

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

MEMS 压电水听器和矢量水听器研究进展*

李俊红[†] 马 军 魏建辉 任 伟

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 基于微电子机械系统制造技术的 MEMS 压电水听器和矢量水听器具有小型化、低功耗、低成本、易成阵、无源、噪音低等优点。对基于 ZnO 薄膜的 MEMS 水听器和矢量水听器进行了研究, 测试结果表明, 硅微压电水听器的灵敏度为 -192 dB (ref. 1 V/ μ Pa), 基本达到实用化的要求。MEMS 压电矢量水听器等效声压灵敏度为 -229.5 dB (ref. 1 V/ μ Pa), 比同类型压阻式 MEMS 矢量水听器的灵敏度高 17 dB, 但还未达到实用化要求。为了进一步提高 MEMS 矢量水听器的灵敏度, 设计了具有 U 形槽的压电复合悬臂梁结构和电极串联结构, 采用具有更高压电系数的掺钒 ZnO 薄膜作为压电层, 并对 MEMS 制备工艺进行了改进, 有望显著提高 MEMS 矢量水听器的灵敏度。

关键词 微电子机械系统, 水听器, ZnO 薄膜, 灵敏度

中图分类号: TN384

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)01-0101-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.015

Research progress of MEMS piezoelectric hydrophone and vector hydrophone

LI Junhong MA Jun WEI Jianhui REN Wei

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

Abstract MEMS piezoelectric hydrophone and vector hydrophone have the advantages of miniaturization, low power consumption, low cost, easy to array, low noise, passive. The MEMS hydrophone and vector hydrophone based on ZnO films were studied. The results show that the sensitivity of silicon micro piezoelectric hydrophone is -192 dB (ref. 1 V/ μ Pa), which basically meets the practical requirements. The equivalent acoustic pressure sensitivity of MEMS vector hydrophone is -229.5 dB (ref. 1 V/ μ Pa), which is 17 dB higher than that of the same type of MEMS piezoresistive vector hydrophone, but has not met the practical requirements. In order to further improve the sensitivity of MEMS vector hydrophone, the separated electrodes series structure and the piezoelectric composite cantilever structure with U grooves were used in the design of MEMS vector hydrophone, the vanadium doped ZnO film with a higher piezoelectric coefficient was used as piezoelectric layer, and the MEMS process of piezoelectric hydrophone was improved.

Key words Micro-electro-mechanical systems, Hydrophone, ZnO film, Sensitivity

2017-10-31 收稿; 2017-12-01 定稿

*国家自然科学基金项目 (11074274, 11174319, 11474304)

作者简介: 李俊红 (1976-), 男, 山西运城人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向: 声学 MEMS。

[†] 通讯作者 E-mail: ljh@mail.ioa.ac.cn

1 引言

水听器是测量流体中声场(声压)的器件,其中压电式水听器是最为普遍采用的一种水听器。矢量水听器是能测量水下声场的质点位移、速度、加速度等矢量信息,从而使水声测量系统的线谱检测能力、抗干扰能力以及抗各向同性噪声的能力得到明显提高。低频、小型化、阵列化、低功耗、低成本是水听器和矢量水听器发展的重要方向,特别是在一些要求空间小的鱼雷和水雷、无人潜航器,以及低功耗、低成本的声纳浮标及具有较长阵列的拖曳阵等领域。基于微细加工技术的微电子机械系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)水听器和矢量水听器能满足这一要求。

与大多数的MEMS声传感器相同,MEMS水听器和矢量水听器主要有电容式、压阻式和压电式三种^[1-5]。MEMS压阻式水听器和矢量水听器,其优点是制备技术与已有半导体微细加工技术一样已经成熟,结构也比较简单,因此制作比较容易,但其缺点是灵敏度低。作为参考,MEMS压阻传声器灵敏度仅为 $25\text{ }\mu\text{V}/\text{Pa}$ ^[6],MEMS压电传声器已达到 $1\text{ mV}/\text{Pa}$ ^[7],即大40倍,差32 dB之多。MEMS压阻式加速度计灵敏度在5 V直流电压下为 $1\text{ mV}/\text{g}$ ^[8],而MEMS压电式加速度计可达到 $7\text{ mV}/\text{g}$ ^[9]。其次,由于压阻式矢量水听器工作时需要加电压,一方面使能耗增加,另外更为严重的问题是,由于焦耳热,将产生额外的所谓电阻器噪声^[10],这需要它具有更高的灵敏度。而压电式的是无源的,不存在这个问题。不仅简化了电路结构,而且无源,噪声低。如MEMS水听器和矢量水听器做成电容式,其灵敏度可能是最高的。作为参考,MEMS电容式传声器的灵敏度可达 $8\sim 10\text{ mV}/\text{Pa}$,相比MEMS压电传声器的 $1\text{ mV}/\text{Pa}$ 高出约20 dB,但是它也是需要DC-DC变换器来提供偏置电压。更加重要的,MEMS电容式矢量水听器,在一个相对大的电容极板间有一个细微的气隙,只有 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$,如作矢量水听器在其膜上附加质量块,这样更容易形成粘连。相对而言,MEMS压电水听器和矢量水听器具有无源、噪音低、结构简单、换能材料换能效率高等优点。本文首先回顾了中科院声学所在MEMS压电水听器和矢量水听器方面的研究成果。为了进一步改善MEMS矢量水听器的性能,提出具有U形槽的压电复合悬

