

DOI:10.11784/tdxbz202402003

一种压电氮化铝双端固支音叉型微谐振器

李浩霖, 杨清瑞, 原毅, 刘伯华, 孙崇玲, 张孟伦

(天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对小型化高性能谐振式压力传感器的应用需求, 提出一种以压电驱动氮化铝 (AlN) 双端固支音叉型 (DETF) 微谐振器为敏感元件的新型压力传感器, 并设计加工了其核心元器件。首先, 通过理论分析, 研究了尺寸参数对谐振器在面内弯曲振动模式下的频率-轴向位移灵敏度及品质因数 Q 值的影响; 同时, 讨论了层叠结构和电极驱动方案对谐振器性能的影响, 从而确定了谐振器设计参数, 进一步采用微机电系统 (MEMS) 工艺加工了该谐振器并对其性能进行了测试。测试结果表明: 在真空度为 0.1 Pa 的环境下, 谐振器的 Q 值为 11 039, 串联谐振阻抗 R_s 为 6.2 k Ω ; 在常压环境下, 谐振器的 Q 值为 844, R_s 为 44.3 k Ω 。两种测试条件下谐振器的性能均优于现有文献报道的同类型谐振器研究结果, 为进一步实现高灵敏度、高精度和宽动态响应范围的谐振式压力传感器奠定了良好的基础。最后, 采用有限元仿真方法确定了谐振器的频率-轴向位移灵敏度, 研究了压力传感器灵敏度与压力敏感隔膜厚度的关系, 设计了压力传感器加工流程, 从而有望制作出完整的压力传感器芯片。

关键词: 微机电系统; 压电驱动; 双端固支音叉型谐振器; 谐振式压力传感器; 氮化铝薄膜

中图分类号: TN384

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)12-1322-09

Piezoelectric Aluminum Nitride Double-Ended Tuning Fork Microresonator

Li Haolin, Yang Qingrui, Yuan Yi, Liu Bohua, Sun Chongling, Zhang Menglun

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel piezoelectric-based pressure sensor is proposed to meet the need for high-performance miniaturized resonant pressure sensors. A piezoelectric-driven aluminum nitride (AlN) double-ended tuning fork (DETF) microresonator was designed and fabricated as the sensing element for this pressure sensor. A theoretical analysis was conducted to investigate the influence of dimensional parameters on the frequency-axial displacement sensitivity and quality factor (Q) of the resonator operating under in-plane flexural modes. The impact of layered structures and electrode driving schemes on resonator performance was also evaluated, establishing the design parameters for the resonator. Furthermore, the resonator was fabricated using micro-electro-mechanical system (MEMS) processes and subjected to performance testing. Test results reveal that under a vacuum level of 0.1 Pa, the resonator demonstrates a Q value of 11 039 and a series resonant impedance (R_s) of 6.2 k Ω . Moreover, at atmospheric pressure, the Q value is 844, with R_s being 44.3 k Ω . These performance measurements exceed those documented in the literature under the same testing conditions, laying a foundation for the development of highly sensitive, accurate, and broad-dynamic-range resonant pressure sensors. Finally, the frequency-axial displacement sensitivity of the resonator was determined through finite element simulation method and the relationship between the sensitivity of the pressure sensor and the thickness of the pressure-sensing diaphragm was analyzed. Additionally, a fabrication process for the pressure sensor was designed, offering the prospect of manufacturing a comprehensive pressure sensor chip.

收稿日期: 2024-02-02; 修回日期: 2024-05-10.

作者简介: 李浩霖 (1997—), 男, 博士研究生, lihaolin@tju.edu.cn.

通信作者: 杨清瑞, yangqingrui@tju.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB2008800).

Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2020YFB2008800).

Keywords: micro-electro-mechanical system (MEMS); piezoelectric actuation; double-ended tuning fork resonator; resonant pressure sensor; aluminum nitride (AlN) thin film

谐振式压力传感器具有高精度、高稳定性和宽动态响应范围等优势,同时,其输出信号为频率信号,更容易转化为数字信号,从而具有较好的抗干扰能力^[1-2]。目前,常见的谐振式压力传感器多基于电磁驱动^[3]或静电驱动^[4]谐振器。电磁驱动谐振器通常需要发射器产生电磁场,因此尺寸普遍较大,功耗较高^[5]。静电驱动谐振器通常采用梳齿型电极结构,其电极间隙一般在微米到亚微米量级,间隙越小越有利于获得更低的动态阻抗(motion resistance)和更小的非线性。这种结构一方面容易受到空气的压膜阻尼影响,因此需要采用高真空度和密封性的真空封装来维持高品质因数,另一方面缩小电极间隙会增加制造难度^[6]。相较于静电驱动的谐振器,压电驱动谐振器的电极直接与压电层接触,从而降低了对制造精度和真空度的要求,并且更易于实现小型化。同时,压电驱动谐振器具有较高的机电耦合系数,因此具有较低的动态阻抗,有利于构建低功耗振荡器^[7]。综上所述,压电驱动谐振器具有构建高性能谐振式压力传感器的应用前景。

当前,压电驱动型谐振式压力传感器主要采用石英双端固支音叉型(double-ended tuning fork, DETF)谐振器作为敏感元件^[8-10],但是石英谐振器体积较大,且不易实现与压力敏感隔膜的集成加工。近年来,基于微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)工艺制造的氮化铝(aluminum nitride, AlN)压电谐振器由于具有尺寸小、可大规模制造、易与集成电路工艺兼容的优势,被广泛研究和关注^[2]。同时,已有研究^[11]表明,AlN能够在1000℃以上的高温环境下保持良好的压电特性和机械强度,使得基于AlN压电特性的传感器具有良好的耐高温特性,能够开辟新的应用领域。

