

庆祝汪承灏先生 85 华诞

DOI:10.15949/j.cnki.0371-0025.2023.01.011

新型 MEMS 压电矢量水听器^{*}

樊青青 李俊红[†] 翟禹光 马 军

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

2022 年 11 月 2 日收到

2022 年 12 月 1 日定稿

摘要 对一种具有 U 形槽或双 U 形槽结构的 MEMS 压电式矢量水听器进行了仿真分析与优化,采用微机械加工技术研制出水听器芯片,并对芯片进行了封装与性能测试。提出了理论灵敏度和能量综合分析的方法,在考虑杂散电容的情况下,对敏感结构进行了更加精确的优化。从实验结果可以看出,所提出的优化方法比仅考虑理论灵敏度的传统优化方法具有更高的准确度。此外,具有双 U 形槽结构的矢量水听器的灵敏度比传统的单臂悬臂梁结构的灵敏度高约 5.9 dB,并且具有良好的指向性。
PACS 数: 43.38

A novel MEMS piezoelectric vector hydrophone

FAN Qingqing LI Junhong[†] ZHAI Yuguang MA Jun

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

Received Nov. 2, 2022

Revised Dec. 1, 2022

Abstract The simulation analysis and optimization of a MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) piezoelectric vector hydrophone with U-groove or double U-groove are carried out in this paper. The hydrophone chip is prepared by micromachining technology. Finally, the prepared chip is packaged and tested. The comprehensive analysis of the theoretical sensitivity and energy is proposed to permit the accurate structure optimization by considering the impact of stray capacitance. From the acquired experiment results, it is divulged that the employed optimization method exhibits a higher accuracy than the traditional optimization approach, which takes into account only the theoretical sensitivity. On top of that, the sensitivity of the proposed double U-groove structure is about 5.9 dB higher than that of the single cantilever structure, and it has good directivity.

引言

与陆地相比,海洋约占地球总面积的 71%,未来人类将严重依赖可用的海洋资源,因此对各种水下目标的检测和观测具有重要的研究意义。另一方面,水声技术的发展可以显著提高海上运输的效率和安全性^[1-2]。因此,水听器被认为是水下目标检测的核心部件,包括声压水听器和矢量水听器。在传统测量技术中,主要使用声压水听器^[3-5]。然而,声压水听器只能测量声场的标量参数—声压。与标量水听器相

比,矢量水听器具有测量矢量参数的能力,包括质点位移、速度和加速度等。因此,矢量水听器的抗各向同性噪声能力得到增强,能够实现远距离和多目标的识别^[6-9]。

微机电系统 (MEMS) 技术的快速发展,使得矢量水听器有了实现低成本、低功耗和小型化的可能,并且更易成阵,是矢量水听器未来发展的一个重要方向^[10-11]。因此,利用 MEMS 技术研究和开发矢量水听器具有重要的研究意义。目前,MEMS 矢量水听器主要分为 3 类:压阻式^[12-18]、电容式^[19-22]和压电式^[23-27]。MEMS 压阻式矢量水听器的结构相对简

^{*} 国家自然科学基金项目 (11874388, 12174420)、中国科学院声学研究所自主部署“前沿探索”类项目 (QYTS202002)、中国科学院声学研究所自主部署“目标导向”类项目 (MBDX202112) 资助

[†] 通讯作者: 李俊红, ljh@mail.ioa.ac.cn

单, 然而压阻材料的换能效率相对较低, 因此灵敏度较低。同时, 由于焦耳热的存在, 使器件不可避免地会产生热噪声^[12]。MEMS 电容式矢量水听器具有良好的温度稳定性和高的灵敏度, 但工作时需要偏置电压, 易受寄生电容的影响, 并且结构复杂, 易粘连。2016 年, 声学所研制了基于 ZnO 薄膜的 MEMS 压电矢量水听器, 灵敏度比同类 MEMS 压阻矢量水听器高出 17 dB 以上, 工作频带为 20~1200 Hz^[23]。目前, 出现了一种依据仿生学理论, 模拟鱼类侧线器官探测水中声波振动原理, 设计的微纤毛式矢量水听器, 但大部分都是基于压阻效应^[14-18]。2020 年, Shi 等研制了一种基于 PZT 的 MEMS 仿生压电式矢量水听器, 在 920 Hz 下的灵敏度为 -189.3 dB (Ref. 1 V/ μ Pa), 凹点深度为 21.41 dB, 工作带宽为 20 Hz~2 kHz^[28]。与同类型的压阻式矢量水听器相比, 压电式矢量水听器具有换能效率高、灵敏度高、无源和噪声低的优点。此外, 与电容式矢量水听器相比, 压电式矢量水听器工作时不需要偏置电压, 因此功耗较低。但 MEMS 压电矢量水听器的灵敏度还不能满足实际应用的要求。

本文为了进一步提高压电矢量水听器的灵敏度, 对一种具有 U 形槽或双 U 形槽结构的 MEMS 压电式矢量水听器进行了仿真分析与优化, 提高了 MEMS 矢量水听器的灵敏度。并采用微机械加工技术对水听器芯片进行了制备, 最后对制备的芯片进行了封装与测试。

1 MEMS 压电矢量水听器的理论分析与结构优化

1.1 MEMS 压电矢量水听器工作原理

MEMS 压电矢量水听器敏感元件是一个 MEMS 压电加速度计。等效声压灵敏度 M_p 与加速度灵敏度 S 的关系如下式所示^[29]:

$$M_p = \frac{j\omega}{\rho c} S, \quad (1)$$

其中, ρc 为介质的声特性阻抗, ω 为振动的角频率。为了提高 MEMS 压电式矢量水听器的等效声压灵敏度 M_p , 就必须提高敏感元件加速度计的加速度灵敏度 S 。

MEMS 压电加速度计的加速度灵敏度 S 可由下式计算得到^[30]:

$$S = \frac{V}{a_{cc}} = \frac{1}{\varepsilon A a_{cc}} \iiint_v [d_{31}(\sigma_x + \sigma_y) + d_{33}\sigma_z] dv, \quad (2)$$

