

文章编号:1000-582X(2009)09-0997-05

谐振式微加速度计驱动和检测结构设计及制作

何高法¹,唐一科¹,周传德²,何晓平³,吴 英²

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆科技学院 机械系, 重庆 401331;

3. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要:基于谐振式加速度计的工作原理和结构特点,设计了一种新型微加速度计谐振器,用解析法和有限元法计算了谐振器的横向驱动力以及其处于谐振状态时的检测电容值。综合粘性阻尼、运动阻尼和气膜阻尼,分析了谐振器在大气环境下的阻尼和品质因子。应用 MEMS (micro-electromechanical system) 工艺,完成了微加速度计谐振器的制作。测试结果表明:谐振器性能好,谐振频率为 54 523.5 Hz,与设计的理论值误差约为 13.6%。

关键词:微机电系统;加速度计;谐振器;静电梳齿

中图分类号:TH11,TH7

文献标志码:A

Design and fabrication of a novel resonator for resonant accelerometer

HE Gao-fa¹, TANG Yi-ke¹, ZHOU Chuan-de², HE Xiao-ping³, WU Ying²

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Department of Mechanical Engineering, Chongqing University of Science and Technology,

Chongqing 401331, P. R. China; 3. Institute of Electronic Engineering,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, P. R. China)

Abstract: A novel resonator for accelerometer with sensing and actuating combs was designed and fabricated based on micro-electromechanical system (MEMS) process. Driving force and demand voltage of the resonator were analyzed by analytical method and Finite-Element Method (FEM). Sensing capacitance on resonance state and Q-factor under atmosphere was calculated by these two methods. The micro-fabrication process was planned and realized using MEMS (Micro-electromechanical System) method. The testing results show the performance of the resonator is high; the natural frequency of the resonator is 54 523.5 Hz, which has the error of 13.6% with the theoretical value.

Key words: micro-electromechanical system; accelerometer; resonator; electrostatic comb

谐振式微传感器是近年来传感器和 MEMS (micro-electromechanical system) 领域的研究热点,这是由于它具有高灵敏度、高带宽、抗干扰性强和准数字的频率信号输出等优点^[1-3]。谐振器及其驱动和检测问题是谐振式微传感器的关键技术之一。通常的谐振器驱动方式有:静电驱动、电磁驱动、压电

驱动、电热驱动和光热驱动等;而检测方式有:电容检测、电阻检测和光检测等^[4-6]。梳齿式静电驱动和电容检测谐振器是比较有效的经典方法,也是国内外研究的热点^[7-9]。同时,谐振式也是在惯性导航和汽车工程等领域有广泛应用的微加速度计^[10-11]的发展方向之一。但由于加速度计结构中的谐振器不仅

收稿日期:2009-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60876088)

作者简介:何高法(1972-),男,重庆大学博士研究生,主要从事 MEMS、微机构学和微传感器研究。

唐一科(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) yktang@cqu.edu.cn。

要求工作在谐振状态,而且要求谐振器的谐振频率随加速度的变化而变化;另外,由于加速度计结构的复杂性,导致加速度计谐振器结构复杂,驱动和检测困难。笔者基于经典的梳齿式横向静电驱动和电容检测理论设计了一种新型结构梳齿电容,有效地提高了谐振器驱动力和检测电容值,同时实现了基于该谐振器的微加速度计原型。

1 谐振器参数设计

加速度计谐振器设计时要考虑的主要因素有:自身固有频率高、频率对外力变化敏感、驱动力需求小、检测电容足够大(谐振时振幅足够大)、谐振时不发生屈曲、最大应力小于材料强度极限以及品质因子高等。为此,根据加速度计的工作原理和结构特征,基于双端固定音叉(DETF)^[12]结构设计并优化了谐振器振动部件结构,如图 1 所示。表 1 给出了 DETF 谐振器几何参数和部分特征量。

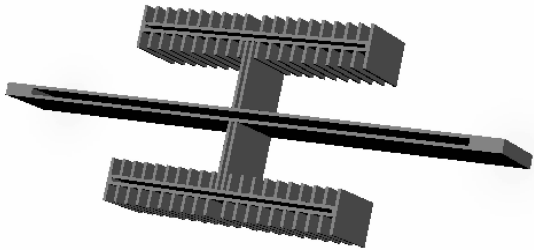


图 1 DETF 谐振器

表 1 DETF 梁参数及特征量

音叉梁长度 / μm	音叉梁宽度 / μm	音叉厚度 / μm	谐振频率 /Hz	频率对轴向外力的变化 / $(\text{MHz} \cdot \text{N}^{-1})$	音叉梁横向刚度 / $(\text{m} \cdot \text{N}^{-1})$
400	4	30	63 163.1	4.6	0.802

