

Study of Inertial Step Response of a Novel MEMS Capacitive Accelerometer with Variable Areas in Low Vacuum *

CHEN Jin-dan¹, DONGLi-xi^{1*}, YAN Hai-xia², HUO Wei-hong¹, LI Yong-jie¹, SUN Ling-ling¹
{ 1. the Key Laboratory of RF Circuits and System of Ministry of Education, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
2. Toshiba Hydro Electro Equipments Company, Hangzhou 311504, China }

Abstract: A new kind of MEMS capacitive inertial sensor with variable overlapping area is insensitive with the non-parallel of the combs and can work under a much larger testing voltage compared with traditional comb capacitive sensor. An inertial step response of MEMS area changed capacitive accelerometer with non-parallel combs is analyzed considering the air damping in low vacuum, and the relation between the testing voltage and the displacement response of the sensor with different angles between the combs and the effects of different air pressure to displacement response are also analyzed. The results are compared with the one of the comb capacitive sensor. It shows that the effects of non-parallel comb on the MEMS capacitive sensors with the variable overlapping area are much smaller. In addition, the designed structure can work under a very large testing voltage which is nearly ten times larger than the one of capacitive sensor with the variable distance, which is very useful for reducing the noise of the interface circuit. It is concluded that the new kind sensor is insensitive with the technology errors and can improve the resolution of MEMS capacitive sensor.

Key words: MEMS; High precision micro-accelerometer; inertial step response analyze; non-parallel combs
EEACC: 7320;2240

低真空封装的新型变电容面积 MEMS 惯性传感器阶跃响应特性分析 *

陈金丹¹, 董林玺^{1*}, 颜海霞², 霍卫红¹, 李永杰¹, 孙玲玲¹

{ 1. 杭州电子科技大学射频电路与系统教育部重点实验室, 杭州 310018;
2. 东芝水电设备有限公司, 杭州 311504 }

摘要: 一种新型变电容面积 MEMS 惯性传感器与传统的梳齿电容传感器相比, 具有对梳齿电容不平行敏感度低, 可加测试电压高等优点。通过对该传感器在低真空封装条件下的惯性阶跃响应特性分析, 着重研究了不同梳齿电容倾斜角度对该传感器的阶跃惯性信号响应的影响, 以及不同倾斜角度梳齿的位移响应和测试电压、空气真空度的关系, 并把该结果和梳齿结构的情况进行比较。结果表明, 工艺因素对变电容面积 MEMS 惯性传感器在低真空封装下的阶跃惯性响应影响很小; 另外, 该结构上可加的测试电压可以是梳齿电容结构上可加测试电压的近 10 倍, 这有利于减小接口电路的噪声。以上分析论证了该新型传感器有利于降低器件的工艺要求和提高传感器的分辨率。

关键词: MEMS; 高精度微传感器; 阶跃响应分析; 倾斜梳齿

中图分类号: TB24P212, 12

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)03-0331-06

目前, 高精度的 MEMS 电容惯性传感器都是采用真空封装的方式来降低机械噪声, 提高器件的分辨率。因此, 对低真空空气阻力条件下传感器对外界加速度的位移响应的研究显得非常有意义。另外, DRIE 工艺

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60506015); 浙江省自然科学基金资助项目(Y107105)

收稿日期: 2008-10-23 **修改日期:** 2009-01-05

加工的高深宽比梳齿电容的梳齿间往往不是绝对平行,因此实际的梳齿电容的相邻梳齿间都存在一个很小的角度,如图1所示^[1]。同时,MEMS电容式传感器工作时都加一个高频测试电压,总的来说,传感器工作时受到了静电力、惯性力、阻尼力和弹性恢复力的作用^[2]。综合考虑以上因素,文献[3]研究了梳齿电容极板不平行对电容式传感器在阶跃信号和振动信号作用下的可靠工作范围影响;文献[4]研究了梳齿电容极板不平行电容式传感器的惯性脉冲响应的特性,并提出了一种新型的变电容面积MEMS惯性传感器结构。上述研究都是对传统梳齿结构进行,本文针对新型变电容面积惯性传感器,首先分析了在阶跃信号作用下,低真空封装双边电容极板间的空气阻力做功,从而研究了该新型结构传感器^[4]在低真空条件下的惯性阶跃信号响应特性,并分析了DRIE工艺引起的梳齿电容倾斜对该器件性能的影响,最后与有相近设计参数的梳齿电容式传感器的阶跃响应特性进行比较,从而分析该结构的优缺点。

