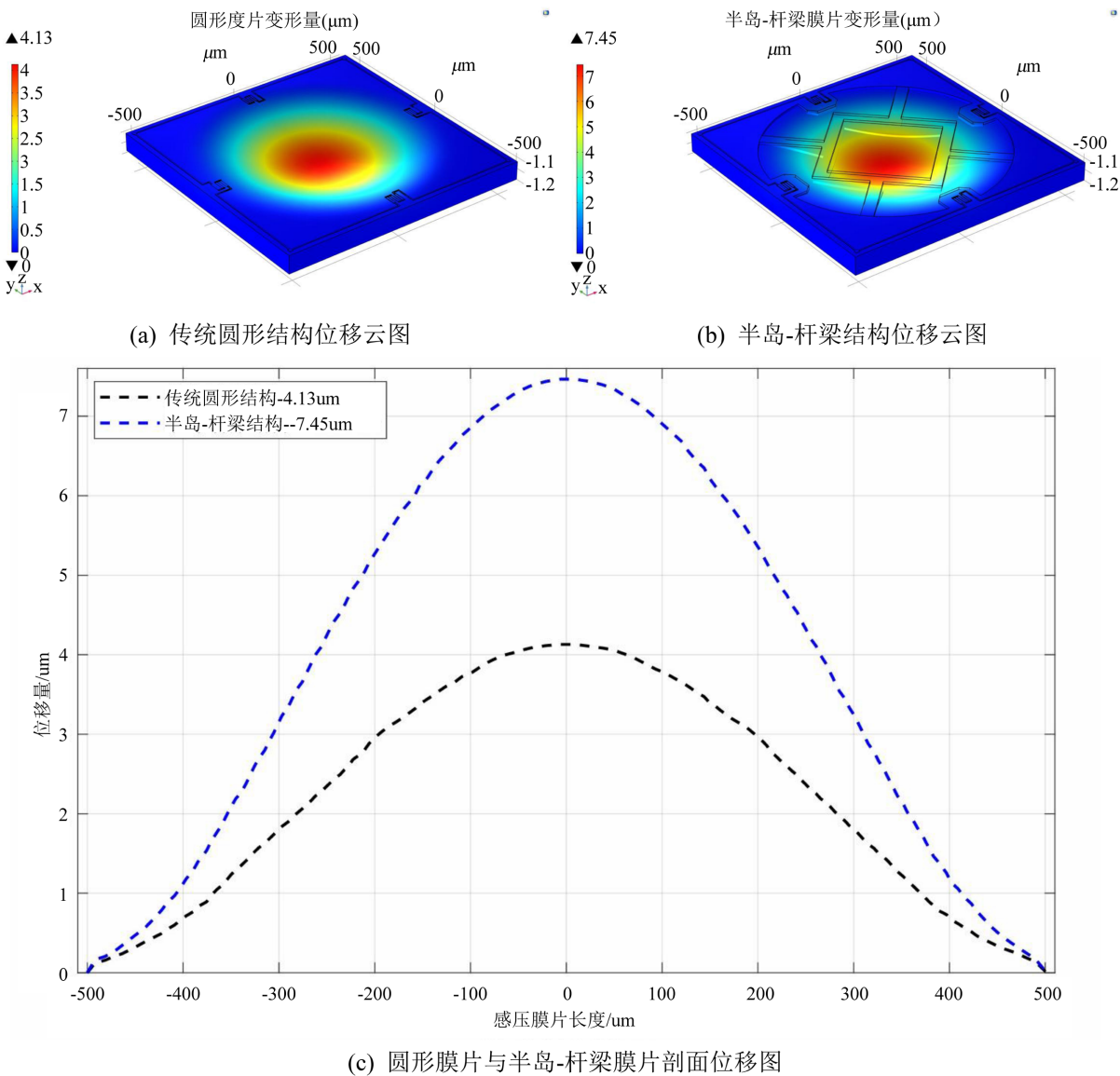


Figure 5. Displacement results of the Peninsula-rod-beam structure and circular structure

