

基于4H-SiC的差分电容真空计设计及仿真

李鑫浦¹, 张 姝², 雷 程¹, 张臻昊¹, 李志强¹, 余建刚¹, 梁 庭^{1*}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 天津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: 针对高温、腐蚀等复杂条件下的真空测试需求, 提出了一种基于4H-SiC为敏感材料且可批量制造的微型化差分电容式真空计。通过有限元仿真分析, 研究了力学敏感结构、电容结构等对传感器灵敏度及非线性度的影响。传感器敏感单元由圆形敏感膜与“开口型”双电容结构构成。仿真结果表明: 该差分电容式敏感结构与单电容式结构相比, 在0~1 000 Pa测压范围内, 灵敏度仅下降0.02 fF/Pa, 非线性度从0.92%降低至0.37%, 可为复杂环境下的真空压力测试提供可行的技术支持。

关键词: 薄膜真空计; 4H-SiC; 差分电容; 有限元分析

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025016

引用格式: 李鑫浦, 张姝, 雷程, 等. 基于4H-SiC的差分电容真空计设计及仿真[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 211-217.

LI Xinpu, ZHANG Shu, LEI Cheng, et al. Design and simulation of differential capacitance vacuum gauge based on 4H-SiC[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 211-217.

Design and Simulation of Differential Capacitance Vacuum Gauge Based on 4H-SiC

LI Xinpu¹, ZHANG Shu², LEI Cheng¹, ZHANG Zhenhao¹, LI Zhiqiang¹, YU Jiangang¹, LIANG Ting^{1*}

(1. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to meet the requirements of vacuum testing under complex conditions such as high temperature and corrosion, a miniaturized differential capacitive vacuum gauge based on 4H-SiC as sensitive material is presented in this paper. The influence of mechanical sensitive structure and capacitance structure on the sensitivity and nonlinearity of the sensor is studied by finite element simulation. The sensor-sensitive unit is composed of a circular sensitive film and an "open mouth" double capacitance structure. The simulation results show that compared with the single capacitance structure, the sensitivity of the differential capacitance sensitive structure decreases by only 0.02 fF/Pa and the nonlinearity decreases from 0.92% to 0.37% in the range of 0~1 000 Pa. This study provides feasible technical support for vacuum pressure testing in a complex environment.

Key words: diaphragm vacuum meter; 4H-SiC; differential capacitance; finite element analysis

收稿日期: 2024-07-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3208500); 山西省重点研发计划资助项目(2023020302010); 中央引导地方科技发展资助项目(YDZJSX20231B006)

作者简介: 李鑫浦(1996-), 男, 硕士生, 主要从事MEMS碳化硅真空计研究。E-mail: lixinpu1127@163.com。

* 通信作者: 梁 庭(1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事微机电系统(MEMS)技术研究。E-mail: liangtingnuc@nuc.edu.cn。

0 引言

电容薄膜真空计在航空航天、电子工业、高能物理、核工业等领域得到了广泛应用^[1-2]。在太空探测和卫星技术中,真空计需要承受极端的温度波动和真空环境^[3];在化工和半导体等工业中,工作环境涉及各种化学物质,真空计需要能够抵抗这些化学物质的侵蚀^[4]。以上场景对真空计的耐高温、耐腐蚀等性能提出了更高的要求。

碳化硅材料具有出色的热力学性能和化学稳定性,是高温传感器敏感单元的理想材料^[5]。相较于传统金属材料,碳化硅能与MEMS工艺相结合,实现批量化制造;与硅材料相比,碳化硅在高温环境下表现出卓越的热稳定性、抗氧化性、抗腐蚀性和抗过载能力^[6-8]。然而,碳化硅具有较大的杨氏模量(450 GPa),是硅材料(170 GPa)的2.6倍^[9],在相同载荷下,其形变量较小,对真空计的敏感结构设计提出了更高的要求。

本文基于4H-SiC材料设计了一种电容薄膜真空计,采用差分电容的方式,通过COMSOL仿真,研究了敏感膜宽度对非线性度和灵敏度的影响,从而确定了敏感膜和电极尺寸。同时,通过改变电容间距和敏感膜厚度来进一步提升结构的线性度和灵敏度。