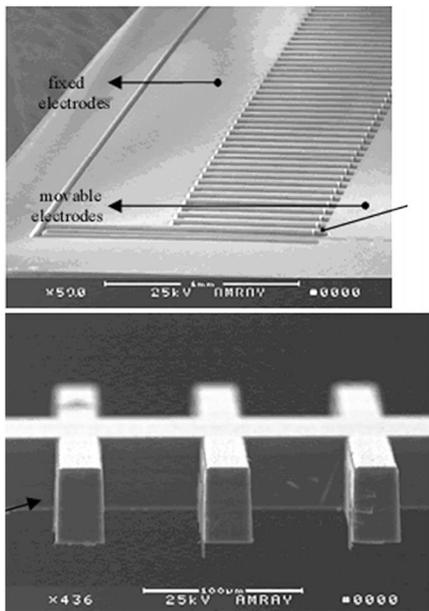


图1 基于DRIE工艺的梳齿差分电容式传感器及其倾斜梳齿

1 低真空空气阻力及阶跃信号响应的理论分析

1.1 低真空封装双边电容极板间的滑膜空气阻力做功分析

低真空时,电容极板间的空气滑膜阻尼力系数计算方程为^[5]:

$$D_{滑} = \frac{A}{d+2} \quad (1)$$

式中 A 为变电容面积电容的静态电容正对面积, 为粘

滞系数, 为空气分子的自由度,其值为 $= P_0 / P_0$, 其中 P 为分装空气压强, P_0 为标准气压的空气压强, ν_0 为标准气压下的空气分子自由度, $d = d_0 / (1 + 8.5 \frac{d_0}{l})$, d_0 为电容极板间距, l 为极板运动方向的长度。在 $1/2$ 周期内, 双边电容极板空气阻力做功为:

$$E_{滑} = \int_0^{T/2} D_{滑} \dot{y}^2 dt = \int_0^{T/2} \frac{A}{d+2} \dot{y}^2 dt \quad (2)$$

当传感器低真空封装时, 空气阻尼系数比较小, 此时传感器第一个 $1/2$ 周期的惯性阶跃响应可以近似为:

$$y = y_0 [1 + e^{-\nu_0 t} \sin(\nu_0 t - \frac{\pi}{2})] \quad (3)$$

式中 ν_0 为传感器的自然角频率, $T = 2 / \nu_0$, 把式(3)代入式(2), 并积分得传感器在第一个 $1/2$ 周期内因空气滑膜阻尼力做功引起的能量损失为:

$$E_{滑} = \frac{A P}{P d + 2 \nu_0 P_0} y_0^2 \quad (4)$$

1.2 低真空封装双边电容极板间的压膜空气阻力做功分析

当传感器振子以 $y = y_0 [1 + \sin(\nu_0 t - \frac{\pi}{2})]$ 振动时, 空气分子从传感器上电容极板间穿过后 y 方向的速度为^[6]

$$v_{y\pm} = v_{y0} + N \times 2\dot{y} \quad (5)$$

其中 $N = l v_{x0} / (d_0 - y) v_{x0} \cdot \dot{y}$ 为空气分子穿过电容极板的碰撞次数, 相应增加的动能为

$$e_{k\pm} = \frac{1}{2} m [- \frac{2 l v_{x0}^2}{(d_0 - y) v_{x0}} \dot{y} + \frac{l^2 v_{x0}^2}{(d_0 - y)^2 v_{x0}^2} \dot{y}^2] \quad (6)$$

式中 v_{x0} 为空气分子在 $x-z$ 平面的运动速度, v_{y0} 为 y 方向的运动速度, d_0 为电容极板间的初始间距, l 为空气分子在电容板间移动的距离, m 为空气分子质量。

对于从下电容极板穿过的空气分子, 在振子速度为 \dot{y} 的瞬间, 它和振子碰撞前的速度方向相同, 均为 y 方向, 如图2所示, 因此空气分子从下极板穿过后 y 方向的速度为

$$v_{y\mp} = v_{y0} - N \times 2\dot{y} \quad (7)$$

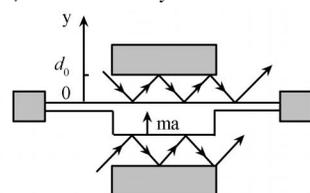


图2 空气分子穿过电容极板示意图
相应增加的动能为:

$$e_{k下} = \frac{1}{2} m l \left[\frac{2 l v_{x0}^2}{(d_0 + y) v_{x0}} \dot{y} + \frac{l^2 v_{x0}^2}{(d_0 + y)^2 v_{x0}^2} \dot{y}^2 \right] \quad (8)$$