其中, V 为输出电压 (V), a_{cc} 为施加在器件 z 轴方

向的加速度 (m/s^2), ε 为压电材料的介电常数, d_{31} 和 d_{33} 为压电材料的压电系数, A 为压电薄膜上下电极的面积, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 3 个正应力分量。

1.2 杂散电容对 MEMS 压电式水听器实际灵敏度的影响

当压电换能元件受到外力作用时, 将在压电材料的表面产生电荷 Q , 并通过上下电极进行存储, 因此可将 MEMS 压电矢量水听器敏感结构看作一个电荷源与一个电容 C 和一个电阻 R (其阻值与压电材料的介电损耗有关, 较高, 可忽略) 并联的等效电路。但在芯片的实际制备中, 引线 and 压焊点等电极结构会给芯片带来寄生电容 C_c 。同时, 实际应用中, 还存在着电缆线所带来的分布电容 C_s (主要由阻抗匹配前的电缆引起), 因此, 器件的等效电路如图 1 所示。由于电容 C 很小, 寄生电容和分布电容等杂散电容对器件的实际灵敏度有很大的影响。因此, 在器件结构优化过程中, 研究杂散电容对器件实际灵敏度的影响是非常重要的。在不考虑寄生电容和分布电容时, 器件的输出电压为 $V = Q/C$; 当考虑寄生电容和分布电容时, 器件的输出电压 V_1 为:

$$V = \frac{Q}{C + C_s + C_c}, \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{C}{C + C_s + C_c} V = \frac{1}{1 + \frac{C_s}{C} + \frac{C_c}{C}} \frac{Q}{C + C_s + C_c}. \quad (4)$$

根据式 (4), 对结构进行优化时, 不仅需要考虑电荷量 Q 的增加, 还需要考虑敏感结构的电容量 C 不能过小。而敏感结构的总电能 E 可表示为:

$$E = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CV_1^2, \quad (5)$$

即结构的总电能 E 越高, 传感器抗外界寄生和分布电容的能力就越强。基于以上分析, 本文提出综合考虑理论灵敏度 S 和能量 E 的方法来进行 MEMS 矢量水听器结构的优化。在实际的结构优化中, 我们不是将理论灵敏度最大作为优化的依据, 而是将理论灵敏度与能量的乘积最大作为优化的依据, 以期最大化器件的实际灵敏度。

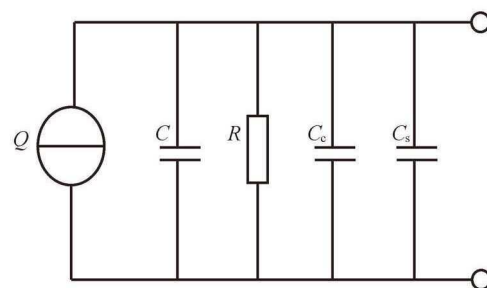


图 1 MEMS 压电矢量水听器敏感元件的等效电路

1.3 有限元仿真与结构优化

传统的 MEMS 压电矢量水听器的敏感结构如图 2 所示, 主要包括由压电层和弹性层组成的弹性复合悬臂梁以及质量块。ZnO 薄膜作为结构的压电层, 位于硅悬臂梁之上, 与硅梁之间有一层 SiO₂, 主要用于绝缘。在实际仿真中, 我们忽略了压电层上下表面的电极层对器件的影响, 因此, 共 3 层结构组成复合悬臂梁。复合悬臂梁的一端固定, 另一端连接由硅材料组成的质量块。各结构的尺寸及材料参数如表 1 所示。

相比传统的单臂悬臂梁结构, 我们提出了一种具有 U 形或双 U 形的悬臂梁结构, 结构如图 3 所示^[29-30]。通过刻蚀单个或两个 U 形槽, 使单悬臂梁结构变为 2 个或 3 个尺寸相同, 并且在力学上并联

的悬臂梁结构来实现灵敏度的提高。同时对各悬臂梁上的压电薄膜换能结构进行电学上串联, 从而使灵敏度得到进一步提高。



图 2 单臂悬臂梁结构
((a) 三维结构; (b) 剖面图)

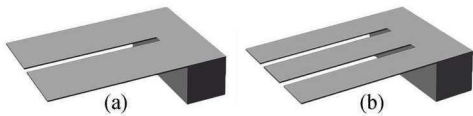


图 3 具有 U 形槽的悬臂梁结构
((a) U 形槽结构; (b) 双 U 形槽结构)

表 1 各敏感结构的尺寸及材料参数

结构	材料	几何尺寸 (μm ³)	杨氏模量 (GPa)	密度 (10 ³ kg/m ³)	泊松比
质量块	Si	1500 * 500 * 500	190	2.33	0.18
弹性复合 悬臂梁	Si 梁	2200 * 1500 * 16			
	SiO ₂ 层	2200 * 1500 * 0.2			
	ZnO 层	1700 * 1500 * 4.6	210	5.68	0.33

图 4 显示了在重力加速度 (g) 下, 不同结构的应力分布。可以看出, 应力变化较大的区域集中在悬臂梁根部周围, 当它远离悬臂梁的根部时, 应力分布急剧减小。理论上, 根据式 (2), 可以通过减小电极面积并将其分布在悬臂梁根部来提高结构的灵敏度, 如图 5 所示。因此, 我们提出了对电极分布面积的优化。另一方面, 电极面积的减小和压电层厚度的增加将降低有效电容 C , 使器件更容易受到杂散电容的影响, 从而降低器件的实际灵敏度。因此, 我们综合研究了理论灵敏度 S 和总电能 E , 利用有限元方法优化了结构的压电层厚度和电极面积, 以提高实际灵敏度。