1 工作原理

弹性薄膜在压力作用下产生位移,会引起电极之间距离发生变化进而导致电容量发生改变,MEMS电容真空计通过测量电容的变化完成力学量到电学量的转换,从而实现真空度的测量^[10-11]。

真空计敏感结构如图1所示,采用差分电容结构,在敏感膜片上放置感压电极,在感压电极上放置测量电极和参考电极。当薄膜受到压力载荷作用下产生挠度变形,电极两端间距减小^[12],参考电容和测量电容增大,输出电容为测量电容和参考电容的差值^[13],其优点在于可以抵消相同类型的误差,优化输出精度。

除电极材料外,整个敏感结构均由4H-SiC组成。4H-SiC具有较大杨氏模量,在1 000 Pa的情况下,薄膜挠度变化小于其厚度的1/5,可采用小挠度理论^[14]进行力学敏感结构设计。常见的敏感膜片有方形膜和圆形膜两种。与方形膜相比,圆形膜的边缘效应较小,且应力分布更均匀^[15]。为

提升敏感结构的灵敏度和测量准确性,本文采用圆形薄膜为敏感膜,压力与挠度变换公式为^[16]

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

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

式中: ω 为感压薄膜上坐标位置挠度; D 为薄膜的弯曲刚度; E 为弹性模量; p 为压力载荷; a 为薄膜半径; r 为薄膜中心到任意一点的距离; μ 为泊松比; h 为薄膜厚度。

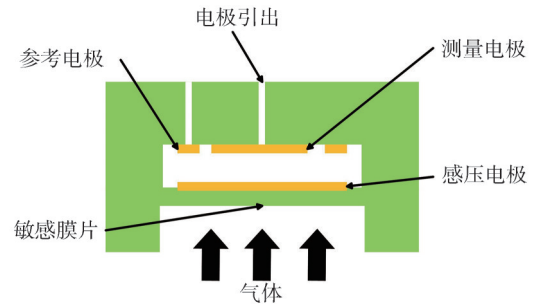


图1 敏感结构示意图

Fig. 1 Sensitive structure diagram

结合挠度曲面方程,可变平行板电容计算公式为^[17]

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \iint \frac{r}{d - \omega(r)} dr d\theta. \quad (3)$$

结合设计的结构,分别有测量电容和参考电容。将式(1)和式(2)代入式(3)可得:

测量电容^[18]

$$C_1 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \int_0^l \frac{r}{d - \omega(r)} dr, \quad (4)$$

参考电容

$$C_2 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \int_{l_1}^{l_2} \frac{r}{d - \omega(r)} dr, \quad (5)$$

输出电容

$$C = C_1 - C_2, \quad (6)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; d 为极板初始间距; l 为测量电极的半径; l_1 为参考电极的内径; l_2 为参考电极的外径。

非线性度^[19]为

$$e_f = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%, \quad (7)$$

灵敏度^[20]为

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta p}, \quad (8)$$

式中: e_f 为非线性偏差; Δ_{\max} 为校准曲线与拟合直

线的最大偏差; Y_{FS} 为满量程输出量; ΔC 为量程内输出电容变化量; Δp 为均布载荷变化量。

2 结构设计

2.1 电极设计

在同等面积的条件下, 施加同等压力, 圆形膜片与其他形状膜片相比较, 挠度最大、边缘应力最小^[17]、灵敏度最大, 故本文采用圆形敏感膜片, 电极形状同样为圆形可以获得更大的电容值。当感压电极面积增大时, 其与参考电极、测量电极的相对面积增大, 输出电容随之增大; 此外, 考虑到要将感压电极电信号引出, 最终与 MEMS 工艺相结合, 感压电极的半径定为 $2\,000\ \mu\text{m}$ 。为评估测量电极的半径对测量电容的影响, 控制真空计其他参数不变, 不同半径下的输出电容变化如图 2 所示。