以AlN为压电层的MEMS DETF谐振器由于具有良好的力敏特性,已有研究人员探索性地将其应用于谐振式加速度计^[12-13]。如Vigevani等^[14]提出了一款以AlN为压电层的DETF谐振器,并利用此结构的谐振器设计了一款加速度计^[12];Wang等^[13]利用AlN为压电层、硅为结构层的DETF谐振器设计了一款具有应变放大功能的加速度计。这类压电谐振式传感器的测试精度通常由振荡电路的相位噪声决定,而谐振器本身的品质因数(quality factor) Q 及动态阻抗 R_m 对相位噪声至关重要。现有文献^[12-15]报道的AlN基MEMS DETF谐振器的 Q 和 R_m 特性较差,因

此,尚不能满足高性能压电谐振式传感器的应用需求。

针对当前对小型化、高性能压力传感器的需求,本文设计了一款 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的谐振式压力传感器,其中压力敏感隔膜尺寸为 $1\ 635\ \mu\text{m} \times 1\ 635\ \mu\text{m}$ 。在该尺寸条件下,本文研究了DETF谐振器的频率-轴向位移灵敏度及其在真空条件下品质因数的影响因素,分析了层叠结构和顶电极排布方式对谐振器性能的影响,从而设计出同时具有高灵敏度和高品质因数的DETF谐振器,并采用MEMS工艺加工制造了该谐振器。实验测得该谐振器在真空度为 $0.1\ \text{Pa}$ 的环境下的串联谐振频率(series resonant frequency) f_s 为 $743.98\ \text{kHz}$, Q 为 $11\ 039$,串联谐振处阻抗(series resonance impedance) R_s 为 $6.2\ \text{k}\Omega$,常压环境下, $f_s = 743.73\ \text{kHz}$, $Q = 844$, $R_s = 44.3\ \text{k}\Omega$,两种测试环境下的谐振器性能均优于前人研究^[12-20]。最后,采用有限元仿真方法确定了本文提出的DETF谐振器的频率-轴向位移灵敏度为 $28.93\ \text{Hz/nm}$,并研究了其作为压力传感器敏感元件时灵敏度随压力敏感隔膜厚度的影响。该谐振器展现了其作为敏感元件应用于高灵敏度、高检测精度谐振式压力传感器的前景。

1 压电驱动谐振式压力传感器设计

谐振式压力传感器的工作原理示意如图1所示,谐振器作为敏感元件被固定在压力敏感隔膜上,当隔膜感受待测压力时会产生形变,进而会对谐振器施加轴向位移,改变谐振器的谐振频率,通过检测谐振频率的变化可以测量待测压力。因此,谐振器的频率-轴向位移灵敏度与最终压力传感器的频率-压力检测灵敏度正相关。此外,压力敏感隔膜对待测压力有放大的作用,隔膜越薄,压力传感器的灵敏度越高。

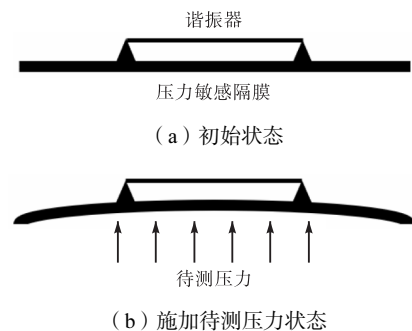


图1 谐振式压力传感器工作原理示意

Fig.1 Schematic of the working principle of a resonant pressure sensor

1.1 灵敏度理论分析

为简化数值计算模型,下文将 DETF 谐振器简化为双端固支梁谐振器,研究其弯曲振动模态的频率-轴向位移灵敏度的影响因素.

固支梁谐振频率 f 与轴向位移 Δl 的关系^[21]为

$$f = \frac{9\pi}{8l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \sqrt{1 + \frac{lA}{2\pi^2 I} \Delta l} \quad (1)$$

式中: l 为梁的长度; E 为杨氏模量; I 为转动惯量; ρ 为密度; A 为梁的横截面积.

当式(1)中的 $\Delta l = 0$ 时,对应的是固支梁的固有谐振频率 f_0 , 其表达式为

$$f_0 = \frac{9\pi}{8l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

对比式(1)和(2)可以看出,当对固支梁谐振器施加轴向位移时,梁的等效刚度增大,谐振频率提高. 对于面内振动模式, I 和 A 可以分别表示为

$$I = \frac{w^3 h}{12} \quad (3)$$

$$A = wh \quad (4)$$

式中 w 和 h 分别为梁的宽度和厚度.

谐振器的频率-轴向位移灵敏度 G 可以表示为

$$G = \frac{df}{f \Delta l} \quad (5)$$

将式(1)、(3)和(4)代入式(5),可得固支梁谐振器的灵敏度 G 为

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{3}{\pi^2} \frac{l}{w}}{1 + \frac{6}{\pi^2} \frac{l}{w} \Delta l} \right) \quad (6)$$

对于小型化的谐振式压力传感器来说,压力敏感隔膜传递给梁的轴向应变通常在百纳米量级,即 Δl 趋于 0, 因此式(6)可以简化为

$$G = \frac{3}{2\pi^2} \frac{l}{w} \quad (7)$$

这说明固支梁谐振器的灵敏度与其长宽比成正比.

