

PMUT 集成 Helmholtz 谐振腔对测距性能产生的影响分析

刘浩杰^{1,2,3}, 塔桂峰^{1,2,3}, 姚术涛^{1,2,3}, 李加东^{1,2,3}, 苗斌^{2,3}, 商文玲^{2,3,4},
冯昌坤^{2,3}, 陶金燕^{2,3,5}

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123;

3. 中国科学院 多功能材料与轻巧系统重点实验室, 江苏 苏州 215123;

4. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026; 5. 上海大学 理学院, 上海 200072)

摘要: 压电微机械超声换能器 (PMUT) 是超声测距领域的重要传感器件, 增强 PMUT 的测距性能对促进工程化应用具有重要意义。基于 Helmholtz 谐振腔体的吸声和扩声特性, 设计了吸收 PMUT 背部声波的腔体结构及正向扩声的喇叭口结构。实验结果表明, 在 2 m 距离处, 集成 Helmholtz 谐振腔体的 PMUT 在超声信号幅值上有显著提升, 达到 321.13 mV, 相较于常规贴片薄膜下的腔体结构, 信号幅度增加了 90.5 mV, 增幅为 39.2%。此外, 配备 Helmholtz 共振特性喇叭口的 PMUT 在同一距离上的信号幅值测量结果为 540.72 mV, 相较于未配置喇叭口的 PMUT, 信号幅值增加了 162.41 mV, 增幅达到 42.9%。上述结果表明, 将 PMUT 与 Helmholtz 谐振腔体的声学特性相结合, 对于提升 PMUT 在超声测距领域的应用具有重要意义。

关键词: 压电微机械超声换能器 (PMUT); Helmholtz 谐振腔体; 有限元仿真; 超声测距

中图分类号: TN384; TB552 **文献标识码:** A

Impact Analysis of Integrating Helmholtz Resonators into PMUTs on Ranging Performance

LIU Haojie^{1,2,3}, TA Guifeng^{1,2,3}, YAO Shutao^{1,2,3}, LI Jiadong^{1,2,3},
MIAO Bin^{2,3}, SHANG Wenling^{2,3,4}, FENG Changkun^{2,3}, TAO Jinyan^{2,3,5}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;

2. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

3. Key Laboratory of Multifunctional Nanomaterials and Smart Systems, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

4. School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

5. The College of Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The piezoelectric micro-machined ultrasonic transducer (PMUT) is an important sensor in the field of ultrasonic ranging. Moreover, enhancing the ranging performance of PMUT is significant for promoting its engineering applications. This study is based on the sound absorption and amplification characteristics of the Helmholtz resonant cavity and describes the design of a cavity structure that reduces sound wave absorption at the back of the PMUT, as well as a horn structure for forward sound amplification. Experimental results show that at a distance of 2 m, the PMUT integrated with the Helmholtz resonant cavity exhibits a significant increase in ultrasonic signal amplitude, reaching 321.13 mV, which is an increase of 90.5 mV (39.2%), compared with the conventional patch film cavity structure. Furthermore, the PMUT equipped with a horn featuring Helmholtz resonance characteristics measured a signal amplitude of 540.72 mV at the same distance, representing an increase of 162.41 mV (42.9%) compared with the PMUT without the horn. These results indicate that combining the PMUT with the acoustic characteristics of the Helmholtz resonant cavity is of great significance for enhancing the application of PMUT in the field of ultrasonic ranging.

Key words: piezoelectric micromachined ultrasonic transducer (PMUT); Helmholtz resonant cavity; finite element simulation; ultrasonic ranging

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 苏州市科技计划项目 (SSD2023001); 国家自然科学基金项目 (62074159); 国家重点研发计划 (2021YFB3201600)

作者简介: 刘浩杰 (1998-), 男, 河南省周口市人, 硕士生。通信作者: 李加东 (1980-), 山东省临沂市人, 研究员, 博士生导师。

0 引言

随着微纳技术的迅速发展,压电微机械超声换能器(PMUT)在生物医学、材料科学等领域的应用日益广泛。超声换能器是超声波技术的核心部件,其性能直接影响到超声波的应用效果。传统压电陶瓷式超声换能器与现有压电式微机械超声换能器作为两种常见的超声换能器类型,在结构、原理及应用方面存在显著差异。随着微纳技术的不断发展,PMUT具有微型化、高性能、低功耗和集成度高等优点,将在更多领域得到应用和推广。