根据 Boltzmann 理论,单位时间内进入上下电容间的空气分子数分别为

$$n_{上} = \frac{1}{4} n_0 \bar{v} (d_0 - y) \quad (9)$$

$$n_{下} = \frac{1}{4} n_0 \bar{v} (d_0 + y) \quad (10)$$

式中 L 为电容极板间隙的周长, n_0 为空气分子密度, \bar{v} 为空气分子的平均运动速度。根据公式(5) — (10), 可得 MEMS 电容式传感器的振子在第一个 1/2 周期内因空气分子碰撞而引起的能量损失为

$$E_{压} = \frac{1}{4} \bar{v} L \frac{l^2}{4} \cdot \left(\frac{1}{d_0 - y} + \frac{1}{d_0 + y} \right) \cdot y^2 d(t) \quad (11)$$

把式(3)代入式(11),并积分得

$$E_{压} = \frac{1}{4} \bar{v} L \frac{l^2}{4} \left[2 - \sqrt{1 - 2y_0} - \sqrt{1 + 2y_0} \right] \quad (12)$$

式中 $y_0 = y_0 / d_0$ 。为了简化问题,对式(12)中的参量作合理近似,令 l^2 和 l 近似等于其平均值,即 $l^2 = \bar{l}^2 = 2 a_p h /$, a_p 和 h 是传感器梳齿的长度和宽度^[6]。如果空气压力 P_{air} 对应的气体比重为 ρ_{air} ,根据理想气体状态方程,对应空气压力 P 的气体比重为

$$\rho = \rho_{air} P / P_{air} = P M_m / R T, \bar{v} = \sqrt{8 R T / (M_m)}$$

其中 M_m 为空气的摩尔质量, R 为气体常数。因此式(12)可进一步简化为

$$E_{压} = \sqrt{2} f_0 P \frac{\sqrt{M_m} L a_p h d_0}{\sqrt{R T}} \left(2 - \sqrt{1 - 2y_0} - \sqrt{1 + 2y_0} \right) \quad (13)$$

$$\text{其中 } u = \sqrt{2} f_0 \frac{\sqrt{M_m} L a_p h d_0}{\sqrt{R T}}$$

综上所述,在第一个 1/2 周期内,总的空气阻尼为

$$E_{haf_air} = E_{滑} + E_{压} = \frac{\rho A P d_0^2}{P d + 2 \rho P_0} y_0^2 +$$

$$u P \left(2 - \sqrt{1 - 2y_0} - \sqrt{1 + 2y_0} \right) \quad (14)$$

1.3 低真空条件下,倾斜梳齿的 MEMS 电容式传感器对惯性阶跃信号的位移响应

设加在传感器上的测试电压信号为 V ,当梳齿倾斜时,电容可以用如下公式计算^[7]:

$$C = \frac{1}{V} \int_0^2 Q dA = \frac{1}{2} \int_0^2 \frac{\rho a}{x} dx = \frac{\rho a_0}{2} \ln \left(\frac{d}{d - 2 h \tan \alpha} \right) \quad (15)$$

当 $2 h \tan \alpha \rightarrow 0$ 时,上式可化为

$$C = \frac{\rho a_0 h}{d_0 - 2 h} \quad (16)$$

其中 $Q = \rho V / 2 x$ 为电容极板单位面积上的电荷, α 为电容极板的倾斜角度,如图 3 所示。

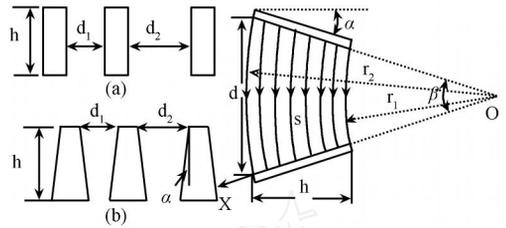


图 3 MEMS 电容式传感器的倾斜梳齿示意图

对于差分电容结构,如图 4 所示,双边驱动时,在可动电极上加测试信号 $V = V_0 + V_1 \sin t$,固定电极接地。当振子运动微小位移 y 时,则作用在振子上的静电力为:

$$F_c = \frac{\rho A V^2}{2(d_0 - y)(d_0 - y - 2h)} - \frac{\rho A V^2}{2(d_0 + y)(d_0 + y - 2h)} \quad (17)$$