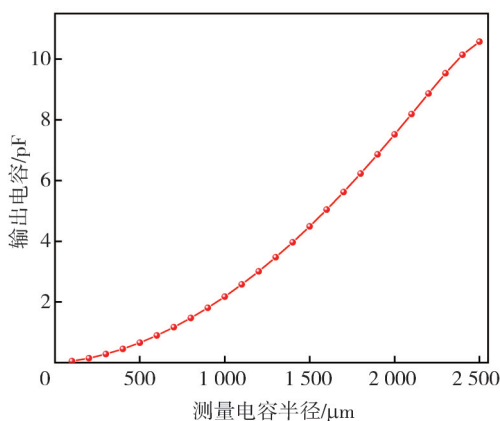


图 2 不同测量电极半径的输出电容变化

Fig. 2 Variation of output capacitance with different measuring electrode radius

随着测量电极半径的增加, 输出电容逐渐增大。然而, 测量电极半径会受到感压电极和参考电极的限制。如果测量电极半径过大, 可能会导致参考电极变得过窄, 工艺上难以实现。此外, 测量电极半径过大还会使参考电极超出感压电极的范围, 从而影响参考电极的输出。由于采用差分电容的结构, 在不加载荷时, 测量电极与参考电极的电容应相等。最终在性能优化、工艺制备、排布设计等多方面考量, 确定测量电极半径为 $1\,400\ \mu\text{m}$, 参考电极的内径为 $1\,500\ \mu\text{m}$ 、外径为 $2\,000\ \mu\text{m}$, 此时, 参考电极与测量电极面积相近。图 3 为参考电极和测量电极的示意图。

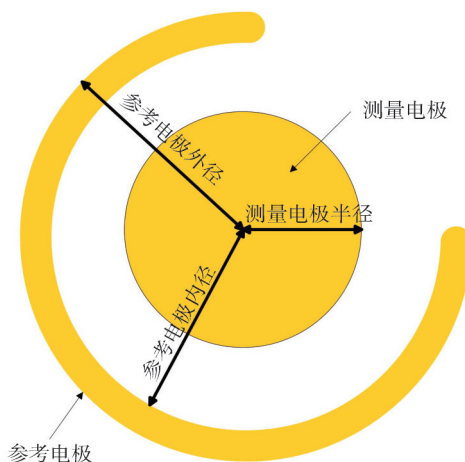


图 3 参考电极和测量电极结构示意图

Fig. 3 Reference electrode and measuring electrode structure diagram

2.2 背腔设计

真空计的背腔尺寸结构如图 4 所示, 其中, L 为背腔的最大宽度。为了评估背腔大小对输出电压的影响, 将真空计其他参数固定, 即固定腔深为 $470\ \mu\text{m}$ 、电容间距为 $10\ \mu\text{m}$, 改变 L , 通过仿真计算出的输出电容判断背腔大小对输出电容的影响。 L 与输出电容变化关系如图 5 所示。

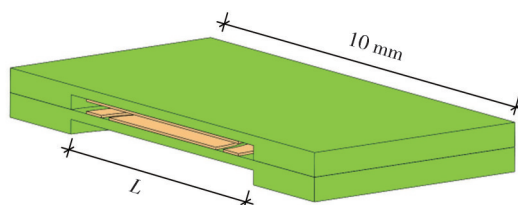


图 4 真空计背腔结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of vacuum gauge back chamber

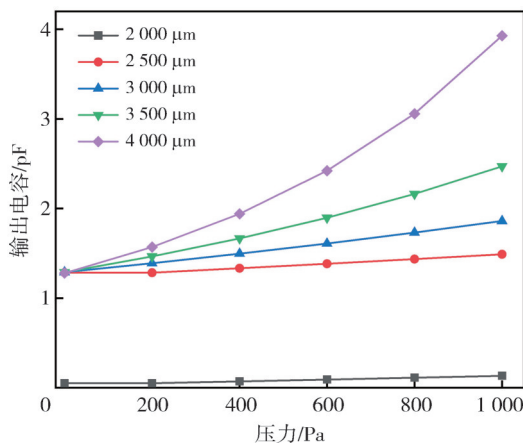


图 5 不同背腔大小的输出电容变化

Fig. 5 Variation of output capacitance with different back cavity sizes

由图5可知,随着敏感膜半径的增加,满量程输出电容随之增大,将仿真结果拟合,计算非线性度和灵敏度,结果如表1所示。相较于灵敏度的下降,敏感膜半径对传感器线性度的提升更为显著。因此,敏感膜半径可选择为 $3\ 000\ \mu\text{m}$,即 $L=6\ 000\ \mu\text{m}$ 。

