文章编号:1004-2474(2018)06-0896-05

用于气体传感的电容式微机械超声阵列设计

卓文军1,吴丽翔2,陈 曦1,王俊力1,王高峰2

(1. 武汉大学 计算机学院,湖北 武汉 430072;2. 杭州电子科技大学 电子信息学院,浙江 杭州 310018)

摘 要:电容式微机械超声阵列(CMUT)是微机电系统(MEMS)气体传感器的常用结构之一。为了在尽可能 降低功耗的前提下,提高气体传感器的灵敏度,对电容式微机械超声阵列尺寸进行优化。首先基于一阶集总电机 械振动模型进行理论分析,发现其灵敏度与塌陷电压成正相关,并主要受振膜厚度、电极间距和电极半径影响,以 此为依据设计符合要求的参数。然后使用 COMSOL 多物理场仿真软件,综合结构特点、空气阻尼、外接电路、弹性 软化等因素的影响,提出一种更接近实际的有限元模型。将理论分析结果代入,对尺寸参数进行进一步优化,得到 塌陷电压 11.3 V,灵敏度-3.253×10¹⁷ Hz/kg,共振频率4.858 MHz,品质因数121.45 的电容式微机械超声阵列。 关键词:电容式微机械超声阵列;灵敏度;共振频率;塌陷电压;有限元分析

中图分类号:TM23;O321 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.06.022

Design of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Array for Gas Sensing

ZHUO Wenjun¹, WU Lixiang², CHEN Xi¹, WANG Junli¹, WANG Gaofeng²

(1. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Electronics and Information,

Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) array is one of the commonly used structures of MEMS sensors. To reduce the power consumption and improve the sensitivity of the gas sensor, the dimension and structure of the CMUT array are optimized. First, with the theoretical analysis of the first-order lumped electromechanical vibration model, it is found that the sensitivity of the CMUT is positively correlated with the collapse voltage and they are mainly affected by the thickness of the diaphragm, the electrode spacing and the electrode radius. The parameters of CMUT are designed to meet with those requirements. Then a more practical finite element model is proposed, which combined with the structural characteristics, air damping, external circuits, elastic softening and other factors by using COMSOL Multiphysics simulation software. The theoretical analysis results are substituted into the model to further optimize the parameters of CMUT. Finally, a CMUT array with collapse voltage of 11.3 V, sensitivity of -3.253×10^{17} Hz/kg, resonant frequency of 4.858 MHz and quality factor of 121.45 has been developed.

Key words: CMUT array; sensitivity; resonant frequency; collapse voltage; finite element analysis

0 引言

与传统传感器相比,微机电系统(MEMS)传感器具有低成本、高灵敏度和小体积,能够获取更多的信息,在众多领域得到应用^[1]。在气体传感器领域, 电容式微机械超声阵列(CMUTs)能通过涂布不同 吸附材料在其表面,达到同时吸附并检测多种不同 气体的目的,其对不同气体的区分能力更强,精确度 也更高^[2],现已逐渐应用在基于 MEMS 气体传感器 的可穿戴智能产品^[3]。

设计电容式微机械超声阵列时,最重要的是确

定其塌陷电压和灵敏度。气体传感器共振频率一般 约在几兆或十几兆赫兹,在较高频率工作时,吸附相 同质量气体后所引起的频率变化会更明显,灵敏度 越高,因而能够检测出更微量的气体,在一些微量、 有毒、易燃气体检测方面拥有极其重要的地位,如甲 基膦酸二甲酯的检测。另一方面,由于器件尺寸与 性能的相互制约,提高共振频率的同时会相应地提 高塌陷电压。为了最大限度地发挥出器件的性能, 提高品质因数,工作偏置电压往往在略小于塌陷电 压处^[4]。这导致气体传感器的灵敏度越高,其共振

收稿日期:2018-03-19

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流基金资助项目[NSFC-ANR项目(中法)]

作者简介:卓文军(1994-),男,浙江永嘉人,硕士生,主要从事 MEMS 加工和 CMUT 超声成像和气体传感研究。通信作者:陈曦(1980-), 男,湖北武汉人,博士生导师,主要从事集成电路设计和应用方面的研究。

