

Effects of Different Structure of Sensing Capacitance on Performance of MEMS Capacitive Sensor*

DONG Linxi^{1*}, LI Shouluo¹, CHEN Jindan¹, YAN Haixia²,
XU Li¹, WANG Guangyi¹, SUN Lingling¹

(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: Optimizing the structure of a sensing capacitance can improve the performances of MEMS accelerometer. The characteristics of MEMS capacitive accelerometers with comb, bar and comb-bar capacitances, respectively, have been analyzed. The proof mass, air damping and damping ratio of the three different sensor structures are compared on the condition of same dimension, elastic constant of the spring, thickness of the proof mass, distance between the proof mass and the substrate. The results show that the proof mass of bar capacitance sensor is largest, and its air damping is least, which is suitable for high-precise sensor. The sensitivity of comb capacitance sensor in air is increased while the air damping is increased too, so it is suitable for high-sensitivity and low-precise sensor. The comb-bar capacitance is suitable for the sensors which need both high sensitivity and precision. An example is taken to prove the results.

Key words: MEMS; Micro capacitive inertial sensor; Structure of detecting capacitance

EEACC: 7230; 2130

不同检测电容结构对 MEMS 电容传感器性能的影响分析*

董林玺^{1*}, 李寿洛¹, 陈金丹¹, 颜海霞², 许立¹, 王光义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:改进传感器检测电容几何结构能有效改善传感器的性能。本文对梳齿电极结构、栅形电极结构及梳栅电极结构检测电容的性能特点进行分析比较,重点分析了振子质量、空气阻尼、系统阻尼系数比以及灵敏度等特性,得出在相同的外轮廓尺寸、支撑梁、振子厚度以及振子到衬底的距离的条件下,栅形结构传感器的振子质量最大,空气阻尼最小,适合制作高分辨率的传感器;在大气下,梳齿结构灵敏度增加的同时空气阻尼力也会增加,且振子质量较小,适合制作高灵敏度,低分辨率传感器结构;梳栅结构的特点居于两者之间,适合制作需要兼顾分辨率和灵敏度的传感器。通过实例计算,证明了该结果。

关键词: MEMS; 微电容式惯性传感器; 检测电容结构

中图分类号: TP212.1; TM53

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)04-0501-07

目前,对于 MEMS 电容式惯性传感器的研究很多,其检测电容结构也多种多样。每种结构都有各自的优缺点,至今还没有关于各种结构的对比分析方面的报告文献。本文通过对两种典型结构和文献[1-2]提出的一种新型结构进行各方面性能的比较分析,为传感器结构的优化设计提供参考。

MEMS 电容式惯性传感器基本原理是:传感器受到加速度作用,检测电容的可动极相对固定极发

生位移,导致电容发生变化,通过测量电容变化量即可测得加速度大小。因此,检测电容是 MEMS 电容传感器中非常重要的组成部分,它直接传递外界信号变化的信息,合理的结构设计能够增加传感器检测信号的能力,如分辨率、带宽、灵敏度等,同时也可以降低对外围电路的性能要求^[3-4]。

由于微机电系统的特点,器件尺寸受到一定的限制,因此在检测电容设计时,采用哪种几何结构可

以在有限空间内达到电容值和质量块质量最大、优化的空气阻尼^[5]以及适合于当前的 MEMS 加工技术,成为优化设计的首要问题。

1 MEMS 检测电容结构及参数设定

为便于比较,先设定三种 MEMS 控制电容结构的外围尺寸、支撑梁、振子厚度、振子到衬底的距离以及静态电容值 C_0 完全相同。再在调整局部关键参数的条件下观测器件性能变化。外围尺寸、支撑梁、振子厚度、振子到衬底的距离相同只要设大小相同即可,而静态电容值 C_0 大小和器件的很多参数有关,为了保证三种结构的 C_0 一致,在设定参数时,要求相同空间内的梳齿电容平均值和栅型条电容平均值相同;且栅型条的上下边框宽度之和,即图 1 中 $2w_1$ 刚好等于梳齿电容中间质量块的宽度,即图 3 中的 w_2 。因此,对于如图 3 所示的梳栅电容,任意调整 n_{ca} 和 α 的值,其电容值保持不变,从而保证三种结构的静态电容值相同。另外,在外围尺寸和振子到衬底的距离确定的情况下,栅型结构的静态电容值和栅型条宽度 w_{ba} 关系不大,如图 1 所示,其值基本确定,而梳齿结构和梳栅结构,如图 3、图 4 所示,通过调整电极间距、梳齿数目等,可获得较大范围的静态电容值,因此,以栅形结构的静态电容值作为三种结构的设定电容值 C_0 ,其具体参数设计如下:

(1) 栅形结构电容,其结构如图 1 和图 2 所示,栅形结构硅和衬底上的两组叉齿状铝电极构成一对差分电容 C_{01} 和 C_{02} 。图 1 中, A 为栅形振子长度; B

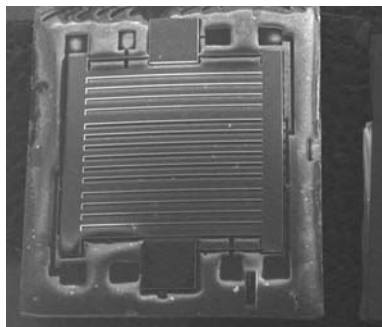
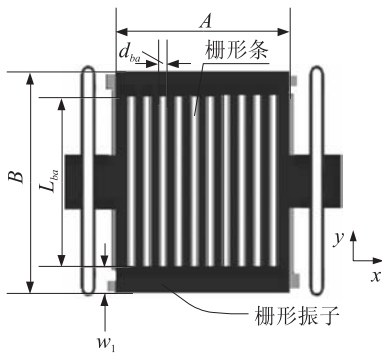


图 1 栅形结构电容扫描电镜图

为栅形振子宽度; L_{ba} 为栅形条长度; w_1 为栅形振子上下边框宽度; d_{ba} 为栅形条间距。图 2 中, w_{ba} 为栅形条宽度; h 为栅形条厚度即振子厚度; w_{al} 为金属铝电极宽度; d_{al} 为铝电极间距; d_h 为振子和衬底间距。

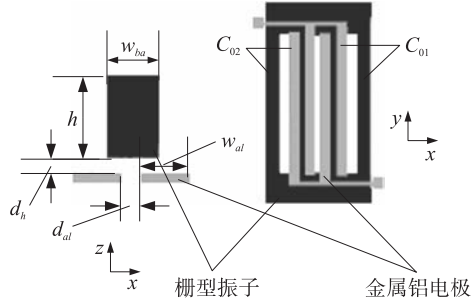


图 2 栅形结构电容截面及背面结构示意图

由图 1 和图 2 中的参数,栅形振子上的栅形条数 n_{ba} 为:

$$n_{ba} = \left[\frac{A + d_{ba}}{w_{ba} + d_{ba}} \right] = \left[\frac{A + w_{ba}}{2w_{ba}} \right] \quad (1)$$

式中 $w_{ba} = d_{ba}$,为使振子振动的左右最大有效偏移量一致,其值为 $(w_{al} - d_{al})/2$,有利于传感器对 x 正负方向加速度的感应具有对称性。

确定以上参数后,在不考虑边缘效应的条件下,栅形结构的静态电容值 C_0 的计算如下:

$$C_0 = \frac{\epsilon\epsilon_0 n_{ba} L_{ba}}{d_h} \left(\frac{w_{ba} - d_{al}}{2} \right) \approx \frac{\epsilon\epsilon_0 (A + w_{ba}) L_{ba}}{4d_h} \left(1 - \frac{d_{al}}{w_{ba}} \right) \quad (2)$$

式中 ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ 为空气中的相对介电常数。由式(2),为使 C_0 最大, $d_{al} \ll w_{ba}$,另外,考虑到器件的灵敏度,通常 $w_{ba} \ll A$,详细见第 3 部分的灵敏度比较分析,所以(2)式可进一步近似为:

$$C_0 \approx \frac{\epsilon\epsilon_0 A L_{ba}}{4d_h} \quad (3)$$

此式证明了前面所说的栅型结构在外围尺寸即 A 、 L_{ba} 和振子到衬底的距离即 d_h 确定的情况下,其静态电容值 C_0 基本确定。

(2) 梳齿结构电容,其结构如图 3 所示。

图 3 中, A 为梳齿振子的长度,同栅形振子长度; B 为梳齿振子宽度,同栅形振子宽度; w_2 为中间质量块宽度; w_c 为梳齿宽度; l_c 为梳齿长度; d_c 为梳齿间距; w_b 为枝杆宽度; l_b 为枝杆长度; l_o 为梳齿迭交长度。由上述参数,梳齿齿端到枝杆间距为:

$$d_{cb} = l_c - l_o \quad (4)$$

梳齿结构的一个枝杆上的梳齿数为:

$$n_c = \left[\frac{L_b}{2(w_c + d_c)} \right] \quad (5)$$

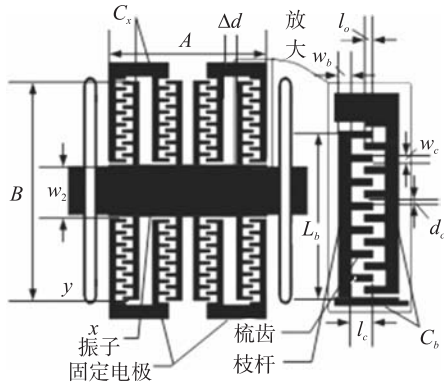


图 3 梳齿结构电容示意图

一条可动极枝杆与其对应固定极枝杆间的电容大小为:

$$c_b = n_c \epsilon \epsilon_0 h \left(\frac{2l_o}{d_c} + \frac{2w_c}{d_{cb}} \right) \quad (6)$$

式中 h 为振子厚度, 同图 2 中的栅形振子厚度。由式(6)可得 h 越大, c_b 值也越大, 但是 h 值受微制造深度刻蚀能力的限制, 一般最大深宽比为 25:1。梳齿结构中, 最小间距是 d_c , 所以振子最大厚度为:

$$h = 25d_c \quad (7)$$

为使梳齿结构静态电容值为 C_0 , 其同方向的枝杆条数计算如下:

$$n_b = \frac{C_0}{c_b} \quad (8)$$

通过合理设定 l_c 和 l_o 的值, 可使(8)式值刚好为整数。

(3) 梳栅结构电容, 其结构如图 4 所示。

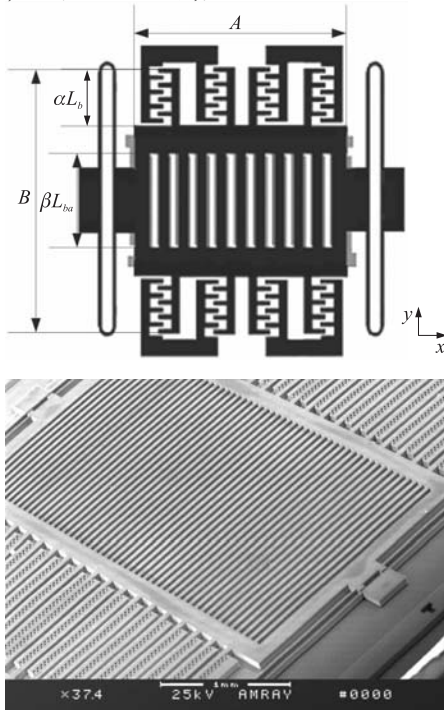


图 4 梳栅结构电容扫描电镜图

图 4 中, αL_b 为梳栅结构梳齿部分宽度; βL_{ba} 为梳栅结构栅形部分宽度。设梳栅结构的一条枝杆上的梳齿数为 $n_{c\alpha}$, 则它与 α 及梳齿结构中一条枝杆上的梳齿数 n_c 关系为:

$$\alpha = \frac{n_{c\alpha}}{n_c} \quad (9)$$

另外, 由图 1 和图 3 可得:

$$L_{ba} = 2L_b = B - w_2 \quad (10)$$

由图 4 可得:

$$\beta L_{ba} + 2\alpha L_b = B - w_2 \quad (11)$$

同解式(10)和式(11)得:

$$\beta = 1 - \alpha \quad (12)$$

以上是为方便比较, 各结构器件主要参数的设定步骤。

2 性能分析比较

在加速度传感器的检测电容结构设计时, 首先考虑的因素应该是传感器在一定量程内的噪声水平和带宽, 其次是灵敏度, 本文中对传感器的性能分析, 其量程限定在 $\pm 2 g_n$ 范围内。而 MEMS 传感器的噪声水平主要由机械噪声决定, 其计算公式为^[6]:

$$TENA = \frac{\sqrt{4k_B T D}}{M} = \frac{D}{\sqrt{M}} \cdot \frac{\sqrt{4k_B T}}{\sqrt{M D}} \quad (13)$$

式中 K_B 和 T 分别是波尔兹曼常数和绝对温度, D 为传感器空气阻尼系数。传感器的带宽可由阻尼系数比来衡量^[4], 其计算如下:

$$\zeta = \frac{D}{2\sqrt{Mk}} = \frac{D}{\sqrt{M}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{k}} \quad (14)$$