表1 敏感膜半径对非线性度和灵敏度的影响

Tab. 1 Influence of sensitive film radius on nonlinearity and sensitivity

敏感膜半径/ μm	非线性度/%	灵敏度/ $(\text{fF}\cdot\text{Pa}^{-1})$
2 000	4.9	0.088
2 500	5.5	0.219
3 000	2.2	0.571
3 500	4.5	1.180
4 000	9.0	2.600

图6为在满载荷下敏感膜半径为 $3\ 000\ \mu\text{m}$ 时,感压膜片的应力云图。

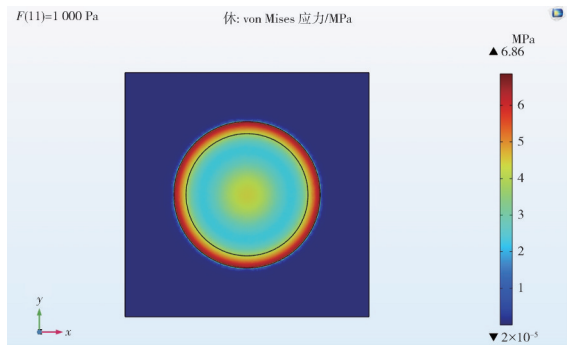


图6 满载荷应力云图

Fig. 6 Full load stress cloud map

2.3 敏感膜厚度设计

电容器的感压电极位于敏感薄膜上,当外部压力发生变化时,薄膜受力变形,从而导致电极之间的距离发生变化,直接影响电容值的大小。敏感薄膜的厚度会影响传感器的灵敏度,薄膜越薄,承受的力越小,反应越灵敏。因此,合适的敏感薄膜设计能够提高真空计对压力变化的敏感度,能够检测到微小的压力变化。同时,还需考虑敏感膜是否具备足够的机械强度以及稳定性。将敏感膜半径固定为 $3\ 000\ \mu\text{m}$ 、电容间距为 $10\ \mu\text{m}$,通过COMSOL对敏感膜厚度进行仿真,输出电容结果如图7所示。

由图7可知,随着敏感膜厚度的减小,满量程输出电容随之增大,对其仿真结果线性拟合,计算非线性度和灵敏度,结果如表2所示。

随着膜厚的增加,线性度和灵敏度逐渐降

低,结合机械强度和工艺制备,可选择膜厚为 $40\ \mu\text{m}$ 。

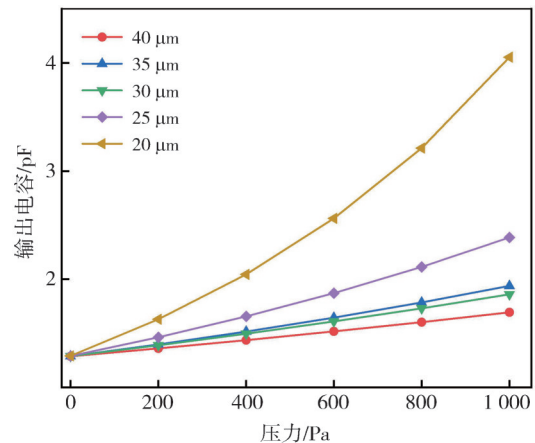


图7 不同膜厚与输出电容的关系

Fig. 7 The relationship between different film thicknesses and output capacitance

表2 敏感膜厚度对非线性度和灵敏度的影响

Tab. 2 Effect of sensitive film thickness on nonlinearity and sensitivity

敏感膜厚度/ μm	非线性度/%	灵敏度/ $(\text{fF}\cdot\text{Pa}^{-1})$
20	7.9	2.730
25	4.1	1.090
30	2.2	0.571
35	2.9	0.650
40	1.9	0.410