图 5. 半岛-杆梁结构和圆形结构位移结果

当施加压力时, 感压膜片的表面会产生相应的应力, 图 6 显示了在 $10\ \text{MPa}$ 压力下感压膜片的应力云图。这种应力分析对于选择压敏电阻的理想位置至关重要, 较大的应力区域将导致使压敏电阻的电阻变化率进一步放大。图 6(a)和图 6(b)分别表示传统圆形结构的纵向和横向应力模拟结果, 图 6(c)和图 6(d)分别表示半岛-杆梁结构的纵向和横向应力模拟结果。最大应力位于膜片的边缘, 这证实了压敏电阻位置的合理性。膜片沿纵向和横向的应力随着压力在 $0\sim 10\ \text{MPa}$ 范围内变化, 纵向和横向的最大应力差分别为

710 MPa 和 1114 MPa。两者都低于碳化硅膜片失效时的极限应力，这确保了传感器的稳定运行[15]。

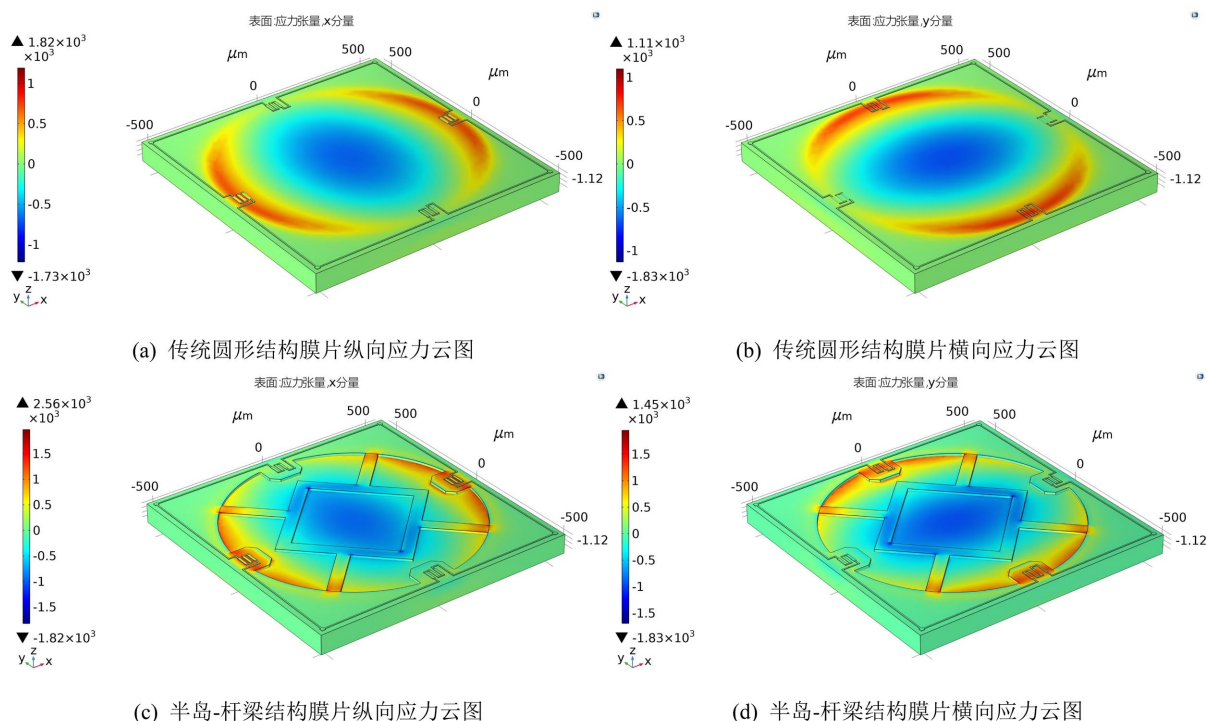


Figure 6. Stress results of the pressure-sensitive diaphragm under 10 MPa

图 6. 感压膜片在 10 MPa 下的应力结果

通过 COMSOL Multiphysics 软件下的压阻效应模块进行输出电压结果分析，其中连续充电产生电势分布，对于 5 V 的输入电压，传感器的电势分布结果如图 7 所示。接地端子具有最低的电势，如图的蓝色区域显示，输入端子具有最大的电势，由红色区域表示。这种配色方案有效地突出高电位区和低电位区，并提供了电压分布清晰而全面的视图。输出电压结果通过计算剩余两个端子之间的电势差获得，传统圆形结构的模拟输出电压为 69.03 mV，而半岛-杆梁结构的模拟得到的最大输出电压为 109.74 mV。两种结构输出结果的比较表明半岛-杆梁结构有助于提高传感器的输出性能。