臂梁结构和电极串联结构,采用具有更高压电系数的掺钒ZnO薄膜作为压电层,并改进了体硅刻蚀和压电厚膜图形化等工艺。

2 MEMS压电水听器和矢量水听器研究

MEMS水听器主要部件是一个声压传感器,由于采用弯曲振动,所以工作频率较低。MEMS矢量水听器是测量声场的质点速度和加速度的器件,其核心部件则是由一个惯性质量加上一弹性支撑所构成的矢量传感器。弹性支撑梁采用弯曲振动方式使之在较低的频率下工作,并保持有小的尺寸。

2.1 MEMS压电水听器

中科院声学所研制的MEMS压电水听器的核心传感芯片是由压电薄膜和氮化硅等基底薄膜组成的^[11]。我们研究了基于氧化锌薄膜的MEMS声压传感器,并对其进行了封装构成了MEMS压电水听器。如图1所示,把MEMS压电传感器粘接在开孔的底板上,并作好防水处理,为了防止短路,氮化硅等基底膜接触水。把匹配电路也粘接在底板上,通过硅铝丝压焊电连接,并引出引线,封装外壳。封装后的MEMS水听器体积小于 1 cm^3 。对于MEMS水听器的测量采取分频段完成,低频段($20\text{ Hz}\sim 1\text{ kHz}$)采用振动液柱法进行测量,高频段($1\text{ kHz}\sim 20\text{ kHz}$)在消声水池中用比较法进行测量。图2为所测量的曲线,可以看出在 1 kHz 灵敏度为 $-192\text{ dB}(\text{ref. } 1\text{ V}/\mu\text{Pa})$ 。

最近我们对MEMS声压传感器做了改进,其在空气中的灵敏度比以前的灵敏度提高了 10 dB ^[7,12],这意味着MEMS水听器的灵敏度也会得到提高, 1 kHz 灵敏度将达到 $-180\text{ dB}(\text{ref. } 1\text{ V}/\mu\text{Pa})$ 左右,已满足了实用化的要求。

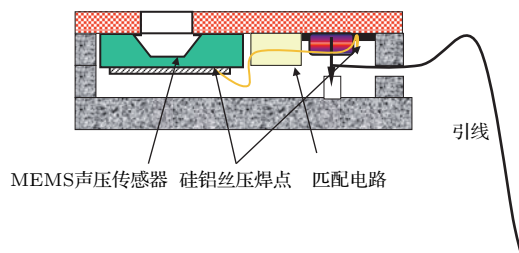


图1 MEMS水听器封装结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of package structure of MEMS hydrophone