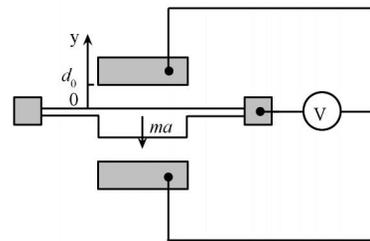


图 4 双边驱动差分电容结构示意图

当惯性阶跃信号幅值为 a ,引起的振子位移为 y ,振子的初始位为 $y = 0$ 时,振子的运动方程为

$$\frac{1}{2} M \dot{y}^2 = \int_0^y (F_c + M a - k y) dy - E_{air}(y) \quad (18)$$

其中 k 为振子支撑梁的刚度系数, M 为振子质量, $E_{air}(y)$ 为振子位移 y 时,空气阻力消耗的总能量。把式(17)代入式(18)中,并积分后得到如下方程:

$$\frac{1}{2} M \dot{y}^2 = \frac{\rho A V^2}{2} \cdot \frac{1}{2 h} \cdot \ln \left[\frac{d_0^2 - y^2}{(d_0 - 2 h)^2 - y^2} \cdot \left(\frac{d_0 - 2 h}{d_0} \right)^2 \right] + M a y - \frac{1}{2} k y^2 - E_{air}(y) \quad (19)$$

当振子达到最大位移 y_m 时,运动速度 $\dot{y} = 0$,令 $p = \rho A V^2 / 2 k d_0^3, y_m = y_m / d_0, \tilde{D}_0 = 1 - 2 h / d_0$ 代入式(19),从而得到低真空封装传感器受到惯性阶跃信号作用时,传感器的响应方程为

$$a = \frac{k d_0}{M} \left[\frac{1}{2} y_m - p \frac{1}{1 - \tilde{D}_0} \cdot \frac{1}{y_m} \ln \left(\frac{1 - y_m^2}{\tilde{D}_0^2 - y_m^2} \cdot \tilde{D}_0^2 \right) + \frac{E_{haf_air}}{k d_0^2 y_m} \right] \quad (20)$$

根据上式,在已知器件尺寸等条件下,同时考虑

梳齿电容对数,可以得到阶跃信号在不同梳齿倾斜角度下的位移变化,以及气压变化或测试电压变化对位移响应的影响。

2 变电容量式传感器阶跃响应特性分析

变电容量式传感器及扫描电镜图片如图 5 所示,其检测电容主要由梳齿检测电容和栅形条检测电容两部分组成。当振子在 y 方向上有位移时,该结构的空气阻力主要由振子下表面与空气间的滑膜阻力和振子梳齿间的空气滑膜、压膜阻力组成。在低真空封装时,滑膜空气阻尼大小可由式(4)来计算,空气压膜阻力可由式(13)来计算,其中 $a_p = N_1 \cdot w_1$, N_1 为梳齿个数, w_1 为梳齿宽度。传感器振子受到的静电力可由式(17)来计算,式中的 A 为传感器变间距电容的总正对面积,其值为 $A = N_1 \cdot w_1 \cdot h$, h 为振子厚度。根据表 1 所示的传感器参数,对于图 5 所示的变电容量传感器结构,受到惯性阶跃信号作用的响应方程为

$$a = \frac{k d_0}{M} \left[\frac{1}{2} y_m - p \frac{1}{1 - D_0} \cdot \frac{1}{y_m} \ln \left(\frac{1 - y_m^2}{D_0^2 - y_m^2} \cdot \tilde{D}_0^2 \right) \right. \\ \left. + \frac{A_1 P}{4 P d_1 k + 8 P_0 k^2} y_m + \frac{A_2 P}{4 P d_2 k + 8 P_0 k^2} y_m + \frac{u P (2 - \sqrt{1 - y_m} - \sqrt{1 + y_m})}{k d_0^2 y_m} \right] \quad (21)$$