当前,PMUT在超声测距领域受到广泛的关注与研究,测距能力取得了显著提升。在PMUT的测距研究中,通过从单元件到多元件的设计创新,提升了PMUT的测距性能。加州大学伯克利分校采用CMOS兼容低温工艺制造的单元件,实现了测试距离在30~450 mm的突破^[1]。美国加州大学戴维斯分校成功制作了一对2×2低频PMUT,其具有匹配共振特性,并在脉冲回波实验中实现了4.8 m的远距离测试^[2]。上海大学设计了14元件的PMUT阵列,在6.8 m距离内表现出良好的传感性能^[3],同时也通过改变薄膜的形状来优化PMUT的测距性能。2011年加州大学伯克利分校成功研制出圆形薄膜PMUT,其最大工作范围超过1 300 mm^[4]。北京大学深圳研究生院采用两块频率分别为97 kHz和96 kHz的方形薄膜PMUT实现了50 cm范围内的测量,其中一块用于发射超声信号,另一块负责接收超声信号^[5]。此外,研究者还尝试更换不同的压电薄膜材料来提升测距性能^[6-7]。例如,加州大学伯克利分校制造的超声测距仪采用直径 $\varnothing 400 \mu\text{m}$ 的压电AlN膜,表现出了相较于其他微机械测距仪更优越的测距性能^[1]。国立中正大学提出采用PZT压电材料制作PMUT,并与MEMS麦克风模块相结合,使最大测距范围达到35 mm^[8]。上海大学使用压电薄膜材料为AlScN的PMUT,实验中将测试距离拉长至6.8 m^[3]。

为了进一步提升PMUT器件声学特性,研究者们还将其与具有声学结构的Helmholtz谐振腔体进行集成,旨在研究PMUT声学性能的变化^[9]。2020年,西安交通大学联合新南威尔士大学研制的Helmholtz谐振腔体集成PMUT阵列在共振频率

下具有更低的串扰效应,与传统圆膜片PMUT阵列对比,其最高超声输出声压提升了163%^[10]。2022年,伊斯坦布尔大学将PMUT融合了颈部振动盘和下方球形声腔,薄膜下部腔体呈现出Helmholtz谐振器的特性,使得薄膜的机械共振与空腔声学共振相匹配,拓展了声压的带宽^[11]。Feng等^[12]的研究聚焦于PMUT与微升级体积可调Helmholtz谐振器的集成,结果表明,在特定腔长下声压级和带宽均提升了2倍。2023年,Wang等^[13]提出了一种新型结构,在PMUT膜下方串联Helmholtz谐振器,形成双腔串联PMUT,共振频率下的平均声压达到了260 Pa/V。

综上所述,通过对元件数量、结构形状和压电材料等进行优化,提升了PMUT的测距性能。基于PMUT集成的Helmholtz谐振腔体在声压和带宽方面有显著改善。本文将进一步探讨Helmholtz谐振腔体的声学特性,并将其与PMUT的超声传播特性相结合,以研究其对PMUT测距性能提升的影响。

1 PMUT的制备及频率测量

图1为PMUT的制备流程,其步骤包括:

- 1) 在初始的SOI晶圆(包括Si、SiO₂和Si基底)上生长一层Mo作为底部电极,并通过磁控溅射技术在Mo层上生长一层Sc_{0.25}AlN_{0.75}作为压电层。
- 2) 利用等离子体刻蚀技术对压电层进行图形化处理。
- 3) 使用IBE离子束刻蚀机对底部电极进行图形化处理。
- 4) 通过深硅刻蚀(DRIE)与NLD刻蚀设备对SOI片的Si层和SiO₂层进行刻蚀,并预留出划片区域。
- 5) 采用电子束蒸发方法,在压电层及已刻蚀露出的底电极上镀金。
- 6) 最后,利用深硅刻蚀机对SOI片底部的Si层进行刻蚀,形成半径为765 μm ,深度为290 μm 的腔体。

完成上述工艺制备后,通过电镜测试检验制备完成后PMUT的物理结构,如图1(g)所示,所制备的PMUT各层材料的厚度参数如表1所示。

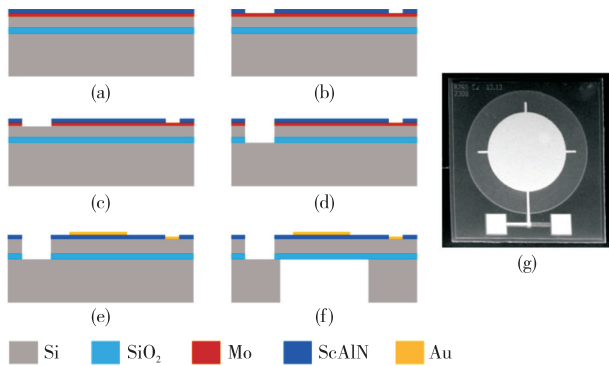


图 1 PMUT 的制备流程

表 1 PMUT 各层材料的厚度

PMUT 材料	厚度/ μm
顶电极 Au	0.2
压电层 $\text{Sc}_{0.25}\text{AlN}_{0.75}$	1.0
底电极 Mo	0.2
支撑层 Si	5.0
埋氧层 SiO_2	0.2
基底 Si	290.0