式中 k 为支撑梁的弹性系数。设计时, 根据加速度计带宽要求, ζ 取得一个定值, 由式(14), 在 k 一定的情况下, D 和 \sqrt{M} 等比例增加或减小, ζ 值不变。又由式(13)得, 在保证 ζ 一定的情况下, D 和 M 同时增加, 能降低器件的机械噪声, 提高分辨率。因此, 如果哪种结构, 在现有微制造工艺能力的条件下能够制造出来的, 具有质量大, 空气阻尼系数大小可控的特点, 则就是最理想的结构。下面对三种结构的质量大小、空气阻尼系数以及灵敏度进行分析比较, 以确定最优结构。

(1) 振子质量大小比较。

① 栅形结构振子质量计算如下:

$$M_1 = \rho_{Si} V_2 = \rho_{Si} (n_{ba} w_{ba} L_{ba} + 2w_1 A) h \approx \frac{1}{2} \rho_{Si} A B h + \rho_{Si} w_1 A h \quad (15)$$

式中 ρ_{Si} 为硅的密度, V_1 为栅形结构振子体积, 约等

号成立的条件为 $w_{ba} \ll A$, 这一条件也符合实际情况。令 $\tilde{M}_1 = M_1 / \rho_{si} ABh$, 则

$$\tilde{M}_1 = \frac{1}{2} + \frac{w_1}{B} \quad (16)$$

②梳齿结构振子质量分析, 如图3所示设振子上所有可动电极 $x-y$ 平面的面积为 U_{mov} , 所有固定电极的 $x-y$ 平面的面积为 U_f , 所有可动电极和所有固定电极间的空隙 $x-y$ 平面的面积为 U_d 。当振子振动时, 可动电极和其背对的固定电极间的错位电容 C_s 发生变化, 会减小差分电容值, 如图3所示, 为减小它对差分电容的影响, 一般使可动电极和其背对的固定电极间的距离较大, 因此由此产生的空隙面积 U_d 也较大, 其值和 U_{mov} 大小相当。另外, 由对称特性可得可动电极面积 U_{mov} 和固定电极面积为 U_f 大小相同。

$$M_2 = \rho_{si} V_2 = \rho_{si} h [U_{mov} + w_2 A] = \rho_{si} h \left[\frac{A \cdot 2L_b - U_d}{2} + w_2 A \right] = \frac{1}{2} \rho_{si} h (AB - U_d + w_2 A) \quad (17)$$

式中 V_2 为栅型结构振子体积, 令 $\tilde{M}_2 = M_2 / \rho_{si} ABh$, 则

$$\tilde{M}_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{U_d}{AB} + \frac{w_1}{B} = \frac{1}{2} + \frac{w_1}{B} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2w_1}{B}\right) \frac{n_b \Delta d}{A} - \left(1 - \frac{2w_1}{B}\right) \frac{n_b d_{cb}}{A} \quad (18)$$

式中 Δd 为杆枝间距, d_{cb} 为梳齿齿端到枝杆的间距, 如图3所示。

③梳栅结构振子质量计算如下:

$$\tilde{M}_3 = \alpha \tilde{M}_1 + (1 - \alpha) \tilde{M}_2 \quad (19)$$

从图5可以看出, 三种振子质量都随质量块宽度增加而增加。振子可分成两部分, 质量块和检测电容, 如图1、图3、图4, 在振子总面积一定的情况下, 质量块的面积越大, 检测电容的面积就小, 因此需要根据性能要求来选择合理的质量块和检测电容面积, 来协调质量和检测电容之间的大小关系。 w_1/B 衡量质量块所占振子的总面积, 因此在振子总宽度 B 确定时, w_1 值需要根据实际需要来选。从图5中可以看出, 当选定 w_1 值, 且三种结构的振子厚度都相同时, 栅形结构振子质量大于梳栅结构, 梳栅结构大于梳齿结构, 且选定的 w_1 值越小, 三种结构之间的质量差距越大。另外, 栅形结构振子由于栅形条间距较大, 一般为几十 μm , 比梳齿结构齿间距离大近十倍, 所以这种结构可以通过增加振子厚度来进一步增大振子质量, 梳栅结构也可以通过增加栅形部分的厚度来增加质量。