1.2 品质因数理论分析

DETF 谐振器的总 Q 值可以表示为各类能量耗散产生的 Q 值的倒数和,即

$$\frac{1}{Q_{\text{Total}}} = \frac{1}{Q_{\text{Air}}} + \frac{1}{Q_{\text{Anchor}}} + \frac{1}{Q_{\text{TED}}} + \dots \quad (8)$$

式中 Q_{Air} 、 Q_{Anchor} 和 Q_{TED} 分别代表空气阻尼损耗、锚损耗和热弹性阻尼损耗 3 类主要损耗对应的 Q 值.

对于谐振式压力传感器来说,为了保证传感器保持较高的性能和稳定性,需要将谐振器进行真空封

装,因此空气阻尼引起的能量损耗可以忽略.

此外,工作在面内反相位振动模态的 DETF 谐振器在与衬底的连接端面可以实现力和力矩平衡,能显著降低锚损耗,因此锚损耗引起的能量损耗也可以忽略^[22].

综上所述,本文主要分析谐振器的热弹性阻尼损耗对 Q 值的影响. 为简化数值模型,将 DETF 谐振器简化为单一材料的双端固支梁谐振器进行研究,其 Q_{TED} 可以表示^[23]为

$$Q_{\text{TED}} = \left(\frac{c_p \rho}{E \alpha^2 T_0} \right) \frac{1 + (\omega_0 \tau)^2}{\omega_0 \tau} \quad (9)$$

式中: c_p 为比定压热容; α 为热膨胀系数; T_0 为固支梁的温度; ω_0 为固支梁谐振器的角频率; τ 为温度梯度衰减的时间常数,用公式可以表示为

$$\tau = \left(\frac{w}{\pi} \right)^2 \frac{c_p \rho}{\kappa} \quad (10)$$

式中 κ 为热导率.

将式(2)、(3)、(4)和(10)代入式(9),可得

$$Q_{\text{TED}} = \frac{8\sqrt{3}\kappa \left(1 + \frac{27E\rho(c_p)^2}{64\kappa^2} \left(\frac{w^3}{l^2} \right)^2 \right)}{9E\alpha^2 T_0 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{w^3}{l^2}} \quad (11)$$

图 2 展示了通过式(11)计算得到的面内振动 AIN 固支梁谐振器的 Q_{TED} 随梁的长宽尺寸变化曲线,其中固支梁的长度 l 为 $600 \mu\text{m}$ 、 $700 \mu\text{m}$ 和 $800 \mu\text{m}$. AIN 的材料参数见文献[24].

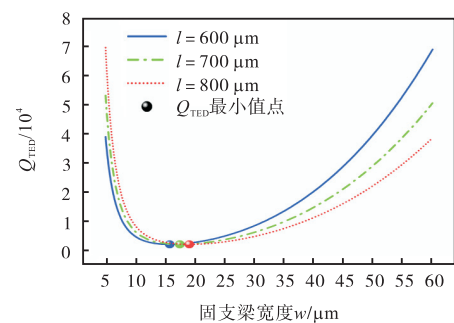


图 2 AIN 固支梁的长宽尺寸对 Q_{TED} 影响的计算结果
Fig.2 Calculation results of impact of length and width dimensions of AlN beams on Q_{TED}

从图 2 中可以看出,当长度 l 为定值时,宽度 w 存在临界值使 Q_{TED} 最小,当 w 小于临界值或者大于临界值, Q_{TED} 均会增加. 对于本文中应用于小型化压力传感器的 DETF 谐振器,鉴于加工难度,其宽度 w 多在几十微米的量级,此时, w 大于临界值. 因此为使 Q_{TED} 尽可能大,谐振器应往“又短又宽”的方向设

计, 即 l/w 值尽量小. 但是, 综合考虑灵敏度式 (7), l/w 值减小会降低灵敏度. 因此, 在传感器设计时, 应同时兼顾灵敏度及谐振器 Q 值性能, 权衡选择谐振器的长度和宽度.

在兼顾传感器灵敏度、电学性能和小型化的同时, 本文选择振动臂尺寸为 $l = 740 \mu\text{m}$ 、 $w = 50 \mu\text{m}$ 的谐振器进行研究, 此时, $l/w = 14.8$, 谐振器的 Q_{TED} 为 26 200.

1.3 谐振器层叠结构研究

低频谐振器(谐振频率小于 1 MHz)的动态阻抗一般在 $\text{k}\Omega$ 量级, 此时其动态阻抗与硅衬底的阻抗相当, 因此不能将硅衬底当作绝缘衬底, 而是要考虑其阻抗特性. 因此, 需要在底电极与衬底间增加一层绝缘材料层将其与衬底隔离. 出于加工工艺兼容性的考虑, 本文选择 AlN 材料作为该绝缘层, 同时作为谐振器的结构层.

由于 AlN 结构层的存在, 谐振器的测试电极之间会存在与谐振器并联的寄生电容 C_{Ft} , AlN 结构层的寄生电容示意如图 3 所示. 谐振器结构层越薄, 寄生电容越大, 导致谐振器的性能恶化愈加显著, 具体表现为并联谐振处阻抗 (parallel resonance impedance) R_p 降低, 有效机电耦合系数 (effective electromechanical coupling coefficient) k_t^2 减小, 相位失真, 不同厚度 AlN 结构层对谐振器性能的影响如图 4 所示, 此处测试电极的尺寸按 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 计算.

