

水下超声成像的电容式微机械超声换能器设计

李照东¹, 曾祥铖¹, 赵晨雅¹, 王任鑫¹

(中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051)

Email: lzd0821@163.com

摘要: 超声技术以其强大的功能和广泛的应用在水下研究领域占据了重要地位。然而, 传统声纳系统因体积庞大和功耗高, 限制了其在水下广泛使用。相比之下, 电容式微机械超声换能器 (CMUT) 具有低机械阻抗, 适合浸入式应用, 其发射和接收具有高灵敏特性。本文设计了一种用于水下成像的 CMUT, 并在 COMSOL 中建立了 CMUT 的有限元模型, 进行了谐振频率、工作电压和表面声压的数值评估。结果显示, CMUT 在空气中的谐振频率约为 4.9 MHz, 在水中约为 2.7 MHz。在 10V 的脉冲激励下, CMUT 微元在水中表面最大声压为 91 Pa, 在空气中表面最大声压为 10 Pa。C-V 特性曲线表明, 在直流偏置电压为 0 V 时, 静态电容值为 1.67 pF, 塌陷电压为 100 V。研究结果表明, CMUT 在水下成像中展现出优异的性能优势。通过进一步优化设计和制造工艺, CMUT 有望在水下传感和成像领域实现更高精度和更广泛的应用。

关键词: CMUT; 有限元分析; 塌陷电压; 谐振频率

Design of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers for Underwater Sonar Imaging

Li ZhaoDong¹, Zeng XiangCheng¹, Zhao ChenYa¹

(1.State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;)

Abstract: Ultrasonic technology has occupied an important position in the field of underwater research with its powerful functions and wide range of applications. However, conventional sonar systems have limited their wide use in underwater applications due to their large size and high power consumption. In contrast, capacitive micromechanical ultrasonic transducers (CMUTs) have low mechanical impedance and are suitable for immersive applications, and their transmitting and receiving have highly sensitive characteristics. In this paper, a CMUT for underwater imaging is designed and a finite element model of the CMUT is built in COMSOL for numerical evaluation of resonant frequency, operating voltage and surface acoustic pressure. The results show that the resonant frequency of the CMUT is about 4.9 MHz in air and 2.7 MHz in water. Under the excitation of operating voltage, the maximum surface acoustic

pressure of the CMUT microelement in water is 91 Pa, and the maximum surface acoustic pressure in air is 10 Pa. The C-V characteristic curve shows that the static capacitance value is 1.67 pF at a DC bias voltage of 0 V, and the collapse voltage is 100 V. The results are shown in the following table. The results show that the CMUT exhibits excellent performance advantages in underwater imaging. By further optimising the design and fabrication process, CMUT is expected to achieve higher accuracy and wider application in underwater sensing and imaging.

Keywords: cmut; consol; collapse voltage; resonant frequency

1、研究背景

超声技术广泛应用于水下超声成像、无损检测、测距和流量测量等领域^[1]。自第一次世界大战以来，超声波一直用于水下成像，并在 20 世纪 30 年代开始用于医学应用。如今，超声波被广泛用于引导血管和心脏的介入手术，以及制造基于微机电系统（MEMS）的麦克风和扬声器。传统上，基于锆钛酸铅（PZT）的压电超声换能器在换能器技术中占据主导地位。然而，PZT 换能器存在一些不足之处，如低运行效率、二维阵列处理困难以及工作带宽窄。近年来，微加工技术的进步使得电容式微机械超声换能器（CMUT）的制造成为可能。CMUT 因其宽带宽和设计灵活性，成为替代传统 PZT 换能器的有力候选者。除此之外，CMUT 还具有其他显著优势，如与集成电路（IC）制造技术的兼容性、阵列配置能力、与液体良好的声阻抗匹配以及高运行效率。这些优势使 CMUT 成为下一代超声换能器技术的理想选择。因此，进一步研究和应用 CMUT 进行水下声学成像具有重要的意义和潜力。

1994 年，斯坦福大学的 Khuri-Yakub 团队通过表面微加工技术成功制备了带有密封腔体的 CMUT，这表明 CMUT 可以应用于水下^[1]。2009 年，A. Bozkurt 团队在水下使用单个 CMUT 单元在 25 KHz 左右实现大约 40% 的带宽^[3]。中北大学张文栋团队专注于水下成像 CMUT 阵列的设计与制造，通过晶圆键合技术制作了 CMUT 并进行了二维成像^[4]。随着封装技术的进步，CMUT 传感器在水下环境中的应用逐步实现。综上所述，CMUT 技术在水下成像领域展示了巨大的潜力。通过进一步优化设计和制造工艺，CMUT 有望克服传统传感器在水下环境中的局限性，实现更高精度和更广泛的应用。