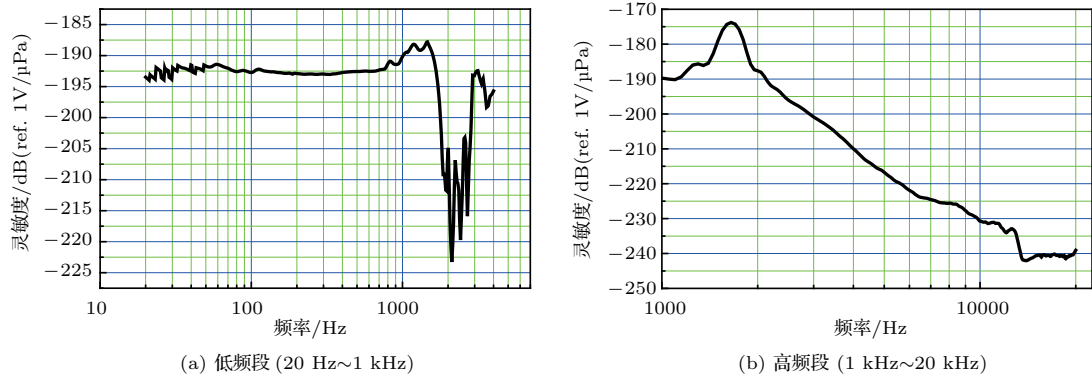


图2 MEMS 水听器频率响应曲线

Fig. 2 Frequency response curve of MEMS hydrophone

2.2 MEMS 压电矢量水听器

MEMS 压电矢量水听器的核心传感部件是压电加速度计。如图3所示, MEMS 压电加速度计主要结构为顶端带有质量块的压电复合悬臂梁。质量

块一般都由体硅刻蚀工艺形成, 压电复合悬臂梁主要包含硅层、氧化层、上下电极和压电层。

通过近似解析分析, MEMS 压电加速度计的灵敏度 M_a 可以表示为^[13]

$$M_a = \frac{1}{2} g_{31} E_p \frac{m(l + l_m) \cdot h_p}{\left(\frac{E_b}{3}\right)(h^3 - 3ah^2 + 3a^2h) + \left(\frac{E_p}{3}\right)(h_p^3 + 3ah_p^2 + 3a^2h_p)} \cdot \frac{h_p/2 + a}{b}, \quad (1)$$

其中, E_p 和 E_b 分别为压电薄膜和基底层的等效杨氏模量, h 和 b 分别为压电复合悬臂梁的厚度和宽度, h_p 为压电层的厚度, a 为压电层与基底接触面到压电复合悬臂梁中性面的距离, l 和 l_m 分别为悬臂梁的长度和质量块的边长。可见 MEMS 压电加速度计的灵敏度与压电薄膜的压电系数 g_{31} 成正比。而压电薄膜的 g_{31} 与压电系数 d_{31} 成正比, 与压电薄膜的介电常数成反比。MEMS 器件中常用的压电薄膜主要有锆钛酸铅 (PZT) 薄膜、氧化锌 (ZnO) 薄膜和氮化铝 (AlN) 薄膜。其中 AlN 薄膜的压电系数最低, 而常用的 PZT 薄膜虽然压电系数 d_{31} 最高, 但同时它的介电常数也很高, 所以 ZnO 薄膜的压电系数 g_{31} 最高, 最适合作为 MEMS 压电加速度传感器的压电层。

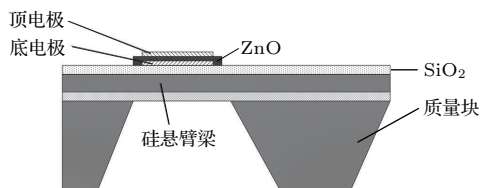


图3 MEMS 压电矢量水听器传感芯片结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of MEMS piezoelectric hydrophone sensor chip

我们通过微加工技术研制了基于 ZnO 薄膜的 MEMS 压电加速度传感芯片, 单个芯片的尺寸约为 $6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。将制得的 MEMS 压电加速度计粘接在材质为铝的同振壳体的底面上, 并配有泡沫塑料浮体, 使得平均密度接近 1.1 g/cm^3 。图4为封装后的 MEMS 压电矢量水听器, 测试和实际应用时需将 MEMS 压电矢量水听器悬挂在弹簧框架结构上。对所制备的 MEMS 压电矢量水听器进行了测试, 如图5所示。从图5中可看出在 1 kHz 时等效声压灵敏度为 $-229.5 \text{ dB (ref. 1 V/μPa)}$, 比同类型的压阻式 MEMS 矢量水听器的灵敏度高 17 dB 以上^[5]。同时也可以看出频率改变一个倍频程, 其等效声压



图4 MEMS 压电矢量水听器

Fig. 4 MEMS piezoelectric vector hydrophone

灵敏度改变约 6 dB, 这一变化规律也是所有加速度计矢量水听器所共有的规律。MEMS 压电矢量水听器由于所使用的换能材料的换能效率高, 所以相对于 MEMS 压阻式矢量水听器, 灵敏度得到明显提高。但灵敏度还需要进一步提高, 才能满足实用化的要求。