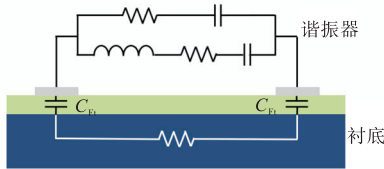


图 3 AlN 结构层的寄生电容示意

Fig.3 Schematic of parasitic capacitance in AlN structural layer

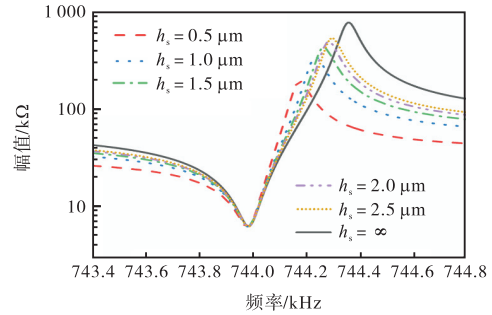
由于 AlN 过厚会增大加工难度, 当结构层厚度 (h_s) 为 $2.5 \mu\text{m}$ 时, 谐振器 k_t^2 能达到结构层无穷厚时的 83.7%, 因此本文采用结构层为 $2.5 \mu\text{m}$ 的双层 AlN 结构谐振器.

1.4 谐振器电极图案研究

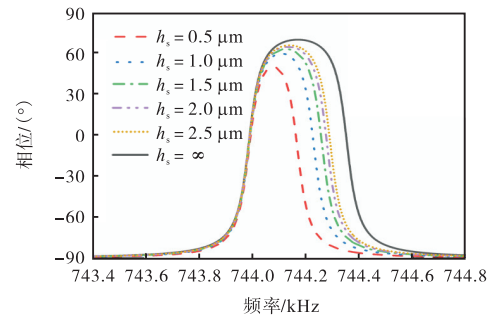
图 5 为 AlN 基底 DETF 谐振器结构示意图. 图 5(a) 为谐振器的平面结构示意, 该器件为对称结构并且由两部分组成, 分别为振动臂及其连接区, 其中, 振动臂为谐振器的核心部分, 而连接区起过渡作用, 负责将振动臂与衬底相连.

图 5(b) 和 (c) 为谐振器的截面结构示意图, 在厚度层叠方向, 自下而上分别为结构层、底电极、压电层

和顶电极, 其中结构层和压电层的材料为 AlN , 底电极和顶电极的材料为钼 (molybdenum) Mo . 为了保证谐振器获得最大的驱动力, 谐振器每根振动臂上的电极必须分布在应变方向相同的区域, 因此每根振动臂上的顶电极在宽度方向上被分成两等份, 在长度方向上被分成中心和两侧 3 部分, 其中, 中心电极长度约为振动臂长度的 0.6 倍^[16]. 谐振器的底电极为一个整体, 压电层中的箭头表示电场方向.



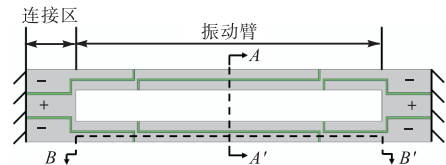
(a) 幅值



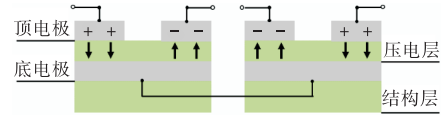
(b) 相位

图 4 寄生电容对谐振器性能的影响

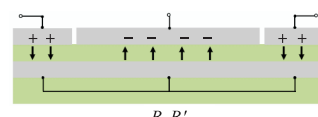
Fig.4 Impact of parasitic capacitance on resonator performance



(a) 平面结构示意图



(b) 沿 A-A' 截面



(c) 沿 B-B' 截面

图 5 DETF 谐振器结构示意图

Fig.5 Schematic of DETF resonator structure

图 5(b)也展示了沿振动臂宽度方向 $A-A'$ 截面的电连接方式,为了激发面内振动模式并降低谐振器的 R_m ,每根振动臂上相邻顶电极分别连接信号端和接地端,两根振动臂的电极信号对称排列,而谐振器的底电极不连接任何电信号,保持悬浮.图 5(c)给出了沿振动臂长度方向 $B-B'$ 截面的电极信号排列方式,两

侧与中心的顶电极分别连接信号端和接地端,并且两侧的顶电极连接相同的电信号.

1.5 谐振器的设计参数与振动模式

综合以上理论分析,在兼顾传感器性能和小型化的同时,谐振器的具体设计参数见表 1.

表 1 DETF 谐振器尺寸参数

Tab.1 Dimension parameters of DETF resonator

μm

连接区长度	连接区宽度	振动臂长度	振动臂宽度	结构层厚度	底电极厚度	压电层厚度	顶电极厚度
120	175	740	50	2.5	0.15	1	0.15

本文展示的 DETF 谐振器工作在面内弯曲振动模式下,其驱动原理为:当压电层的 AlN 中存在沿厚度方向的电场时,压电层 AlN 会在长度方向上伸长或缩短,进而带动谐振器产生面内的弯曲形变.图 6 展示了本文设计的 DETF 谐振器在面内弯曲振动模式下位移分布的三维有限元仿真结果,模型中添加的材料为 AlN 和 Mo,材料的具体参数设置见文献[24].谐振器的有限元仿真频率为 686.67 kHz.

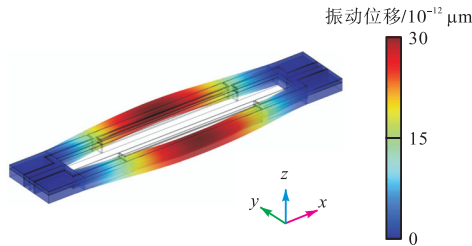


图 6 DETF 谐振器的位移仿真结果

Fig.6 Simulation results of DETF resonator displacement

2 器件加工

本文提出的 DETF 谐振器基于半导体加工平台制造,图 7 为加工流程的关键步骤,具体加工步骤如下.

