

# Research on Micro Pressure Sensors Based on MEMS Technology

Wei Zhang

Sichuan Polytechnic College of Information Technology, Guangyuan, Sichuan, 628000, China

## Abstract

This study delves into the development of micro pressure sensors based on MEMS technology, providing a comprehensive analysis from design principles to manufacturing processes. The paper elaborates on the key role of MEMS technology in the miniaturization process of pressure sensors, discussing material selection, structural optimization, and performance parameter regulation in sensor design. Additionally, the paper provides a thorough analysis of key manufacturing technologies, including photolithography, etching, and deposition, which are core processes in the manufacturing of micro pressure sensors. Furthermore, the article assesses the application fields and market prospects of micro pressure sensors, providing valuable references for the future development of this field.

## Keywords

MEMS technology; micro pressure sensors; design optimization.

## 基于 MEMS 技术的微型压力传感器研究

张维

四川信息职业技术学院, 中国·四川广元 628000

## 摘要

本研究深入探讨了基于MEMS技术的微型压力传感器,涵盖了从设计原理到制造工艺的全面分析。论文详细阐述了MEMS技术在压力传感器微型化过程中的关键作用,探讨了传感器设计中的材料选择、结构优化及性能参数调控。同时,对制造工艺中的关键技术进行了深入剖析,包括光刻、蚀刻、沉积等核心工艺。此外,论文还对微型压力传感器的应用领域和市场前景进行了全面评估,为该领域的未来发展提供了有价值的参考。

## 关键词

MEMS技术; 微型压力传感器; 设计优化

## 1 引言

微机电系统(MEMS)技术的快速发展为传感器领域带来了革命性的变革,尤其在压力传感器的微型化和高性能化方面取得了显著进展。MEMS技术通过将微电子和微机械系统集成于一体,实现了传感器的小型化、智能化和低成本化。微型压力传感器作为MEMS技术的重要应用之一,在医疗、汽车、航空航天等领域展现出巨大的应用潜力。本研究将从MEMS技术基础、传感器设计、制造工艺以及应用前景等方面,全面阐述基于MEMS技术的微型压力传感器的研究现状和发展趋势。

【基金项目】院级项目:基于图像检测的飞镖自动记分系统研究(项目编号:2019KC12)。

【作者简介】张维(1985-),男,中国四川广元人,本科,讲师,从事智能控制技术研究。

## 2 MEMS 技术基础

MEMS技术是一种将微电子技术与微机械加工技术相结合的新兴技术领域。这种技术通过在微米甚至纳米尺度上加工和制造微小的机械结构、传感器、执行器和电子电路,实现了系统的微型化。MEMS技术的核心在于利用半导体制造工艺,在硅片上制造出具有特定功能的微型结构。另外在MEMS技术中,微加工技术扮演着关键角色。体硅微加工和表面微加工是两种主要的MEMS制造技术。体硅微加工通过选择性刻蚀硅衬底来形成三维结构,能够制造出深度较大的微结构。表面微加工则是在衬底表面沉积和图形化薄膜材料来构建微结构,适合制造复杂的平面结构。这两种技术的结合使得复杂的三维微结构的制造成为可能,为微型压力传感器的设计以及制造提供了技术支持。另外,MEMS技术的优势在于可大幅度减小器件尺寸提高性能降低成本,并实现批量化生产。使得基于MEMS技术的微型压力传感器具有体积小或者灵敏度高优点,能够满足各种严苛环境下的应用需求<sup>[1]</sup>。