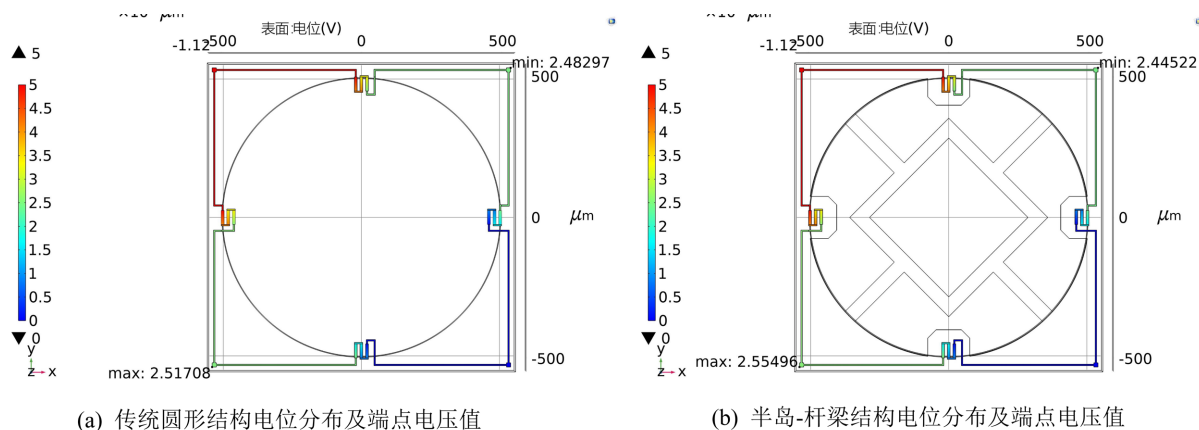


Figure 7. The potential distribution of different diaphragm structures at 10 MPa

图 7. 不同膜片结构在 10 MPa 下的电位分布

4. 结果与讨论

4.1. 传感器的位移分析

通过 COMSOL Multiphysics 软件在 0~10 MPa 压力范围内分析传统圆形膜片和半岛-杆梁膜片的变形结果, 并与传统圆形膜片的解析公式(3)和半岛-杆梁结构的解析公式(11)所得的计算结果进行比较。仿真分析可得传统圆形结构和半岛-杆梁结构感压膜片的最大位移量分别为 $4.13\ \mu\text{m}$ 和 $7.45\ \mu\text{m}$, 从解析方程(4)和(11)可以推导出, 传统圆形结构和半岛-杆梁结构中膜片的理论位移分别为 $3.97\ \mu\text{m}$ 和 $7.12\ \mu\text{m}$ 。传统圆形结构的挠度变形、传统圆形结构的解析解、半岛-杆梁结构的挠度变形和半岛-杆梁结构的解析解的比较结果如图 8 所示, 以上四种变形结果都小于感压膜片厚度的五分之一。感压膜片的仿真结果与理论分析结果较为一致, 表明传感器结构设计与预期结果相符。模拟和分析结果之间的高度相关性证实了所采用的建模策略的准确性, 误差小于 4.6%。