频率、塌陷电压也越高,即所需的偏置电压也越高, 当工作频率为几十兆赫兹时,所需的偏置电压可能 达到上千伏特,导致功耗上升,接口电路难度提高。 因此,如何在拥有较低塌陷电压的前提下使设计的 器件灵敏度尽可能高,是 MEMS 气体传感器中 CMUT 的主要设计目标。在设计时需要全面考虑 各种因素对灵敏度的影响。

首先,本文主要针对电容式微机械超声阵列在 气体传感器领域的应用,通过简化一阶集总电机械 振动模型进行理论计算,得到影响塌陷电压和灵敏 度的主要参数,针对一般工艺条件给出优化尺寸。 然后,通过 COMSOL 多物理场仿真软件进行仿真, 综合结构特点、接口电路、空气阻尼、弹性软化等因 素,利用交流电激励时薄膜振动,得到更接近实际情 况的设计结果,对结构参数进行微调优化。

1 理论计算

1.1 塌陷电压计算

为了降低理论分析的复杂性,尽量考虑影响电 容式微机械超声阵列工作的最主要因素,作如下 简化:

1) 电容式微机械超声阵列工作在一阶谐振 模态。

2) 忽略边缘电场的影响。

3)电极层为良导体,电阻为0,绝缘层完全不导电,电阻无穷大。

4) 无阻尼影响,工作在真空环境。

5) 弹性恢复力与位移是线性关系^[5]。

电容式微机械超声阵列由数个相同的单元组成,其物理结构和振动模式类似,仅考虑单个单元,如图1所示。图中,*d*为电容上、下电极间距,*x*为上电极在受库仑力作用时的位移大小。





在理论计算部分,电容式微机械超声阵列振动 部分为上电极,其形状为圆形。实际情况下,采用该 形状时,CMUT 受水流、气流等外力影响,其边缘应 力最小。下电极固定不动,上电极受弹性恢复力和 库仑力作用,库仑力包括直流偏置的静电力和交流 信号的电场力。实际加工的电容超声阵列的振膜由 薄膜层、电极层、绝缘层组成,包含多晶硅、氧化硅、 氮化硅多种材料。上电极受力分析情况:

$$F = F_{e} + F_{m} = \frac{1}{2} \times \frac{\epsilon A}{(d-x)^{2}} V^{2} - kx -$$
(1)
$$k_{1}x^{2} - k_{2}x^{3}$$

式中:V为上、下电极的电压差;A为电容极板面积; ε为自由空间的介电常数;k为电容上电极的弹性系 数;F。为上电极所受电场力;Fm为上电极机械恢复 力;k1、k2为非线性机械力的高次项系数。上电极 在运动时,整个极板受力同时向上或向下,并始终保 持与下极板平行,呈活塞运动。当电极板达到稳态 时,库仑力和弹力大小相等、方向相反,上电极所受 合力为0,则

$$\frac{1}{2} \times \frac{\epsilon A}{(d-x)^2} V^2 = kx + k_1 x^2 + k_2 x^3$$
(2)

忽略 $k_1 x^2 \langle k_2 x^3 \rangle$ 高次项的影响,同时对式(1)两 边进行微分可得

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}x} = \frac{2kx}{d-x} - k \tag{3}$$

当 dF/dx = 0 时,x = d/3,代入式(2)可得塌陷 电压^[6]:

$$V_{\rm collapse} = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\epsilon A}} \tag{4}$$

由于电容式微机械超声阵列实际工作时,其运 动模式并非完全为活塞模式,上电极板的实际最大 位移值将大于 d/3。上、下极板形状为圆形,可得其 弹性系数^[7]:

$$k = \frac{16\pi E d_{\rm m}^3}{3R^2(1-\nu^2)} \tag{5}$$

式中:E为上电极层的杨氏模量;d_m为上电极厚度; R为电极半径;v为上电极层泊松比。结合电极板 圆形面积公式和式(4)可得

$$V_{\text{collapse}} = \sqrt{\frac{128}{81} \times \frac{Ed_{\text{m}}^3 d^3}{\varepsilon (1 - \nu^2)} \times \frac{1}{R^4}}$$
(6)