其中 $u = \sqrt{2} f_0 \frac{\sqrt{M_m L N_1 w_1 h d_0}}{N R T}$, $d_0 = d_{01}$, $p = N_1 \cdot w_1 h V^2 / 2 k d_0^3$, A_1 为传感器变电容量电容的正对面积, A_2 为振子下表面面积。由式(21)可以分析振子在不同大小的阶跃惯性信号作用下的位移响应特性,以及因 DRIE 工艺因素引起的梳齿电容不平行对传感器阶跃惯性信号响应的影响。

表 1 变电容量式传感器结构属性

参数	变量	值
梳齿电容间距 1	d_{01}	15 μm
梳齿电容间距 2	d_2	3 μm
振子与衬底距离	d_3	4 μm
梳齿电容宽度	w_1	15
振子厚度	h	70 μm
振子质量	M	1223.34 μg
U 形梁刚度系数	k	77.67 N/m
共振频率	f_0	1269 Hz
梳齿电容差分对数	N_1	520
栅形电容差分对数	N_2	52
器件静态电容值	C_0	6.069 pf
空气介质常数	ϵ_0	8.854×10^{-12}
气体常数	R	8.3145
空气温度	T	298 K
一个梳齿电容的周长	L	170 μm
大气压力	P	500 - 1000 Pa

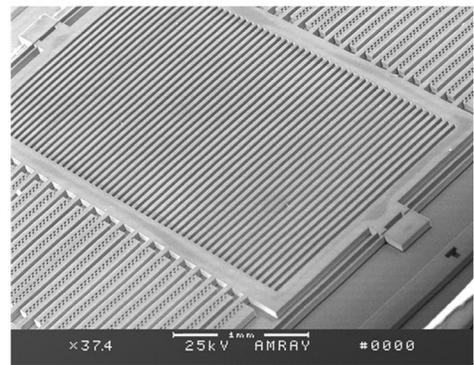
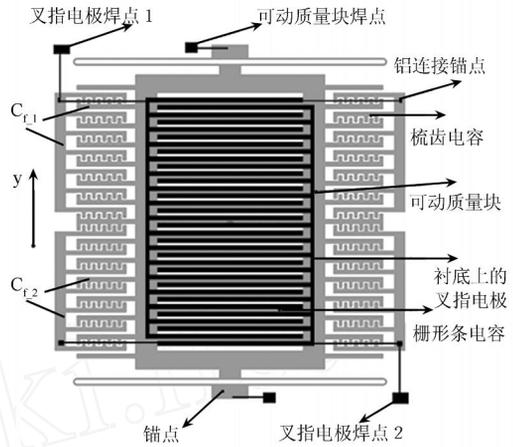


图 5 变面积 MEMS 电容式惯性传感器结构示意图和 SEM 照片

从图 6 可以看出,随着外界阶跃惯性信号幅值的增加,梳齿电容不平行对变面积 MEMS 电容传感器的位移响应影响虽然越来越明显,但是影响值很小,尤其是在 $y_m < 1/3$ 范围内。从图中还可以看出,0.5° 倾斜角的梳齿电容的线性范围要小于倾斜角为 0.3° 和 0.1° 的情形,但是影响并不明显;0.5° 倾斜角的梳齿电容的最大工作范围略微小于倾斜角为 0.3° 和 0.1° 的情形。

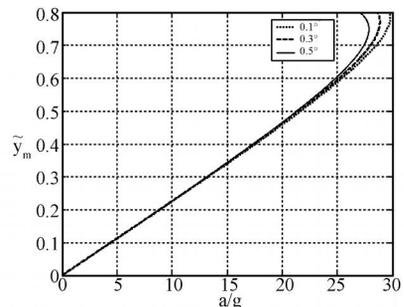


图 6 500 Pa 气压下变电容量传感器的惯性阶跃响应特

从图 7 可以看出,在低真空封装时,不同真空度对器件阶跃惯性响应也有轻微的差异。

从图 8(a) 可以看出梳齿电容倾斜角的大小会影响传感器的响应灵敏度随梳齿电容两端所加的测试信号电压的增加速度,且倾斜角度越大,灵敏度随测试信号电压的增加速度越快,当测试信号电压增