2.4 电容间距设计

电容间距是指形成电容器两电极之间的距离。合理选择电容间距能够优化真空计的测量能力,尤其在检测微小的压力变化时。当间距较大时,传感器的灵敏度可能降低,但可以测量较高的压力;而间距较小时,灵敏度提高,但其上限压力会减小,较小的电容间距可能减少敏感结构的机械强度,使其在高压或震动环境下易受损。因此,在设计过程中,需要考虑电容间距与机械稳定性之间的平衡,以确保传感器在各种条件下的可靠性。保持真空计其他参数不变,即固定敏感膜半径为 $3\ 000\ \mu\text{m}$ 、敏感厚度为 $40\ \mu\text{m}$,通过COMSOL对电容间距进行仿真,输出电容结果如图8所示。

对其仿真结果线性拟合,计算非线性度和灵敏度,结果如表3所示。

由表3可知,相较于灵敏度的下降,敏感膜半径对传感器线性度的提升更为显著,故电容间距选择 $25\ \mu\text{m}$ 。

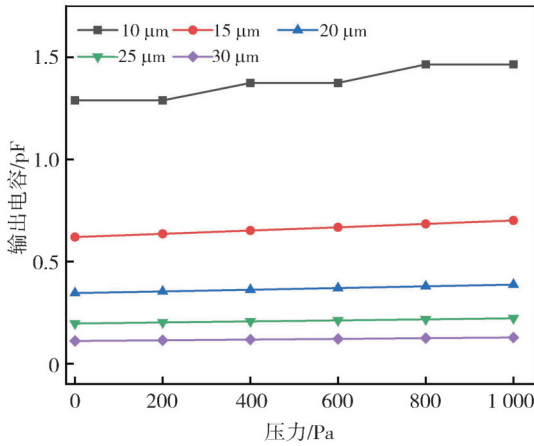


图 8 不同间距与输出电容的关系

Fig. 8 The relationship between different spacing and output capacitance

表 3 电容间距对非线性度和灵敏度的影响

Tab. 3 Effect of capacitance spacing on nonlinearity and sensitivity

电容间距/ μm	非线性度/%	灵敏度/ $(\text{fF}\cdot\text{Pa}^{-1})$
10	6.6	0.20
15	0.69	0.08
20	0.79	0.04
25	0.37	0.03
30	0.67	0.01

3 仿真分析

确定真空计的结构尺寸后,对真空计进行建模,主要参数如表 4 所示。

表 4 结构参数

Tab. 4 Structural parameter

结构	尺寸/mm
芯片尺寸	10*10*0.5
圆形感膜半径	3.0
敏感膜厚	0.04
电容间距	0.025
感压电极半径	2.0
测量电极半径	1.4
参考电极内径	1.5
参考电极外径	2.0

将 MEMS 4H-SiC 真空计的建模导入 COMSOL 有限元仿真软件,对其进行力学和电学耦合仿真,评估其性能。添加材料属性后,为模仿实际测试环境,对感压电极施加 5 V 电压,而参考电极和测量电极接地,仿真出的电场模分布云图如图 9 所示,电场线最密集的区域位于测量电极的中心区域,测量电极和参考电极具有明显的电场差异且中心区域场强分布均匀。