实际工作时,为了提高机械转换效率,电容式微机械超声阵列工作时的偏置电压常与塌陷电压相近。品质因数^[8]为

$$Q = \frac{\omega Z_{a} (\varepsilon_{0} d_{m} + \varepsilon_{r} d)^{3}}{V_{\text{collapse}}^{2} \varepsilon_{0} \varepsilon_{r}^{3}} \propto R^{4} \left(\frac{1}{d_{m}} + \frac{1}{d}\right)$$
(7)

式中:*Z*。为振动介质的机械阻抗;ω为激励交流信 号角频率;ε。为真空介电常数;ε_r为电极的介电常数。为了得到较高的品质因数,*d*和*d*_m需取最小 值,CMUT的R取最小值,此时,塌陷电压达到最小 值。较小的塌陷电压所需的偏置电压也小,有利于 减少器件工作时的功耗。

1.2 灵敏度计算

898

结合弹性系数计算公式和共振频率计算公式可 以进一步导出 CMUT 的共振频率^[9]:

$$f_{0} = \frac{1}{R^{2}} \times \frac{\lambda^{2}}{2\pi} \sqrt{\frac{Ed_{\mathrm{m}}^{2}}{12(1-\nu^{2})\rho_{\mathrm{m}}}} \propto \frac{V_{\mathrm{collapse}}}{\sqrt{d_{\mathrm{m}}}} \quad (8)$$

式中:λ为与振动模态相关的常数,一阶振动模态时 取 3.196;ρ_m为电极层密度。

灵敏度可表示为振动电极在吸附气体前后所引 起的频率偏移量与振动电极在吸附气体前后所引起 的质量变化的比值^[10]:

$$\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}m} = -\frac{f_0}{2m} = \frac{-1}{R^4} \times \frac{\lambda^6}{256\pi^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho_{\mathrm{m}}^3}}$$
(9)

由于可以检测到的最小频率偏移 df 受检测电路限制,若要提高气体传感器的灵敏度,就要使同样的质量变化引起尽可能大的频率偏移,那么只要使CMUT 的半径减小到最小值即可。但是,气体浓度超过一定阈值后,CMUT 气体传感器灵敏度会出现明显下降^[11]。

综上可得出以下结论:

1) *d*_m、*d* 值对灵敏度无影响,为了降低器件的 功耗,提高品质因数,*d*_m、*d*取制作工艺上能达到的 最小值。

2) 灵敏度主要受 CMUT 半径影响,半径越小, 灵敏度越高。

3) 减小半径的同时会增加塌陷电压,故 R 值为 设计 CMUT 的主要优化对象,塌陷电压与灵敏度 需要权衡取舍。

4) 半径过小会使 CMUT 电容值难以检测,可 通过增加单元数来提高 CMUT 总电容。

5)由于实际情况下腔体壁固定,并具有一定厚度,半径过小会导致可振动部分比例下降,信噪比较低。

以塌陷电压不超过 12 V 为例,考虑到实际加工 时工艺条件和结构稳定方面因素的限制, d_m 、d 不能 无限减小,此处旨在提供一种优化方法,取 $d_m =$ 1 μ m,0.2 μ m 作为参考值,采用晶圆键合技术可制 得 130 nm 间距的 CMUT 腔体^[12]。E、 ν 由材料本 身性质决定,不易在设计和制作中进行调整,此处取 E=145 GPa, $\nu=0.21$ 作为参考值。

图 2 为塌陷电压随电极半径变化关系图。由图 可知,要使塌陷电压小于 12 V,CMUT 半径需大于 35.02 μm。图 3 为共振频率随电极半径变化图,半 径大于 35.02 μm时,共振频率低于 3.042 MHz。



图 4 为灵敏度随 CMUT 半径变化图。当半径 大于 35.02 μm 时,灵敏度绝对值将小于2.682× 10¹⁷ Hz/kg,即当共振频率偏移检测电路最小分辨 率为 50 Hz 时,设计的 CMUT 可检测到 1.864× 10⁻¹³ g 的质量变化。表 1 为理论计算参数表。