2、研究内容

CMUT 元件通常由多个并联的单元组成。每个单元由固定在其边缘的顶电极组成。此顶板与固定底板之间形成浅间隙。这两个板被制成导电的以形成一个电容器，其间有间隙称为空腔，使 CMUT 单元成为可变电容器，其剖面图如图 1 所示。CMUT 微元结构可以用具有移动顶部电极的平行板电容器等效建模，在平衡状态下，假设顶部电极位移 x ，平行板电容器的电容由下式给出：

$$C(x) = \frac{\dot{q}_0 \dot{q}_r S}{g_{eff} - x}$$

有效间隙高度 g_{eff} 定义为:

$$g_{eff} = (t_i + t_m) / \dot{q}_r + g_o$$

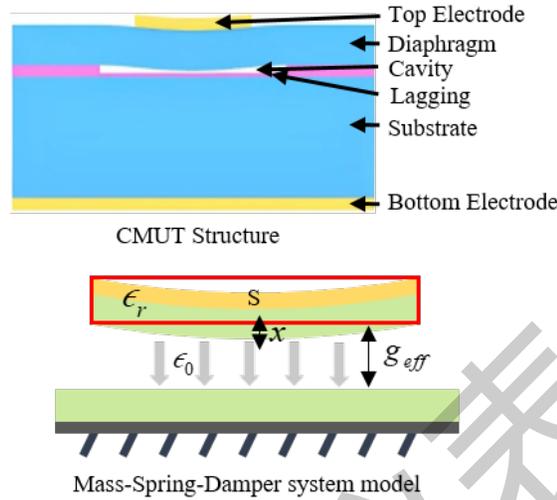


Fig. 1 CMUT structure and equivalent model

其中 S 是顶部电极的面积, \dot{q}_0 是真空介电常数, \dot{q}_r 是绝缘体和膜材料的相对介电常数 g_{eff} 是零偏置电压下的初始间隙距离, t_i 和 t_m 分别是绝缘体和膜厚度。

较高的直流偏置会导致较大的静电力, 将膜向硅基底拉伸。存在一个偏置电压, 薄膜的机械回复力无法平衡静电力。这个电压称为膜的塌陷电压, 可以表示为:

$$V_{coll} = \sqrt{8kg_{eff}^3 / 27\dot{q}_0 \dot{q}_r S}$$

为了确保 CMUT 工作在正常电压范围内, 通常选择塌陷电压的三分之一作为工作电压。

基于理论模型, 我们使用 CMOSOL 有限元模拟软件建立了 CMUT 模型, 耦合力学、声学及电学场对 CMUT 微元进行仿真分析。所设计的 CMUT 阵元由 200 个微元阵列组成, 单个微元振膜厚的为 2um, 空腔高度 0.2um, 绝缘层厚度为 0.1um, 振膜半径为 34um。

通过固体力学及静电物理场耦合, 在 CMUT 顶电极上逐步增大直流偏置引起的振膜中心挠度的增大, 当挠度接近空腔高度时, 认定为其塌陷电压。本结构中 CMUT 塌陷电压为 100V, 最大挠度为 187nm。由理论分析可知 CMUT 的工作频率与其施加的直流偏置成负相关, 即直流偏置增大, 谐振频率降低。静态电容与其施加的直流偏置成正相关, 即直流偏置增大, 电容增大。当偏置设置为 0 时, 其静态电容为 1.67pF。

基于完美匹配层 (PML) 模拟的无限元域, 耦合固体力学、静电及声学物理场分别在空气及水域环境下分别模拟了频率 0-10MHz 幅值固定为 10V 的脉冲激励 CMUT 发射的表面声压及上下电极导纳, 由频率曲线可知在水中其谐振频率为 2.7MHz, 在空气中为 4.9MHz, 水中表面中心处最大

声压为 91Pa，空气中声衰减较大，最大声压为 10Pa。其导纳随频率的特性与表面声压随频率的特性一致，如图 2 所示。

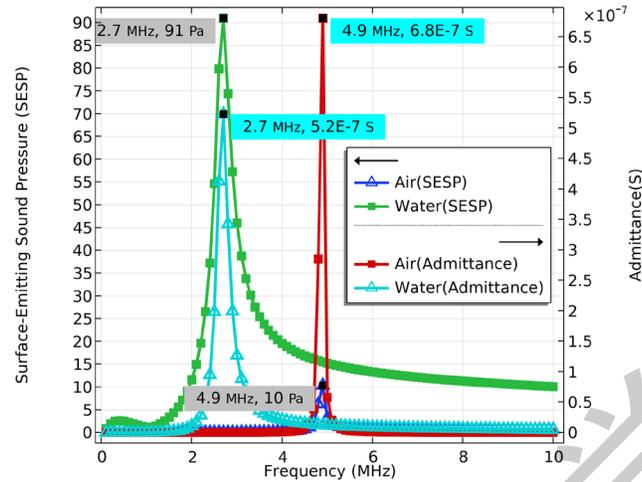


Figure 2 Relationship between Frequency, Sound Pressure and Admittance of CMUT in Air and Water

3、结论

本研究基于 CMUT 理论分析结合 COMSOL 有限元模拟对 CMUT 特性进行了分析，明确了其结构及性能特征。通过多物理场耦合仿真，获得了 CMUT 的塌陷电压为 100V、在空气和水中的谐振频率分别为 4.9MHz 和 2.7MHz、水中表面中心处最大声压为 91Pa、空气中表面中心处最大声压为 10Pa。静态电容为 1.67pF 等关键特性。这些结果为未来 CMUT 的工艺研究和制备提供了重要的参考依据。

参考文献

- [1] Jia, L., He, C., Xue, C. et al. The device characteristics and fabrication method of 72-element CMUT array for long-range underwater imaging applications. *Microsyst Technol* 25, 1195–1202 (2019).
- [2] Haller, Matthew I. and Butrus T. Khuri-Yakub. “A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer.” 1994 Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium 2 (1994): 1241-1244 vol.2.
- [3] Olçum, Selim et al. “Wafer bonded capacitive micromachined underwater transducers.” 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium (2009): 976-979.
- [4] Song, J.; Xue, C.; He, C.; Zhang, R.; Mu, L.; Cui, J.; Miao, J.; Liu, Y.; Zhang, W. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs) for Underwater Imaging Applications. *Sensors* 2015, 15, 23205-23217.