

柔性振动膜 CMUT 器件的设计与仿真分析

高麒轩

布里斯托尔大学工程学院 英国

【摘要】随着微机电系统（MEMS）技术的快速发展，电容式超声波传感器（CMUT）在医疗成像，无损检测等领域展现出巨大的潜力。振动薄膜作为 CMUT 的核心部件，其材料特征和几何参数决定了传感器的性能表现。本研究通过有限元仿真方法，系统性的分析了薄膜材料，几何构型及表面附加工艺对器件共振频率与最大位移的影响。仿真结果表明，Kapton 薄膜相较于多晶硅薄膜，在相同几何尺寸下具有更低的共振频率和更大的位移响应，更适用于低频、高灵敏度应用场景。研究为面向不同应用需求的 CMUT 器件材料选择与结构优化提供了数据支撑与设计参考。

【关键词】CMUT；柔性振动膜；Kapton；有限元仿真；共振频率

【收稿日期】2026 年 6 月 12 日

【出刊日期】2026 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260044

Design and simulation analysis of flexible vibration-membrane CMUT devices

Qixuan Gao

University of Bristol, Faculty of Engineering, Queen's Building, University Walk, Bristol, BS8 1TR, United Kingdom

【Abstract】 With the rapid development of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) technology, Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs) have demonstrated significant potential in fields such as medical imaging and non-destructive testing. The vibrating membrane, as the core component of a CMUT, determines the performance of the device through its material properties and geometric parameters. In this study, a finite element simulation approach was employed to systematically analyze the effects of membrane material, geometric configuration, and surface additive processes on the resonant frequency and maximum displacement of the device. The simulation results indicate that, compared to polysilicon membranes, Kapton membranes exhibit lower resonant frequencies and larger displacement responses under the same geometric dimensions, making them more suitable for low-frequency, high-sensitivity application scenarios. This research provides data support and design references for material selection and structural optimization of CMUT devices tailored to different application requirements.

【Keywords】 CMUT; Flexible vibrating diaphragm; Kapton; Finite element simulation; Resonant frequency

1 前言

电容式超声波传感器（Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer, CMUT）凭借其高带宽、高灵敏度及易于集成的优势，已成为新一代超声传感器的研究热点^[1,2]。其工作原理基于平行板电容器模型：上电极附着于可振动的薄膜上，下电极固定于基底，通过对电极施加偏置电压与交流激励信号，薄膜产生振动并发射超声波；反之，入射声压引起薄膜振动，改变其电容值，从而实现信号的接收。

振动薄膜作为 CMUT 的核心组件，其材料属性与

几何参数直接决定了器件的转换效率、工作范围及灵敏度^[3]。传统 CMUT 多采用多晶硅等刚性材料，虽能满足高频工作需求，但其低柔性与高刚度在一定程度上限制了器件在柔性传感、低频探测等新兴场景中的应用^[4]。近年来，高分子聚合物材料 Kapton 因其极低的杨氏模量和密度、优异的耐高温性能及良好的化学稳定性，引起了广泛关注^[5]。本研究基于有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)方法，系统性研究不同材料、厚度、半径、中心孔及表面附加工艺对 CMUT 的共振频率和最大位移的影响，旨在为 CMUT 的设计与性能优化提供工程参考。

2 仿真模型与方法

2.1 有限元建模

本研究采用 ANSYS Workbench 2022R1 建立 CMUT 振动薄膜的有限元模型^[6,7]。薄膜边界条件设置为固定支撑,以模拟现实中的安装状态。网格划分采用结构化四面体单元,确保计算精度与效率。通过模态分析对薄膜的各阶固有频率及对应的振型特征进行有限元仿真,重点研究第一阶模态下的共振频率与最大位移。

2.2 影响参数

为对比传统刚性材料与柔性高分子聚合物材料的性能差异,本研究选取多晶硅与 Kapton 两种薄膜材料,其力学性能参数如表 1 所示。其中 Kapton 的杨氏模量 (2.8 GPa) 与密度 (1420 kg/m³) 均显著低于多晶硅 (168 GPa, 2329 kg/m³)。

CMUT 由基座、底电极、空腔壁、柔性膜和上电极组成。在有限元仿真的过程中,本研究主要研究的是柔性膜材料,几何参数,中心孔以及表面结构对柔性膜共振频率和位移的影响。