通过阻抗分析仪对制备的 PMUT 进行频率测试,结果显示 PMUT 的谐振频率 f_0 为 126 kHz,如图 2 所示。

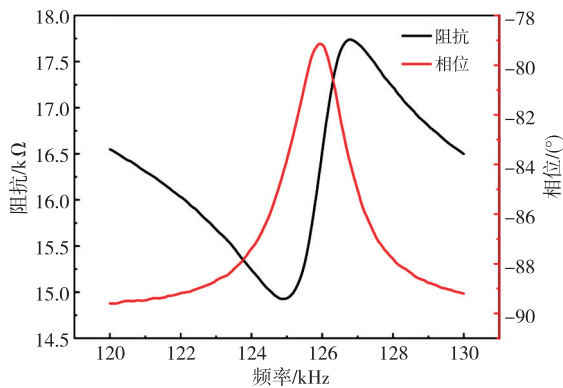


图 2 PMUT 的频率测量

2 Helmholtz 谐振腔体的机理

Helmholtz 谐振器由一个连接颈部管道和主共鸣腔体构成,其声学特性主要受颈部管道的横截面积、管道长度、共鸣腔体积以及腔内介质的影响^[14],其结构如图 3 所示。Helmholtz 谐振腔体能够响应外部声场激发的声波,声波通过颈部管道进入共鸣腔,在腔内形成共振。当共鸣腔的底部封闭时,进入腔内的共振声波会增强与腔壁的摩擦,实现吸声效果;而当底部非密封时,声波则通过底部增强传出。

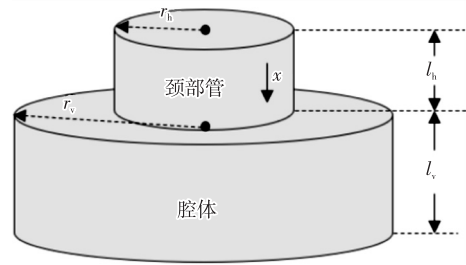


图 3 经典 Helmholtz 谐振腔体

在探讨 Helmholtz 谐振器的几何参数时,定义 l_h 为颈部管道的长度, l_v 为空腔的深度, r_h 和 r_v 分别表示颈部管道和空腔圆柱体的半径。此外, S_h 和 S_v 分别表示颈管和空腔的横截面积,这些参数对于理解和计算 Helmholtz 谐振器的声学特性至关重要。Helmholtz 谐振腔体的共振频率为

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_h}{Vl_h}} \quad (1)$$

研究发现,Helmholtz 谐振腔体的共振频率与颈部管道的横截面积存在正比关系,而与颈部管道的长度及共鸣腔的体积呈反比关系。在声波波长远大于颈管直径的情况下,管口辐射对声阻抗的影响可以通过端部修正来近似处理,这种修正相当于在管口增加了一定的长度。端部修正的物理意义在于,管口附近的介质会与颈管内的介质一同振动,导致声质量增加,从而相当于在管口处增加了一段有效长度。考虑端部修正后,共振频率的计算公式变为

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_h}{Vl'_n}} \quad (2)$$

式中 $l'_n = l_h + \gamma r_h$ 为考虑了端部修正后的颈管长度,即颈部管的有效长度,其数值为实际长度加上端部修正, γ 为颈部末端校正因子。

图 4 为 Helmholtz 谐振腔体的吸声/扩声示意图。

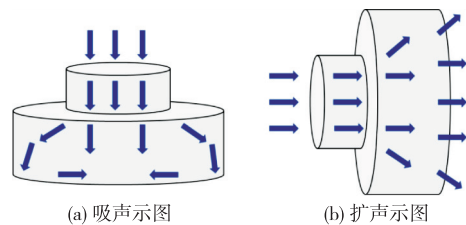


图 4 Helmholtz 谐振腔体

从吸声性能的角度分析,Helmholtz 谐振腔体在其固有的共振频率下展现出显著的吸声峰值。当 Helmholtz 谐振腔体的底部被封闭时,声波通过颈部管道进入腔体,通过调整腔体的体积和颈部管道的尺寸,可使共振腔体的谐振频率与声波的频率

相匹配,从而实现共振。在共振过程中,声波与腔体壁的摩擦增加,促使声能更多地转化为热能,从而有效衰减声波能量,实现吸声效果。

从扩声效果的角度来看,Helmholtz 谐振腔体在共振频率处能够产生一个声压增强的扩声峰值。当 Helmholtz 谐振腔体的底部开放时,声波通过颈部管道进入腔体,如果谐振腔体的谐振频率与声波频率相一致,进入腔体的声波将被放大,放大后的声波从腔体底部释放。放大系数定义为腔室内声压 P_{cavity} 与入射声压 $P_{incident}$ 的比值。在谐振频率下,腔室内的声压放大系数 $A^{[15]}$ 可表示为

$$A = \frac{P_{cavity}}{P_{incident}} = 2\pi \sqrt{\frac{(l_h + \gamma r_h)^3 V}{S_h}} \quad (3)$$

3 PMUT 集成 Helmholtz 谐振腔体减弱背腔声波

3.1 Helmholtz 谐振腔体的结构设计

为了有效降低 PMUT 背腔的超声波影响,设计了一种与 PMUT 硅基底腔体结合的衬底结构,旨在构建一个与 PMUT 薄膜共振频率相匹配的 Helmholtz 谐振腔体。在 PMUT 的制造过程中,通过刻蚀技术在底部形成了一个半径为 $500 \mu\text{m}$ 、深度为 $290 \mu\text{m}$ 的空腔,该空腔在设计中充当 Helmholtz 谐振腔体的颈部管道。同时,还设计了一种衬底结构,作为主体腔室与 PMUT 相连,共同构成完整的 Helmholtz 谐振腔体。