2 驱动和检测结构设计

图 2 为包含驱动和检测梳齿的完整谐振器结构。梳齿的设计参数如表 2 所示。

表 2 梳齿设计参数

梳齿间距 (d)	梳齿小端宽度 (b_1)	梳齿大端宽度 (b_2)	动静梳齿重叠段长度 (l)	梳齿顶端到对应梳齿根部距离 (a)	梳齿厚度(深度) (t)
3	2	4	12	8	30

2.1 梳齿横向驱动力和检测电容值理论分析

梳齿之间的电容为^[13]

$$C = 2N\epsilon \frac{lt}{d} + (2N + 1)\epsilon \frac{tb}{a}, \quad (1)$$

式中: N 为梳齿数; ϵ 为介电常数;其它符号含义见表 2。

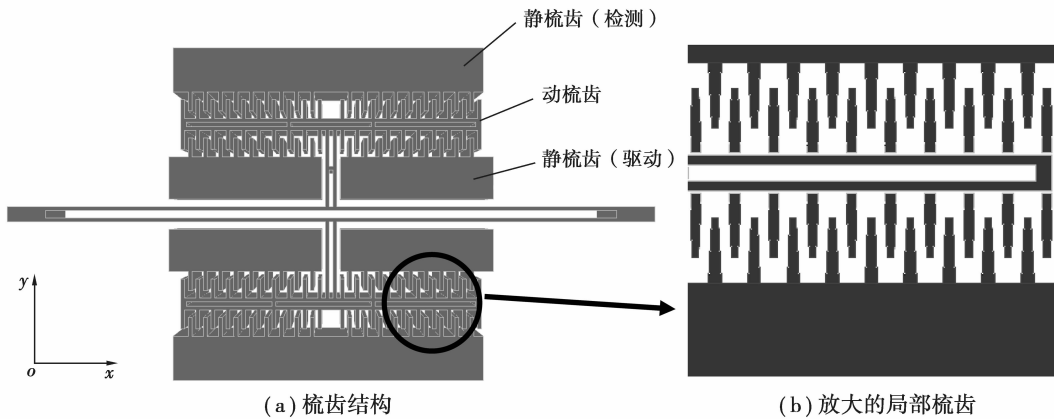


图 2 谐振器检测和驱动梳齿结构

若加载与梳齿电容两端的电压为 U , 则电场能量为

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = N\epsilon U^2 \frac{lt}{d} + \left(N + \frac{1}{2}\right)\epsilon U^2 \frac{tb}{a}.$$

将电场能量 E 对 y 轴向位移求偏导数, 则得沿 y 轴方向的静电吸力

$$F_y = \frac{\partial E}{\partial y} = N\epsilon U^2 \frac{t}{d} + \left(N + \frac{1}{2}\right)\epsilon U^2 \frac{tb}{a^2}, \quad (2)$$

因实际结构中 a^2/b 比 d 大很多, 故式(2)可简化

$$F_y = \frac{N\epsilon t U^2}{d}, \quad (3)$$

由式(3)可以看出力 F_y 与梳齿在 y 方向的位移无关。

在驱动端固定电极上施加的是带有直流偏置的交流电压,同时在检测端电极上加同等大小的直流电压,则两对梳齿以推挽方式驱动。即

$$U_{驱动} = U_p + U_D \sin \omega t,$$

$$U_{检测} = U_p,$$

式中: U_p 为直流偏置电压; U_D 为交流电压幅值; ω 为角频率。在该电压作用下,检测和驱动两个固定电极对活动电极的静电吸力可表示为

$$F_{y驱动} = N\epsilon \frac{t}{d} (U_p^2 + 2U_p U_D \sin \omega t + U_D^2 \sin^2 \omega t),$$

$$F_{y检测} = N\epsilon \frac{t}{d} U_p^2.$$

静电吸力的方向总是使电极之间的电场能量趋于最大。因此驱动端固定电极对活动电极的静电吸力沿 y 轴的负向,检测端的静电吸力沿 y 轴的正向。则梳齿电极的静电驱动力为

$$F_y = F_{y驱动} - F_{y检测} =$$

$$N\epsilon \frac{t}{d} (2U_p U_D \sin \omega t + U_D^2 \sin^2 \omega t), \quad (4)$$

