

一种低频高灵敏度压电 MEMS 声接收器设计

王登攀^{1,2,3}, 黄晶^{1,2,3}, 赵德锋⁴, 王飞^{1,2,3}, 王露^{1,2,3},
刘文怡^{1,2,3}, 苗晋威^{1,2,3}, 张立宇^{1,2,3}, 袁宇鹏^{1,2,3}, 胡义东^{1,2,3}

(1. 中国电科芯片技术研究院, 重庆 401332; 2. 国知创芯(重庆)科技有限公司, 重庆 401332;

3. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 4. 云南无线电有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 为了提高低频段的灵敏度, 基于 ScAlN 薄膜设计了一种开缝式低频高灵敏度 MEMS 声传感器结构, 并分析了开缝数量对谐振频率和电压输出的影响规律。制作微机电系统(MEMS)声接收器样品, 当谐振频率为 29.3 kHz 时, 在 20~30 kHz 内测得其最高灵敏度高于 -60 dB, 说明所提出的开缝式结构能在低频段实现高灵敏度。

关键词: 压电薄膜; 微机电系统(MEMS); 声接收器

中图分类号: TN384; TN64; TH765; P412.13 **文献标识码:** A

Design of a Low-Frequency High-Sensitivity Piezoelectric MEMS Acoustic Receiver

WANG Dengpan^{1,2,3}, HUANG Jing^{1,2,3}, ZHAO Defeng⁴, WANG Fei^{1,2,3}, WANG Lu^{1,2,3},
LIU Wenyi^{1,2,3}, MIAO Jinwei^{1,2,3}, ZHANG Liyu^{1,2,3}, YUAN Yupeng^{1,2,3}, HU Yidong^{1,2,3}

(1. Academy of Chips Technology, China Electronics Technology Group, Chongqing 401332, China;

2. NIICAS (Chongqing) Technology Co., Ltd, Chongqing 401332, China;

3. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

4. Yunnan Radio Co., Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: To enhance the sensitivity in the low-frequency range, a slotted low-frequency high-sensitivity micro-electromechanical systems (MEMS) acoustic sensor structure was designed based on scandium aluminum nitride (ScAlN) piezoelectric films. The influence of the number of slots on the resonant frequency and voltage output was analyzed. A MEMS acoustic receiver with a resonant frequency of 29.3 kHz was fabricated. The highest sensitivity measured within the frequency range of 20-30 kHz exceeded -60 dB, indicating that the slotted structure proposed in this paper could achieve high sensitivity in the low-frequency range.

Key words: piezoelectric film; MEMS; acoustic receiver

0 引言

压电微机械超声换能器(PMUT)具有尺寸小、结构紧凑、形状可调、易与电路集成、适于 2D 相控和 3D 成像、无需直流偏压、响应速度快及不受电磁干扰等特点。当 PMUT 工作在弯曲振动模态时, 其特点是小尺寸可产生大振幅, 故适用于空气介质中的声波发射和接收。PMUT 的核心换能元件压电薄膜采用氧化锌(ZnO)、锆钛酸铅(PZT)和氮化铝(AlN)等。其中氮化铝薄膜能与 CMOS 兼容, 允许器件与 ASIC 单片集成。氮化铝薄膜因具有较小

的介电常数而适用于接收器, 随着氮化铝制备工艺的发展, 近年来逐渐成为研究热点^[1-7]。根据相关文献报道, 掺 Sc 可有效提升薄膜的压电常数^[8-10], 进而提高器件的接收灵敏度, 可作为本文研究的首选压电材料。

目前, PMUT 谐振频率通常在 50 kHz 以上, 低频段的接收灵敏度较低, 难以直接用于麦克风等声接收器。为了提高低频段的接收灵敏度, 降低结构的谐振频率是一种有效的手段。Tseng 等基于 PZT 压电薄膜, 利用开缝结构提高了微机电系统