在设计过程中,利用式(2)并结合有限元仿真软件对 Helmholtz 谐振腔体的结构尺寸进行了设计。通过在仿真软件中调整谐振腔体的尺寸,确保了 Helmholtz 谐振腔体的频率 f_r 与 PMUT 的谐振频率 f_0 相匹配,均约为 126 kHz ,如图 5 所示。Helmholtz 谐振腔体的结构尺寸参数如表 2 所示。

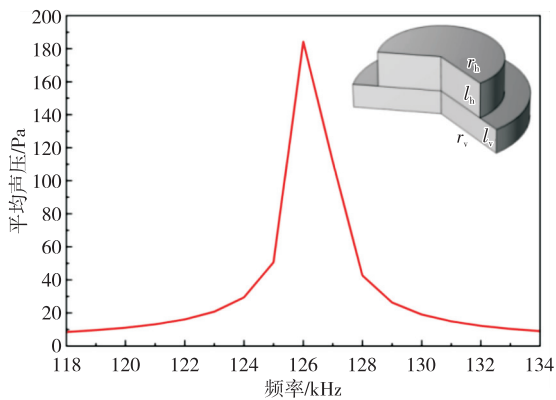


图 5 Helmholtz 谐振腔体频率仿真

表 2 Helmholtz 谐振腔体仿真的尺寸参数

参数	数值
基底硅腔体半径 $r_h/\mu\text{m}$	500
基底硅腔体深度 $l_h/\mu\text{m}$	290
衬底腔体半径 $r_v/\mu\text{m}$	706
衬底腔体深度 $l_v/\mu\text{m}$	200

采用有限元仿真技术,分别对 PMUT 常规贴片和集成 Helmholtz 谐振腔体时振动薄膜下方形成的腔体结构进行建模。如图 6-7 所示,该模型能够模拟 PMUT 常规贴片及集成 Helmholtz 谐振腔体时,在振动薄膜下形成不同腔体结构的外场声压级。同时还模拟了声场分布,特别是对半径为 1 m 的区域进行了声压级和声指向性的仿真分析,仿真结果如图 8-9 所示。

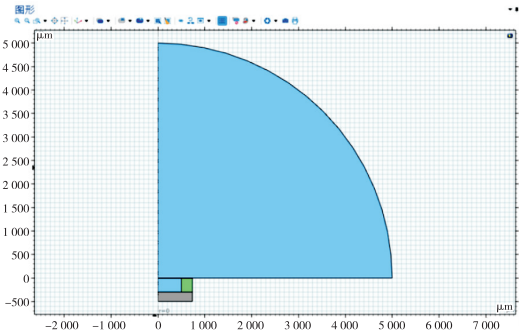


图 6 PMUT 常规贴片仿真模型

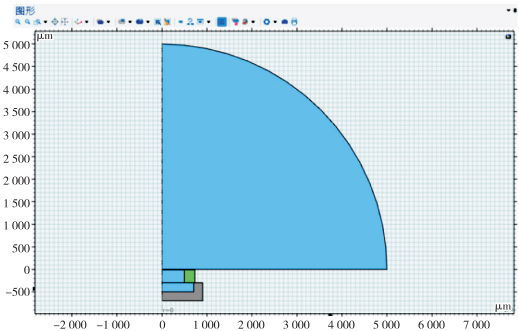


图 7 PMUT 集成 Helmholtz 谐振腔体仿真模型

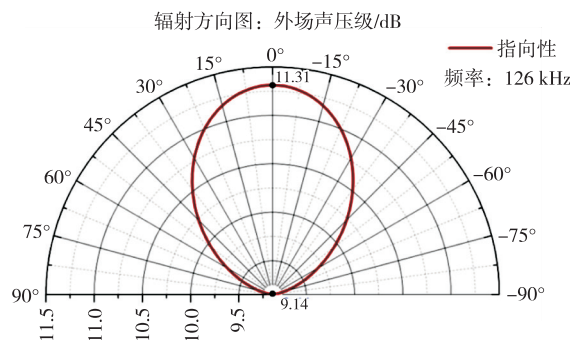


图 8 PMUT 常规贴片的声压级和指向性

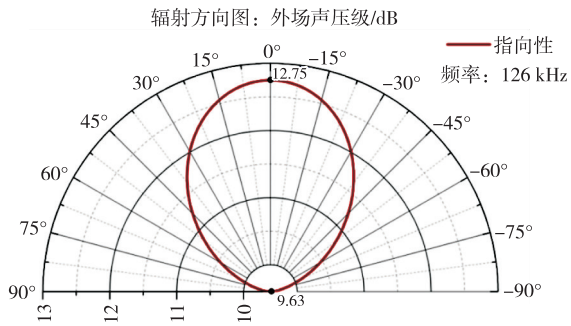


图 9 PMUT 结合 Helmholtz 谐振腔体的声压级和指向性

由图 9 可见,集成了 Helmholtz 谐振腔体的 PMUT 振动薄膜表现出了卓越的声学性能。该集成结构在轴向上的声压级范围为 9.63~12.75 dB,与未集成谐振腔体的 PMUT(声压级范围为 9.14~11.31 dB)相比性能提升显著。