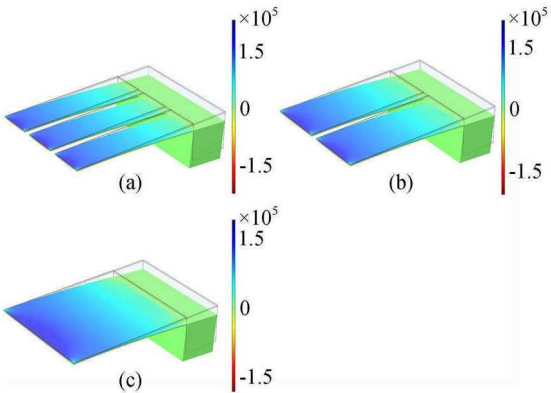


图 4 重力加速度 (g) 下, 不同结构的应力分布
((a) 双 U 形悬臂梁; (b) U 形悬臂梁; (c) 单臂悬臂梁)

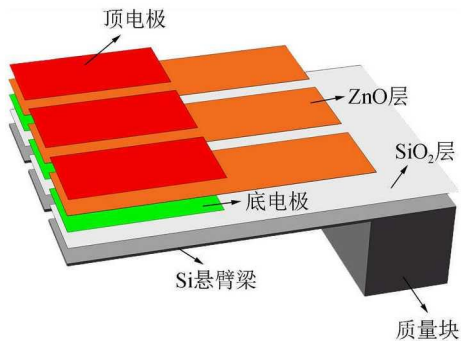


图 5 双 U 形槽结构中, 电极分布在悬臂梁根部, 并且面积小于压电层

将 3 种不同结构的悬臂梁根部进行固定, 加载同样的重力加速度 (g) 于质量块之上, 进行准静态分析。由于 σ_z 应力分量过小, 可忽略, 理论的加速度灵敏度的计算公式 (2) 可简化为^[30]:

$$S = \frac{d_{31}}{\varepsilon A a_{cc}} \iiint_v (\sigma_x + \sigma_y) dv.$$

(6)

图 6 为归一化坐标下, 电能 E 及理论灵敏度 S 随压电层厚度的变化, 虚线为两者的乘积。由图 6 可以看出, 随着压电层厚度的增加, S 和 E 先增加后减小。值得注意的是, 在不考虑能量时, 当压电层厚度约为 7.6 μm (即硅梁厚度的 47.5%) 时, 理论灵敏度 S 最大; 当考虑能量时, 两者的乘积在压电层

厚度为 4.6 μm (即硅梁厚度的 28.8%) 时最大。即综合考虑能量 (寄生电容和分布电容的影响) 及理论灵敏度时, 压电层厚度最优为 4.6 μm 。

此外, 还研究了不同电极面积对实际灵敏度的影响。图 7 为归一化坐标下, 电能 E 及理论灵敏度 S 随电极面积的变化, 虚线为两者的乘积。由图 7 可以看出, 随着电极面积的增加, S 逐渐降低, E 先增加后减小; 而两者的乘积在电极面积为压电层的 50% 时最大。即采用综合考虑能量 E (寄生电容和分布电容的影响) 及理论灵敏度 S 的方法对电极面积进行优化时, 电极面积最优为压电层的 50%。