步骤 1 利用反应离子刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 的方法在晶圆表面刻蚀 $3.5\ \mu\text{m}$ 的空腔,目的是为振动臂的工作提供空间,具体流程见图 7(a).

步骤 2 在晶圆表面沉积硅酸盐玻璃 (phosphor-silicate glass, PSG) 作为牺牲层,然后用化学机械研磨 (chemical-mechanical polishing, CMP) 的方式将空腔外的 PSG 磨去,并保证表面平整,具体流程见图 7(b).

步骤 3 利用磁控溅射的方式在晶圆表面依次沉积 $2.5\ \mu\text{m}$ 的 AlN 和 $150\ \text{nm}$ 的 Mo,分别作为结构层和底电极,然后对底电极进行图形化,具体流程见图 7(c).

步骤 4 再沉积 $1.0\ \mu\text{m}$ 的 AlN 和 $150\ \text{nm}$ 的 Mo 作为压电层和顶电极,然后对顶电极进行图形化,具体流程见图 7(d).

步骤 5 依次利用 RIE 和氢氧化钾溶液湿法刻蚀的方式刻蚀部分底电极上方的 AlN,暴露出底电极,具体流程见图 7(e).

步骤 6 利用 RIE 的方式刻蚀 $3.5\ \mu\text{m}$ 的 AlN,形成谐振器轮廓,刻蚀过程应尽可能减小侧向刻蚀,具体流程见图 7(f).

步骤 7 利用蒸镀和揭开-剥离 (lift off) 的方式沉积 $60\ \text{nm}$ 的金电极层,实现底电极和顶电极的电连接,具体流程见图 7(g).

步骤 8 将加工后的晶圆放入氢氟酸溶液,将牺牲层溶解,释放器件,使其悬空,具体流程见图 7(h).

加工完成的 DETF 谐振器在光学显微镜下的照片如图 8 所示.

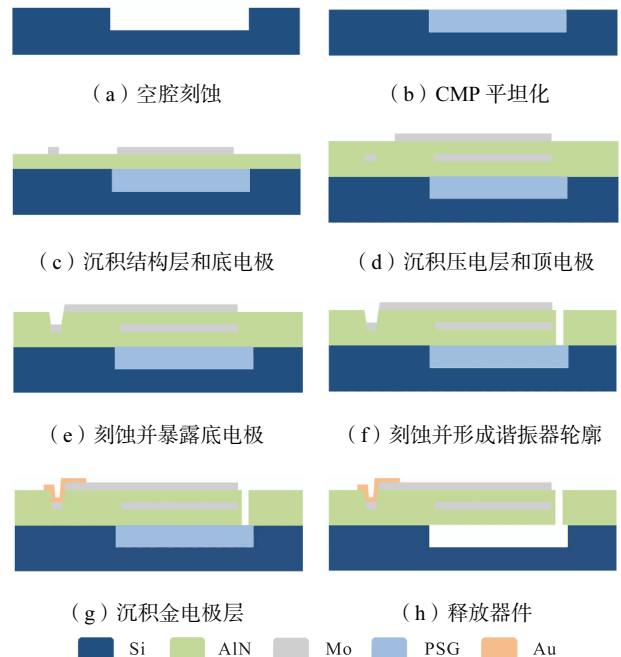


图 7 DETF 谐振器的加工流程

Fig.7 Process of DETF resonator

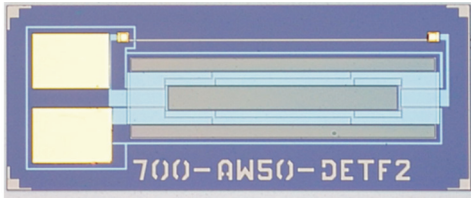


图 8 光学显微镜下 DETF 谐振器的照片

Fig.8 Photograph of DETF resonator under an optical microscope

3 器件测试及结果分析

为了研究空气阻尼对谐振器性能的影响,本文使用如图 9 所示的测试系统表征了谐振器在真空度为 0.1 Pa 和常压环境下的性能. 该测试系统由真空探针台、真空计和阻抗分析仪 (E4990A, Keysight Technologies) 共同组成. 真空探针台的真空腔连接着机械泵和分子泵,配合手阀使用可以实现真空腔内真空度的变化,真空腔内的真空度由真空计实时显示. 谐振器采用直流探针测试,探针通过同轴连接器 (bayonet nut connector, BNC) 线缆连接至阻抗分析仪,图中阻抗分析仪屏幕上正显示着被测器件的幅频特性曲线. 图 9 的局部放大图为直流探针扎在待测器件测试电极的照片.

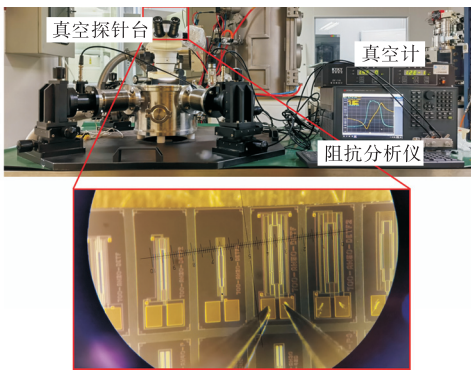
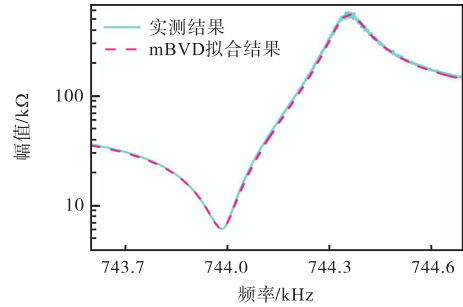