大时,影响程度也越大。

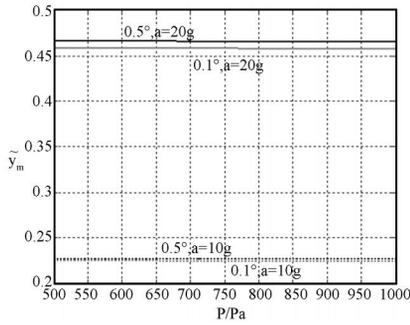
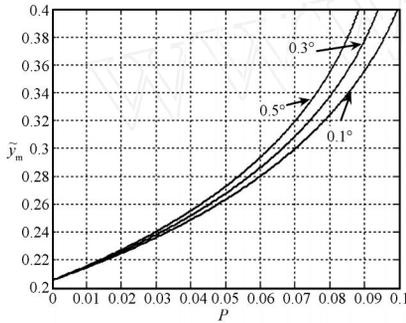
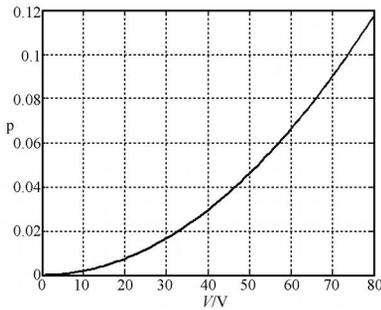


图 7 不同空气阻尼下的变电容面积传感器的惯性阶跃响应特性



(a) 10g, p 值变化时的位移变化



(b) p 值随测试电压变化的变化关系

图 8 变电容面积传感器的惯性阶跃响应特性与测试电压的关系

当振子结构为纯梳齿结构,且静态电容值和变电容面积传感器的电容值相当时,其阶跃响应特性如图 9~图 11,梳齿电容传感器结构特性如表 2。

表 2 梳齿电容式传感器结构属性

参数	变量	值
梳齿电容间距	d_0	4 μ m
振子厚度	h	80 μ m
共振频率	f_0	2000 Hz
振子质量	M_p	733.86 μ g
差分电容对数	N	39
单个平行梳齿电容	C_0	0.133pf
空气介电常数	ϵ_0	8.854 $\times 10^{-12}$
气体常数	R	8.3145
空气温度	T	298 K
一个梳齿电容的周长	L	1660 μ m
大气压力	P	500 - 1000 Pa

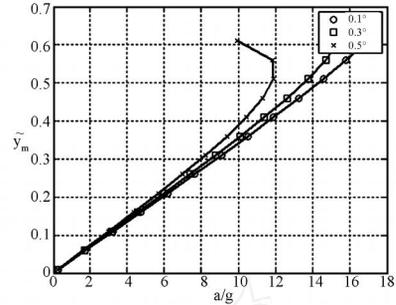


图 9 500 Pa 气压下梳齿电容传感器的惯性阶跃响应特性

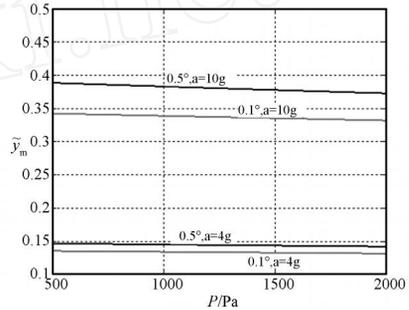
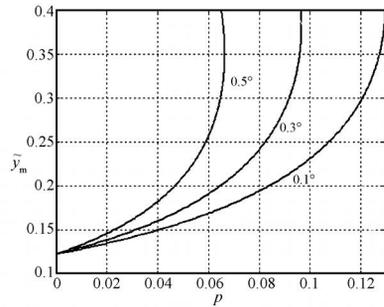
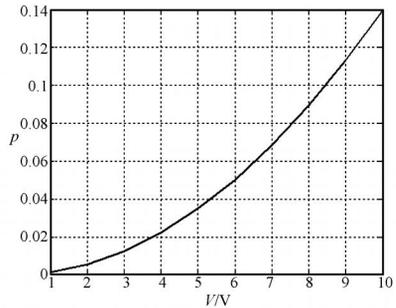