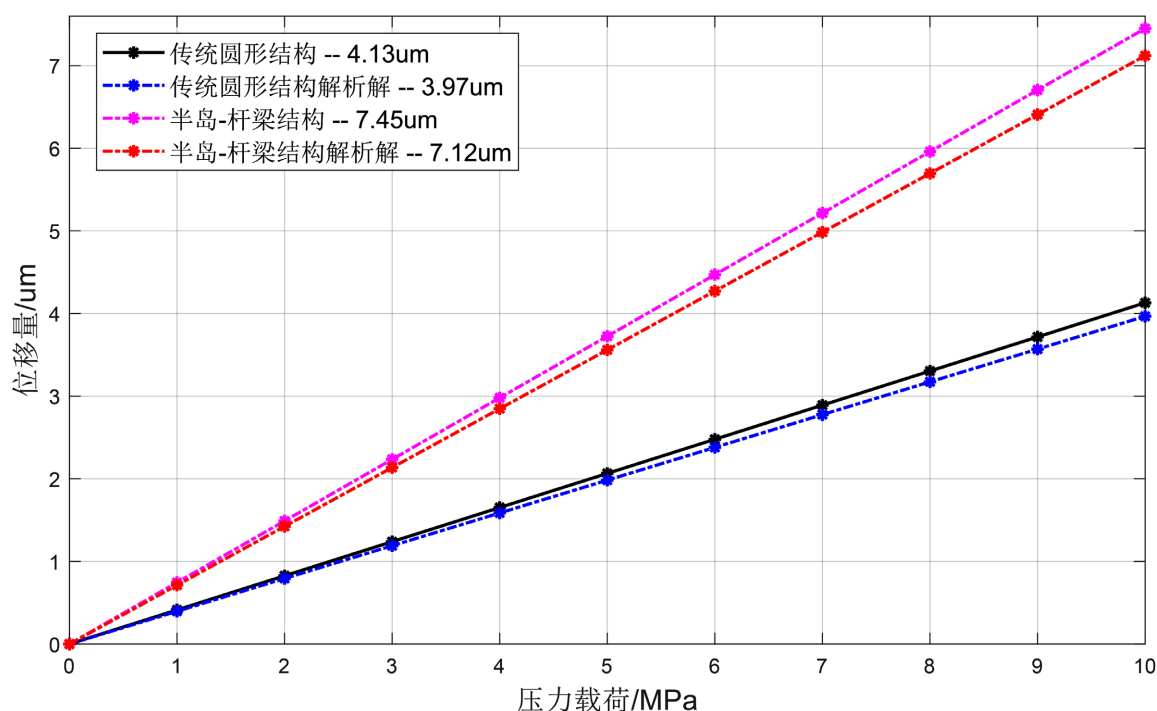


Figure 8. Theoretical and simulation deformation results of the pressure-sensitive diaphragm under a pressure of 10 MPa
图 8. 10 MPa 压力作用下感压膜片理论及仿真位移变形结果

4.2. 传感器的输出电压分析

图 9 显示在 0~10 MPa 的压力范围内传统圆形结构、半岛-杆梁结构以及传统圆形结构和半岛-杆梁结构解析解的输出电压结果比较, 以及两种感压膜片在不同外部压力作用下的非线性。当使用 COMSOL Multiphysics 软件中剩余两个端子之间的电压差计算输出电压时, 可以观察到输出电压随着压力的增大而逐渐增加。传统圆形结构、半岛-杆梁结构、传统圆形结构和半岛-杆梁结构的解析解的最大输出电压分别为 69.03 mV、109.74 mV、65.31 mV 和 103.76 mV。对于传统圆形结构传感器仿真模拟所得的灵敏度为 $1.38\ \text{mV/V/MPa}$, 对于半岛-杆梁结构所得的灵敏度为 $2.19\ \text{mV/V/MPa}$ 。当外加压力值为 8 MPa 时, 圆形结构的非线性度最大, 为 1.03% FSS。当外加压力值为 9 MPa 时, 半岛-杆梁结构的非线性度最大, 为 0.64% FSS。与传统结构相比, 优化后的结构具有更高的灵敏度和更低的非线性。对于大量程