(MEMS)麦克风的低频灵敏度和工作带宽^[11],为低频高灵敏度 MEMS 声接收器设计提供了一种新的思路。此外,暂未有其他关于开缝式压电 MEMS 声传感结构的研究报道。

针对压电 MEMS 麦克风、空气中的声接收器等实际应用需求,本文开展了基于 ScAlN 压电薄膜的低频高灵敏度压电 MEMS 声学器件研究,探索新的技术方案。

1 基本结构优化降低谐振频率

图 1 为 PMUT 基本结构图,包含硅基底、氧化硅、硅基板、下电极、压电层、上电极和焊盘等部分,通过压电层可实现电能与机械能之间的相互转换。硅衬底部分空腔的存在,使由被动层、压电层和电极等组成的多层薄膜结构形成了悬空的振膜结构,振膜的弯曲振动可发射和接收超声波。

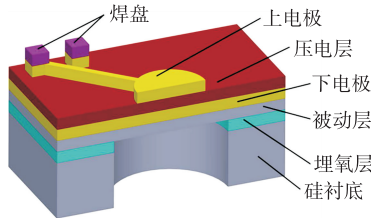


图 1 PMUT 结构剖面图

由图 1 可知,当前结构中多层复合薄膜振动接近圆形薄板边缘固定情况的自由振动,其谐振频率为

$$f_{nm} = \alpha_{nm} \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{(1-\sigma)^2}} \quad (1)$$

式中: α_{nm} 为系数; h 为板的厚度; a 为板的半径; E 为杨氏模量; σ 为泊松比。由式(1)可见,薄板的固有频率与尺寸有关,板越厚,则频率越高;板的直径越大,则频率越低,因此,降低谐振频率的方法是减小膜层厚度和增加膜层直径。对于 PMUT 而言,各膜层厚度受工艺限制,改变背腔直径可以更灵活地调节谐振频率。

为了定量分析谐振频率和接收灵敏度等参数随 PMUT 背腔直径的变化规律,利用 ANSYS 进行了有限元仿真。模型中硅基板厚度为 $8 \mu\text{m}$,压电层为 $2 \mu\text{m}$,压电层为氮化铝,材料参数参考 COMSOL 的材料数据库。利用谐响应分析提取压电层两端输出的电压信号,通过改变不同的尺寸组合得到灵敏度的变化规律,如图 2 所示。由图可见,通过增大背腔直径可降低谐振频率。但是当背腔直径过大时,PMUT 的性能受薄膜内应力等因素影响更明

显,且会增加工艺风险。此外,PMUT 尺寸增大会减少单个晶圆上器件的数量,进而增加器件的成本,因此迫切需要采用新的方式来降低谐振频率。

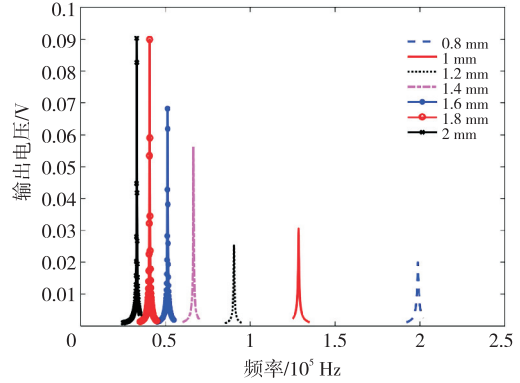


图 2 输出电荷随背腔直径的变化规律图

2 开缝式结构设计

为了降低谐振频率,除了增加背腔的直径外,还可以通过开缝的方式来实现。图 3 为一种开缝结构示意图。由图可见,该结构以开 8 条缝为例,将振膜中上电极、压电层、下电极和部分硅基板用上下贯穿的开缝分割成 8 个悬臂梁结构,有效降低了弯曲振动模态的基频。图 4、5 分别为未开缝和开 8 条缝时弯曲振动模态基片对比图。由图 4 可知,未开缝时频率约为 65.6 kHz。而在尺寸和材料保持不变的情况下,开 8 条缝后,频率降为 37.2 kHz(见图 5),降频效果显著。