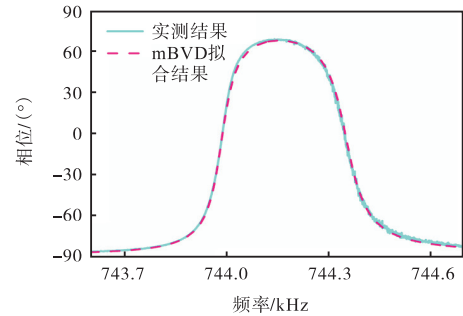
图 9 测试系统照片

Fig.9 Photograph of the testing system

图 10 和图 11 分别展示了真空度为 0.1 Pa 和常压环境下 DETF 谐振器工作在面内弯曲振动模式下的幅频特性曲线,其中蓝色实线为实测结果,紫色虚线是修正后的巴特沃思-范戴克 (modified Butterworth-van Dyke, mBVD) 拟合结果. mBVD 等效电路模型如图 12 所示,该电路模型由动态支路和静态支路并联构成,其中动态支路由动态阻抗 R_m 、动态电感 (motion inductance) L_m 和动态电容 (motion capacitance) C_m 串联构成,其中 L_m 和 C_m 共同决定谐振器的串联谐振频率, R_m 反映了串联谐振处的损耗;静态



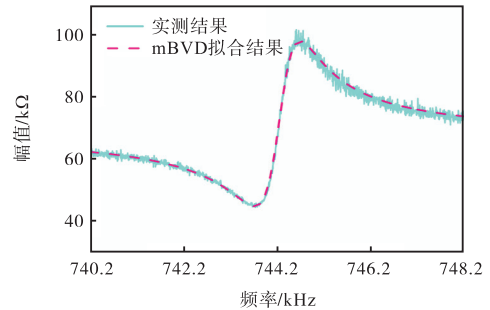
(a) 幅值



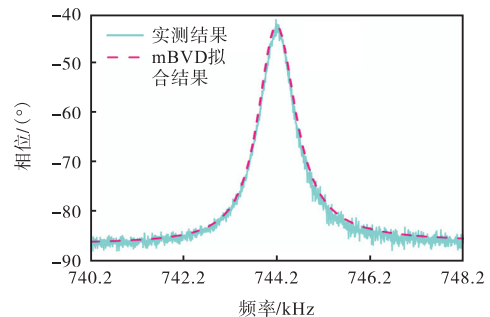
(b) 相位

图 10 0.1 Pa 真空度下谐振器的实测和 mBVD 拟合幅频特性曲线

Fig.10 Measured and mBVD-fitted amplitude-frequency characteristic curves of the resonator at a vacuum level of 0.1 Pa



(a) 幅值



(b) 相位

图 11 常压下谐振器的实测和 mBVD 拟合幅频特性曲线
Fig.11 Measured and mBVD-fitted amplitude-frequency characteristic curves of the resonator under atmospheric pressure

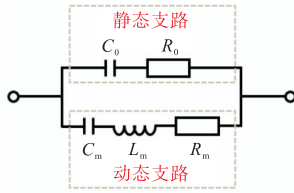


图 12 mBVD 等效电路模型

Fig.12 Model of mBVD equivalent circuit

支路由静态电阻 (static resistance) R_0 和静态电容 (static capacitance) C_0 串联构成, 其中 C_0 为谐振器在远离谐振处的电容, R_0 反映了谐振器的介电损耗. 本文, C_0 和 R_0 除了来自谐振器本身的静态电容和介电损耗外, 还包括引脚间的寄生电容和相关介电损耗. mBVD 等效电路将谐振器建模成为一个电路, 可以应用于后续传感器电路的设计.

表 2 列出了谐振器在真空度为 0.1 Pa 和常压环境下的实测 f_s 、 f_p 、 k_t^2 、 R_s 、 R_p 以及 Q 的参数对比, 表 3 对比了根据实测结果拟合出的 mBVD 电路模型参数. 相较于真空中的测试结果, 常压环境下谐振器的性能显著降低, 说明空气阻尼对该谐振器的性能有较大的影响, 因此当谐振器被应用于传感器时, 应尽可能在真空封装的条件下使用.

表 2 真空和常压测试条件下 DETF 谐振器实测性能对比

Tab.2 Performance comparison of DETF resonator under vacuum and atmospheric pressure

$f_s /$ kHz	$f_p /$ kHz	$k_t^2 /$ %	$R_s /$ k Ω	$R_p /$ k Ω	Q	测试 条件
743.98	744.36	0.12	6.2	495.1	11 039	真空
743.73	744.73	0.12	44.3	96.7	844	常压

表 3 真空和常压测试条件下 DETF 谐振器的 mBVD 模型参数对比

Tab.3 mBVD model parameter comparison of DETF resonator under vacuum and atmospheric pressure

$R_m /$ k Ω	$L_m /$ H	$C_m /$ fF	$C_0 /$ pF	$R_0 /$ k Ω	测试 条件
6.3	14.82	3.09	3.14	2.4	真空
82.0	14.82	3.09	3.16	4.1	常压

表 4 对比了在真空度为 0.1 Pa 和常压环境测试条件下, 本文提出的 DETF 谐振器相较于已有研究中以 AIN、锆钛酸铅 (lead zirconate titanate, PZT) 和氧化锌 (zinc oxide, ZnO) 薄膜作为压电层的弯曲振动模式双端固支梁式谐振器的部分性能指标. 由于 R_s 是直接从测试曲线中获得的, 并且恰当地反映了 R_m 的水平, 因此在下面的对比中使用 R_s 代替 R_m . 可以看出本文设计的谐振器具有更高的 Q 值和更低的 R_s .