测量, 半岛-杆梁结构设计具有明显优势, 因为它不仅提高了传感器的灵敏度, 而且大大提高了其稳定性。

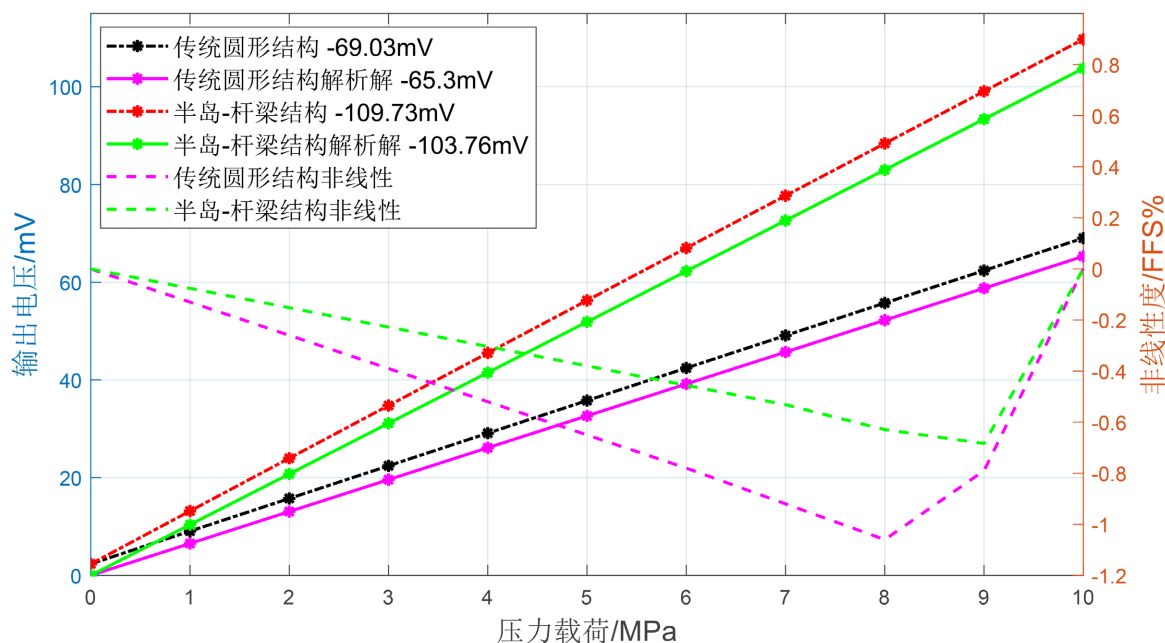


Figure 9. The results graph of output voltage and nonlinearity for different diaphragm structures

图 9. 不同膜片结构的输出电压与非线性度的结果图

4.3. 传感器的制备工艺

压阻式压力传感器采用 MEMS 技术制造。基于传感器的性能模拟结果, 确定了芯片的核心结构参数, 并概述其主要制造工艺流程, 如图 10 所示。MEMS 制备工艺中微米级刻蚀深度的误差主要来源于刻蚀速率的波动, 如设备参数、材料均匀性、掩膜特性等。为实现微米级的精确结构刻蚀, 优先使用 ICP-RIE (感应耦合等离子体刻蚀) 或 DRIE (深度反应离子刻蚀), 严格控制气体比例与设备功率。为了承受极端的环境条件, 本文选用 P 型 SiC 作为衬底, 在其上通过外延生长技术制备 N 型隔离层和 P 型器件层, 形成 P-N-P 结构的 SiC 外延片 (总厚度 300 μm)。P 型 SiC 衬底层的厚度为 250 μm ; N 型 SiC 隔离层的厚度为 40 μm ; P 型 SiC 器件层厚度为 10 μm , 掺杂浓度为 $1.38 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。具体工艺流程如下:

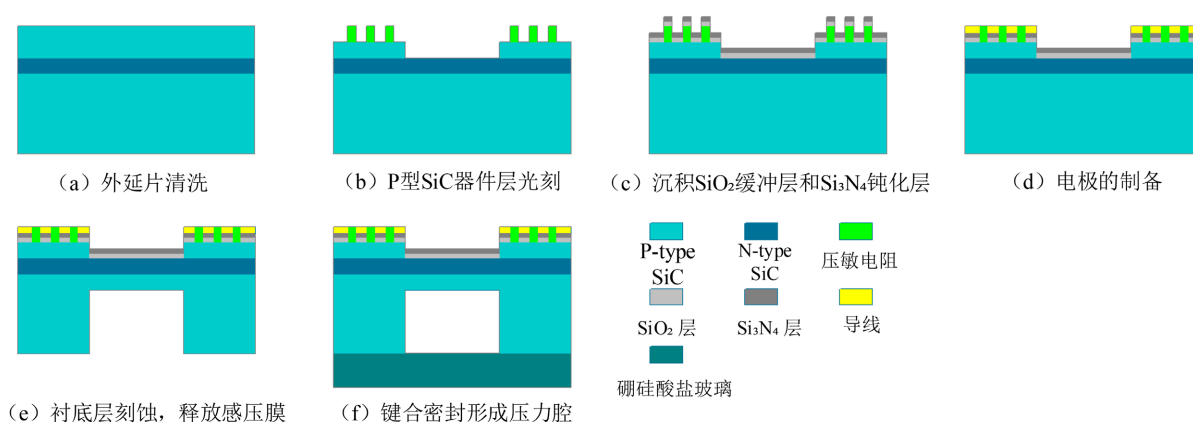


Figure 10. The main process flow of sensor chips

图 10. 传感器芯片主要工艺流程

(a) 首先选择 P-N-P 型 SiC 外延片, 对晶片进行标准清洗, 去除表面的自然氧化层。(b) 对 P 型 SiC 器件层进行光刻, 旋涂光刻胶并曝光(定义压敏电阻和半岛-杆梁结构的图形), 显影并烘干。采用 ICP-RIE 刻蚀(蚀刻气体: SF_6/O_2 , 功率 300 W, 压强 5 Pa), 蚀刻深度至目标尺寸后, 剥离光刻胶形成压阻元件和半岛-杆梁结构。(c) 使用化学气相沉积法在 SiC 外延晶片的表面上沉积 SiO_2 缓冲层和 Si_3N_4 钝化层。(d) 通过光刻定义电极窗口图形, 采用 RIE 分两步刻蚀(先以 CF_4/O_2 蚀刻 SiO_2 , 再以 CHF_3/O_2 蚀刻 Si_3N_4), 并且通过磁控溅射沉积金属层, 退火后剥离多余金属结构, 完成电极图形化。(e) 采用 DRIE 蚀刻 P 型 SiC 衬底底部(蚀刻气体: SF_6/Ar , 功率 500 W, 压强 8 Pa), 蚀刻深度 200 μm , 以释放感压膜片并形成压力腔。(f) 采用等离子体活化键合(PAB)技术, 将 SiC 外延片与硼硅酸盐玻璃键合, 实现压力腔的密封。

5. 结果与现有文献比较

在这项工作中, 通过使用边缘夹紧固定作为边界条件, 将 0~10 MPa 范围内的压力施加到具有半岛-杆梁结构的圆形压敏膜片, 获得了 2.19 mV/V/MPa 的灵敏度。将本研究获得的灵敏度结果与近年来具有相似几何形状的压阻式压力传感器的灵敏度结果进行比较。结果表明, 本文所提出的设计比以前的研究性能更加优异。表 4 给出了这项工作和现有研究结果的对比。

Table 4. Comparison of key parameters with those in the literature

表 4. 关键参数与文献比较

文献	几何结构与材料	感压膜片的结构参数	压力范围	灵敏度(mV/V/MPa)
Vinod, B. [15]	方形结构(金刚石)	500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$	0~10 MPa	0.36
Vinod, B. [5]	方形结构(单晶硅)	1000 $\mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$	0~40 MPa	0.625
Tian, B. H. [11]	圆形结构(碳化硅)	1000 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$	0~10 MPa	1.74
本文研究	半岛-杆梁结构(碳化硅)	1000 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$	0~10 MPa	2.19

6. 结论

本文在解析模型推导和仿真分析的基础上, 提出了一种半岛-杆梁结构的圆形感压膜片。通过 COMSOL Multiphysics 软件验证了设计的可靠性, 并根据仿真结果确定了传感器的性能参数, 如传感器挠度、灵敏度和非线性等。研究发现, 半岛-杆梁结构可以提高传感器的输出电压, 膜片顶部的杆梁结构可以缓解较大压力作用下感压膜片的过度变形, 半岛结构可以在压敏电阻区域产生应力集中。优化后的结构与传统圆形结构相比, 传感器的输出性能得到了显著改善, 在 0~10 MPa 的压力范围内, 灵敏度达到了 2.19 mV/V/MPa。此外, 本研究建立了在 P-N-P 型 SiC 外延片上设计压阻式压力传感器的制作工艺, 为推广碳化硅材料在极端环境中的应用奠定了基础。

基金项目

这项工作得到了常州市应用基础研究项目的资助: (编号 CJ20235046)。

参考文献

- [1] Han, X., Xu, M., Li, G., Yan, H., Feng, Y. and Li, D. (2020) Design and Experiment of a Touch Mode MEMS Capacitance Vacuum Gauge with Square Diaphragm. *Sensors and Actuators A: Physical*, **313**, Article ID: 112154. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112154>
- [2] Kanekal, D. and Jindal, S.K. (2023) Investigation of MEMS Single Turn Meander-Shaped Silicon Carbide Piezoresistive