## 3 微型压力传感器的设计

### 3.1 设计要求与标准

基于机电系统 (MEMS) 技术的微型压力传感器在现代工业、医疗和消费电子等领域具有广泛应用, 其设计需满足特定的要求和标准。

#### 3.1.1 设计要求

**高灵敏度和精度:** 微型压力传感器应具备高灵敏度, 以检测微小的压力变化。例如, 某研究通过优化压敏膜层厚度和压敏电阻位置, 成功研制出量程为 40kPa 的表压式压力传感器, 灵敏度达到 0.25~0.35mV/kPa。

**小型化和低功耗:** MEMS 技术使传感器体积小、重量轻, 适用于空间受限的应用场景。同时, 低功耗设计延长了设备的使用寿命, 特别适用于无线传感器网络和电池供电的移动设备。

**环境适应性:** 传感器需在宽温度范围内 (如 -40℃ ~ 125℃) 稳定工作, 并具备抗湿度、抗腐蚀等特性, 以适应不同的应用环境。

#### 3.1.2 相关标准

中国已制定多项国家标准, 规范 MEMS 压力传感器的设计和测试方法。例如, GB/T 32817—2016《半导体器件微机电器件 MEMS 总规范》对 MEMS 器件的基本要求进行了规定。此外, GB/T 42191—2023《MEMS 压阻式压力敏感器件性能试验方法》详细描述了压阻式压力传感器的性能测试方法。针对汽车应用, 国家标准计划《机电系统 (MEMS) 技术 基于 MEMS 技术的车规级压力传感器技术规范》正在制定中, 旨在规范车规级压力传感器的技术要求。

故而, 基于 MEMS 技术的微型压力传感器在设计时需综合考虑灵敏度、精度、尺寸、功耗和环境适应性等因素, 并遵循相关国家标准, 来保证其在各应用领域的可靠性。

### 3.2 传感器材料的选择

材料选择对微型压力传感器的性能起着决定性作用。常用的材料包括单晶硅、多晶硅、氮化硅、氧化硅等。单晶硅因其优异的机械性能和电学性能, 成为制造 MEMS 压力传感器的首选材料。它具有高弹性模量以及低蠕变特点, 能够提供良好的线性度。单晶硅的压阻效应显著使得基于压阻原理的压力传感器能够实现高灵敏度<sup>[2]</sup>。另外, 多晶硅在某些性能上不如单晶硅, 但其制备工艺更加灵活, 可通过 LPCVD (低压化学气相沉积) 方法在各种衬底上沉积。多晶硅传感器在成本和集成度方面具有优势, 特别适合大规模生产。此外, 氮化硅具有优异的机械强度和化学稳定性, 常用于制作薄膜结构。它的热膨胀系数与硅接近, 可以减少热应力的影响提高传感器的温度稳定性。最后, 氧化硅作为绝缘材料和牺牲层在 MEMS 压力传感器的制造过程中扮演着重要角色。它可以用作电气隔离层也可以作为刻蚀停止层。在选择材料时要综合考虑材料的机械或者热性能以及与其他工艺的兼容性。而且对于高温应用碳化硅或氮化铝等耐高温材料可能更为合适。例如, 博世 (Bosch) 公司在

其 MEMS 压力传感器中采用了单晶硅作为主要材料。单晶硅具有优异的机械和电学性能, 特别是其高弹性模量和显著的压阻效应, 使传感器能够实现高灵敏度和良好的线性度。而且博世还利用氮化硅的高机械强度和化学稳定性, 作为传感器的保护层来提高其耐用性。这种材料组合使博世的 MEMS 压力传感器在汽车电子等领域表现出色, 满足了高精度和高可靠性的要求。

### 3.3 结构设计

微型压力传感器结构设计中, 薄膜式结构凭借其简单可靠的特点得到广泛应用。典型的薄膜结构由一层厚度为 10~50 μm 的硅膜构成, 利用通过体硅刻蚀在硅片上形成方形或圆形的隔膜。压力作用下, 隔膜产生形变通过压阻效应将压力信号转换为电信号。压阻元件布置在隔膜边缘应力最大处, 采用惠斯通电桥的方式连接, 可获得较大的输出信号和良好的温度补偿效果。另外, 悬臂梁结构在某些特定应用场景中展现出独特优势, 这种结构由一端固定、另一端悬空的微型梁构成, 压力作用使梁产生挠曲变形。通过优化梁的长度宽度和厚度可调节传感器的灵敏度。悬臂梁结构的设计中, 应力集中效应需要特别关注, 合理的倒角设计和应力释放结构可以提高传感器的可靠性。还有, 设计模拟与仿真在结构优化过程中发挥重要作用。经有限元分析软件可模拟不同压力下结构的应力分布和变形情况。ANSYS 等商用软件提供了完整的仿真环境, 能够进行应力分析、模态分析和热分析。仿真结果指导结构参数的优化避免了反复试验带来的时间和成本浪费<sup>[3]</sup>。