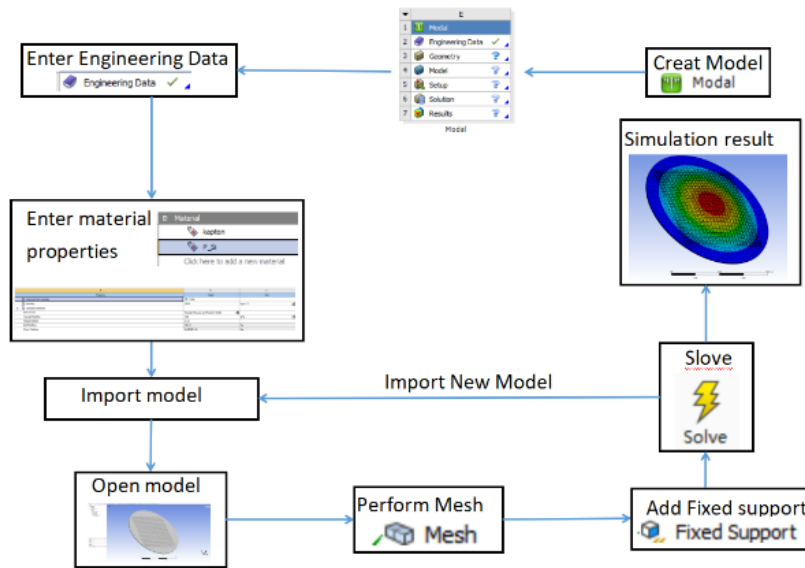


图 1 CMUT 模态分析有限元仿真流程图

表 1 CMUT 的几何参数

Geometrical parameter	Value (μm)	Remarks
Air cavity radius	55	As the membrane radius changes
Thickness of the membrane	0.2-1.3	T _m
Air-gap thickness	0.45	T _g
Outer radius of the cavity wall	66	20% greater than the cavity radius
Substrate length	145.2	60% more than the diameter of the outer radius of cavity wall
Substrate width	145.2	Same as substrate length
Bottom electrode height	10	-
Bottom electrode radius	0.5	-
Diaphragm radius	25-200	5% greater than the cavity radius
Hole radius	1	-
Top electrode radius	55	Same as cavity radius

3 结果与讨论

3.1 薄膜厚度和半径的影响

仿真结果表明,薄膜的厚度和半径对共振频率和最

大位移具有显著的影响。在厚度方面,最大位移从 $7.8 \times 10^5 \mu\text{m}$ 下降至 $3.9 \times 10^5 \mu\text{m}$,降幅约 50%。使用 Kapton 作为材料的薄膜呈现出相同趋势,但是共振频率显著低

于使用多晶硅材料的薄膜。在半径方面,以厚度为 $1\mu\text{m}$ 的无孔多晶硅薄膜为例,半径从 $50\mu\text{m}$ 增加至 $200\mu\text{m}$ 时,共振频率从 1.6372 MHz 降至 0.10223 MHz ,降幅约 6% ,最大位移从 $5.47\times 10^5\mu\text{m}$ 降至 $1.37\times 10^5\mu\text{m}$,降幅约 25% 。这表明了增大播磨板机可以显著降低共振频率并且增大位移,适合低频 CMUT 设计,而减小半径则相反,有利于高频 CMUT 使用。厚度增大会提高共振频率但降低位移,检校后的有则相反。

3.2 中心孔的影响

在半径 $1\mu\text{m}$ 中心孔条件下,有孔与无孔结构之间的共振频率和最大位移差异极小。以半径 $50\mu\text{m}$ 、厚度 $1\mu\text{m}$ 多晶硅薄膜为例,无孔结构频率为 1.6372 MHz ,有孔结构为 1.6374 MHz ,差异不足 0.02% 。Kapton 薄膜亦呈现相同规律。尽管中心孔对共振频率和位移影响有限,但其可有效平衡薄膜的内外压差,增强传感器在不同温度和气压环境下的稳定性,仍具有工程价值。

在使用半径为 $1\mu\text{m}$ 中心孔的条件下,有孔与无孔薄膜之间的共振频率和最大位移差异极小。以半径 $50\mu\text{m}$ 、厚度 $1\mu\text{m}$ 多晶硅薄膜为例,无孔结构的共振频率为 1.6372 MHz ,有孔结构为 1.6374 MHz ,差异不足 0.02% 。使用 Kapton 作为材料的薄膜呈现相同的规律^[8]。

3.3 材料对比

在相同的集合条件下,使用 Kapton 作为材料的薄膜的共振频率约为使用多晶硅材料的薄膜的 $17\%\sim 20\%$ 。以半径 $100\mu\text{m}$,厚度 μm 含中心孔的结构为例,使用多晶硅薄膜的共振频率为 0.4091 MHz ,使用 Kapton 薄膜仅为 0.070379 MHz 。与此同时,kapton 薄膜的最大位移显著高于多晶硅薄膜,表明其更为敏感。Kapton 薄膜凭借其低模量,低密度材料,在低频,高灵敏度使用场景和柔性传感方面优势明显;多晶硅薄膜则凭借其高模量材料,更适合高频的使用场景。