当电极面积为压电层的 50% 时, 3 种不同结构的理论灵敏度 S 随压电层厚度的变化如图 8 所示。

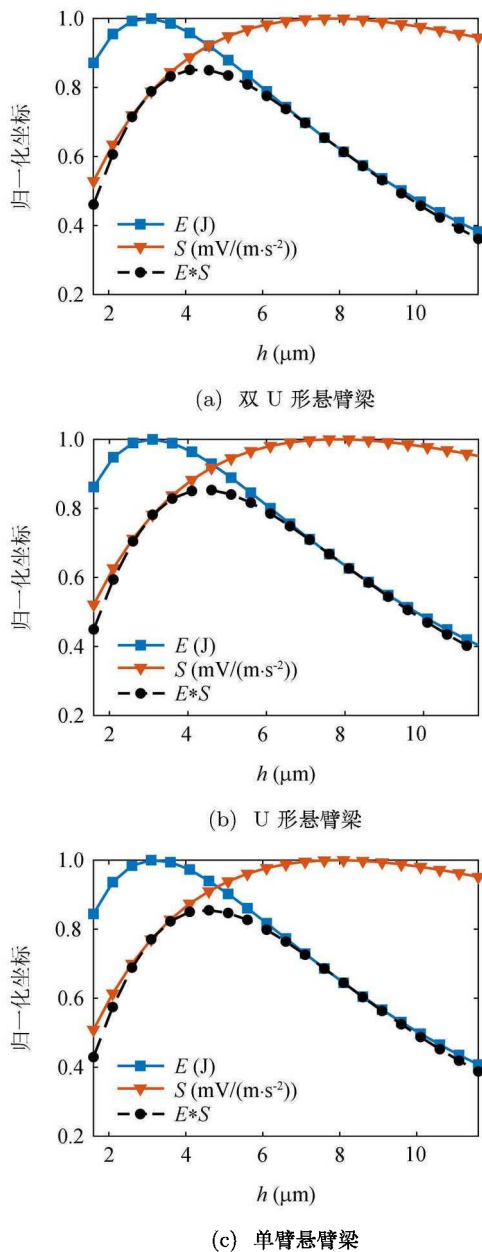


图 6 归一化坐标下, 不同结构的电能 E 及加速度灵敏度 S 随压电层厚度的变化

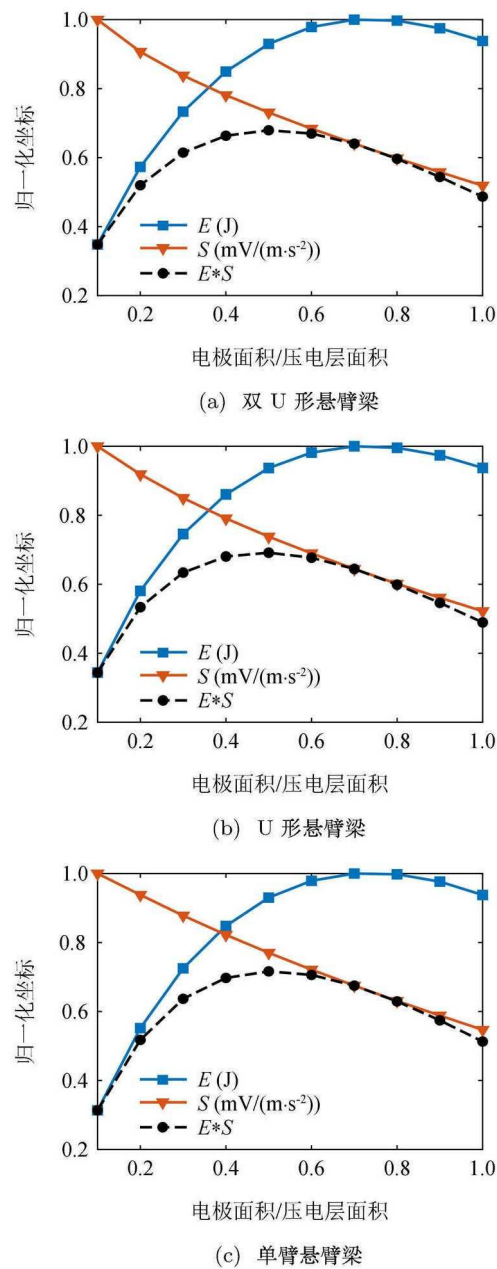


图 7 归一化坐标下, 不同结构的电能 E 及加速度灵敏度 S 随电极面积的变化

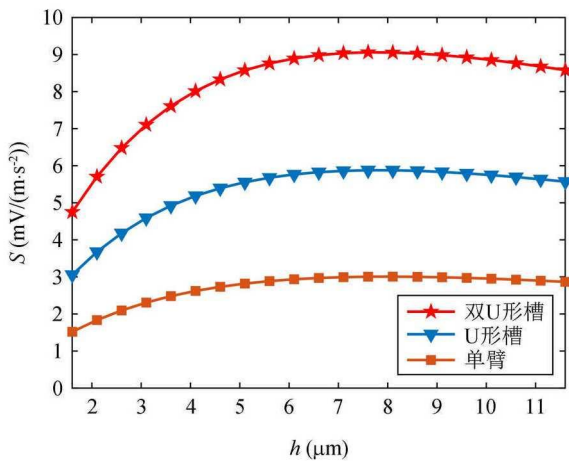


图 8 不同结构的加速度灵敏度随压电层厚度的变化

由图 6 可知，当压电层厚度为 4.6 μm 时，能最大程度地提高器件的实际灵敏度，此时双 U 形结构的理论灵敏度 S 为单臂结构的 3.05 倍，相应的双 U 形结构的矢量水听器的等效声压灵敏度比单臂结构提高了 9.7 dB。

2 制备与封装

2.1 制备

基于 ZnO 的 MEMS 压电式矢量水听器芯片的具体结构包括 Si 材质的基底，由 Si 梁、SiO₂ 层、压电层和上下电极组成的复合悬臂梁，以及 Si 材质的质量块。上下电极选择在悬臂梁根部处，其面积分别为压电层的 20%，50% 和 66%。图 9 是不同电极面积的芯片结构图，详细的微加工技术与先前的报道一致^[31]。其中，由于 ZnO 越厚，图形化时的侧向腐蚀

越严重，将大大减小 ZnO 压电层的有效尺寸，严重影响器件的性能。因此，本文制备的 ZnO 厚度选择为 1.6 μm ，在未来，我们将进一步对 ZnO 层的图形化工艺进行研究与优化，使 ZnO 层的厚度达到仿真的最优 — 4.6 μm 。在我们之前的研究报道中^[32]，我们已详细研究过压电材料 ZnO 薄膜的制备与优化，并对其微观结构进行了测试与分析。从 XRD 图可以看出，制备的 ZnO 薄膜是具有 (002) 择优生长的，说明其具有明显的压电性能。并且，研制了基于此 ZnO 薄膜材料的 MEMS 压电传声器，测试得到其具有较高的灵敏度，也证明了我们制备的 ZnO 薄膜良好的压电性能。

图 10 为切片后 MEMS 压电矢量水听器芯片实物图、光学显微照片、以及 SEM 图，芯片尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 0.52 mm。可以看出，器件的结构完整，

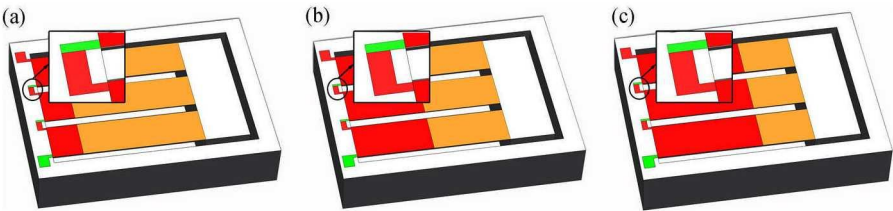


图 9 不同电极面积的双 U 形槽结构
(a) 压电层面积的 20%; (b) 压电层面积的 50%; (c) 压电层面积的 66%)