3.2 PMUT 贴片集成不同的腔体结构的测距性能

根据仿真结果,采用先进的硅片刻蚀技术,成功制备了与 PMUT 外框尺寸相匹配的硅基衬底结构,其尺寸为 1 600 μm ×1 600 μm 。该硅基衬底的中心腔体设计半径为 706 μm ,深度达到 200 μm ,如图 10 所示。

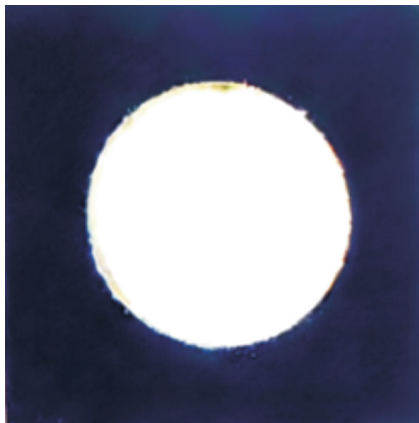


图 10 衬底硅片

在完成硅基衬底的制备之后,采用 126 kHz 频率的裸片 PMUT,将其精确地粘贴到一个与 PMUT 尺寸完全对应的 PCB 板上,确保其背部留有空间以形成空腔,具体粘贴效果见图 11(a)-(b)。随后,将制备好的硅基衬底与一块相同尺寸未经刻蚀处理的硅片相粘合,以此构建出所需的衬底空腔结构。然后,将衬底空腔结构以及未刻蚀的硅片与 PMUT 进行粘合,从而在 PMUT 的振动薄膜下方