当 $U_p > U_D$ 时忽略高阶小量,则式(4)可写为

$$F_y = 2N\epsilon \frac{t}{d} U_p U_D \sin \omega t. \quad (5)$$

由此可见,梳状电极横向静电驱动力是随时间按简谐规律变化的,其角频率与驱动电压的角频率相同,幅值与梳状电极的几何参数及驱动电压有关,而与活动电极相对固定电极的位移无关。当 $N = 18$, $U_p = 10 \text{ V}$, $U_D = 5 \text{ V}$,由式(5)可得最大横向驱动静

电力为 $0.12 \mu\text{N}$ 。同时由式(1)可以计算出当振幅为 $1 \mu\text{m}$ 时的电容变化量为 $6.0328 \times 10^{-15} \text{ F}$ (基准电容为 $3.3621 \times 10^{-14} \text{ F}$)。

2.2 仿真分析

上述理论分析中忽略了高阶小量,计算结果有较大误差,故采用有限元软件对其进行仿真分析。同时分析相同结构尺寸的直齿梳齿谐振器和斜齿结构谐振器的检测端电容值和横向驱动力,结果见表 3和图 3。结果表明,与相同尺寸的直齿梳齿谐振器相比,斜齿结构的谐振器将检测电容提高了 47%,在相同的驱动电压下将横向驱动力提高了约 13.9%。

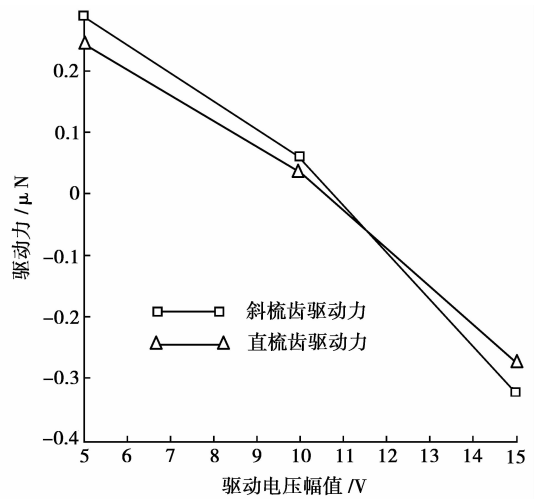


图 3 驱动力的有限元仿真结果

表 3 驱动力和检测电容的有限元分析结果

检测端电容(无振动)/pF		检测端电压/V	驱动端电压/V	驱动力/μN	
直齿梳齿	斜齿梳齿			直齿梳齿	斜齿梳齿
3.828×10^{-2}	5.636×10^{-2}	10	5	-0.284 6	-0.324 1
			10	0.048 3	0.059 9
			15	0.250 3	0.290 1

3 阻尼和品质因子分析

谐振器的阻尼主要包括梳齿结构的空气阻尼、DETF 梁之间的气膜阻尼和梁的结构阻尼,在正常大气压下,空气阻尼是最主要的阻尼^[14]。

3.1 梳齿间的粘性阻尼

梳齿间的粘性阻尼为牛顿阻尼力,其阻尼系数为

$$c = \frac{\mu A_p}{d},$$

式中: μ 为空气的动力粘度; A_p 为梳齿重叠段的面积; d 为梳齿间距。那么 DETF 梁梳齿间粘性阻尼

$$系数总和为 c_z = 4N \frac{\mu A_p}{d},$$

其中 N 为检测和激励梳齿总数。

$$品质因子 Q_1 = \frac{1}{c} \sqrt{km},$$

式中: k 为系统等效刚度,即 DETF 梁的横向刚度; m 为系统等效质量(等于梳齿质量与梁质量的 13/35 之和)。

3.2 运动时空气阻力对梳齿产生的阻尼

$$梳齿运动时的空气阻力为 F = \frac{1}{2} C_D \times \rho v^2 A,$$

式中： A 为梳齿的迎风表面积； C_D 为空气阻力系数； v 为运动速度； ρ 为空气密度。

$$c_p = \frac{1}{2} C_D \times \rho A,$$

则振动等效粘性阻尼系数 $c_e = \frac{8c_p \omega B}{3\pi}$ ，式中 B 为稳态响应振幅，其计算式为

$$B = \frac{3\pi m}{8c_p \lambda^2} \sqrt{-\frac{(1-\lambda^2)^2}{2} + \sqrt{\frac{(1-\lambda^2)^4}{2} + \left(\frac{8c_p \lambda^2 P_0}{3\pi k m}\right)^2}},$$