## 4 制造工艺

### 4.1 MEMS 制造技术概述

MEMS 制造技术中, 光刻工艺是图形转移的关键步骤。在硅片表面涂覆光刻胶后通过掩模版进行选择曝光, 显影后形成所需的图形。深紫外光刻技术可以实现亚微米级的分辨率, 满足微型压力传感器的精细加工需求。多层光刻工艺通过多次曝光和对准, 实现复杂的三维结构制造。

蚀刻工艺分为湿法蚀刻和干法蚀刻。湿法蚀刻使用化学溶液选择性去除材料, 具有工艺简单、成本低的特点。KOH 溶液常用于硅的各向异性刻蚀, 可以形成具有特定晶面的 V 型槽或凹腔结构。深反应离子刻蚀 (DRIE) 技术能够实现高深宽比的垂直侧壁结构, 这在压力传感器的腔体制作中尤为重要。

薄膜沉积技术包括物理气相沉积 (PVD) 和化学气相沉积 (CVD)。PVD 方法如磁控溅射可以沉积金属电极和压阻层。LPCVD 技术用于沉积多晶硅、氮化硅等功能层, 具有覆盖度好、均匀性高的特点。等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 在较低温度下即可实现薄膜沉积, 减少了热应力的影响<sup>[4]</sup>。

例如, 以某国内汽车制造商在汽车发动机管理系统中采用了基于 MEMS 技术的微型压力传感器, 用于监测发动

机进气压力,以优化燃油喷射和排气再循环系统。该传感器设计符合 GB/T 32817—2016 和 ISO 21789 等标准,具有较高的精度和快速响应能力,可在  $-40^{\circ}\text{C}$  ~  $125^{\circ}\text{C}$  的温度范围内稳定工作。为提高灵敏度,工程团队选择了单晶硅作为主要压阻材料,并将氮化硅作为保护层,增强了设备在高温和振动环境中的抗干扰能力。传感器设计采用薄膜结构,通过在隔膜边缘布置压阻元件实现灵敏度提升。实验数据显示,该传感器能够精确检测到 0~150kPa 的压力变化,满足发动机进气管管理的需求,有效提升了车辆的燃油效率和排放控制。

#### 4.2 微型压力传感器的具体制造流程

制造流程从清洗硅片开始,去除表面污染物和自然氧化层。热氧化形成厚度约  $1\mu\text{m}$  的二氧化硅层,作为绝缘层通过 LPCVD 沉积氮化硅薄膜,提供额外的保护和应力调节作用。在正面进行光刻和刻蚀,定义压阻元件的位置。离子注入工艺形成 P 型或 N 型压阻区,退火处理活化掺杂原子并修复晶格缺陷。金属化工工艺通过蒸发或溅射沉积铝等金属,形成电极。背面光刻定义膜片区域采用 DRIE 工艺刻蚀形成腔体结构。腔体深度直接影响传感器的测量范围,要精确控制。真空键合技术将硅片与玻璃衬底键合形成密封的参考腔,这一步骤对传感器的性能至关重要。

#### 4.3 封装技术

封装技术在微型压力传感器制造中至关重要,作为工艺流程的最后一步,封装有保护传感器的敏感元件免受外界环境的腐蚀、湿气、粉尘和机械冲击的影响,还对传感器的稳定性和使用寿命产生直接影响。封装方法通常分为软封装和硬封装。软封装采用弹性材料具有较强的柔性,适用于需要灵活佩戴的可穿戴设备,能够适应人体运动而不影响测量精度。硬封装则选用金属或者陶瓷等刚性材料,多用于工业和汽车等需要抗干扰能力强的应用场景,能够有效防护冲击振动及电磁干扰。封装材料的选择至关重要,需具备良好的密封性和电绝缘性。在高温高压环境下往往会选择具备高热稳定性和抗氧化性的材料;而在医疗或消费电子领域,则会倾向于选择轻便耐用且对生物体无害的材料。传感器封装结构的设计也要考虑到工作环境的特性,来保证在极端条件下仍能保持稳定的性能<sup>[5]</sup>。