形成了具有不同形状的腔体结构,粘接示意图见图 11(c)-(d)。图 12 为 PMUT 背部腔体结构的剖面视图。

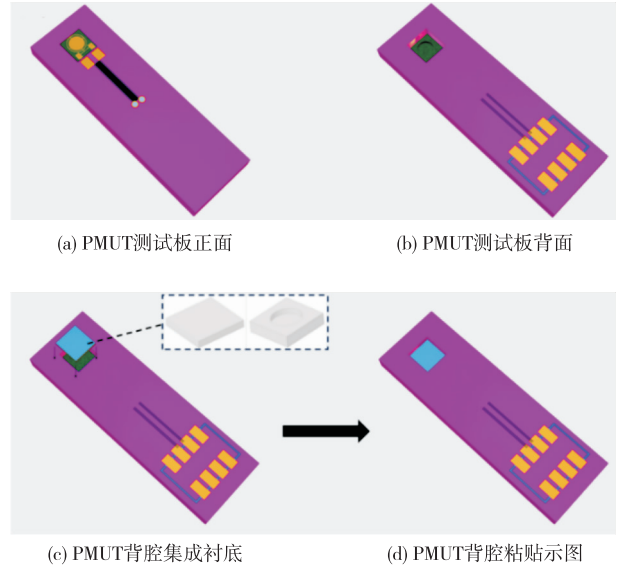


图 11 PMUT 粘合示意图

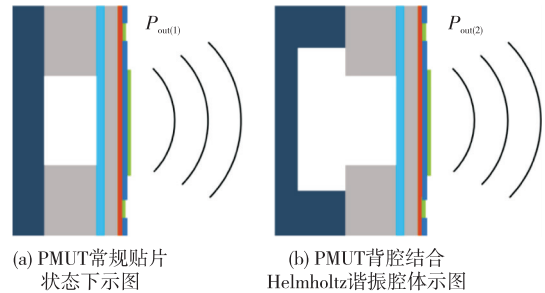


图 12 PMUT 背部腔体结构剖面视图

测试具有不同腔体结构的 PMUT 在特定距离下的信号性能。对 PMUT 在 2 m 处的信号幅值进行了测试,结果如图 13-14 所示。

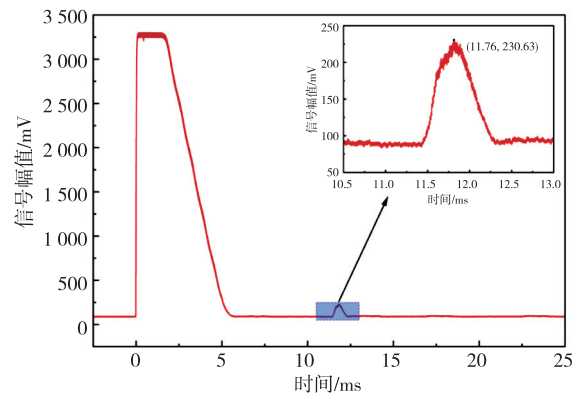


图 13 PMUT 常规贴片在 2 m 处的测距信号幅值

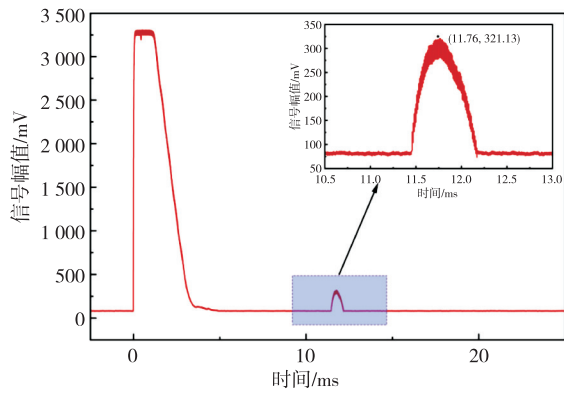


图 14 PMUT 结合 Helmholtz 谐振腔体在 2 m 处的测距信号幅值

由图 13-14 可见,当采用 PMUT 贴片技术构建背部腔体结构时,在 2 m 处测得的信号幅值为 230.63 mV。相比之下,将 PMUT 与 Helmholtz 共振腔体集成后,在相同距离的信号幅值提升至 321.13 mV,增幅达到了 90.5 mV。相较于常规贴片,集成 Helmholtz 共振腔体的信号幅值提升了 39.2%。基于测距信号幅值的显著提升,在 PMUT 薄膜下集成 Helmholtz 共振腔体衰减背腔超声波的干扰,可有效提升 PMUT 的测距性能。

4 PMUT 集成 Helmholtz 腔体状的喇叭口增强正向发射声波

4.1 Helmholtz 腔体的喇叭口结构设计

研究 Helmholtz 共振腔对声波的放大作用时,发现将共振腔设计成锥形结构能够显著增强其声波放大效果^[16]。因此,为了增强正向声波的放大作用,设计了一种与 PMUT 振动频率相匹配的锥形喇叭口形 Helmholtz 共振腔。通过有限元仿真软件对这一结构进行仿真分析,其尺寸参数如表 3 所示。确保所设计的喇叭口结构在仿真中的响应频率与选定的 PMUT 频率一致,均为 126 kHz,如图 15 所示。

表 3 Helmholtz 喇叭口仿真的尺寸参数

参数	数值
基底硅腔体半径 $r_m/\mu\text{m}$	2 900
基底硅腔体深度 $l_m/\mu\text{m}$	2 000
衬底腔体半径 $r_n/\mu\text{m}$	6 600
衬底腔体深度 $H/\mu\text{m}$	4 280

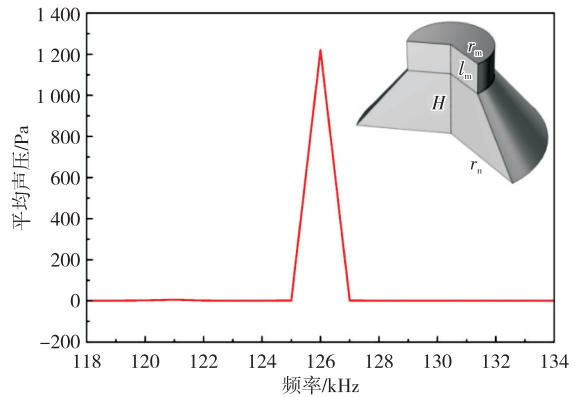


图 15 喇叭口频率仿真

利用有限元仿真技术,对比了裸片 PMUT 与配备喇叭口的 PMUT 的仿真模型,如图 16-17 所示。进一步建立了声场模型,对半径 1 m 的区域进行声压级和声指向性仿真分析,结果如图 18-19 所示。