由此可知品质因子 $Q_2 = \sqrt{\frac{3\pi k m}{8c_p P_0}}$ ，其中 P_0 为驱动力最大值。

3.3 DETF 梁之间的气膜阻尼

由气膜阻尼模型可以得到其等效粘性阻尼系数

$$c_s = \frac{\nu h_b^3 l_b}{d_b^3},$$

式中： ν 为修正系数， $\nu = 1 - 0.6 \frac{h_b}{l_b}$ ， $h_b \leq l_b$ ， h_b 为 DETF 梁的宽度， l_b 为 DETF 梁的长度； d_b 为 DETF 两梁之间的间距。

$$Q_3 = \frac{1}{c_s} \sqrt{k m}.$$

3.4 谐振器总品质因子

在大气环境下不考虑结构阻尼，则谐振器的总品质因子为

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \frac{1}{Q_3}.$$

4 加工制作与测试

加速度计谐振器采用 ICP 深硅刻蚀和体硅溶片工艺，其工艺过程如图 4 所示。使用单晶硅硅片，清洗后浓硼扩散形成腐蚀自停止层；在另一面刻蚀键合台，用 ICP 刻蚀出结构形状(图 4(a))；在玻璃片工艺中，采用硼硅玻璃光刻出形状后溅射金属电极和引线(图 4(b))；硅、玻璃键合后(图 4(c))，背面湿法腐蚀去除大部分硅，释放结构(图 4(d))。与其它结构分离方法相比，该方法成品率高，结构与衬底间的间隙容易控制，加工工艺过程简单，成本较低，整个过程只需要 3 块掩模版，3 次光刻。图 5 为加工后谐振器的 SEM 图片。

测试时，由信号发生器产生 $5\sin \omega t$ 的交流信号叠加 10 V 直流电压后加载于驱动端，检测端加 10 V 直流信号，如图 6 所示。活动梳齿以某一频率振动时，电容随之改变，经 C/V 转换电路后在检测端输出同频率的电压信号。