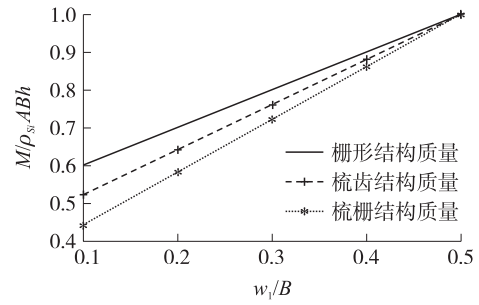


图5 $n_b \Delta d/A = 0.3, \alpha = 0.5$, 各振子质量和相应的栅形结构上下边框宽度 w_1 或梳齿结构中间质量块一半宽度 $w_2/2 = w_1$ 的关系

(2) 空气阻尼系数比较

通常, 传感器的滑膜阻尼可用 Couette 和 Stokes 模型来计算^[7], 当 $\delta \gg d$ 时, 利用 Couette 模型: $c_{couette} = \mu S/d_1$; 当 $\delta \ll d$ 时, 利用 Stokes 模型: $c_{stokes} = \mu S/\delta$ 。其中, δ 为极板与上表面的间距, d_1 为极板与下表面的间距, S 为极板间正对面积。而压膜阻尼在矩形极板情况下可用如下公式^[8]: $D_{压膜} = (\mu LB^3/d_2^3) \beta(B/L)$, 式中 L 为极板长度, B 为极板宽度, d_2 为极板间距。

①栅形结构传感器的空气阻尼系数 D_1 如图1所示, 主要是振子与衬底间的空气滑膜阻尼, 其计算方程如下^[9]:

$$D_1 = \frac{\eta U_1}{d_h + 2\lambda} = \frac{1}{2} \frac{\eta A (B + w_1)}{d_h + 2\lambda} \quad (20)$$

令 $\tilde{D}_1 = D_1 / \frac{\eta AB}{d_h + 2\lambda}$, 则

$$\tilde{D}_1 = \frac{1}{2} + \frac{w_1}{B} \quad (21)$$

式中 U_1 为栅形振子和衬底的正对面积, η 为空气粘度系数, λ 为空气分子自由度。

②梳齿结构空气阻尼 D_2 主要由可动梳齿电极与固定梳齿电极间的滑膜阻尼 D_{2a} 和梳齿齿端与枝杆间的压膜阻尼 D_{2b} 以及振子与衬底间的滑膜阻尼 D_{2c} 三部分组成, 即

$$D_2 = D_{2a} + D_{2b} + D_{2c} \quad (22)$$

式中滑膜阻尼 D_{2a} 和 D_{2c} 计算公式如下:

$$D_{2a} + D_{2c} = \eta \left(\frac{U_{2c}}{d + 2\lambda} + \frac{U_2}{d_h + 2\lambda} \right) \quad (23)$$

式中 U_{2c} 、 U_2 为变电容面积梳齿电容的正对面积和振子与衬底正对的面积, 分别为 $U_{2c} = 2n_c n_b l_0 h$, $U_2 = 2n_b (l_c w_c n_c + L_b w_b) + w_2 A$, 考虑边缘效应^[10], $d = \frac{d_c}{1 + 8.5 d_c / l_0}$, 其中 d_c 为变电容面积梳齿电容的间距, d_h 为振子和衬底的间距。压膜阻尼 D_{2b} 可由下式来估算^[7]:

$$D_{2b} = \frac{2n_c n_b \eta h w_c^3}{(l_c - l_o)^3} \beta \left(\frac{w_c}{h} \right) \quad (24)$$

令 $\tilde{D}_2 = D_2 / \frac{\eta AB}{d_h + 2\lambda}$, 则

$$\tilde{D}_2 = \frac{4n_c n_b l_o h}{AB} \cdot \frac{d_h + 2\lambda}{d + 2\lambda} + 0.5 + \frac{w_1}{B} - \left(0.5 - \frac{w_1}{B}\right) \cdot \frac{n_b \cdot \Delta d}{A} + \frac{4n_c n_b h w_c^3}{(l_c - l_o)^3} \left(1 - 0.56 \frac{w_c}{h}\right) \cdot \frac{d_h + 2\lambda}{AB} \quad (25)$$