- Pressure Sensor on a Clamped Circular Diaphragm for High Pressure Harsh Environment Applications. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, **33**, Article ID: 2450065. <https://doi.org/10.1142/s0218126624500658>
- [3] Luo, G., Kusano, Y. and Horsley, D.A. (2021) Airborne Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers for Long-Range Detection. *Journal of Microelectromechanical Systems*, **30**, 81-89. <https://doi.org/10.1109/jmems.2020.3037298>
 - [4] Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., et al. (2023) Advances in High-Performance MEMS Pressure Sensors: Design, Fabrication, and Packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, **9**, 156-166. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>
 - [5] Belwanshi, V. (2020) Analytical Modeling to Estimate the Sensitivity of MEMS Technology-Based Piezoresistive Pressure Sensor. *Journal of Computational Electronics*, **20**, 668-680. <https://doi.org/10.1007/s10825-020-01592-5>
 - [6] Tang, X., Li, T., Shang, H., Wan, X. and Wang, W. (2022) A Method of Performance Enhancement for Piezoresistive Pressure Sensors through Diaphragm Size Design. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **32**, Article ID: 105007. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ac8eb9>
 - [7] Kanekal, D. and Jindal, S.K. (2024) Prefabrication Design, Theoretical Framework and Simulation Demonstration of a Meander-Shaped MEMS Piezoresistive Pressure Sensor Implanted on Silicon Substrate Circular Diaphragm for Enhancement of Key Performance Parameters Utilized for Low-Pressure Applications. *Journal of Computational Electronics*, **23**, 433-447. <https://doi.org/10.1007/s10825-024-02133-0>
 - [8] Jena, S., Pandey, C. and Gupta, A. (2021) Mathematical Modeling of Different Diaphragm Geometries in MEMS Pressure Sensor. *Materials Today: Proceedings*, **44**, 1243-1248. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.249>
 - [9] Li, C., Cordovilla, F. and Ocaña, J.L. (2018) Design Optimization and Fabrication of a Novel Structural Piezoresistive Pressure Sensor for Micro-Pressure Measurement. *Solid-State Electronics*, **139**, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2017.09.012>
 - [10] Farhath, M. and Samad, M.F. (2019) Design and Simulation of a High Sensitive Stripped-Shaped Piezoresistive Pressure Sensor. *Journal of Computational Electronics*, **19**, 310-320. <https://doi.org/10.1007/s10825-019-01429-w>
 - [11] Tian, B., Shang, H., Zhao, L. and Wang, W. (2021) Performance Optimization of Sic Piezoresistive Pressure Sensor through Suitable Piezoresistor Design. *Microsystem Technologies*, **27**, 3083-3093. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-05175-z>
 - [12] Meng, Q., Wang, J., Chen, D., Chen, J., Xie, B. and Lu, Y. (2024) A Piezoresistive Pressure Sensor with Centralized Piezoresistors and a Diamond-Shape Composite Diaphragm. *Sensors and Actuators A: Physical*, **369**, Article ID: 115134. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115134>
 - [13] Basov, M. and Prigodskiy, D.M. (2020) Investigation of High-Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors at Ultra-Low Differential Pressures. *IEEE Sensors Journal*, **20**, 7646-7652. <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2980326>
 - [14] Guo, X., Shao, S., Hu, B., Yan, X., Huang, X., Hong, W., et al. (2024) Topology Optimization Research and Simulation Analysis of High-Performance MEMS Pressure Sensor. *Microsystem Technologies*, **30**, 231-241. <https://doi.org/10.1007/s00542-023-05601-y>
 - [15] Belwanshi, V. and Topkar, A. (2019) Quantitative Analysis of MEMS Piezoresistive Pressure Sensors Based on Wide Band Gap Materials. *IETE Journal of Research*, **68**, 667-677. <https://doi.org/10.1080/03772063.2019.1620641>
 - [16] Verma, P., Punetha, D. and Pandey, S.K. (2020) Sensitivity Optimization of MEMS Based Piezoresistive Pressure Sensor for Harsh Environment. *Silicon*, **12**, 2663-2671. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00362-8>
 - [17] Jindal, S.K., Patra, R., Banerjee, S., Paul, A., Kanekal, D. and Kumar, A. (2022) Reliable Before-Fabrication Forecasting of MEMS Piezoresistive Pressure Sensor: Mathematical Modelling and Numerical Simulation. *Microsystem Technologies*, **28**, 1653-1661. <https://doi.org/10.1007/s00542-022-05305-9>
 - [18] Jindal, S.K., Magam, S.P. and Shaklya, M. (2018) Analytical Modeling and Simulation of MEMS Piezoresistive Pressure Sensors with a Square Silicon Carbide Diaphragm as the Primary Sensing Element under Different Loading Conditions. *Journal of Computational Electronics*, **17**, 1780-1789. <https://doi.org/10.1007/s10825-018-1223-8>
 - [19] Manikandan, N., Muruganand, S., Divagar, M. and Viswanathan, C. (2019) Design and Fabrication of MEMS Based Intracranial Pressure Sensor for Neurons Study. *Vacuum*, **163**, 204-209. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.02.018>