

修改说明:

1、缺少器件结构的描述，直接给出有限元模型，可能使读者不能够清楚地理解。

文章修改后，增加了一节的内容是：cMUT 的基本结构和工作原理，通过图 1 给出了器件结构描述，文中介绍了器件的结构和工作原理。

2、关于吸合电压的分析主要在开关特性或大信号应用时，不能从论文中看出这是该传感器的关键参数，如果作者不能正确阐述吸合电压与该传感器的直接关系与参数的重要性，则整个论文的立足点都将不成立。

在文中第二节(cMUT 的基本结构和工作原理)，介绍了吸合电压是该传感器的重要参数。另外文章中第四节，添加了几个小节标题，如：4.1、传感器电极参数与吸合电压的关系，4.2、电极半径与静态电容的关系

电容式微超声传感器的电极参数优化设计

张慧, 宋光德, 靳世久, 官志坚, 刘娟

(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: 建立了电容式微超声传感器(cMUT)的有限元模型, 通过对模型进行静电-结构耦合仿真分析, 研究了金属电极的结构参数包括电极面积、电极材料以及电极相对与薄膜的位置等参数的变化对传感器性能的影响。分析了电极参数与传感器吸合电压, 静态电容, 机电转换比以及机电耦合系数的关系, 最后得到了优化的电极结构参数, 即金属电极面积为传感器振动薄膜面积的一半时, 传感器具有较低的吸合电压和较大带宽值及机电耦合系数。

关键词: 电容式微超声传感器(cMUT), 吸合电压, 静态电容, 机电耦合系数

Optimization design of the electrode parameters in capacitive micromachined ultrasonic transducer

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

(State key laboratory of precision measuring technology and instruments,

Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The metal electrode parameters affected the performance of a cMUT such as collapse voltage, static capacitance, bandwidth, transformation ratio and electromechanical coupling coefficient, the parameters including electrode size, electrode material, and the position of the electrode relative to the membrane of a cMUT. This paper reported the analysis results of these effects by a 2D finite element model, the optimal parameters of electrode in a cMUT is found. The design and fabricate of cMUT could be more feasible according the work of this paper.

Keywords: Capacitive micromachined ultrasonic transducer (cMUT), collapse voltage, static capacitance, electromechanical coupling coefficient

1、引言

由于传统的压电式超声传感器存在着压电材料与工作介质阻抗失配、探测距离短、工作温度范围小等诸多缺点, 使其发展和应用受到了很大制约。近年来, 基于MEMS制作工艺的电容式微超声传感器(cMUT)逐渐成为研究热点, cMUT的超声发射源是一层很薄

的薄膜, 可实现与工作介质的声阻抗匹配, 克服了压电传感器阻抗失配的缺陷; 利用MEMS微加工技术制作的cMUT尺寸小、自身噪声低、工作温度范围宽, 可以将前级驱动电路、前置放大器、信号处理电路等整合到同一硅片上, 可广泛应用于超声无损检测及医学成像等众多领域^{[1][2]}。

由于目前 cMUT 器件制作周期长而且成本昂贵，所以在设计传感器时要尽量对影响其性能的一些主要参数进行合理优化，以提高传感器的设计与制作的效率和正确性。本文建立了 cMUT 的二维有限元模型，通过仿真分析，研究了金属电极的面积、厚度、材料、位置等结构参数对传感器的吸合电压、带宽以及机电耦合系数等性能的影响，得到了优化的电极结构参数，为传感器的设计和制作提供了依据。

2、cMUT的基本结构和工作原理

一个传感器是由许多个相同的cMUT单元按一定间距排列成一维或二维阵列组成的。一个cMUT单元是由振动薄膜、硅基底、绝缘层、金属上电极及边缘支撑组成，其结构如图 1 所示。硅基底为重掺杂硅晶片，用作下电极。当在金属上电极和硅基底之间施加直流电压时，静电力将薄膜拉向硅基底，然后在两极间施加一定频率的交流电压，薄膜就会发生振动，产生超声波，此时cMUT可作为超声波发射器。相反，两极间施加适当的直流偏置电压后，薄膜会在外部超声波的作用下产生振动，两电极板形成的电容值就会随薄膜的振动而改变，从而产生可探测的电信号，此时cMUT用作超声波接收器。在两电极之间施加直流电压时产生的静电

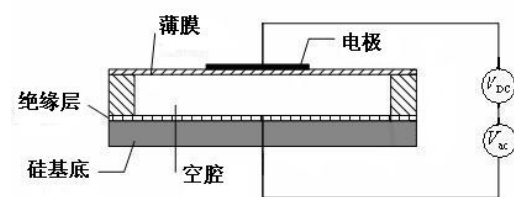


图 1 cMUT 的单元结构图

引力使薄膜拉向硅基座，同时薄膜内产生的结构应力抵消静电力而使薄膜处于平衡状态，当静电力大于结构应力时薄膜塌陷，被吸合到硅基底上，薄膜停止振动。此时所施加的直流电压称为吸合电压 $V_{collapse}$ 。吸合电压的大小影响到传感器的工作电压、机电转换比、带宽以及机电耦合系数等参数^[2]，传感器工作时的直流电压应小于吸合电压，且接近吸合电压，使传感器具有较高的发射效率和接收灵敏度。

3、cMUT 的二维有限元模型

设计具有圆形薄膜的微超声传感器，其中一个cMUT单元的二维轴对称模型如图 2 所示^{[3][4][5][6][7]}。各部分尺寸为：传感器振动薄膜的半径为 $R_m=50\mu m$ ，膜厚度为 $L_t=1\mu m$ ，空腔厚度为 $L_a=1\mu m$ ，硅基底厚度为 $1\mu m$ 。薄

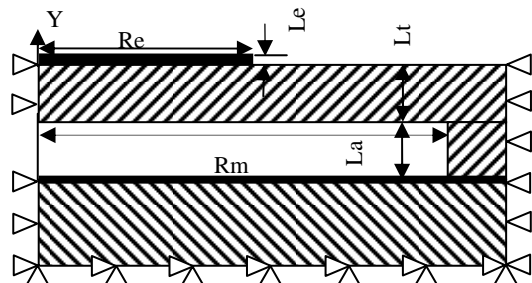


图 2 cMUT 的二维轴对称模型

膜材料为氮化硅，其弹性模量为 320GPa，泊松比 0.263，密度为 3270kg/m^3 ，相对介电常数 7.6。硅基底的弹性模量为 169GPa，泊松比 0.299，密度为 2332kg/m^3 ，相对介电常数 11.8。真空介电常数是 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/M}$ 。

本文主要研究微超声传感器的金属电极各个参数的变化对传感器性能的影响，设电极各部分的标准参数为：电极半径 $R_e=0-50\mu m$ ，厚度 $L_e=0.2$ 或 $0.4\mu m$ ，电极材

料为Al或Au, Al材料的弹性模量为 67.6GPa, 泊松比 0.355, 密度为 2700kg/m³, 而Au材料的弹性模量为 80.6GPa, 泊松比为 0.42, 密度为 19300kg/m³. 电极底部与薄膜底部的距离设为de, de=1um时表示电极在薄膜上面, 而de=0 时电极在薄膜下面, de在 0 到 1 之间表示电极在薄膜内部。

模型中采用了二维8节点的结构实体单元PLANE82和静电单元PLANE121。首先建立模型的结构物理环境, 薄膜, 电极, 底座和空腔采用PLANE82单元建立, 对各节点施加的位移约束如图2所示, 硅底座上的节点施加x, y方向上的位移约束, 薄膜圆周上的节点施加x方向的位移约束, 薄膜中心线上的节点施加x方向的位移约束。然后建立模型的静电物理环境, 将PLANE82单元改为PLANE121单元, 在金属电极和硅基座之间施加直流电压约束, 硅底座的电压值设为0V, 金属电极上的电压值即为施加到传感器上的直流偏置电压值。

4、cMUT 电极结构参数对传感器性能的影响

4.1、传感器电极参数与吸合电压的关系

假设电极为圆形^[9], 电极半径Re在0—50um之间变化, 电极位置在薄膜的上面即de=1um, 利用有限元模型求解可以得出电极半径Re与传感器吸合电压的关系曲线如图3所示, 图中两条曲线分别对应的电极厚度是0.2um和0.4um。由图3可以看出, 随着电极半径的增大, 吸合电压总体趋势是逐渐减小。当电极面积从薄膜面积的一半增大至等于薄膜面积时, 传感器吸合电压的变化较小, 吸合电压的变化不到20V; 当电极面积由薄膜面积的一半减小到零时, 吸合电压增

大很快。从图中的两条曲线可以看出电极厚度增大时吸合电压略有增加。

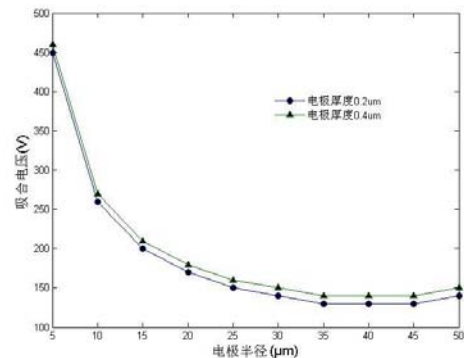


图 3 电极半径与吸合电压关系

假设 cMUT 尺寸如前所述, 将电极面积设为等于薄膜面积, 电极厚度 Le=0.2um, 电极位置 de=1um, 利用 cMUT 模型可以得到不同电极材料对传感器吸合电压的影响, 电极材料为 Au 和 Al 时电极面积与吸合电压的关系如图 4 所示, 曲线的变化趋势一致, 相同的电极面积时, 传感器采用 Au 电极时的吸合电压比采用 Al 电极时要大一些, 最大时相差为 3%, 可见电极材料的改变对传感器吸合电压的影响较小。

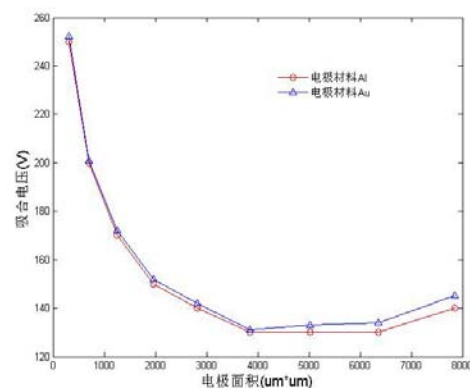


图 4 电极材料与吸合电压关系

假设 cMUT 各部分材料和尺寸不变, 即电极面积等于薄膜面积, 电极厚度 0.2um, 材料为铝电极。改变电极与薄膜的相对位

置, 即 $d_e=0-1\mu\text{m}$, 得到电极位置与吸合电压的关系, 如图 5 所示, 电极由薄膜底部逐渐移动至薄膜顶部时, 吸合电压逐渐增大。实际上当 d_e 从 0 至 $1\mu\text{m}$ 变化时, 上下电极间的距离即空腔间隙变大了, 因此吸合电压随之增大。通常情况下由于传感器的制作工艺限制, 电极一般放在薄膜下面或者薄膜上面。

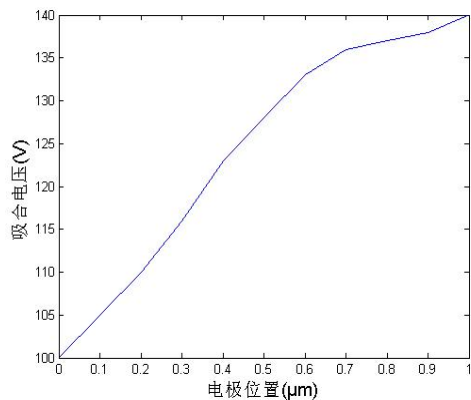


图 5 电极位置与吸合电压关系

4.2、电极半径与静态电容的关系

静态电容 C_0 是传感器的一个重要参数, 它决定了传感器带宽的下限值, 当 C_0 增大时, 传感器的带宽减小^{[1][8]}。假设 cMUT 各部分材料和尺寸不变, 电极厚度 $0.2\mu\text{m}$, 材料为铝电极, 电极位置在薄膜上面。由有限元模型可求出不同电极半径与电容 C_0 值的关系^[9], 如图 6 所示。图中四条曲线对应的电极半径分别为 $15\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$ 与 $50\mu\text{m}$ 。可以看出, 电极半径增大, 即两电极之间的有效面积增大, 使传感器的静态电容 C_0 增大。由图中曲线还可以看出随着直流电压的增加传感器静态电容 C_0 值的变化较小。若使传感器的带宽增大, 应减小电极半径。

4.3、电极半径与机电转换比的关系

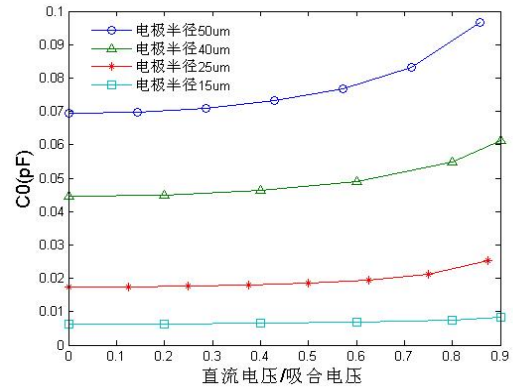


图 6 电极半径与 C_0 关系对比

cMUT 的等效电路模型^[1]中的一个重要参数是传感器的机电转换比 n , 它表示将等效电路中左边的电量转换为右边的机械量的比率, 它是传感器性能的重要指标, n 越大说明转换效率越高。图 7 中所示是电极半径与传感器机电转换比 n 的关系对比图^[10], 传感器的各参数与求静态电容 C_0 时一样。机电转换比随电压的增大而增大。电极半径增大时, n 值变大。当直流电压设为吸合电压的 80% 时, 图中从上到下四条曲线所对应的传感器机电转换比的值为 $15.02\mu\text{N/V}$, $7.05\mu\text{N/V}$, $4.71\mu\text{N/V}$, $1.44\mu\text{N/V}$ 。

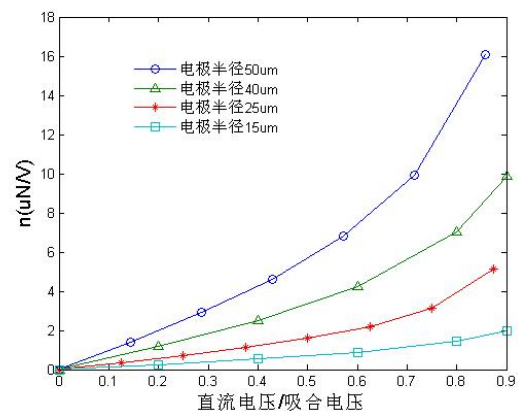


图 7 电极半径与 n 的关系对比

4.4、电极半径与机电耦合系数的关系

超声传感器实现了电能与机械能之间

的转换,其机电耦合系数定义为传感器的机械能与所存储的总能量的比值。假设cMUT各部分材料和尺寸与前面所述一样,图8所示为电极半径变化时,传感器的机电耦合系数的变化情况^{[11][12]}。由图8可以看到,当施加在传感器上的直流电压从0增大至吸合电压时,机电耦合系数逐渐增大,直至接近为1,表示传感器中的机械能全部转换为电能或者相反。图中四条曲线分别是电极半径为50um,40um,25um和15um时对应的机电耦合系数变化情况,我们发现当电极面积等于薄膜面积和约为薄膜面积的一半时,两条曲线基本重合,而当电极面积小于薄膜面积的一半,或者大于薄膜面积的一半时,同样的电压比值下,传感器的耦合系数都小于电极半径为50um和25um时的耦合系数。

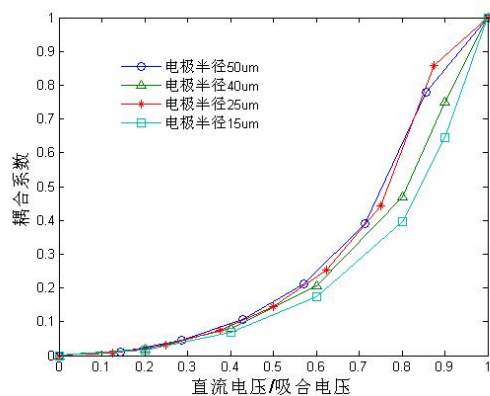


图8 电极半径与耦合系数关系对比

5、结论

利用二维 cMUT 有限元模型分析讨论了传感器电极面积,位置,材料等参数对传感器的吸合电压、静态电容、带宽及机电耦合系数的影响。通过本文的研究分析发现,当传感器的电极面积由等于薄膜面积减小至薄膜面积一半时,吸合电压的变化较小,约20V;而电极面积由0增加至薄膜面积的一

半时,吸合电压下降很快。当电极半径从50um减小到25um时,传感器在电压为0时的静态电容C0从0.069pF减小到0.017pF。电极面积等于薄膜面积或者薄膜面积的一半时,机电耦合系数大于其它情况。因此我们可以看出,当设计传感器的电极面积等于薄膜面积或者等于薄膜面积的一半时,这两种情况下传感器的吸合电压和耦合系数值相差不大,但是电极面积小时静态电容减小很多,即带宽增大,所以电极面积等于薄膜面积一半时,传感器有较好的性能,但是此时传感器的机电转换比与电极面积等于薄膜面积时相比要小一些。电极厚度与材料对传感器性能影响较小。电极制作在薄膜下面可以减小吸合电压,减小薄膜对空腔间隙的影响。因此设计传感器时要综合考虑以上各影响因素。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.

[5] Manvinder Singh, Vamshi Kommareddy, Manoj Kumar. Finite element analysis of capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) for NDE applications[C]. *AIP Conf. Proc.*, 2006, 922-929.

[6] S A Anbalagan, G Uma, M Umapathy. Modeling and simulation of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (CMUT)[C], *International MEMS Conference 2006*, 596-600.

[7] Wenchao Zhou , Ting Yu1, Fengqi Yu. A 1-D Lumped Theoretical Model for CMUT. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. July 2 - 5, 2008, 318-322.

[8] Ayhan Bozkurt, Igal Ladabaum, Abdullah Atllar. Theory and analysis of electrode size optimization for capacitive microfabricated ultrasonic transducers[J]. *IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* , 1999,46(6):1364-1373.

[9] Baris Bayram,Goksen G. Yaralioglu, Arif S. Ergun and B.T. Khuri-Yakub, Influence of the electrode size and location on the performance of a cMUT[J]. *IEEE Ultrasonic Symposium* , 2001, 949-952.

[10] Alessandro Caronti, Riccardo Carotenuto,Giosuè Caliano, Massimo Pappalardo. The effects of membrane metallization in capacitive microfabricated ultrasonic transducers[J]. *Acoustical Society of America*, 2004,115(2):651-657

[11] Goksen G. Yaralioglu, Arif Sanli Ergun, Baris Bayram. Calculation and measurement of electromechanical coupling coefficient of capacitive micromachined ultrasonic transducers[J]. *IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency*

Control , 2003,50(4):449-455.

[12] Dominique Certon, Franck Teston. A finite difference Model For cMUT Devices[J]. *IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* , 2005,52(12):2199-2210.