表 4 弯曲振动模式双端固支梁式谐振器性能对比

Tab.4 Performance comparison of double-ended beam resonators in flexural modes

$f_s /$ kHz	$R_s /$ k Ω	Q	压电层 材料	谐振器 结构	测试 条件	文献
375.00	175.0	3 028	AIN	DETF	真空	[14]
332.10	10 500.0	2 200	AIN	DETF	真空	[12]
204.50		8 174	AIN	DETF	真空	[16]
890.00	200.0	5 090	AIN	DETF	真空	[15]
140.70	125.0		AIN	DETF	真空	[13]
158.40		6 500	AIN	固支梁	真空	[17]
171.00		3 400	PZT	固支梁	真空	[18]
1 720.00		6 200	ZnO	固支梁	真空	[19]
158.00		3 700	ZnO	固支梁	真空	[20]
140.60	135.0		AIN	DETF	常压	[13]
373.00	180.0	578	AIN	DETF	常压	[14]
743.98	6.2	11 039	AIN	DETF	真空	本文提出的 谐振器
743.73	44.3	844	AIN	DETF	常压	本文提出的 谐振器

4 压力传感器的加工流程和有限元仿真分析

4.1 压力传感器的加工流程

图 7 仅展示了 AIN DETF 谐振器的加工流程, 为了加工完整的压力传感器, 需要在晶圆上将谐振器与硅压力敏感隔膜集成. 这要求在图 7(g) 和(h) 步骤之间引入一步在衬底背面进行深硅刻蚀的工艺步骤, 从而形成压力敏感隔膜. 加工完成后的压力传感器结构示意图如图 13 所示. 该工艺正在开发中, 因此本文中尚没有展示出压力传感器的加工结果.

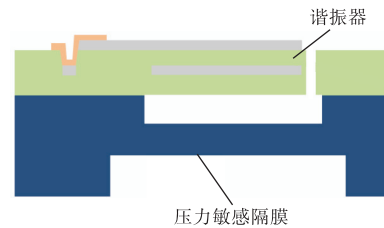


图 13 加工完成后的压力传感器结构示意图

Fig.13 Schematic of the processed pressure sensor structure

4.2 DETF 谐振器频率-轴向位移灵敏度

本文利用有限元仿真方法对 DETF 谐振器的频率-轴向位移灵敏度进行了研究, 图 14 为 DETF 谐振器的有限元仿真模型, 模型中谐振器的边界条件添加在长度方向的两个端面上, 一端设置为固定约束, 一端设置为轴向位移. 图 15 展示了其谐振频率随轴向位移变化的曲线, 仿真结果表明, 本文提出的 DETF 谐振器的频率-位移灵敏度为 28.9 Hz/nm. 根据式(1) 计算得到谐振器的频率-位移灵敏度为 30.0 Hz/nm,

造成灵敏度差距的原因是连接区的存在影响了实际作用到每个梁的轴向应力。

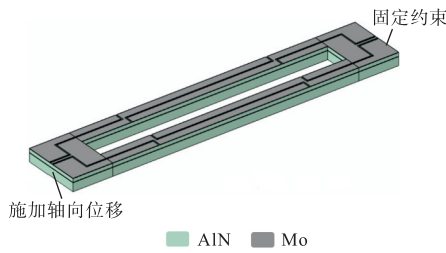


图 14 DETF 谐振器的有限元仿真模型

Fig.14 Finite element simulation model of DETF resonator

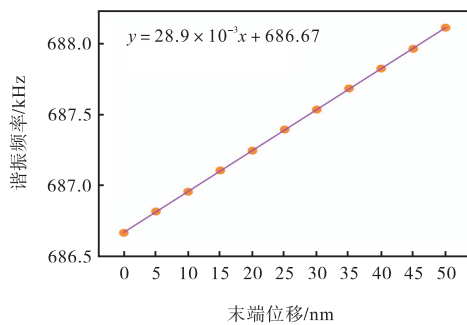


图 15 DETF 谐振器的频率-位移灵敏度的有限元仿真结果

Fig.15 Finite element simulation results of the frequency-displacement sensitivity of DETF resonator

4.3 压力敏感隔膜厚度对压力传感器灵敏度影响

为了研究本文设计的 DETF 谐振器作为敏感元件应用于压力传感器时,压力敏感隔膜厚度对传感器灵敏度的影响,本文通过有限元仿真方法进行了研究,图 16 为压力传感器的有限元仿真模型,矩形隔膜的正面为 DETF 谐振器,背面施加待测压力,隔膜的四周被设置为固定约束,其尺寸为 1 635 μm × 1 635 μm. 图 17 为压力敏感隔膜厚度对压力传感器灵敏度影响的有限元仿真结果,由图 17 可以看出,隔膜越薄,传感器的灵敏度越高。

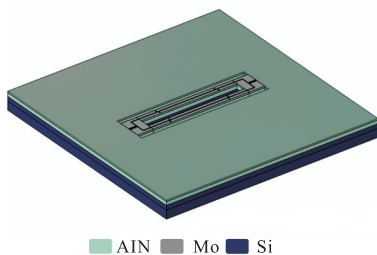


图 16 压力传感器的有限元仿真模型

Fig.16 Finite element simulation model of pressure sensor

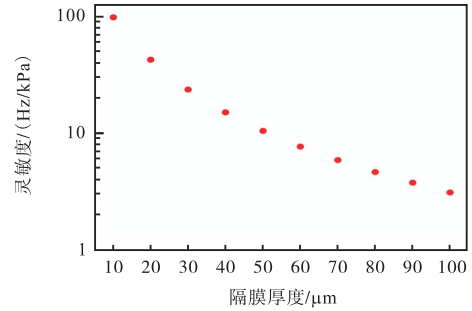


图 17 压力敏感隔膜厚度对压力传感器灵敏度影响的有限元仿真结果

Fig.17 Finite element simulation results of influence of pressure-sensitive diaphragm thickness on the pressure sensor sensitivity