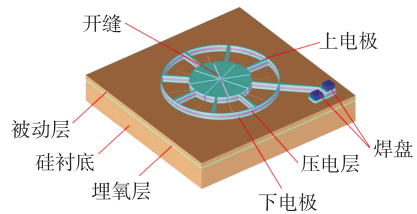


图 3 开缝结构示意图

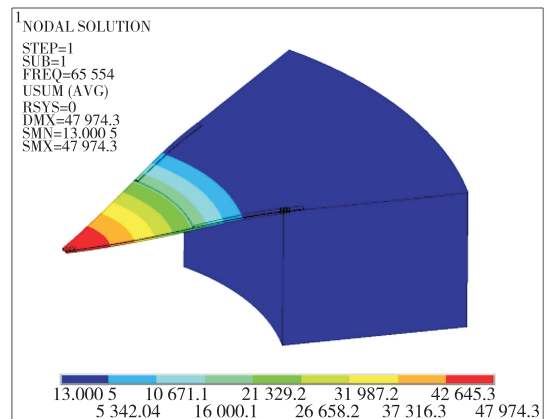


图 4 未开缝时的弯曲振动模态基频

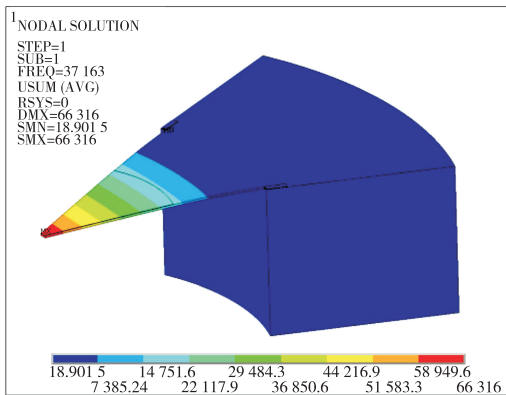


图5 开缝后的弯曲振动模式基频

为了研究开缝数对谐振频率的影响,对多种开缝数进行了模态分析,得到的变化规律如图6所示。由图可见,当开缝数量越多时,结构的谐振频率越低。当开缝数量增加时,压电层体积会减小,可能导致接收灵敏度降低。为了研究开缝数量对灵敏度的影响,采用在器件表面施加单位压强的方法提取电压输出,得到的变化规律如图7所示。利用 $20 \times \lg(V_{out})$ 得到对数形式的变化规律,如图8所示。上述规律表明,当开缝数量增加时,输出电压先降低后增高再降低,而最优开缝数量为18。