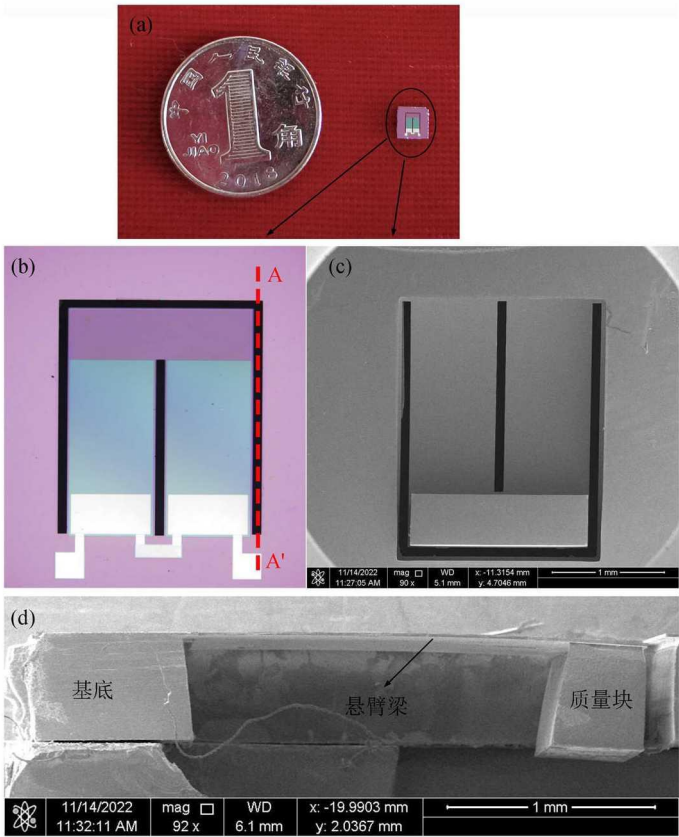


图 10 MEMS 压电式矢量水听器芯片 ((a) 切片后的实物图; (b) 芯片结构正面的光学显微照片; (c) 芯片结构背面的 SEM 图; (d) 芯片结构从 AA' 截面观察的 SEM 剖面图)

振膜平整，无翘曲变形，电极和压电层未受损。另一方面，从剖面图可以看出复合振动悬臂梁结构具有初始位移，这主要是由质量块带来的。结果表明，此工艺过程可以有效地保持结构的完整性。

2.2 芯片的封装

MEMS 压电矢量水听器芯片的具体封装结构如图 11(a) 所示。由于 MEMS 压电芯片的等效电容量

非常小，相当于一个高输出阻抗的元件，因此电路部分需包含阻抗匹配电路。本文采用低噪声的 JFET 进行阻抗匹配，同时电路对采集到的信号进行了 50 倍 (34 dB) 的放大，电路原理图如图 11(b) 所示。ABS 塑料环是为了给芯片的振动提供一定体积的空腔。封装后的实物图如图 12 所示，铝壳内包含有 MEMS 矢量水听器芯片、ABS 塑料环和具有匹配电路的电路板。

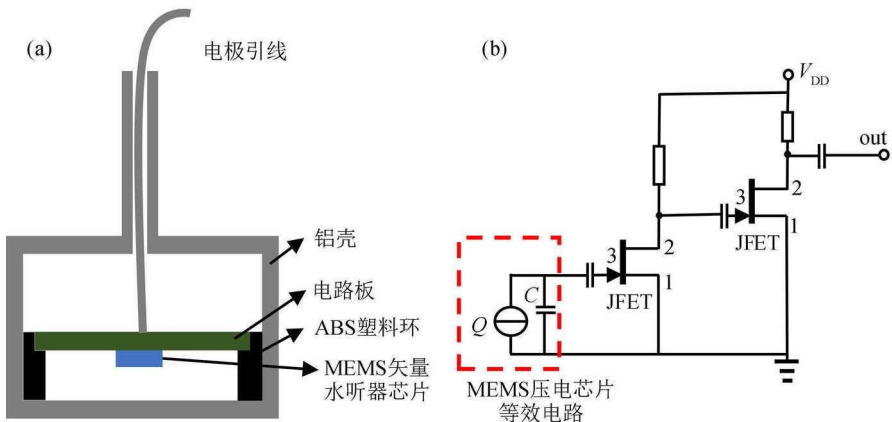


图 11 MEMS 压电矢量水听器芯片的封装 ((a) 封装结构示意图; (b) 电子原理框图)

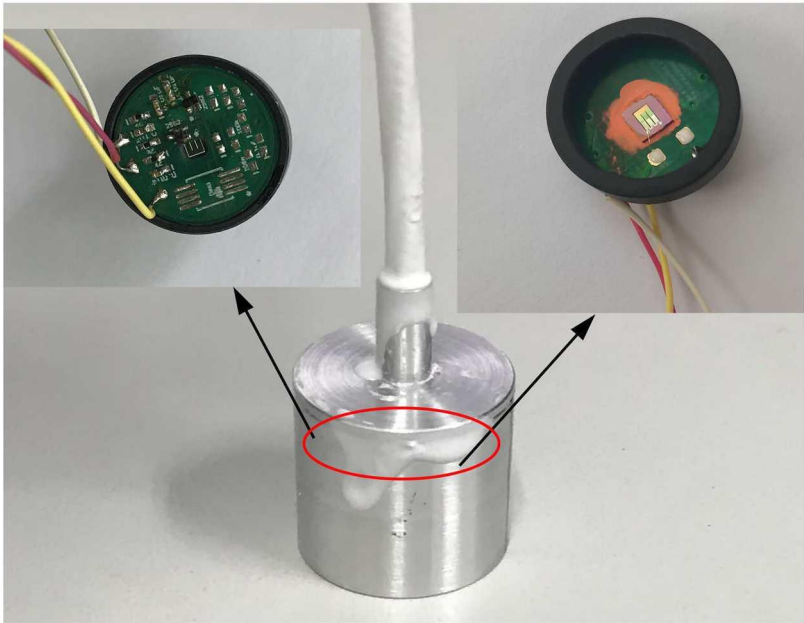


图 12 封装后的实物图

3 测试与分析

MEMS 压电矢量水听器敏感元件的加速度灵敏度主要通过电压输出型的标准加速度计 (CA-YD-1181, 加速度灵敏度为 100 mV/g) 进行比较标定获得。测量系统如图 13 所示，包括动态信号分析仪 (Agilent 35670A)、功率放大器 (B&K 2712)、振动台

(B&K 4813)、标准加速度计和被测量的 MEMS 压电矢量水听器敏感元件。

如图 14 所示为双 U 形槽结构在不同电极面积下的加速度灵敏度的频响特性曲线。可以看出，器件的谐振频率在 800 Hz~1 kHz 之间。当电极面积为压电层的 50% 时，器件的灵敏度最大，而不是 20% (不考虑杂散电容时，理论灵敏度更高)，与图 7 中的仿真结果一致。说明综合考虑理论灵敏度和能量的优