图 10 不同空气阻尼下的响应特性



(a) 4g, p 值变化时的位移变化



(b) p 值随测试电压变化的变化关系

图 11 梳齿电容传感器的惯性阶跃响应特性与测试电压的关系

对比变电容面积传感器和梳齿电容传感器的响应特性,从图 6 和图 9 可以看出,梳齿电容倾斜对变电容面积传感器灵敏度及线性范围的影响明显小于梳齿电容传感器;从图 7 和图 10 可以看出,封装低真空度的变化对变电容面积传感器位移响应的更小;图 8(a)和图 11(a)表明变电容面积传感器可以承受更大的测试电压,且梳齿角度对测试电压与位移响应的影响也较小;对比图 8(b)和图 11(b),可

以看出对于相同的 p 值,变电容面积传感器所加的测试电压是梳齿结构传感器所加的测试电压的近 10 倍。

综上所述,如图 5 所示的变电容面积传感器结构能有效降低梳齿电容间的不平行对传感器性能的影响,从而降低了对 DRIE 工艺的要求。另外,由于测试信号电压产生的非线性静电力不会导致栅形条电容和变电容面积梳齿电容的电容变化,因此相同测试电压对变电容面积电容产生的静电力要远远小于对梳齿电容产生的静电力,即变电容面积传感器可以承受更大的测试电压,这有利于降低接口电路的电路噪声^[8]。因此,以上分析证明了变电容面积传感器比一般的梳齿传感器更能实现具有高分辨率的 MEMS 惯性传感器。

3 结论

变电容面积结构的 MEMS 传感器是一种针对 DRIE 工艺加工的高深宽比梳齿电容梳齿不能绝对平行,使得传感器性能受到影响而提出的改进结构。本文在考虑低真空空气阻力的条件下,研究了 DRIE 工艺不理想造成梳齿倾斜的变电容面积传感器的惯性阶跃信号响应,同时也分析了梳齿电容倾斜的 MEMS 梳齿电容传感器的阶跃惯性信号响应,并把两者进行对比。研究表明,梳齿不平行对变电容面积传感器阶跃惯性信号响应的影响很小,是一种可以降低对 DRIE 工艺的要求的结构。另外,变电容面积传感器所加的测试电压可以是梳齿结构电容传感器所加电压的近 10 倍,这有利于降低接口电路的电路噪声,提高整个系统的分辨率,最终获得高

分辨率的 MEMS 惯性传感器。

参考文献:

- [1] 董林玺,孙玲玲,车录锋,王跃林. 梳齿的不平行对电容式微机械传感器阶跃信号响应的影响. 传感技术学报[J], 2005, 3(18): 91-96.
- [2] Jaume Verd, Abadal G, Teva J et al. Design, Fabrication, and Characterization of a Sub-Microelectromechanical Resonator with Monolithically Integrated CMOS Readout Circuit[J]. Journal of Micro-Electromechanical Systems, 2005, 14(3): 508-519.
- [3] Dong Linxi, et al. Effects of Non-Parallel Combs on Reliable Operation Conditions of Capacitive Inertial Sensor for Step and Shock Signals[J]. Sensors and Actuators, 2005, 121(2): 395-404.
- [4] 董林玺,颜海霞,钱 S,孙玲玲. 倾斜梳齿的 MEMS 电容式传感器惯性脉冲响应特性研究[J]. 电子学报, 2008, 35(5): 1035-1040.
- [5] Timo Veijola, Marek Turowski. Compact Damping Models for Laterally Moving Microstructures with Gas-Rarefaction Effects [J]. Journal of Micro-Electromechanical Systems, 2001, 10(2): 263-273.
- [6] Bao M, Yang H, Yin H, Sun Y. Energy Transfer Model for Squeeze-Film Air Damping in Low Vacuum, Journal of Micro-mechanics and Microengineering[M], 2002, 12: 341-346.
- [7] FEH Tay, et al. The Effects of Non-Parallel Plates in a Differential Capacitive Micro-Accelerometer [J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 1999, 9(4): 283-293.
- [8] Han Ki-Ho, et al. Self-Balanced Navigation-Grade Capacitive Micro-Accelerometers Using Branched Finger Electrodes and Their performance for Varying Sense Voltage and Pressure[J]. Journal of Micro-electromechanical Systems, 2003, 12(1): 11-20.



陈金丹(1982-),女,硕士研究生,主要从事 MEMS 惯性电容加速度传感器研究, cjdfly2000@hotmail.com



董林玺(1976-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事超高精度 MEMS 传感技术、RF MEMS 器件、NEMS 谐振器等方面的研究,已发表 SCI/EI 收录论文十余篇, donglinxi@hdu.edu.cn