### 5 应用领域与市场前景

#### 5.1 微型压力传感器的应用

微型压力传感器凭借其高灵敏度、低功耗、小体积等特点,在众多应用场景中展现出强大的适用性,特别是在医疗设备中得到了广泛应用。例如,在血压监测和呼吸监测设备中,微型压力传感器能够实时、准确地监测人体的生理压力变化,提供即时的生理数据帮助医生做出准确的诊断和治疗决策。其高精度和快速响应特性确保了监测数据的可靠性,尤其在呼吸机等设备中,压力传感器的响应时间对患者的安全至关重要。在汽车行业中,微型压力传感器主要用于胎压监测系统(TPMS)和刹车系统等关键位置,通过实时反馈车轮胎压和刹车气压的变化,保障行车安全防止意外事

故的发生。而且微型压力传感器在智能家居领域也扮演着越来越重要的角色。通过集成到水压监控、空气质量检测等智能家居设备中,压力传感器能够实时感知家居环境的变化,为用户提供安全舒适的居住体验。传感器的高灵敏度和小体积使其易于嵌入各种家电设备中进一步推动了智能家居的普及。

#### 5.2 市场需求分析

未来,随着 5G、物联网(IoT)等前沿技术的快速发展,微型压力传感器的市场需求将大幅度增加。物联网技术的发展使得设备之间的数据传输和信息共享更加便捷,对高精度、高灵敏度、低功耗的传感器提出了更高要求,推动了 MEMS 压力传感器的技术升级和市场扩展。对于制造企业而言,这一趋势不仅为微型压力传感器带来了更广阔的市场,也对产品的材料结构和工艺等方面提出了持续优化的要求,以确保产品在复杂环境中保持高性能。MEMS 技术在传感器灵敏度和功耗方面的优势也不断被发掘,特别是在结合人工智能(AI)算法和无线传输技术方面,将进一步赋予微型压力传感器数据处理和远程监控的智能化能力。通过 AI 的加持传感器不再仅仅是被动的数据采集器,而是具备了对数据进行预处理以及异常识别等功能,从而极大地提升了设备的自动化水平。未来,微型压力传感器有望在智慧城市、智能制造等新兴领域中发挥更大的作用,推动整个行业向更加智能便捷的方向发展。

### 6 结语

微型压力传感器在 MEMS 技术的支持下展示出巨大的应用潜力与市场前景。其凭借高灵敏度、低功耗、小型化等优势,在多个领域得到了广泛应用。未来,随着 5G、物联网和智能制造的持续发展,对高精度、高稳定性、智能化压力传感器的需求将不断增加。MEMS 技术也将在不断进步的过程中,继续提升传感器的性能,为传感器的微型化和多功能集成提供更多技术支持。材料、结构和工艺的不断优化将推动微型压力传感器朝着更为智能化、个性化的方向迈进,使其能够在更严苛的环境中实现精准的压力检测,并满足现代科技对多功能传感器的需求。MEMS 微型压力传感器将逐步从单一的压力检测功能向综合环境监测发展,助力各行各业的信息化、智能化转型。

#### 参考文献

- [1] 李文豪,贾平岗,王军,等.基于硅MEMS技术的高灵敏度微型光纤法布里-珀罗压力传感器[J].光子学报,2024,53(5):154-162.
- [2] 唐鑫.微型耐高温SOI压力传感器结构与宽温区补偿研究[D].长沙:中南大学,2023.
- [3] 张劲弓,赵明,孙旭光,等.微型无源无线压力传感器及其系统设计[J].传感器与微系统,2021,40(9):71-73+77.
- [4] 李文莉.微型电容式压力传感器的制作与测试[J].电子制作,2020(24):81-82+74.
- [5] 许高斌,陈诚,陈兴,等.一种用于复杂环境下的高精度微型谐振式压力传感器[J].真空科学与技术学报,2019,39(11):980-988.