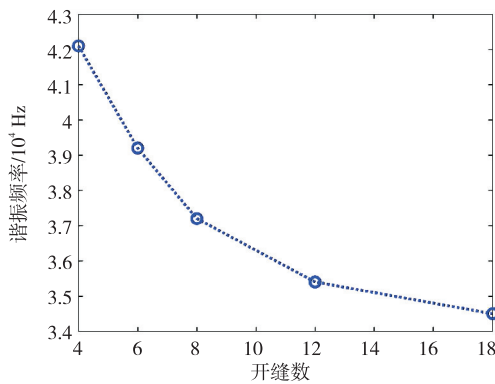


图6 谐振频率随开缝数的变化

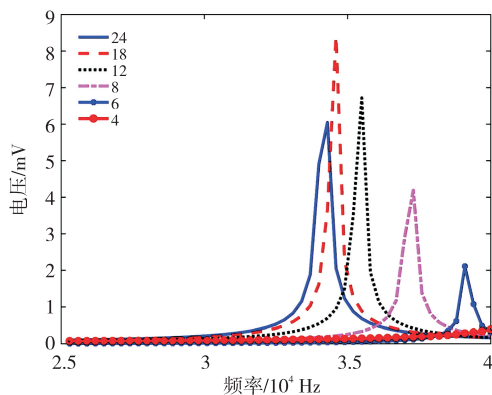


图7 电压随开缝数的变化

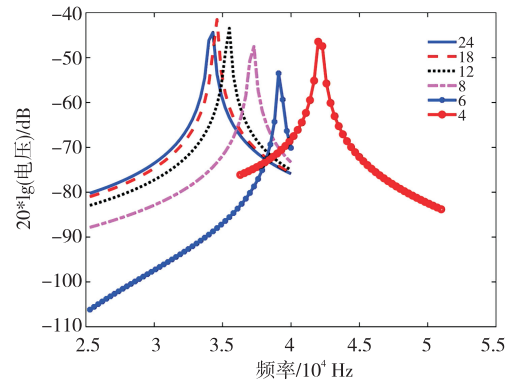


图8 电压灵敏度随开缝数的变化

3 结果与讨论

尽管变化规律显示18条缝为最优选择,但综合考虑结构强度和工艺风险等因素,首次样品制作时,选择8条开缝结构(见图3),采用图9所示的工艺流程,其中压电层采用 $Sc_{0.2}Al_{0.8}N$ 薄膜,所制作的开缝式声接收器实物样品如图10所示。

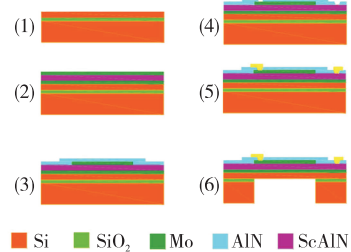


图9 工艺流程图

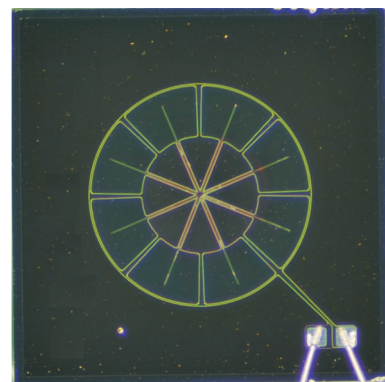


图10 开缝结构实物图

利用 Agilent4294A 阻抗分析仪测试器件的导纳频响曲线,如图11所示。由图可见,实物的谐振频率为29.3 kHz,实现了本文低频化设计的目标。利用 SDS2202X 型示波器、SDG5122 型信号发射器、MZ251612TL 型超声波发射器和 MZ251612RL 型超声波接收器,通过对比法测试得到灵敏度频响曲线,如图12所示。由图12可见,其灵敏度与仿真

值存在一定差距。受测试中标准发射和接收器工作频带所限,未能进一步测试 30 kHz 以上的工作点,但由曲线变化趋势推断,实测灵敏度最高点在 30 kHz 附近,与阻抗测试谐振频率较吻合。