E/GPa	ν	λ	$ ho_{ m m}/(m kg ullet m^{-3})$
145	0.21	3.196	2 400
$\epsilon_0/(F \cdot m^{-1})$)	$d/\mu{ m m}$	$d_{ m m}/\mu{ m m}$
8.854 $\times 10^{-1}$	2	0.2	1

2 优化仿真

使用 COMSOL 多物理场仿真软件进行计算, 添加了静电场模块、电路模块、固体机械模块、移动 网格划分模块、热粘性声学模块及多物理场模块。 仿真模型针对电容式微机械超声阵列中的单个单 元,考虑实际多层膜结构及腔室壁结构特点对共振





图 5 仿真模型结构图

通过电路模块对 CMUT 外加直流偏置和交流 小信号进行激励,结合固体机械模块和静电模块仿 真弹性软化作用。电路采用典型的 T 型偏置电路 (见图 6),当所加交流信号正好处于 CMUT 共振频 率点时,CMUT 振动部分会出现最大动态位移,且 CMUT 器件的电容值在此刻达到极值,CMUT 两 端分压也达到极值。利用多物理场模块将热粘性声 学模块与固体机械模块耦合,将空气阻尼作用在腔 体表面。



图 6 T型偏置电路示意图

仿真时将薄膜层材料设为氧化硅,其厚度为 0.1 μ m,上电极材料为多晶硅,其厚为 0.7 μ m,钝化 层材料为氧化硅和氮化硅,氧化硅厚为 0.1 μ m,氮 化硅厚为 0.1 μ m。薄膜层、上电极和钝化层共同组 成振动部分,总厚度为 1 μ m。空气层高为 0.2 μ m, 绝缘层材料为氧化硅,其厚为 0.1 μ m。下电极材料 为多晶硅,其厚为 0.1 μ m。绝缘层、下电极和基底 共同组成固定部分,CMUT 半径为 35.02 μ m。具 体参数如表 2 所示。

表2 仿真计算参数表

名称	数值
空气体粘性/(µPa・s)	18.27
边界初始应力大小/MPa	100
偏置电压/V	12
交流信号电压/V	1
氧化硅密度/(kg•m ⁻³)	2 200
氮化硅密度/(kg•m ⁻³)	3 100
多晶硅密度/(kg•m ⁻³)	2 320

续表	
名称	数值
氧化硅泊松比	0.17
氮化硅泊松比	0.24
多晶硅泊松比	0.22
氧化硅杨氏模量/GPa	75
氮化硅杨氏模量/GPa	210
多晶硅杨氏模量/GPa	169

塌陷电压的仿真主要通过不断增大偏置电压的 方法,当达到塌陷电压值时,由于无法迭代出收敛 值,COMSOL 多物理场仿真软件将停止计算。因 此,能计算出的最大直流偏压值即为 CMUT 的塌 陷电压值。图 7 为振动部分的薄膜静态位移随偏置 电压变化关系图。由于偏置电压要经过一对阻值相 同的串联电阻进行分压,故而本例中塌陷电压为 14.5 V,略大于理论计算的 12 V。



图 7 薄膜静态位移随偏置电压变化关系

图 8 为 CMUT 与电阻分压后两端电压随交流 信号频率的变化图。由图可知,共振频率为 4.455 MHz,反共振频率为 4.395 MHz,品质因数 Q 为 74.25。根据式(9)可得灵敏度绝对值为 2.435× 10¹⁷ Hz/kg,略小于理论计算的 2.682×10¹⁷ Hz/ kg。仿真考虑到外接电路、弹性软化效应、空气阻 尼及 CMUT 非活塞运动的作用,且结构拥有腔体 壁,上、下电极间存在绝缘层和薄膜层,因此,仿真结 果中的塌陷电压和灵敏度结果更符合实际情况。



度、钝化层厚度和空气层厚度微调,使塌陷电压降到 12 V以下,并进一步提高灵敏度。首先,根据理论 分析 d 对共振频率无影响,先对 d 进行微调,结果 如图 9 所示。当 $d=0.17 \mu$ m 时,偏置电压最大值 为 23.6 V,即塌陷电压为 11.8 V,满足要求。然后 为保持塌陷电压不变,固定 d_m^3/R^4 值,再同时减小 d_m 、R 值来提高灵敏度。