化方法比只考虑理论灵敏度的优化方法更为合理。

当电极面积为压电层的 50% 时, 3 种不同结构测得的加速度灵敏度的频响特性曲线如图 15 所示。由图 15 可以看出, 双 U 形槽结构的加速度灵敏度最大, U 形槽结构次之, 单臂结构最小, 与图 8 中的仿真结果一致。另外, 双 U 形槽结构的加速度灵敏度约为单臂结构的 2 倍。与仿真结果相比, 实际测得的灵敏度较低, 造成这一结果的主要原因是实际器件

中使用的 ZnO 薄膜的压电系数远小于仿真分析中使用的 ZnO 体材料的压电系数^[23]。

由式 (1) 可知矢量水听器的等效声压灵敏度级 (dB) 为^[23]:

$$20 \lg M_p = -227.5 + 20 \lg M_a + 20 \lg f, \quad (7)$$

其中, f 为振动频率。由式 (7) 可得本文制备的不同结构的 MEMS 压电矢量水听器的等效声压灵敏度的



图 13 MEMS 压电矢量水听器敏感元件测量系统

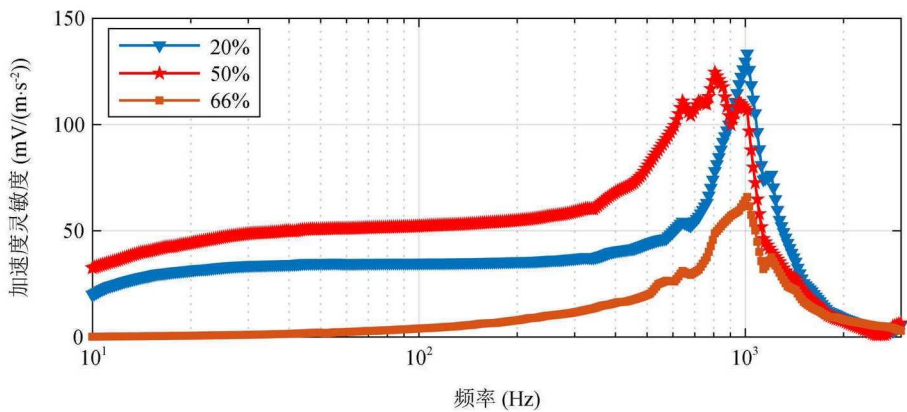


图 14 不同电极面积下, 双 U 形槽结构的加速度灵敏度的频响特性曲线

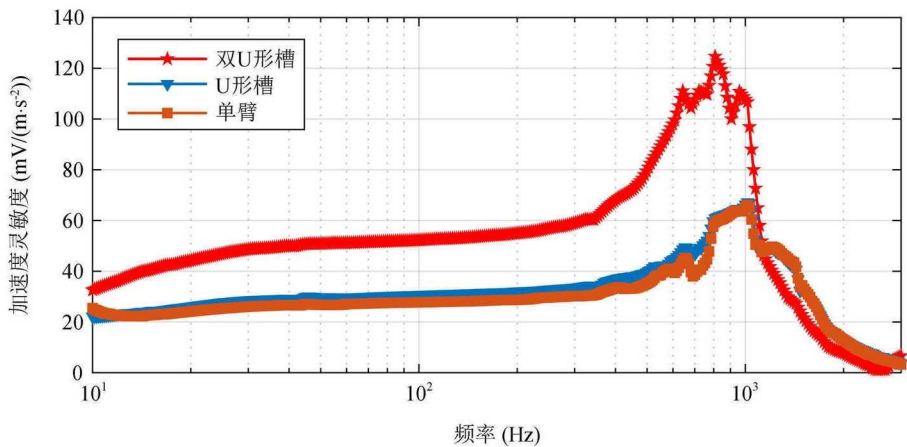


图 15 电极面积为压电层的 50% 时, 不同结构的加速度灵敏度的频响特性曲线

频响特性曲线,如图 16 所示。可以看出,在 10 Hz~1 kHz 范围内,矢量水听器的等效声压灵敏度随着频率的升高,基本呈线性增加,并且每倍频程增加 6 dB,由式 (7) 也可得出此结论。此外,双 U 形槽结构的等效声压灵敏度仍然表现出最大的响应,比单臂悬臂梁结构的等效声压灵敏度高约 5.9 dB,在 1 kHz 时的灵敏度为 -186.8 dB (Ref. 1 V / μ Pa,放大 34 dB)。与文献 23 中报道的 MEMS 压电矢量水听器相比,本文制作的水听器的原始灵敏度提高了 8.7 dB (去除放大的影响)。与近年来得到广泛研究的仿生式 MEMS 矢量水听器相比^[17],本文研究的器件的灵敏度提高了约 7.7 dB (同样去除放大的影响)。结果表明,本文研制的双 U 形槽矢量水听器能有效地提高 MEMS 矢量水听器的灵敏度。

x 轴 (沿悬臂梁长度方向) 和 y 轴 (沿悬臂梁宽度方向) 方向的灵敏度相对于 z 轴 (沿悬臂梁厚度方向) 方向的灵敏度降低量反应了器件的指向性性能。本文测量了不同结构在 300 Hz (频响较为平坦区域) 和 900 Hz (接近谐振频率区域) 下的 x, y, z 三轴方向的灵敏度,并计算了 x 轴和 y 轴相对于 z 轴的灵敏度降低量,如图 17 所示。可以看出,指向性随着频率的增加而降低; x 轴方向的灵敏度降低量明显低于 y 轴方向的灵敏度降低量,造成这一结果的主要原因是:质量块的存在导致悬臂梁产生了弯曲,使得在加速度作用下,沿着悬臂梁的长度方向的振动比宽度方向的振动更加强烈。与单臂悬臂梁结构相比,U 形槽的加入在一定程度上降低了器件的指向性,双 U 形槽结构的最大降低量可达 26 dB。