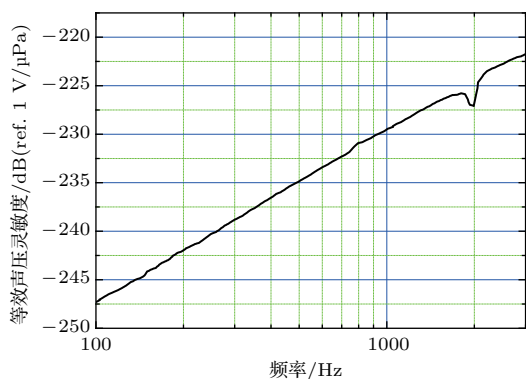


图5 MEMS 压电矢量水听器的等效声压灵敏度频率响应

Fig. 5 The equivalent acoustic pressure sensitivity of MEMS piezoelectric vector hydrophone

3 MEMS 压电矢量水听器结构和工艺改进

为了进一步提高 MEMS 矢量水听器的灵敏度, 我们对其结构、制备工艺和压电薄膜性能等方面进行了改进。首先在工艺方面, 现有的 MEMS 压电矢量水听器的灵敏度要明显低于理论分析结果, 造成这个现象的一个重要原因是制备工艺的限制, 使矢量水听器的结构没有满足理论分析的优化结构要求。所以需要体硅刻蚀和压电厚膜刻蚀等工艺进行改进, 以提高灵敏度。在结构方面, 如图6所示我们把多个 MEMS 压电加速度计粘接在一绝缘板上, 并通过硅铝丝进行电连接, 使多个加速度计在电学上串联。这样, 从理论上讲, n 个加速度计进行串联, 则最终加速度计的灵敏度就会提高 n 倍。从而, 使最终封装后的 MEMS 压电矢量水听器的灵敏度得到提高^[14]。在单个 MEMS 压电加速度计芯片方面, 我们也作了改进。如图7所示, 通过在压电复合悬臂梁上刻蚀 U 形槽, 使原来单个的压电复合悬臂梁变成多个独立的、共用一个质量块的压电复合悬臂梁, 并且多个独立悬臂梁上的压电换能器被串联起来。通过模拟分析可知, 采用 U 形槽结构后, 每个独立的压电悬臂梁加速度计的灵敏度是原来加速

度计灵敏度的 1.5 倍, 再加上电极串联, 最终加速度计的灵敏度将有明显提高。以有三个 U 形槽的加速度计芯片为例, 灵敏度将是原来的 6 倍, 而封装后的 MEMS 压电矢量水听器的灵敏度将提高近 16 dB。若 U 形槽数量增加为 10 个, 则灵敏度将提高 24 dB。

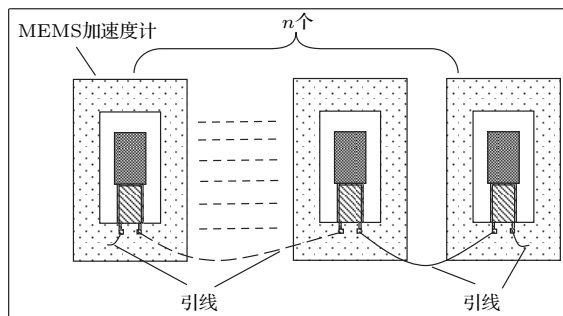


图6 具有串联结构的 MEMS 压电矢量水听器芯片结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a MEMS piezoelectric vector hydrophone with separated electrodes series

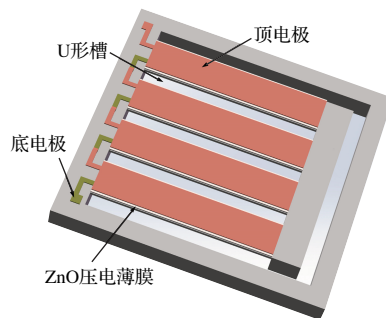


图7 具有 U 形槽结构的 MEMS 压电矢量水听器芯片结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of MEMS piezoelectric vector hydrophone with U grooves structure

提高氧化锌压电薄膜的压电系数, 是提高 MEMS 矢量水听器灵敏度的另外一个重要方法, 研究表明掺钒后氧化锌薄膜的压电系数将会提高一个数量级^[15], 也将意味着最终的水听器的灵敏度将提高 20 dB。我们对掺钒氧化锌薄膜进行了研究, 研制出成分均一的薄膜, 后续的研究正在进行中。通过以上的结构优化和工艺改进, MEMS 压电矢量水听器的灵敏度有望得到明显提高。