5 结 语

本文通过理论分析和有限元仿真设计并加工了一款可以应用于谐振式压力传感器的高频率-位移灵敏度、高 Q 值、低 R_m 的压电氮化铝 DETF 谐振器. 在真空度为 0.1 Pa 的测试条件下,测得该谐振器的 Q 值为 11 039, R_s 为 6.2 kΩ, 常压环境下,谐振器的 Q 值为 844, R_s 为 44.3 kΩ, 该谐振器的 Q 值和 R_s 均优于此前已公布的同类型谐振器. 通过优化现有的谐振器加工工艺,本文展示的高性能 AlN MEMS 谐振器能够与压力敏感隔膜在晶圆上实现集成,从而为实现高性能谐振式压力传感器提供基于压电驱动的新技术路径,同时为实现极端环境下压力传感器提供了新方案。

参考文献:

[1] Van Beek J T M, Puers R. A review of MEMS oscillators for frequency reference and timing applications[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(1): 1-35.

[2] Chen W, Jia W H, Xiao Y H, et al. A temperature-stable and low impedance piezoelectric MEMS resonator for drop-in replacement of quartz crystals[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(9): 1382-1385.

[3] Chen D Y, Li Y X, Liu M, et al. Design and experiment of a laterally driven micromachined resonant pressure sensor for barometers[J]. Procedia Engineering, 2010, 5: 1490-1493.

[4] 苑伟政, 任 森, 邓进军, 等. 硅微机械谐振压力传感器技术发展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 3-9.

Yuan Weizheng, Ren Sen, Deng Jinjun, et al. A review of silicon micromachined resonant pressure

- sensor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(20): 3-9(in Chinese).
- [5] Chuan Y, Can G. Investigation based on MEMS double Si_3N_4 resonant beams pressure sensor[C]// *Proceedings of the 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Xiamen, China, 2010: 5-8.
- [6] Bahrami M N, Yousefi-Koma A, Raeisifard H. Modeling and nonlinear analysis of a micro-switch under electrostatic and piezoelectric excitations with curvature and piezoelectric nonlinearities[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(1): 263-272.
- [7] Humad S, Abdolvand R, Ho G K, et al. High frequency micromechanical piezo-on-silicon block resonators[C]//*Proceedings of the IEEE International Electron Devices Meeting*. Washington, USA, 2003: 957-959.
- [8] Wang J, Zhao C, Zhao G H, et al. All-quartz high accuracy MEMS pressure sensor based on double-ended tuning fork resonator[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 120: 857-860.
- [9] Ren Z M, Qi Y H, Zhao M H, et al. A composite structure pressure sensor based on quartz DETF resonator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 346: 113883.
- [10] Cheng R J, Zhao Y L, Li C, et al. Design and fabrication of a resonant pressure sensor by combination of DETF quartz resonator and silicon diaphragm[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(3): 631-640.
- [11] Turner R C, Fuierer P A, Newnham R E, et al. Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: A review[J]. *Applied Acoustics*, 1994, 41(4): 299-324.
- [12] Vigevani G, Goericke F T, Pisano A P, et al. Microleverage DETF aluminum nitride resonating accelerometer[C]//*Proceedings of the 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings*. Baltimore, USA, 2012: 6243634.
- [13] Wang Y X, Ding H, Le X H, et al. A MEMS piezoelectric in-plane resonant accelerometer based on aluminum nitride with two-stage microleverage mechanism[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 254: 126-133.
- [14] Vigevani G, Przybyla R, Yen T T, et al. Characterization of a single port aluminum nitride tuning fork [C]//*2010 IEEE International Ultrasonics Symposium*. San Diego, USA, 2010: 1281-1285.
- [15] Olsson R H, Wojciechowski K E, Baker M S, et al. Post-CMOS-compatible aluminum nitride resonant MEMS accelerometers[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 18(3): 671-678.
- [16] Liu X X, Wang Y X, Le X H, et al. A dual-driving piezoelectric DETF resonator with high quality factor and low multimode effect[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(10): 105006.
- [17] Westra H J R, Karabacak D M, Brongersma S H, et al. Interactions between directly- and parametrically-driven vibration modes in a micromechanical resonator [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(13): 134305.
- [18] Piekarski B, DeVoe D, Dubey M, et al. Surface micromachined piezoelectric resonant beam filters[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 91(3): 313-320.
- [19] Piazza G, Abdolvand R, Ho G K, et al. Voltage-tunable piezoelectrically-transduced single-crystal silicon micromechanical resonators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 111(1): 71-78.
- [20] DeVoe D L. Piezoelectric thin film micromechanical beam resonators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 88(3): 263-272.
- [21] Bokaian A. Natural frequencies of beams under tensile axial loads[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 142(3): 481-498.
- [22] Rodriguez J, Chandorkar S A, Glaze G M, et al. Direct detection of anchor damping in MEMS tuning fork resonators[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, 27(5): 800-809.
- [23] Candler R N, Duwel A, Varghese M, et al. Impact of geometry on thermoelastic dissipation in micromechanical resonant beams[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(4): 927-934.
- [24] Yuan Y, Yang Q R, Li H L, et al. Investigation on anchor and base design for aluminum nitride flexural mode resonators[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2023, 33(8): 085009.

(责任编辑:孙立华)