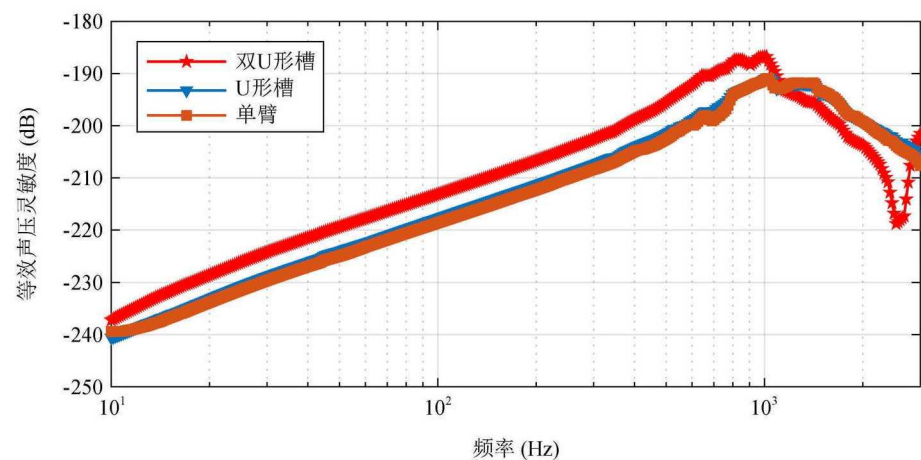


图 16 不同结构的 MEMS 压电矢量水听器的等效声压灵敏度的频响特性曲线

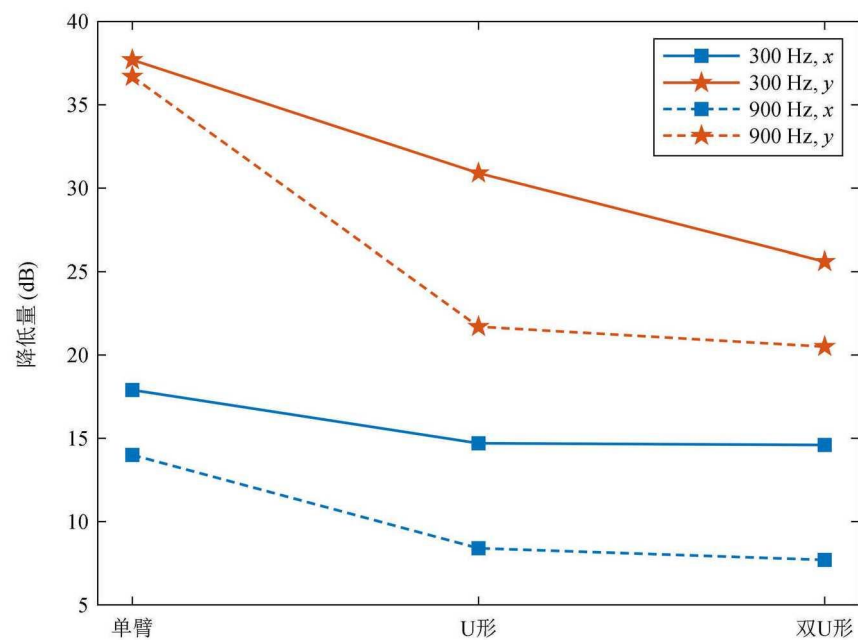


图 17 在 300 Hz 和 900 Hz 处,与 z 轴相比, x 轴和 y 轴的灵敏度降低量

灵敏度和指向性是矢量水听器两个十分重要的指标, 高的灵敏度有利于对于远距离弱目标信号的探测; 高的指向性一方面有利于抑制声场中的各向同性噪声和干扰, 更重要的是有利于实现对于声源的定位。由 Si 梁、SiO₂ 绝缘层和 ZnO 压电层组成的复合悬臂梁结构的中性面距 ZnO 层下表面的距离 a 可表示为^[31]:

$$a = \frac{E_b h^2 + E_c h_c^2 - E_p h_p^2 + 2E_b h h_c}{2(E_b h + E_c h_c + E_p h_p)}. \quad (8)$$

复合梁的等效弯曲刚度 EI 为:

$$EI = \frac{b}{3} \{ E_b [h^3 - 3h^2(a - h_c) + 3h(a - h_c)^2] + E_c [h_c^3 - 3ah_c^2 + 3h_c a^2] + E_p [h_p^3 + 3ah_p^2 + 3h_p a^2] \}, \quad (9)$$

其中, b 为复合梁的宽度, h , h_c 和 h_p 分别为 Si 梁、SiO₂ 层和 ZnO 压电层的厚度, E_p , E_b 和 E_c 分别为 ZnO, Si 和 SiO₂ 的杨氏模量。刻 U 形槽会降低梁宽 b , 从而使敏感结构的等效弯曲刚度降低, 在提高 z 轴方向的灵敏度的同时, 也会使 x 轴和 y 轴的横向灵敏度得到提高, 从而在一定程度上降低了结构的指向性。后续我们将通过提出降低质量块的横向自由度的方法来提高器件的指向性。另一方面, 可对高压电性能的 ZnO 薄膜材料进行研制与优化, 通过提高材料的压电性能来达到灵敏度的提高, 而不以牺牲指向性为代价。与仿生式 MEMS 矢量水听器相比, 本文研制的 MEMS 压电式矢量水听器的灵敏度提高了约 7.7 dB, 同时指向性降低了约 4 dB。总体来说本文研制的 MEMS 压电式矢量水听器具有明显的指向性, 以及较高的灵敏度, 具有一定的应用优势。

4 结论

本文对一种具有 U 形槽或双 U 形槽结构的 MEMS 压电矢量水听器进行了理论仿真、结构优化和器件研制。为了更准确地优化器件结构, 提出了理论灵敏度和能量结合的综合分析方法。采用微机械加工技术制备了基于 ZnO 压电薄膜的矢量水听器芯片, 并对制备的芯片进行了封装与性能测试。实验结果表明, 当电极面积为 ZnO 薄膜的 50% 时, 灵敏度达到最大, 而不是 20% (不考虑杂散电容时, 理论灵敏度更高)。通过分析, 我们可以得出结论, 理论灵敏度和能量的综合优化方法明显比仅考虑理论灵敏度时更准确。这主要是由于实际器件中的杂散电容较大, 采用综合优化的方法可以较为准确地分析杂散电容对器件实际灵敏度的影响。此外, 具有双 U 形