图 7 为检测用 PCB 电路照片。测试表明谐振器谐振状态良好，谐振频率为 54 523.5 Hz。

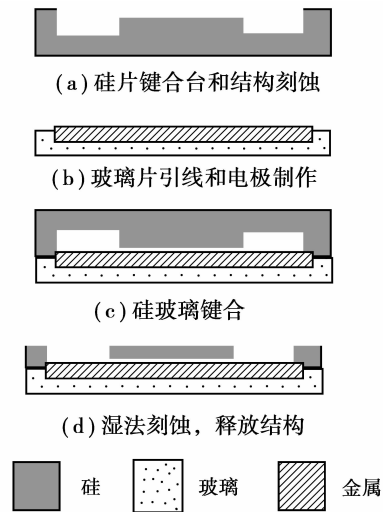


图 4 谐振器加工工艺过程

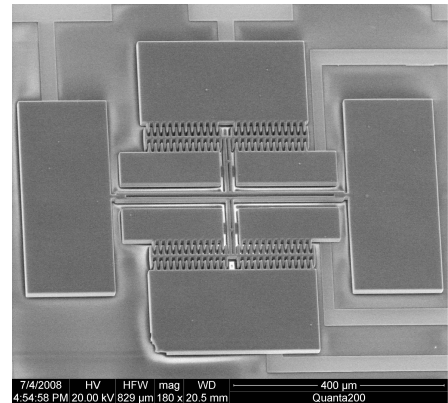


图 5 谐振器 SEM 图片

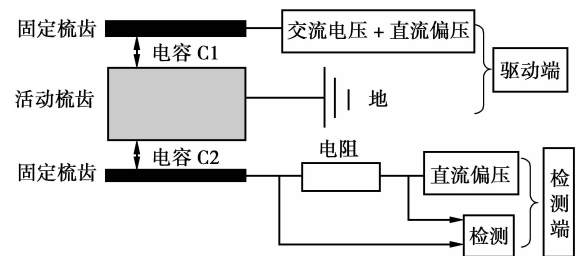


图 6 测试原理

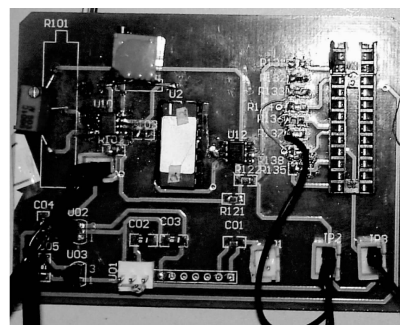


图 7 测试用 PCB 电路板

5 结 语

通过对梳齿式谐振器的理论和有限元仿真分析,设计了一种新型谐振器结构,完成了谐振器的制作并进行了测试。测试表明所设计的谐振器具有良好的谐振状态,谐振频率为 54 523.5 Hz,为设计制作高性能的谐振式传感器提供了保障。另外,基于该谐振器设计的微加速度计正在中国工程物理研究院电子工程研究所的 MEMS 中心制作加工,对加速度计进行闭环电路设计和测试是今后进一步的研究内容。

感谢中国工程物理研究院电子工程研究所对本课题研究工作给予的资助和支持,同时感谢他们为样片制作付出的劳动。

参考文献:

- [1] HASSANPOUR P A, CLEGHORN W L, ESMAILZADEH E, et al. Vibration analysis of micro-machined beam-type resonators [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 308(1/2): 287-301.
- [2] IKEDA K, KUWAYAMA H, KOBAYASHI T, et al. Three-dimensional micromachining of silicon pressure sensor integrating resonant strain gauge on diaphragm [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1990, 23(1/3):1007-1010.
- [3] LE TRAON O, JANIAUD D, PERNICE M, et al. A new quartz monolithic differential vibrating beam accelerometer [C]// 2006 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, April 25-27, 2006, San Diego, California, USA. [S. l.]: IEEE, 2006:6-15.
- [4] BAHADUR I B, MILLS J, SUN Y. Design of a MEMS-based resonant force sensor for compliant, passive microgripping [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, July 29-Aug 1, 2005, Niagara Falls, Ontario, Canada. [S. l.]: IEEE, 2005:77-82.
- [5] TILLEMANN M M. Analysis of electrostatic comb-driven actuators in linear and nonlinear regions [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(3/4):4889-4898.
- [6] 李炳乾. 电热激励硅谐振器件的研究[J]. *半导体光电*, 2005, 26(2):105-107.
- LI BING-QIAN. Electro-thermal excited Si resonant devices [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(2):105-107.
- [7] JEONG H M, HA S K. Dynamic analysis of a resonant comb-drive micro-actuator in linear and nonlinear regions[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 125(1):59-68.
- [8] 朱毅,郭丹. 微梳齿驱动性能的耦合仿真研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(7):206-211.
- ZHU YI, GUO DAN. Coupled simulative analysis for drive characteristic of micro-comb structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(7):206-211.
- [9] WOJCOECHOWSKI K E, BOSER B E, PISANO A P. A MEMS resonant strain sensor with 33 nano-strain resolution in a 10 kHz bandwidth [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 11(3): 4-8.
- [10] SU X P S, YANG S H, AGOGINO A M. A resonant accelerometer with two-stage microleverage mechanisms fabricated by SOI-MEMS technology [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(6):1214-1223.
- [11] SEOK S, CHUN K. Inertial-grade in-plane resonant silicon accelerometer [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(19): 8-9.
- [12] CHESHMEHDOOST A, JONES B E. Design and performance characteristics of an integrated high-capacity DETF-based force sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 52(1/3): 99-102.
- [13] TANG W C, NUYEN T C, HOWE R T. Laterally driven polysilicon resonant microstructures [J]. *Sensors and Actuators A*, 1989, 20(3):25-32.
- [14] ANDOJO O, TAY F E H. Slide film damping and squeeze film damping models considering gas rarefaction effects for MEMS devices [J]. *International Journal of Computational Engineering Science*, 2003, 4(2): 401-404.

(编辑 张 苹)