4 结论

MEMS 压电水听器和矢量水听器具有无源、噪音低、结构简单等优点。研制了基于氧化锌薄膜的

MEMS 压电水听器和矢量水听器。测试结果表明通过封装获得的硅微压电水听器,灵敏度为 -192 dB (ref. $1\text{ V}/\mu\text{Pa}$),通过传感芯片结构和工艺改进, MEMS 压电水听器的灵敏度可达到 -180 dB 左右,满足了实用化需求。MEMS 压电矢量水听器等效声压灵敏度为 -229.5 dB (ref. $1\text{ V}/\mu\text{Pa}$),比同类型压阻式 MEMS 矢量水听器的灵敏度高 17 dB 。为了进一步提高 MEMS 矢量水听器的灵敏度,在结构、压电薄膜和微加工工艺方面都做了改进。设计了具有串联结构的 MEMS 压电矢量水听器,理论上将 n 个传感芯片串联,灵敏度就会提高 n 倍。设计了具有 U 形槽的压电复合悬臂梁 MEMS 矢量水听器,采用 U 形槽结构后,每个独立的压电悬臂梁加速度计的灵敏度是原来加速度计灵敏度的 1.5 倍,再加上电极串联,最终加速度计的灵敏度将有明显提高。对掺钒 ZnO 薄膜进行了研究,可望提高水听器灵敏度 20 dB 。通过采用深度反应离子刻蚀工艺形成合理质量块大小,改进氧化锌沉积和图形化工艺,沉积厚度合理的压电薄膜,最终制备出结构更加合理的 MEMS 矢量水听器。预计可提高灵敏度 $40\text{ dB}\sim 50\text{ dB}$,如能实现最终将能达到矢量水听器实用化的要求。

致谢 感谢吕宁研究生和李东宁研究生在 MEMS 压电加速度计研制中所做的工作。

参 考 文 献

- [1] 陈丽洁. 微型矢量水听器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [2] Guan L G, Zhang G J, Xu J, et al. Design of T-shape vector hydrophone based on MEMS[J]. Sens. Actuators, A, 2012, 188(1): 35-40.
- [3] Zhou X F, Che L F, Liang S L, et al. Design and fabrication of a MEMS capacitive accelerometer with fully symmetrical double-sided H-shaped beam structure[J]. Microelectron. Eng., 2015, 131(1): 51-57.
- [4] Dai G, Li M, He X P, et al. Thermal drift analysis using a multiphysics model of bulk silicon MEMS capacitive accelerometer[J]. Sens. Actuators, A, 2011, 172(2): 369-378.
- [5] 李俊红, 魏建辉, 马军, 等. ZnO 薄膜硅微压电矢量水听器[J]. 声学学报, 2016, 41(3): 273-280.
LI Junhong, WEI Jianhui, MA Jun, et al. ZnO thin film piezoelectric micromachined vector hydrophone[J]. Acta Acustica, 2016, 41(3): 273-280.
- [6] 格雷戈里 T. A. 科瓦奇. 微传感器和微执行器全书[M]. 张文栋, 译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] 李俊红. 压电薄膜及硅微压电换能器的研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2009.
- [8] 陈宏, 鲍敏杭. 硅微结构加速度传感器空气阻尼的研究[J]. 半导体学报, 1995, 16(12): 921-927.
Chen Hong, Bao Minhang. Air damping of micromechanical silicon accelerometers[J]. J. Semicond., 1995, 16(12): 921-927.
- [9] Zou Q, Tan W, Kim E S, et al. Single and tri-axis piezoelectric-bimorph accelerometers[J]. J. Microelectromech. Syst., 2008, 17(1): 45-57.
- [10] 《电子工业技术词典》编辑委员会. 电子工业技术词典(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 第6章, 6-8.
- [11] 马军, 郝震宏, 徐联, 等. MEMS 压电水听器的研究[C]. 2007' 促进西部发展声学学术交流会, 张家界, 2007.
- [12] Li J H, Wang C H, Ren W, et al. ZnO thin film piezoelectric micromachined microphone with symmetric composite vibrating diaphragm[J]. Smart Mater. Struct., 2017, 26(5): 1-10.
- [13] Lu N, Li J H, Liu M W, et al. Design of MEMS piezoelectric vector hydrophone[J]. Key Eng. Mater., 2013, 562-565: 1143-1148.
- [14] 汪承灏, 李俊红, 魏建辉, 等. 具有串联结构的 MEMS 压电矢量水听器及其制备方法: 中国, 110108193801101414[P]. 2016-05-04.
- [15] Yang Y C, Song C, Wang X H, et al. Giant piezoelectric d33 coefficient in ferroelectric vanadium doped ZnO films[J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(1): 1-3.