槽结构的 MEMS 压电矢量水听器的灵敏度比单臂悬臂梁结构高约 5.9 dB, 其在 1 kHz 下的等效声压灵敏度为 -186.8 dB (Ref. 1 V/μPa, 放大 34 dB), 并且具有良好的指向性。

参 考 文 献

- 1 Saheban H, Kordrostami Z. Hydrophones, fundamental features, design considerations, and various structures: A review. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2021; **329**(1): 112790
- 2 Rebello K J, Kitchin D A, Henrick R F *et al.* Lowcost MEMS hydrophones. *Proc. SPIE 6540, Optics and Photonics in Global Homeland Security III*, 2007: 65400W
- 3 Amiri P, Kordrostami Z, Ghoddus H. Design and simulation of a flat cap mushroom shape microelectromechanical systems piezoelectric transducer with the application as hydrophone. *IET Sci. Meas. Technol.*, 2020; **14**(2): 157—164
- 4 Amiri P, Kordrostami Z. Sensitivity enhancement of MEMS diaphragm hydrophones using an integrated ring MOSFET transducer. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, 2018; **65**(11): 2121—2130
- 5 Bernstein J. A micromachined condenser hydrophone. In: *Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, IEEE, 1992: 4359057
- 6 陈丽洁, 张鹏, 徐兴烨等. 矢量水听器综述. *传感器与微系统*, 2006; **25**(6): 5—8
- 7 Li S Y, Hsu C C, Lin S Z *et al.* A novel design of piezoresistive type underwater acoustic sensor using SOI wafer. *Oceans -asia Pacific IEEE*, 2007: 9859558
- 8 Leslie C B, Kendall J M, Jones J L. Hydrophone for measuring particle velocity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1956; **28**(4): 711—715
- 9 Berliner M J, Lindberg J F. Acoustic particle velocity sensor: design, performance, and applications. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996; **100**(6): 3478—3479
- 10 Liu C. *Foundations of MEMS*. 2nd Ed. 2013
- 11 Abraham B M. Low-cost dipole hydrophone for use in towed arrays. *AIP Conference Proceedings*, 1996; **368**(1): 189—201
- 12 陈丽洁, 杨士莪. 压阻式新型矢量水听器设计. *应用声学*, 2006; **25**(5): 273—278
- 13 Chen S, Xue C Y, Zhang B Z *et al.* A novel MEMS based piezoresistive vector hydrophone for low frequency detection. *Proceedings of the 2007 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007: 1839—1844
- 14 Xue C Y, Chen S, Zhang W D *et al.* Design, fabrication, and preliminary characterization of a novel MEMS bionic vector hydrophone. *Microelectron. J.*, 2007; **38**(10-11): 1021—1026
- 15 Zhang G J, Wang P P, Guan L G *et al.* Improvement of the MEMS bionic vector hydrophone. *Microelectron. J.* 2011; **42**(5): 815—819
- 16 Liu Y, Wang R X, Zhang G J *et al.* "Lollipop-shaped" high-sensitivity Microelectromechanical Systems vector hydrophone based on Parylene encapsulation. *J. Appl. Phys.*, 2015; **118**(4): 044501
- 17 Xu W, Liu Y, Zhang G J *et al.* Development of cup-shaped micro-electromechanical systems-based vector hydrophone.

- J. Appl. Phys.*, 2016; **120**(12): 124502
- 18 Chen P, Zhang G J, Yang X *et al.* Design and realization of sculpture-shaped ciliary MEMS vector hydrophone. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2021; **331**(10–11): 112575
- 19 Li J, Chen L, Gong Z *et al.* A low-noise MEMS acoustic vector sensor. International Conference on Optoelectronics & Microelectronics, IEEE, 2013: 13839287
- 20 Zhang P, Shi X, Chen H T. Research on capacitance attitude self-correction vector hydrophone. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), 2013: 13839280
- 21 van Baar J, Dijkstra M, Wiegerink R *et al.* Arrays of cricket-inspired sensory hairs with capacitive motion detection. 18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS, 2005: 8477303
- 22 Bernstein J. A micromachined condenser hydrophone. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 5th Technical Digest, IEEE, 1992: 4359057
- 23 李俊红, 魏建辉, 马军, 任伟, 刘梦伟, 汪承灏. ZnO 薄膜硅微压电矢量水听器. *声学学报*, 2016; **41**(3): 273—280
- 24 Lu N, Li J H, Liu M W *et al.* Design of MEMS piezoelectric vector hydrophone. *Key Eng. Mater.*, 2013; **562–565**: 1143—1148
- 25 Hu Z, Chen H J. The research on 1–3 type piezoelectric composite material application in vector hydrophone. IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), IEEE, 2016: 16212092
- 26 Ganji B A, Nateri M S, Dardaël M. Design and modeling of a novel high sensitive MEMS piezoelectric vector hydrophone. *Microsyst. Technol.*, 2018; **24**: 2085—2095
- 27 Chen H J, Hong L J. Vector hydrophone of the resonant-column type using a piezoelectric bilaminar sensing element. *J. Appl. Acoust.*, 2003; **22**(3): 25—28
- 28 Shi S Z, Geng W P, Bi K X *et al.* Design and fabrication of a novel MEMS piezoelectric hydrophone. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2020; **313**: 112203
- 29 Li D N, Fan Q Q, Li J H *et al.* Design and analysis of a novel MEMS piezoelectric accelerometer for vector hydrophone. 13th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2019: 18584307
- 30 樊青青, 李俊红, 翟禹光. MEMS 压电式矢量水听器仿真与结构优化. *压电与声光*, 2021; **43**: 587—591
- 31 Fan Q Q, Li J H, Zhai Y G *et al.* Numerical simulation and experimental analysis of directivity of a MEMS piezoelectric vector hydrophone. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2022; **61**: 096501
- 32 Li J H, Wang C H, Ren W *et al.* ZnO thin film piezoelectric micromachined microphone with symmetric composite vibrating diaphragm. *Smart. Mater. Struct.*, 2017; **26**(5): 055033