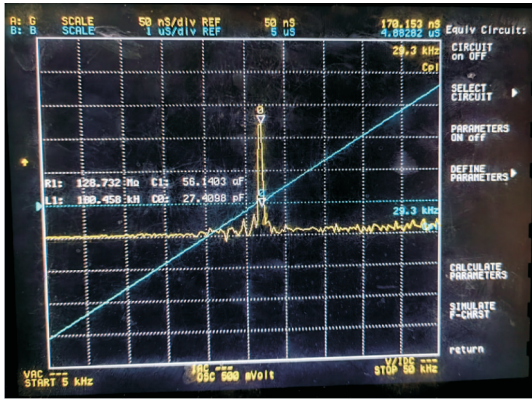


图 11 导纳频响曲线实测数据图

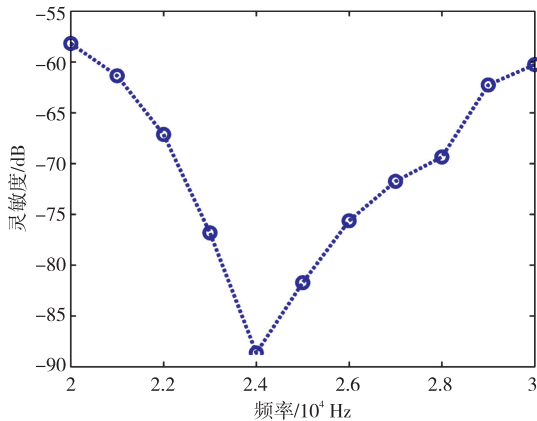


图 12 灵敏度实测频响曲线

4 结束语

针对压电 MEMS 麦克风、空气中声接收器等实际应用需求,提出了一种开缝式压电 MEMS 声接收器新结构。模态分析数据表明,在结构尺寸不变的情况下,通过开缝可使谐振频率由 65.6 kHz 降低到 37.2 kHz。利用有限元仿真得到谐振频率和输出电压随开缝数量的变化规律。基于 ScAlN 压电薄膜制作了声接收器样品,选择开缝数量为 8。经测试,样品的谐振频率结果为 29.3 kHz,实现了低频化设计目标。灵敏度测试数据表明,在 20~30 kHz 内测得最高灵敏度高于 -60 dB,在低频段实现了高灵敏度。

参考文献:

[1] JIA Licheng, SHI Lei, LU Zhaoyang, et al. A high-performance 9.5% scandium-doped aluminum nitride piezoelectric MEMS hydrophone with honeycomb

structure[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42 (12):1845-1848.

- [2] DANGI A, CHENG C Y, AGRAWAL S, et al. A photoacoustic imaging device using piezoelectric micromachined ultrasound transducers (PMUTs) [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(4):801-809.
- [3] 塔桂峰, 刘建河, 李加东, 等. 基于 ScAlN 薄膜的高频 PMUT 阵列的设计与制造[J]. 压电与声光, 2024, 46 (4):496-504.
- TA Guifeng, LIU Jianhe, LI Jiadong, et al. Design and fabrication of high-frequency PMUT array based on an ScAlN thin film[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2024, 46(4):496-504.
- [4] 孙长河, 李博伦, 黑创, 等. 压电微型超声换能器阵列设计及焊缝检测应用[J]. 压电与声光, 2023, 45 (4):595-600.
- SUN Changhe, LI Bolun, HEI Chuang, et al. Design of miniaturized piezoelectric ultrasonic transducer array for welding seam detection [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(4):595-600.
- [5] 黄湘俊, 邸啸, 刘娅, 等. 基于 $Al_{0.8}Sc_{0.2}N$ 压电薄膜 MEMS 声波器件的研制[J]. 压电与声光, 2022, 44 (3):397-402.
- HUANG Xiangjun, DI Xiao, LIU Ya, et al. Development of MEMS acoustic wave device based on $Al_{0.8}Sc_{0.2}N$ piezoelectric thin film[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(3):397-402.
- [6] 余卿, 逆金铭, 樊青青, 等. 压电微机械超声换能器仿真与结构优化[J]. 压电与声光, 2022, 44(3):403-406.
- YU Qing, TI Jinming, FAN Qingqing, et al. Simulation and structure optimization of piezoelectric micromachined ultrasonic transducer [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(3):403-406.
- [7] 汪晓洁, 安志武. 压电 MEMS 扬声器的设计与优化 [J]. 压电与声光, 2022, 44(2):294-298.
- WANG Xiaojie, AN Zhiwu. Design and optimization of piezoelectric MEMS speakers[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(2):294-298.
- [8] KUSANO Y, ISHII I, KAMIYA T, et al. High-SPL air-coupled piezoelectric micromachined ultrasonic transducers based on 36% ScAlN thin-film[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(9):1488-1496.