

Influences of the Structural Parameters on the Performance of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer*

ZHANG Hui, SONG Guang-de, GUAN Zhi-jian, JIN Shi-jiu*

(State key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The operating principles of capacitive micromachined ultrasonic transducer (cMUT) were introduced. The various structural parameters affected the performance of cMUT such as resonant frequency and collapse voltage, the parameters including membrane radius, membrane thickness, residual stress of the membrane and the gap between the two electrodes. This paper reported the analysis results of these effects by the theory formulas deduced from Mason's equation and a 3D finite element modal, the results of these two methods were uniform. The design and fabricate of cMUT could be more feasible according to the work of this paper.

Key words: capacitive micromachined ultrasonic transducer (cMUT); collapse voltage; resonance frequency
EEACC: 2575; 7820

电容式微加工超声传感器结构参数对性能的影响分析*

张 慧, 宋光德, 官志坚, 靳世久*

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 介绍了电容式微加工超声传感器 (cMUT) 的工作原理, 通过理论计算和有限元仿真分析, 讨论了 cMUT 中薄膜厚度、薄膜半径、薄膜残余应力和空腔厚度的变化对传感器的塌陷电压和谐振频率的影响, 为传感器的设计和制作提供了依据。

关键词: 电容式微加工超声传感器 (cMUT); 塌陷电压; 谐振频率

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)06-0951-03

电容式微加工超声传感器 (cMUT) 具有频带宽且灵敏度高, 声阻抗易与环境匹配等特点, 可用于精密工业测量、生物医学成像、缺陷检测等领域, 大有取代传统的压电式超声传感器之势。

cMUT 可与电子元器件集成于同一硅片上, 降低电路的寄生电容及噪声, 易于形成高密度的阵列。但是其制作周期长又成本昂贵, 所以在设计传感器时要尽量对影响其性能的一些参数进行合理优化, 以提高传感器的设计与制作的效率和正确性。本文讨论了 cMUT 中薄膜厚度、薄膜半径、薄膜残余应力和空腔厚度的变化对传感器的塌陷电压和谐振频率的影响, 为传感器的设计和制作提供了依据。

1 cMUT 的工作原理和理论分析

典型的一个电容式微加工超声传感器 (cMUT) 单元的结构如图 1 所示, 它是由薄膜、支撑梁柱、重掺杂硅底座和金属电极组成。当在薄膜和硅基体之

间即两电极之间施加直流电压时, 静电力将薄膜拉向基体, 然后在两极间施加交流电压, 薄膜就会发生振动并产生超声波; 相反, 两极间施加适当的直流偏置电压后, 薄膜在超声波作用下发生振动, 两电极板间的电容发生变化, 通过检测这种变化实现超声波的接收。

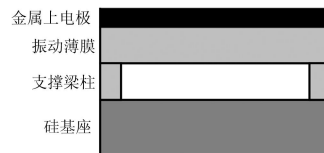


图 1 cMUT 结构图

1.1 振动薄膜的机械阻抗^[2]

根据 Mason 模型和能量守恒原理^[1], 图 1 中圆形薄膜, 其杨式模量为 Y , 泊松比为 ν , 薄膜的预应力为拉应力 T (采用 LPCVD 或 PECVD 工艺沉积振动膜后存在残留应力), 薄膜密度为 ρ , 半径为 a , 厚度为 L (单位均为 MKS 标准单位), 得到薄膜机械阻抗:

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助 (60534050)

收稿日期: 2008-01-09 修改日期: 2008-01-26

$$Z_m = j\omega L \frac{K}{K - 2(k_1^2 - k_2^2)J_1(k_1 a)J_1(k_2 a)} \quad (1)$$

$$K = ak_1 k_2 (k_1 J_1(k_1 a)J_0(k_2 a) - k_2 J_0(k_1 a)J_1(k_2 a)) \quad (2)$$

式中, ω 为角频率, $J_1(\cdot)$ 和 $J_2(\cdot)$ 表示第一类零阶和一阶贝塞尔函数。

式(2)中 k_1 和 k_2 由式(3)得出:

$$k_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{d^2 + 4c\omega^2} - d}{2c}} \quad (3)$$

$$k_2 = j \sqrt{\frac{\sqrt{d^2 + 4c\omega^2} + d}{2c}}$$

式(3)中

$$c = \frac{(Y + T)L^2}{12(1 - \nu^2)} \quad (4)$$

$$d = T$$

由式(1)可知,传感器的谐振频率与薄膜厚度、半径以及薄膜的残余应力有关。

1.2 cMUT的塌陷电压和转换效率^[3-4]

对cMUT进行机电分析,可以得出其机电转换率和塌陷电压的近似计算公式:

$$n = \frac{V_{DC} \epsilon_0^2 S}{(L + L_a)^2} \quad (5)$$

$$V_{collaps} = K \sqrt{\frac{28(Y + T)L^3 L_a^3}{27 \epsilon_0 (1 - \nu^2) a^4}} \quad (6)$$

其中: ϵ_0 与 ϵ_a 分别代表真空的介电常数与膜材料的相对介电常数, S 表示膜的面积, L_a 表示空腔间隙厚度, V_{DC} 是施加在两电极间的直流电压,当电极半径等于薄膜半径时, $K = 0.7$, 电极半径等于薄膜半径的一半时, $K = 0.82$ 。可以看出,通过增大直流偏置电压或是减小薄膜的厚度和间隙的厚度可以提高传感器的转换率。cMUT的塌陷电压与薄膜厚度,间隙厚度,薄膜半径有关,当施加在传感器上的直流电压在小于塌陷电压时,直流电压值越大,机电转换效率越高,产生的声压越大。

2 cMUT的有限元模型^[5-6]

利用ANSYS软件建立了图1所示的传感器的三维模型。在模型中传感器被简化为振动薄膜,空腔和金属电极三部分。顶端金属电极采用solid95单元模拟,振动膜由solid45单元模拟,空腔由静电结构单元trans126来模拟。选用solid45单元模拟振动膜是为了能通过此单元的热属性来引入残余应力。当膜单元的温度发生改变时振动膜所受应力也将改变,通过合理的限制振动薄膜的边界条件可引入应力。

对cMUT模型施加残余应力和直流偏置电压进行静态分析,改变直流电压直到薄膜发生塌陷,吸

合到底座上。此时的电压即传感器的塌陷电压。另外在进行静态分析的基础上,对模型施加交流电压,可对此有限元模型进行谐波分析,计算出该cMUT的谐振频率。

3 cMUT结构参数对其性能的影响

分别用前两个小节的理论分析公式和建立的有限元模型对一个cMUT单元的机械阻抗,谐振频率和塌陷电压进行计算和仿真分析,得到cMUT的结构参数变化对传感器性能的影响。结构参数包括薄膜厚度,薄膜半径,间隙厚度,和薄膜内的残余应力等等。cMUT模型中各部分的标准尺寸为:金属电极厚 $0.2 \mu\text{m}$,间隙厚度 $1 \mu\text{m}$,薄膜和金属电极半径均为 $50 \mu\text{m}$,薄膜厚度 $1 \mu\text{m}$ 。薄膜材料氮化硅的杨氏模量为 320 GPa ,泊松比 0.263 ,密度为 3270 kg/m^3 。金属电极铝的杨氏模量为 67.6 GPa ,泊松比 0.356 ,密度为 2700 kg/m^3 。真空的介电常数是 $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/M}$ 。

3.1 薄膜厚度变化对塌陷电压和谐振频率的影响

从图2可看出,当薄膜厚度为 $0.5 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 时,ANSYS分析结果是cMUT的谐振频率从 1.48 MHz 增大至 4.86 MHz 。传感器的谐振频率随着薄膜厚度的增加而增大。从图3可以看出,传感器的塌陷电压随着薄膜厚度的增加而增大。当薄膜厚度为 $0.5 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 时,cMUT的塌陷电压从 97 V 增至 502 V 。因此,在一定的频率范围内,要想提高传感器的共振频率可以增大薄膜厚度。但是增大薄膜厚度时塌陷电压也随之增大,同时会降低传感器的转换效率,所以设计薄膜厚度时要综合考虑上述因素。

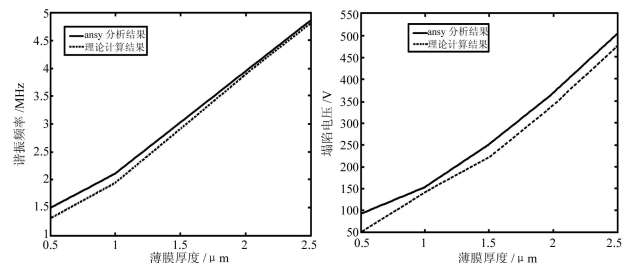


图2 薄膜厚度与谐振频率的关系

图3 薄膜厚度与塌陷电压的关系

3.2 薄膜半径变化对塌陷电压和谐振频率的影响

由图4和图5可知,cMUT的薄膜半径增大,其谐振频率和塌陷电压都随之减小。在一定的频率范围内,要想提高传感器的共振频率可以减少薄膜半径,但是减小薄膜半径会降低传感器的转换率,而且如果薄膜半径太小在牺牲层刻蚀时由于开孔过大会影响薄膜的性能。因此考虑到各方面的要求,薄

膜半径应根据所需要的谐振频率在工艺允许的范围
内进行调整。

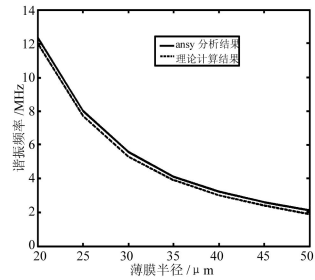


图 4 薄膜半径与
谐振频率的关系

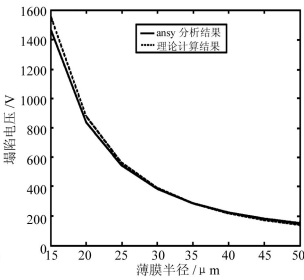


图 5 薄膜半径与
塌陷电压的关系

3.3 间隙厚度变化对塌陷电压和谐振频率的影响

由图 6 可知增大传感器空腔间隙则塌陷电压会
随之增大。通过理论公式计算和 ANSYS 仿真分析
可知传感器的谐振频率不随间隙厚度的改变而变
化,但是增大空腔厚度会降低传感器的转换率。

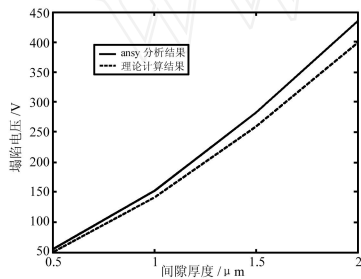


图 6 间隙厚度与塌陷电压的关系

通常作为发射器和接收器时空腔间隙的设计
要分别考虑。发射器是用来在介质中发射一定频率
的超声波,所需要的薄膜位移比较大,因此空腔间隙
厚度应比较大;而接收器是用来检测穿过待测样品
后的微小超声信号,空腔间隙厚度应较小,可以提高
传感器的灵敏度。

3.4 薄膜残余应力对塌陷电压和谐振频率的影响

由图 7 可知随着传感器振动膜内残余应力的增
加其谐振频率会增大。设计时要充分考虑传感器制
作时因加工工艺的影响而产生的薄膜残余应力对谐
振频率的影响。图 8 是薄膜残余应力与塌陷电压的
关系,ANSYS 仿真结果显示残余应力变大,塌陷电压
也会增大;由于塌陷电压的理论计算采用的是近似公

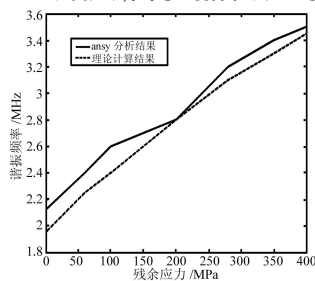


图 7 薄膜残余应力与
谐振频率的关系

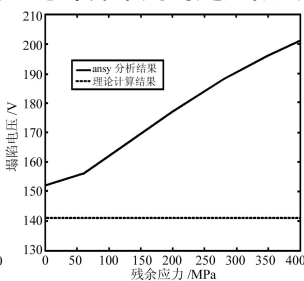


图 8 薄膜残余应力与
塌陷电压的关系

式,所以计算的结果与 ANSYS 的分析结果有差异。

4 结论

由上一节的分析结果可以看出,有限元仿真分
析结果和理论公式计算结果基本相似,曲线的变化
趋势基本是一致的。可知建立的 cMUT 有限元简
化模型是正确的。cMUT 的理论公式中没有考虑
电极的大小,位置和质量的影 响,而有限元模型中则
包括了电极部分,这也是导致两种分析结果存在差
异的原因之一。

本文介绍了 cMUT 的工作原理,通过理论计算
和有限元仿真分析,讨论了 cMUT 中薄膜厚度、薄
膜半径、薄膜残余应力和空腔厚度的变化对传感器
的塌陷电压和谐振频率的影响,提高了传感器设计
和制作的效率与可靠性。

参考文献:

- [1] Mason W P, Electromechanical Transducers and Wave Filters [M]. New York, NY: Van Nostrand, 1942.
- [2] Ladabaum I, Jin X C, Soh H T. Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Transducers [J]. IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(3): 678-690.
- [3] Olcum Selim, Senlik Muhammed N, Atalar Abdullah. Optimization of the Gain-Bandwidth Product of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers [J]. IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(12): 2211-2219.
- [4] Ergun A S, Yaralioglu G G, Khuri-Yakub B T. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Theory and Technology [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2003, 16(2): 76-84.
- [5] Yaralioglu G G, Ergun A S, Khuri-Yakub B T. Finite-Element Analysis of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer [J]. IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(12): 2185-2198.
- [6] Kirchmayer Bradley J, Moussa Walied A, David Checkel M. Finite Element Modeling of a Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer [C]// The International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, 2003.



张 慧(1975-),女,讲师,在职博士,研
究方向为超声无损检测技术、超声
MEMS 传感器, hzhang@tju.edu.cn



靳世久,男,天津大学精密仪器与光电
子工程学院教授,博士生导师,天津大
学精密测试技术与仪器国家重点实
验室资深学术委员。天津市计量测试
学会副理事长。长期从事自动测控技
术与系统的研究工作。曾获国家科技
进步二等奖,国家教育部科技进步一
等奖和中国仪器仪表学会科学技术奖。