图 9 偏置电压最大值随电极间距变化关系图

图 10 为不同半径和电极厚度组合下的 CMUT 两端电压随频率的变化关系图。由图可见,R和 d_m 越小,共振频率越高,灵敏度越高,与理论推导相符。 采用 d_m =0.923 μ m,R=33 μ m 的组合,其共振频 率为 4.858 MHz, Q=121.45,经计算得到灵敏度 绝对值为 3.253×10¹⁷ Hz/kg。若检测电路可以检 测到 50 Hz 的频率偏移时,相当于可以检测到 1.537×10⁻¹³ g 的质量变化,超过理论预设值。



图 10 不同组合下 CMUT 两端电压随频率变化关系图

3 结束语

通过一阶电机械振动模型的理论分析,确定影 响塌陷电压和灵敏度的主要因素,并给出相应要求 下对 CMUT 器件尺寸的优化方法。再结合更贴近 实际的仿真模型进行理论分析验证,得到更准确的 塌陷电压和灵敏度,对薄膜厚度、CMUT 半径、电极 间距等参数进一步优化微调,使其满足要求。通过 上述方法得到塌陷电压为 11.3 V,共振频率为 4.858 MHz,品质因数为 121.45,灵敏度为-3.253× 10¹⁷ Hz/kg 的电容式微机械超声阵列腔体结构。与 文献[13]中的 CMUT 共振频率 4.33 MHz、偏置电 压 16 V 相比,其拥有更低的偏置电压和更高的共振 频率。

参考文献:

- [1] 王朝杰,王红亮,段培盛,等. 电容式微机械超声传感器设计与仿真[J]. 压电与声光,2017,39(2):284-288.
 WANG C J, WANG H L, DUAN P S, et al. Design and simulation of capacitive micromachined ultrasonic transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(2):284-288.
- [2] LIU X, CHENG S, LIU H, et al. A survey on gas sensing technology[J]. Sensors, 2013, 12(7): 9635-9665.
- [3] DIEFFENDERFER J, GOODELL H, MILLS S, et al. Low power wearable systems for continuous monitoring of environment and health for chronic respiratory disease[J]. IEEE Journal of Biomedical & Health Informatics, 2016, 20(5):1251-1264.
- [4] KUMAR M, SEOK C, MAHMUD M M, et al. A lowpower integrated circuit for interfacing a capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) based resonant gas sensor [C]//Busan, South Korea: Sensors, IEEE, 2015:1-4.
- [5] HSU T R. MEMS & microsystems: Design, manufacture, and nanoscale engineering [M]. New York: John Wiley, 2008.
- [6] GULDIKEN R O. Dual-electrode capacitive micromachined ultrasonic transducers for medical ultrasound applications[J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2008(8):2234-2243.
- [7] WERELEY S T. Fundamentals and applications of microfluidics[M]. Massachusetts: Artech House, 2006.
- LADABAUM I, JIN X, SOH H T, et al. Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1998, 45(3):678-90.
- [9] SOEDEL W, FAULKNER L. Vibrations of shells and plates[M]. 3th ed. Florida: CRC Press, 2004.
- [10] MAHMUD M M, KUMAR M, ZHANG X, et al. A capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) array as a low-power multi-channel volatile organic compound (VOC) sensor[C]//Orlando, FL, USA: Sensors, IEEE, 2016:1-4.
- [11] BARAUSKAS D, PELENIS D, VIRZONIS D, et al. Greenhouse gas molecule CO₂ detection using a capacitive micromachined ultrasound transducer[J]. Analytical Chemistry,2016,88(13):6662-6665.
- [12] PARK K K,LEE H J,KUPNIK M, et al. Fabricating capacitive micromachined ultrasonic transducers with direct wafer-bonding and LOCOS technology [C]// Tucson, Arizona, USA: IEEE, International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems, IEEE, 2008:339-342.
- [13] MAHMUD M M,LI J,LUNSFORD J E, et al. A lowpower gas sensor for environmental monitoring using a capacitive micromachined ultrasonic transducer [C]// Valencia, Spain: Sensors, IEEE, 2014:677-680.