3.4 表面附加结构的影响

本研究还考察了表面附加结构对薄膜的影响,如方块阵列,圆柱阵列及在中心集中附加质量。图 1,图 2 展示了方块阵列的局部和整体模型。

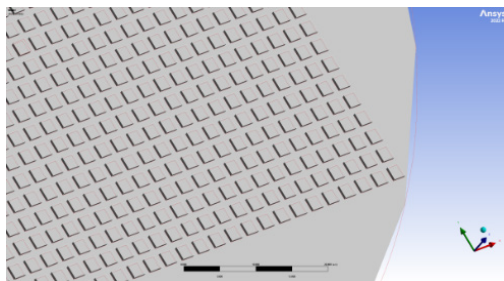


图 2 局部表面附加结构振动膜示意图

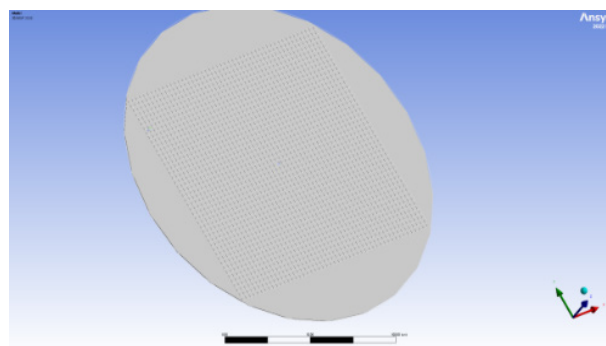


图 3 具有完整表面附加结构的 CMUT 柔性振动膜结构示意图

对于较薄的薄膜(厚度为 $0.5\mu\text{m}$),表面附加方块阵列可以提升局部刚度,振频率由 0.81966 MHz 提升至 0.91747 MHz 。但是随着薄膜厚度的增加,质量效应逐渐的占据主导,共振频率提升的幅度减小甚至降低。当厚度为 $2\mu\text{m}$ 时,共振频率由 3.2669 MHz 降至 3.2563 MHz 。

在薄膜中心添加质量时,随着附加质量的增加,薄膜的共振频率随之下降。例如在中心位置附加内径 $1\mu\text{m}$ 、外径 $3\text{ 至 }6\mu\text{m}$ 、高 $2\mu\text{m}$ 的圆筒,多晶硅薄膜的共振频率由 0.82256 MHz 逐渐降至 0.808 MHz ,降幅约 1.77% ,表明局部集中质量可有效降低共振频率。

表面附加结构可实现微调共振频率吧,附加结构通过改变刚度和等效质量共同影响共振频率,在厚度小时刚度效应明显,厚度大时质量效应明显。表面附加结构可以在不改变薄膜整体尺寸的前提下实现频率的调整,但是需要牺牲部分位移响应为代价,须在灵敏度与频率之间进行权衡。

4 结论

本研究通过有限元仿真系统分析了 Kapton 材料厚度、半径、中心孔及表面结构对 CMUT 振动薄膜性能的影响。主要结论如下:

(1) 薄膜厚度与半径是影响谐振频率和位移的主导因素,厚而小的薄膜适用于高频,薄而大的薄膜适用于低频和大位移需求;

(2) Kapton 薄膜在低频和高灵敏度应用中优势显著,谐振频率仅为同尺寸多晶硅薄膜的约 $17\%\sim 20\%$,位移响应更大;

(3) 表面附加结构可对共振频率进行微调,其效果受等效刚度与等效质量竞争关系支配,薄模时刚度主导,厚模时质量主导。中心孔的影响可忽略,但具有平衡压差的工程价值。

研究结果可为面向不同频率范围与灵敏度需求的

柔性 CMUT 器件设计提供参考。后续工作可进一步引入静电-结构-声学多物理场耦合分析,全面评估偏置电压、阻尼、塌陷电压及声压输出等综合性能指标。

参考文献

- [1] 杨建东,等. MEMS 超声换能器设计与应用[J]. 微纳电子技术,2020,57(3):175-182.
- [2] Joseph J, Ma B, Khuri-Yakub BT. Applications of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: A Comprehensive Review[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(2):456-465.
- [3] 马大猷,等. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [4] Chang MMW, Deng MTM, Gwo JTJ, et al. Polymer-based capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUT) for micro surgical imaging applications[C]. Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. IEEE, 2006:61-65.
- [5] Sroog CE. Polyimides[J]. Progress in Polymer Science, 1991, 16(4):561-694.
- [6] Ray A, Chandel V, Taiwade K, et al. Design and analysis of CMUT device using COMSOL for Radio frequency applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 65: 2602-2605.
- [7] Anbalagan SA, Uma G, Umapathy M. Modeling and simulation of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (CMUT)[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 34:595-600.
- [8] Ghosh Dastidar A, Maity R, Tiwari R C, Dutta S, Maity N P. An analytical and FEM simulation-based study of the dependence of capacitance profile on structural parameters of CMUT with and without vent[J]. Microsystem Technologies, 2024, 30: 1239-1248.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS