

新型 MEMS 质量传感器的研究

熊磊^{1 2 3} 焦继伟^{2 3} 葛道晗^{2 3} 宓斌伟^{2 3} 张轩雄¹

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 中科院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050; 3. 中科院上海微系统与信息技术研究所微系统技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 研究了一种新型 MEMS 质量传感器的设计、仿真与制造。这种用于流体中微小分子质量检测的 MEMS 器件, 具有高度对称的中空圆盘结构, 以谐振的方式工作于简并/解并模态, 能在测量时实现对环境波动的自我补偿。器件的中空腔内可以流过被测流体, 腔外的真空环境使得圆盘谐振器受到更小的阻尼。利用 ANSYS 对圆盘在质量吸附前后的模态及频率分裂进行仿真, 计算结果显示对质量的测量灵敏度达 pg 量级。采用 MEMS 双牺牲层工艺方法成功制作出具有双层结构的空心圆盘谐振器。

关键词: MEMS; 谐振器; 质量传感器; 自补偿

中图分类号: TP212; TN405

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2011)08-0001-03

Study on Novel MEMS Mass Sensor

XIONG Lei^{1 2 3} JIAO Ji-wei^{2 3} GE Dao-han^{2 3} MI Bin-wei^{2 3} ZHANG Xuan-xiong¹

(1. School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Micro-system and Information, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3. Science and Technology on Micro-system Laboratory, Shanghai Institute of Micro-system and Information, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: This paper investigated the design, simulation and fabrication of a novel MEMS mass sensor. The highly symmetric MEMS device used for micro-molecule mass sensing in fluid worked in the principle of mode degeneration and non-degeneration when resonating, being advantaged in self-compensating with environmental fluctuation. Analyte is confined in the hollow channel, external surrounded by vacuum environment eliminating viscous damping. Modes of disk when mass sorption/desorption were simulated in ANSYS and an order of pg test resolution can be obtained. Using a standard MEMS process flow, the hollow disk resonator with double structures was fabricated with dual-sacrificial-layer.

Key words: MEMS; resonator; mass sensor; self-compensating

0 引言

目前, MEMS(微机电系统)技术广泛应用于生化、医学等方面的研究, 如病毒检测、生物分子辨识等, 而利用 MEMS 器件对流体中微小分子的质量检测也是非常重要的研究方向^[1]。传统的悬臂梁谐振器通过测量质量改变引起的谐振频率绝对变化来完成检测, 这种方式在测量时, 因为被测物质量非常微小, 测量结果受环境的影响比较大, 会出现较大的漂移^[2]。一般通过增加参考结构或者补偿电路^[3]的方式来改善, 但这样不仅增加了器件的复杂程度, 更降低了测量精度。同时, 在对一些流体中小分子的质量检测时, 被测物常常处于液态环境中, 液体的粘滞以及环境阻尼对谐振器件的影响都非常大, 给测量带来很多不便。Thomas P. 等提出让被测流体流过一个被真空环境包围的中空腔, 从而消减谐振器件在检测时的能量衰减^[4-5]。

为此, 提出一种新型的 MEMS 中空圆盘谐振器, 圆盘的对称结构能够对环境波动实现自我补偿; 中空腔内可以流过被测流体, 器件封装后, 谐振器件与流体结合为整体处于真空环境中, 可以减小测量时流体的粘滞系数和环境阻尼。这种中空

圆盘谐振器用于对流体中微小分子的质量检测, 具有高灵敏度和高品质因数。

1 工作原理与模态仿真

1.1 工作原理

理想的圆盘是中心对称结构, 能够工作在简并/解并模态^[6]。一对相邻的简并模态具有相同的自然频率(图 1(a))。当对图 1(b)所示的 4 个中心对称的扇形吸附区功能化处理后, 如对特定区域涂覆抗原蛋白分子, 流体中被检测的微小分子(如抗体蛋白分子)就可以吸附在这些特定的区域(图 1(c))。质量吸附后圆盘的对称结构将被打破, 这对模态的自然频率就发生分裂, 也就是解并。频率的分裂值可以作为吸附的小分子质量的输出, 以一种准数字化的方式读出被检测的质量。

1.2 模态仿真

轴对称的圆盘结构, 其振动模态在空间上与 $\sin n\theta/\cos n\theta$ 成比例变化^[7-8], 其中 n 为波节直径数目, θ 为径线所在位置的角度。使用 ANSYS 对圆盘在质量吸附前的模态仿真(图 2(a), 图 2(b)), 被选定的两阶简并模态具有几乎相同的自然频率(210 kHz), 但振动模态在空间上具有 45° 的相移, 为 $\sin 2\theta/\cos 2\theta$ 模

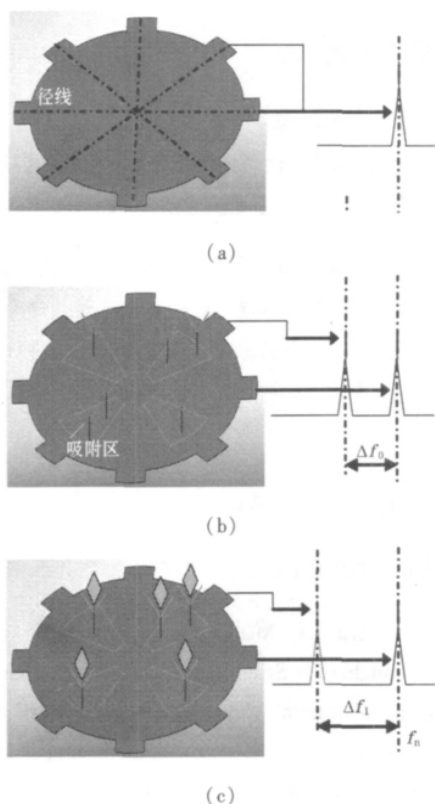


图1 圆盘谐振器的工作原理

式。为了分析吸附质量与频率分裂的关系,在功能吸附区用一层金属代替吸附质量,通过改变金属薄层的厚度,在 ANSYS 中模拟质量吸附前后以及不同金属厚度(不同吸附质量)下的模态及频率变化规律。从仿真结果可以得知,在有质量吸附到圆盘表面后,圆盘的简并模态被打破,选定的一对简并模态在空间上发生 45° 相移,并且谐振频率也随之改变。当功能区金属的厚度为 $0.3 \mu\text{m}$ 时,这对模态解并为图 2(c) 和图 2(d) 所示,频率改变为 216 kHz 和 223 kHz ,则这两阶模态频率分裂的差值为 $\Delta f = 7007 \text{ Hz}$ 。

1.3 模拟结果分析

在模拟时,设定功能吸附区金属铝薄层的杨氏模量为 69 GPa ,泊松比为 0.3 ,密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,可以计算得吸附区 $0.3 \mu\text{m}$ 厚度金属薄层的质量为 $\Delta m = 2.4 \times 10^{-11} \text{ kg}$,于是,圆盘谐振器的测量灵敏度 $\left(\frac{\Delta m}{\Delta f}\right)$ 能够达到 $3.4 \times 10^{-12} \text{ g/Hz}$ (即 3.4 pg/Hz)。

圆盘谐振器吸附不同质量时,其从简并模态到解并模态的变化也随之改变,频率的分裂也不相同。图 3 为解并模态下两阶模态频率及频率分裂的差值与不同厚度 ($0.1 \sim 0.38 \mu\text{m}$) 吸附层的关系。

质量的吸附会打破圆盘的对称性,出现模态的解并。图 3 中两阶解并模态频率分裂的差值与质量增加成近似线性关系。

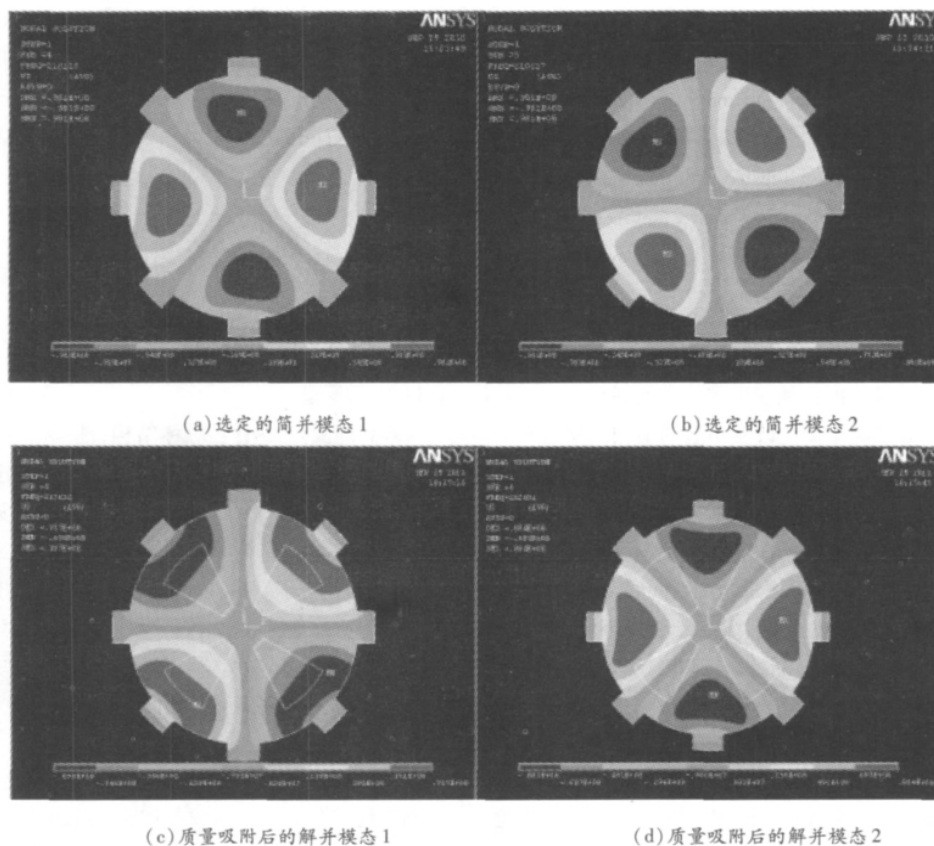


图2 有限元对质量吸附前后圆盘模态的仿真

于是,吸附的质量就可由两阶解并模态频率分裂的差值来近似表示,即:

$$\frac{\Delta m}{m} = k \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (1)$$

式中: m 是圆盘在 $\sin n\theta/\cos n\theta$ 模态下的质量, kg ; f 是圆盘在

$\sin n\theta/\cos n\theta$ 横态下的自然频率, Hz; k 为常数; Δm 为吸附的质量; Δf 为质量吸附后解并模态分裂频率的差值。

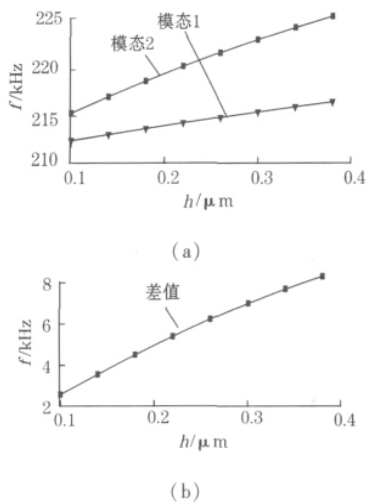


图3 模态频率及频率差值随薄膜厚度变化曲线

2 工艺制造

在 MEMS 工艺流水线上,使用双牺牲层方法,配合淀积和刻蚀工艺,制作谐振器器件。图4为谐振器工艺流程图。

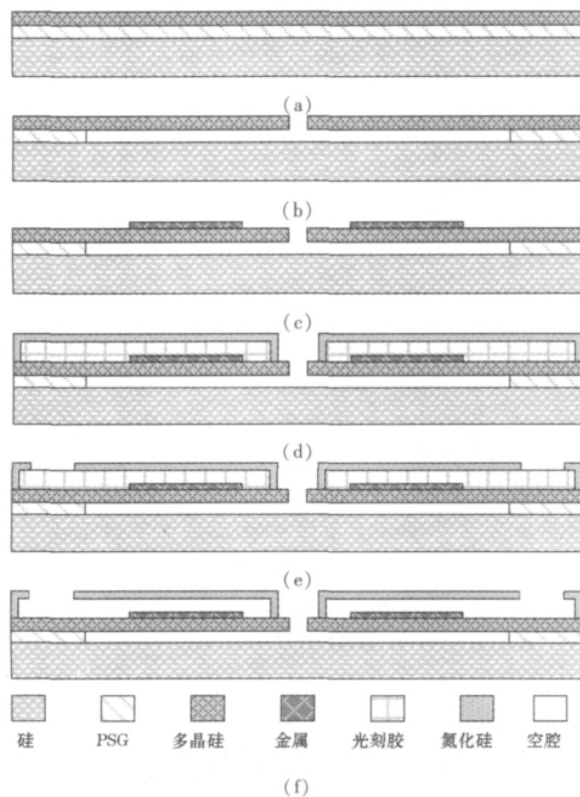


图4 谐振器工艺流程图

首先使用 LPCVD(低压化学汽相淀积) 的方法在 4 英寸 n 型 $<100>$ 晶向的中阻 ($3 \sim 8\Omega \cdot \text{cm}$) 硅片上依次淀积 1 层 $1\mu\text{m}$ 厚的磷硅酸玻璃(PSG) 和 1 层 $1\mu\text{m}$ 厚的多晶硅(图4(a))。其中 PSG 作为牺牲层,多晶硅作为圆盘结构层。在多晶硅表面光刻出 $10\mu\text{m}$ 直径的圆形释放孔, DRIE (深反应离子刻蚀) 后,在 40% 氢氟酸溶液中释放掉以圆孔为中心直径为 $420 \sim 440\mu\text{m}$ 的 PSG 区域,则圆盘结构就悬浮在衬

底上(图4(b))。然后在圆盘表面溅射金属,光刻出图形后进行金属腐蚀,形成电极和吸附功能区(图4(c))。接着在圆盘表面涂覆光刻胶作为第二层牺牲层,光刻出中空腔体图形后在其表面溅射一层 300nm 的氮化硅薄膜作为腔体的密封膜(图4(d))。刻蚀出释放窗口(入口/出口) 后(图4(e)),在丙酮溶液中释放掉牺牲层(图4(f))。最后用 DRIE 方法刻蚀出圆盘周围的扇形刻蚀区,由对称的八根梁支撑的悬浮圆盘谐振器如图5所示。

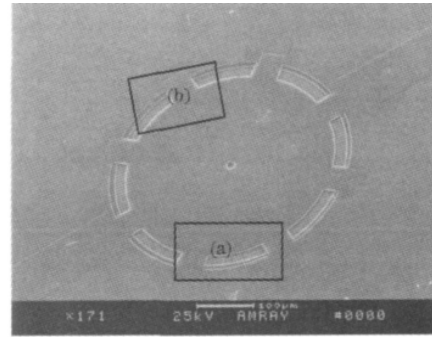
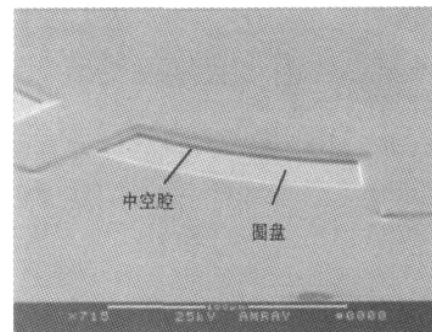
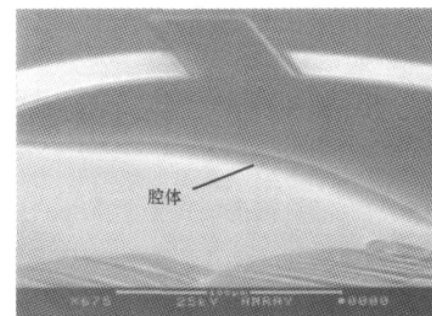


图5 中空圆盘谐振器的 SEM 图

分别对图5中(a) 和(b) 区域在扫描电子显微镜(SEM) 下局部放大,器件的外边缘局部视图如图6(a) 所示,释放后的中空腔体如图6(b) 所示。真空封装后,流体从入口/出口流经器件的中空腔,被检测物将会吸附在圆盘的特殊功能区。



(a) 圆盘边缘局部视图



(b) 中空腔局部视图

图6 器件 SEM 图局部结构

3 结束语

对称结构的新型 MEMS 中空圆盘谐振器,在简并/解并模态的工作方式下可以减小环境波动对器件性能的影响,以自我补偿的方式提高测量精度。被真空环境包围的中空腔,不仅能流过被测流体,更能减小器件谐振时的阻尼衰减, (下转第 16 页)

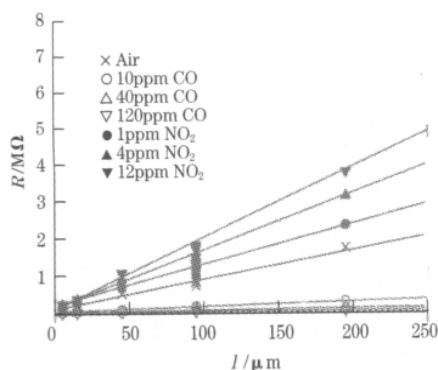
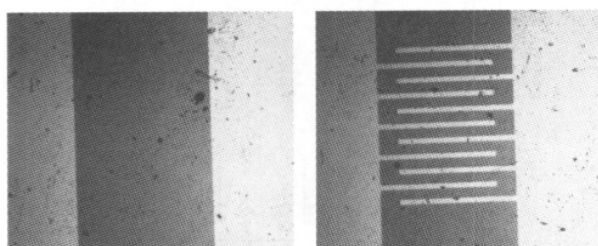


图6 不同气体中 SnO_2 气敏材料初始电阻值与电极间距的关系曲线^[1]



(a) 无电极样品

(b) 有电极样品

图7 SnO_2 气敏薄膜样品

为电极间 SnO_2 气敏薄膜电阻值计算公式

$$R_{\text{nonelectrode}} = \frac{\rho(d+c)}{(h+l)(11a+10b)} \quad (6)$$

式中: h 为金电极的厚度; l 为金电极上方的 SnO_2 气敏薄膜的厚度。

有叉指电极时样品的电阻值为

$$R_{\text{electrode}} = \frac{\rho(d+c)}{h(11a+10b)} \parallel \frac{1}{5} \parallel (R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4) \quad (7)$$

由于金电极本身的电阻值远小于 SnO_2 气敏材料的电阻值,故在计算中可忽略。为了计算方便,利用 LabVIEW MathScript 编写了计算程序^[5]。由于 SnO_2 的电阻率 ρ 不易获得,故定义两组样品电阻比值 P 为

$$P = R_{\text{nonelectrode}} / R_{\text{electrode}} \quad (8)$$

用于比较理论计算值与实验值。用旋涂法分别在两组样品上旋涂 10 层、20 层、30 层 SnO_2 纳米薄膜,利用搭建的测试系统分别测试样品在不同旋涂层数下的电阻值^[6],经计算得 P 值。如图 8 所示,实验值与理论计算值重合性不好,原因是上述理论计算并未考虑 SnO_2 气敏材料本身的结构组成及烧结过

程中可能带来的裂纹等缺陷。但 P 值随着旋涂层数的变化趋势是一致的,且理论计算值与实验值差值也不是很大,说明用该电极间分布电阻计算方法对于初步估计气敏材料初始电阻值是完全可行的,这对气体传感器的设计、测试和优化具有一定的参考价值。

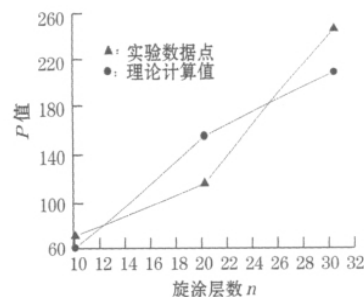


图8 电极间分布电阻理论计算与实验值与样品旋涂层数的关系图

4 结论

利用有限元分析手段,分析了测试电极的存在对温度场分布的影响,确定了气体传感器叉指电极结构参数。采用溶胶凝胶法制备了两组样品,在这两组样品上分别旋涂不同层数的 SnO_2 纳米薄膜,分析了试验测得 P 值与理论计算值,得出该电极间分布电阻计算方法是可行性的,这对以后的传感器结构设计、测试及优化具有一定的借鉴。

参考文献:

- [1] BARSAN N, KOZIEJ D, WEIMAR U. Metal oxide-based gas sensor research: How to?. Sensors and Actuators B 2007, 121: 18-35.
- [2] 徐甲强, 韩建军, 孙雨安, 等. 半导体气体传感器敏感机理的研究进展. 传感器与微系统 2006, 25(11): 5-8.
- [3] WANG J, ZHANG P, QI J Q, et al. Silicon-based micro-gas sensors for detecting formaldehyde. Sensors and Actuators B, 2009, 136: 399-404.
- [4] 张鹏, 王兢. 平面工艺 SnO_2 薄膜甲醛气敏元件的研究. 传感技术学报 2009, 22(1): 6-10.
- [5] 岂兴明, 周建兴, 矫津毅. LabVIEW 8.2 中文版入门与典型实例. 北京: 人民邮电出版社 2008.
- [6] 朱斌, 殷晨波, 陶春旻, 等. 微气体敏感单元实验平台. 仪表技术与传感器 2010(7): 84-86.

作者简介: 朱斌(1985—), 博士, 主要从事微气体传感器方面的研究。

E-mail: zhubin08058@163.com

(上接第3页) 提高 Q 值。测量一对简并模态频率分裂的方式获取被测质量,能获得更高的灵敏度。这种用于流体中微小分子质量检测的新型 MEMS 谐振器将会在生命科学等领域有广泛应用前景。

参考文献:

- [1] MAREK J. MEMS Technology—from Automotive to Consumer, Proc. IEEE MEMS 2007: 59-62.
- [2] 王大甲, 胡放荣, 姚军, 等. 基于微悬臂梁的化学传感器的灵敏度研究. 传感技术学报 2008, 21(8): 1333-1336.
- [3] JUNG U, KUWANA K. Photo-response compensated piezoresistive cantilever for use in fluorescence microscopy. IEEE MEMS 2010: 588-591.
- [4] THOMAS P, MICHEL G, SCOTT M, et al. Weighing of biomolecules,

single cells and single nanoparticles in fluid. Nature 2007, 446(26): 1066-1069.

- [5] BURG T P, MANALIS S R. Suspended microchannel resonators for biomolecular detection. Applied Physics Letters 2003, 83(13): 2698-2700.
- [6] DEUTSCH B M. Nondegenerate normal mode doublets in vibrating flat circular plates. Am. J. Phys. 2004(72): 220-225.
- [7] ISMAIL A K. The principles of a MEMS circular diaphragm mass sensor. J. Micromech. Microeng 2006(16): 1487-1493.
- [8] ISMAIL A K. The fabrication, characterization and testing of a MEMS circular diaphragm mass sensor. J. Micromech. Microeng 2008(18): 025021.