为评估真空计的输出电容,对其进行力电耦

合仿真,同时该差分电容结构与同等尺寸单电容结构对比,其输出电容变化如图 10 所示,输出电压随着压力的增加而增加,且具有良好的线性关系。

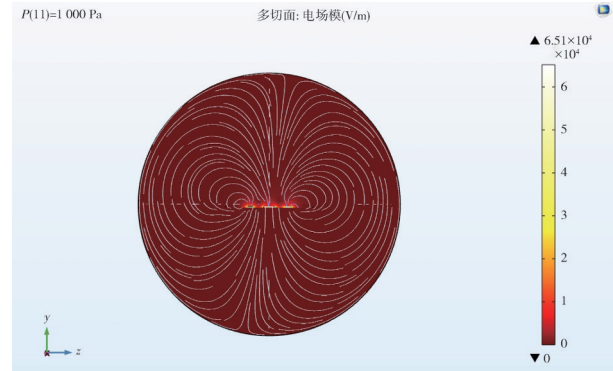


图 9 电场模分布云图

Fig. 9 Electric field mode distribution cloud

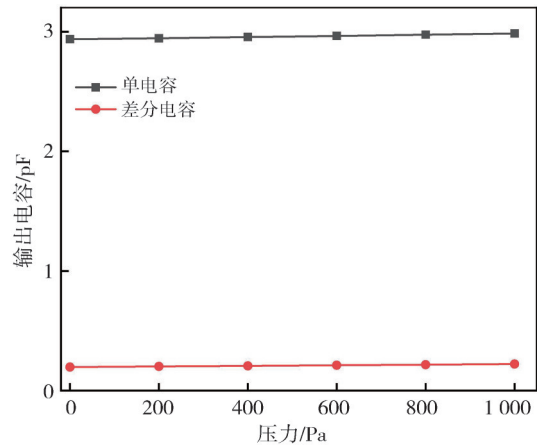


图 10 单电容和差分电容的输出电容变化

Fig. 10 Variation of output capacitance of single and differential capacitors

将仿真结果进行线性拟合,计算其灵敏度和非线性度,结果如表 5 所示,差分电容比单点容非线性度小 0.55%,灵敏度只下降了 0.02 fF/Pa。但是,差分电容减少了边缘效应的影响,提高了传感器信号的清晰度和稳定性,从而增强了信噪比,提高了电容传感器的测量精度和稳定性。

表 5 MEMS 碳化硅真空计性能参数

Tab. 5 MEMS silicon carbide vacuum gauge performance parameters

性能参数	灵敏度/ $(\text{fF}\cdot\text{Pa}^{-1})$	非线性度/%
差分电容	0.03	0.37
单电容	0.05	0.92

4 工艺流程设计

4H-SiC 差分电容薄膜真空计敏感结构的工艺

制备流程如图 11 所示。其中的关键技术在于高精度碳化硅的蚀刻以及金属电极的导出。高精度蚀刻是关键工艺,保证传感器的工作量程和输出灵敏度;金属电极的导出对传感器与外界电器的互联互通和信号传递起着决定性作用。该工艺流程的优点在于工艺步骤简洁、易于实施且能够灵活制造不同量程的真空计。

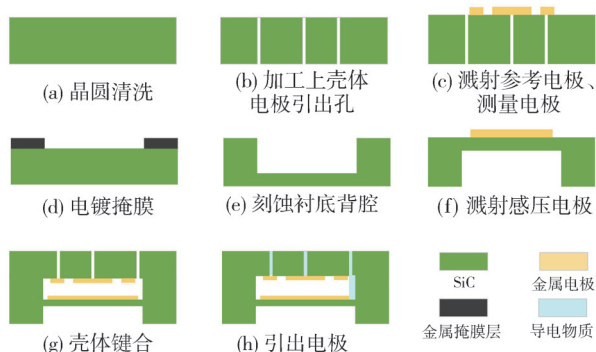


图 11 工艺制备流程

Fig. 11 Process preparation process

5 结论

本文针对高温、腐蚀等复杂环境,设计了一种基于 4H-SiC 的差分电容真空计。在兼顾工艺可行性的前提下探究了电容间距、敏感膜尺寸等对传感器灵敏度及线性度的影响;通过有限元仿真分析,确定了敏感结构和电极的结构参数;同时,完成了真空计敏感结构工艺流程设计,为后续的真空规研制工作提供参考。

参考文献:

- [1] 林主税. 21 世纪真空科学技术的展望[J]. 真空科学与技术学报, 2003, 23(2): 96-100.
LIN Zhushui. Future vision of vacuum science and technology in 21st century [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2003, 23(2): 96-100. (in Chinese)
- [2] 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 13-18.
YE Peijian, PENG Jing. Deep space exploration and its prospect in China [J]. Strategic Study of CAE, 2006, 8(10): 13-18. (in Chinese)
- [3] 李得天. 真空计量新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] 梁平, 李杰, 戴佳鑫, 等. 真空计的发展概况与趋势[J]. 真空与低温, 2011, 17(1): 53-57.
LIANG Ping, LI Jie, DAI Jiabin, et al. Review and trend on development of vacuum gauge [J]. Vacuum & Cryogenics, 2011, 17(1): 53-57. (in Chinese)
- [5] 何文涛, 李艳华, 邹江波, 等. 高温压力传感器的研究现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 61-71.
HE Wentao, LI Yanhua, ZOU Jiangbo, et al. Present research status and prospective trend of high-temperature pressure sensor [J]. Journal of Telemetry Tracking and Command, 2016, 37(6): 61-71. (in Chinese)
- [6] 曹正威, 尹玉刚, 许姣, 等. 4H-SiC MEMS 高温电容式压力敏感元件设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(3): 179-185.
CAO Zhengwei, YIN Yugang, XU Jiao, et al. Design of MEMS high-temperature capacitance pressure sensor based on 4H-SiC [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015, 13(3): 179-185. (in Chinese)
- [7] 赵立波, 赵玉龙. 用于恶劣环境的耐高温压力传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(6): 1460-1466.
ZHAO Libo, ZHAO Yulong. High temperature pressure sensor for harsh environment [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(6): 1460-1466. (in Chinese)
- [8] OKOJIE R S, LUKCO D, NGUYEN V, et al. 4H-SiC piezoresistive pressure sensors at 800 °C with observed sensitivity recovery [J]. IEEE Electron Device Letters, 2014, 36(2): 174-176.
- [9] 刘家澍, 余民森, 杨忠宝. 电容式薄膜真空计[J]. 自动化仪表, 1981, 2(5): 15-20.
LIU Jiashu, YU Minsan, YANG Zhongbao. Capacitive thin film vacuum gauge [J]. Process Automation Instrumentation, 1981, 2(5): 15-20. (in Chinese)
- [10] HAN X, XU M, LI G, et al. Design and experiment of a touch mode MEMS capacitance vacuum gauge with square diaphragm [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 313: 112154.
- [11] LI G, LI D, CHENG Y, et al. Design of pressure-sensing diaphragm for MEMS capacitance diaphragm gauge considering size effect [J]. AIP Advances, 2018, 8(3): 035120.
- [12] 申亚东. 电容薄膜真空计膜片建模与仿真[J]. 科技创新导报, 2022, 19(4): 34-36.
SHEN Yadong. Modeling and simulation of diaphragm of capacitance diaphragm vacuum gauge [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2022, 19(4): 34-36. (in Chinese)
- [13] 孙雯君, 冯焱, 马奔, 等. 小型电容薄膜真空规的设

- 计[J]. 真空与低温, 2012, 18(4): 232-234.
SUN Wenjun, FENG Yan, MA Ben, et al. Design of miniature capacitance diaphragm vacuum gauge [J]. Vacuum and Cryogenics, 2012, 18(4): 232-234. (in Chinese)
- [14] 达道安. 真空设计手册[M]. 3版. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [15] 王化祥. 电容式压力传感器感压膜片的形状设计[J]. 自动化仪表, 1985, 6(2): 18-19.
WANG Huaxiang. Shape design of pressure sensing diaphragm of capacitive pressure sensor [J]. Process Automation Instrumentation, 1985, 6(2): 18-19. (in Chinese)
- [16] HYLAND R W, TILFORD C R. Zero stability and calibration results for a group of capacitance diaphragm gages [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1985, 3(3): 1731-1737.
- [17] 孟岳. 电容薄膜真空计感压膜片力学特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [18] 王呈祥, 韩晓东, 李得天, 等. 采用环形感压薄膜的 MEMS 电容薄膜真空规设计[J]. 中国测试, 2019, 45(1): 88-93.
WANG Chengxiang, HAN Xiaodong, LI Detian, et al. Design of MEMS diaphragm capacitive vacuum gauge with an annular sensing film [J]. China Measurement & Test, 2019, 45(1): 88-93. (in Chinese)
- [19] 杜春林, 常冬林, 许忠旭, 等. 真空环境下电容薄膜规测量偏差的原因分析[J]. 真空, 2013, 50(4): 58-60.
DU Chunlin, CHANG Donglin, XU Zhongxu, et al. The reason analysis of measurement deviation about capacitance film gauge in vacuum [J]. Vacuum, 2013, 50(4): 58-60. (in Chinese)
- [20] HYLAND R W, TILFORD C R. Zero stability and calibration results for a group of capacitance diaphragm gages [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1985, 3(3): 1731-1737.