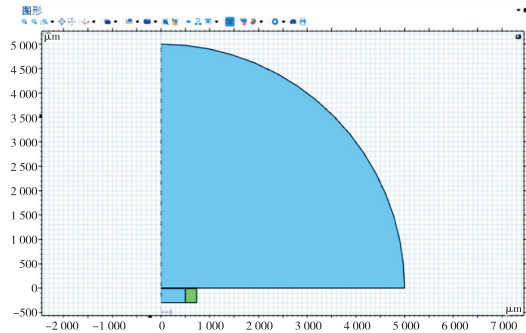


图 16 裸片 PMUT 的仿真模型

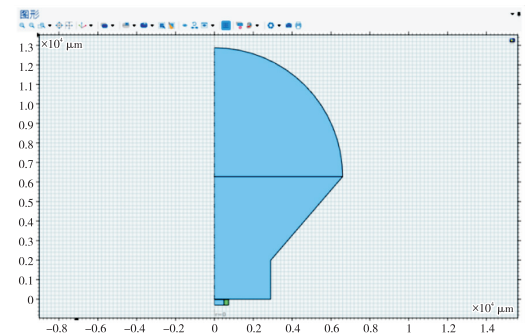


图 17 PMUT 加装喇叭口的仿真模型

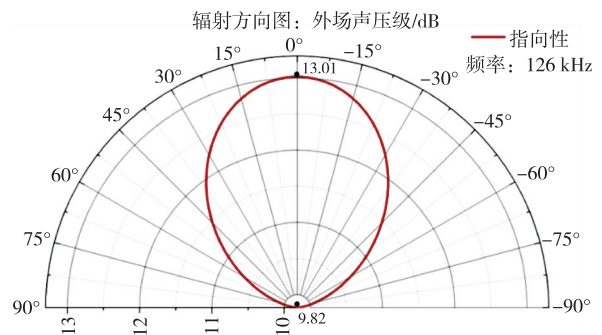


图 18 裸片 PMUT 的声压级和指向性

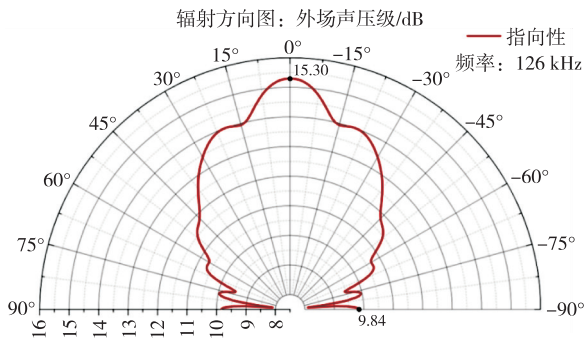


图 19 PMUT 加装喇叭口的声压级和指向性

4.2 PMUT 加装喇叭口的测距性能

根据仿真数据设计并制造了一款与 PMUT 共振频率相匹配的喇叭口装置,如图 20 所示。该设计旨在优化 PMUT 的声波放大效果,通过仿真分析确保所设计的喇叭口在声学性能上与 PMUT 的共振频率具有一致性,从而提高声波的放大效率。



图 20 喇叭口

为了增强 126 kHz 振动频率的裸片 PMUT 的声波发射性能,特别设计并附加了一个喇叭口结构。装置步骤如图 21 所示。在性能测试阶段,对裸片 PMUT 以及加装喇叭口的 PMUT 进行了侧视剖面图的绘制,以直观展示其结构变化,如图 22 所示。

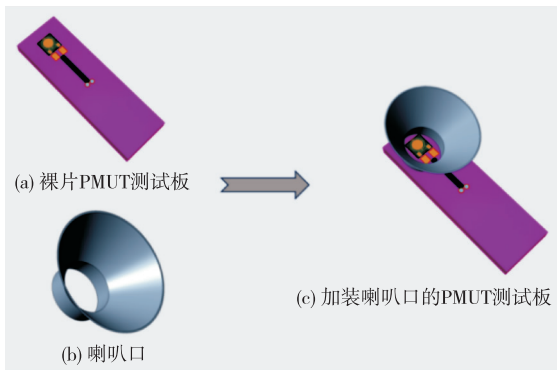


图 21 喇叭口装置步骤

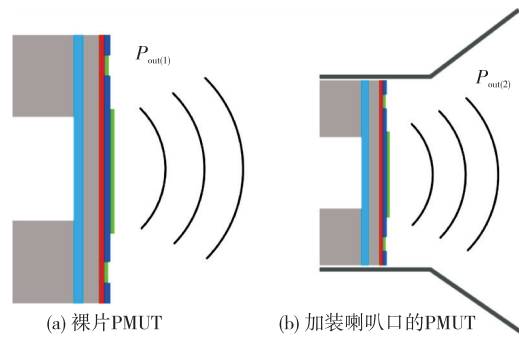


图 22 PMUT 侧视剖面图

对裸片 PMUT 和装置 Helmholtz 共振腔结构喇叭口的 PMUT,检测 2 m 距离处的信号幅值,结果如图 23-24 所示。

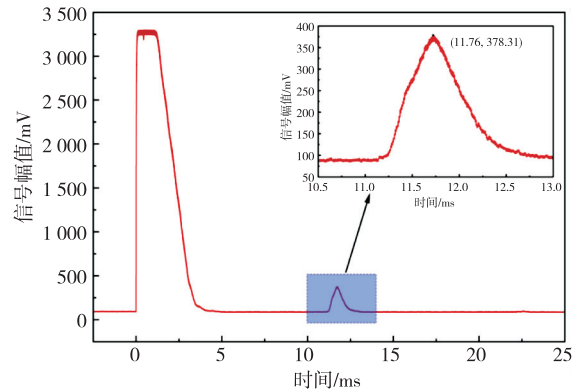


图 23 裸片 PMUT 在 2 m 处测距信号幅值

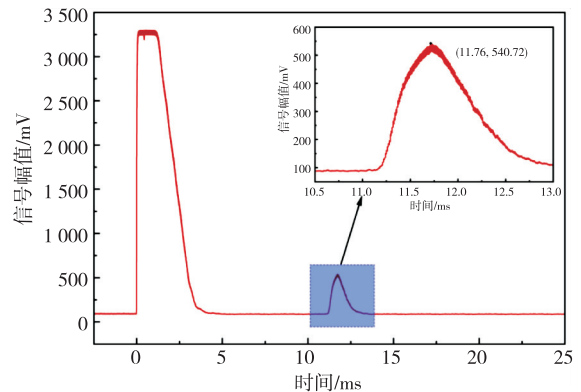


图 24 加装喇叭口 PMUT 在 2 m 处测距信号幅值

由图 23-24 可见,当 PMUT 配备 Helmholtz 共振腔结构的喇叭口时,其在 2 m 处信号幅值测量结果为 540.72 mV,相较于未配置喇叭口的 PMUT 在同一位置的信号幅值 378.31 mV,实现了 162.41 mV 的显著提升,增幅为 42.9%。结果表明,根据 Helmholtz 谐振腔体原理设计的共振喇叭口对 PMUT 的声波放大作用明显,该结构设计为 PMUT 的测距性能提升提供了新方法。

5 结束语

基于 Helmholtz 谐振腔体的声学特性,结合制备完成的 PMUT 结构及其振动时的超声频率,设计了与 PMUT 振动频率相匹配的衬底结构和喇叭口结构。该设计旨在通过 PMUT 与 Helmholtz 谐振腔体的集成,消除 PMUT 背面的多余声波并放大正向声波,进一步提升测距性能。对 Helmholtz 谐振腔体的吸声和扩声特性进行了理论分析,并利用有限元仿真软件对 PMUT 的声场和声压进行了仿真分析。采用深硅刻蚀技术来制备与 PMUT 背部腔体相结合的衬底结构,并使用 3D 打印技术来制造与 PMUT 振动频率一致的喇叭口结构。在 2 m 标准距离上,对集成 Helmholtz 谐振腔体的 PMUT 结构和常规贴片下的 PMUT 腔体结构进行了超声信号幅值的检测。测试结果显示,振动薄膜下集成 Helmholtz 共振腔体的 PMUT 在相同距离的信号幅度达到 321.13 mV,相较于常规贴片提升了 90.5 mV,增幅为 39.2%。同时,在装置了具有 Helmholtz 共振特性的喇叭口后,2 m 处信号幅值测量结果为 540.72 mV,相较于未配置喇叭口的 PMUT 在同一位置的信号幅值 378.31 mV,提升了 162.41 mV,增幅为 42.9%。仿真和实验结果均表明,通过结合 Helmholtz 共振腔体,PMUT 在测距应用中能够更有效地消除背部超声干扰并放大正向发射声波,从而提升测距能力。

参考文献:

- [1] PRZYBYLA R J, SHELTON S E, GUEDES A, et al. In-air rangefinding with an AlN piezoelectric micromachined ultrasound transducer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(11): 2690-2697.
- [2] LUO Guolun, KUSANO Y, HORSLEY D A. Airborne piezoelectric micromachined ultrasonic transducers for long-range detection[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2021, 30(1): 81-89.
- [3] YANG Haolin, JI Meilin, XIU Xueying, et al. AlScN film based piezoelectric micromechanical ultrasonic transducer for an extended long-range detection[J]. *Micromachines*, 2022, 13(11): 1942.
- [4] PRZYBYLA R, FLYNN A, JAIN V, et al. A micromechanical ultrasonic distance sensor with >1 meter range[C]//Beijing, China:2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2011: 2070-2073.
- [5] CHIU Y, WANG Chen, GONG Dan, et al. A novel ultrasonic TOF ranging system using AlN based PMUTs[J]. *Micromachines*, 2021, 12(3): 284.
- [6] JUNG J, LEE W, KANG W, et al. Review of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers and their applications[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(11): 113001.
- [7] 张晋弘, 马剑强, 李保庆, 等. MEMS 压电超声换能器的结构设计及性能表征[J]. *压电与声光*, 2010, 32(4): 604-607.
ZHANG Jinhong, MA Jianqiang, LI Baoqing, et al. Structure design and characterization of MEMS piezoelectric ultrasonic transducer [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(4): 604-607.
- [8] FENG Guohua, LIU Huajin. Piezoelectric micromachined ultrasonic transducers with a cost-effective bottom-up fabrication scheme for millimeter-scale range finding[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4696.
- [9] XU Tingzhong, ZHAO Libo, JIANG Zhuangde, et al. Equivalent circuit models of cell and array for resonant cavity-based piezoelectric micromachined ultrasonic transducer[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(10): 2103-2118.
- [10] 张玉超, 王光华, 周红宇, 等. 声压增强型压电微机械超声换能器[J]. *压电与声光*, 2023, 45(4): 619-623.
ZHANG Yuchao, WANG Guanghua, ZHOU Hongyu, et al. Sound pressure enhanced piezoelectric micromechanical ultrasound transducer[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2023, 45(4): 619-623.
- [11] TOYMUS A T, BATHAEI M J, AKINCI S, et al. Design and fabrication of a P(VDF-TrFE) based piezoelectric micromachined ultrasonic transducer with acoustic cavity[C]//Venice, Italy:2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2022: 1-3.
- [12] FENG Guohua, CHEN Wensheng. Piezoelectric micromachined ultrasonic transducer-integrated Helmholtz resonator with microliter-sized volume-tunable cavity[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7471.