③梳栅结构空气阻尼 D_3 主要由可动梳齿电极与固定梳齿电极间的滑膜阻尼 D_{2a} 和梳齿齿端与枝杆间的压膜阻尼 D_{2b} 以及振子与衬底间的滑膜阻尼 D_{2c} 三部分组成, 其计算可由 D_1 、 D_2 得出:

$$\tilde{D}_3 = \alpha \tilde{D}_1 + (1 - \alpha) \tilde{D}_2 \quad (26)$$

由式(21)、(25)和(26), 参考表1的数据, 三种结构空气阻尼系数随梳齿正对长度 l_0 的增长关系如图6所示。从图中可以看出, 栅形无梳齿部分, 因此阻尼系数和 l_0 无关, 其值为定值且最小, 根据式(21), 其值只与 w_1 有关, 且变化范围在2倍之内; 梳齿结构空气阻尼系数随 l_0 的增大而增大, 尤其是当 l_0 接近 $20 \mu\text{m}$ 时, 空气阻尼系数开始显著增加, 因此梳齿结构可通过设计合理的 l_0 值, 来调整传感器的空气阻尼系数; 同理, 梳栅结构也可通过设计 l_0 的值来调整空气阻尼系数。

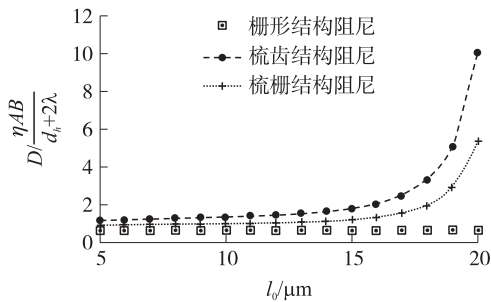


图6 $n_b \Delta d / A = 0.3, \alpha = 0.5$, 空气阻尼力随梳齿正对长度 l_0 的增长关系

(3) 灵敏度比较

传感器的设计采用了变检测电容叠加面积的方式, 这消除了变电容间距存在的非线性问题。对于传感器结构中存在的变间距的寄生电容, 其间距很大, 电容微小, 可以忽略。这种结构设计可以通过增大振子的位移来增加电容灵敏度, 而且不会有引入非线性。当传感器受到惯性信号作用且振子位移 $x \ll d_0$, 则等效差分电容变化为: $\Delta C = C_1 - C_2 = 2n \left(\frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d_0 - x} - \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d_0 + x} \right) \approx 2C_0 \frac{x}{d_0}$, n 为差分电容数, 稳态时有 $Ma = kx$, 因此传感器的电容灵敏度可用下式计算:

$$S_c = \frac{\Delta C}{a} = \frac{2Ma}{kd_0} C_0$$

根据上式, 栅形结构传感器的电容灵敏度为:

$$S_1 = 2\epsilon \epsilon_0 \frac{A(B - 2w_1) M_1 g}{2w_{ba} d_h k} \quad (27)$$

式中 k 为 U 形梁的弹性系数。

从图7可以看出, w_{ba} 越小, 栅形结构传感器的电容灵敏度越高, 但是 w_{ba} 不能过小, 否则, 传感器的电容边缘效应会很明显, 其灵敏度不能由式(27)来计算, 具体情况不在本文的讨论范围。因此, 在实际设计中, w_{ba} 的值因在考虑各方面因素的前提下, 尽量取小值。

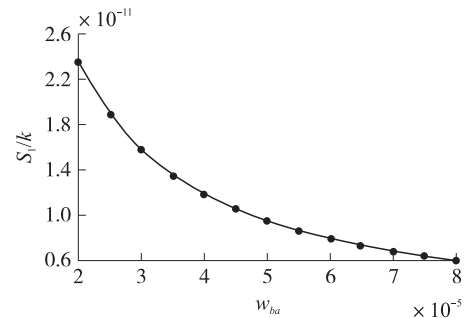


图7 栅形结构传感器的电容灵敏度 S_1 随 w_{ba} 的变化关系

梳齿结构传感器的电容灵敏度为:

$$S_2 = \frac{4\epsilon \epsilon_0 n_b n_c h M_2 g}{k} \left[\frac{1}{d_c} + \frac{w_c}{(l_c - l_o)^2} \right] \quad (28)$$

梳栅结构传感器的电容灵敏度:

$$S_3 = \alpha S_1 + (1 - \alpha) S_2 \quad (29)$$

从图8可以看出, 在梳齿正对长度 l_0 较小时, 梳齿结构和梳栅结构的灵敏度都小于栅形结构传感器的灵敏度, 随着 l_0 的增大, 梳齿结构和梳栅结构的灵敏度快速增加, 当 $l_0 > 15 \mu\text{m}$ 时, 开始大于栅形结构。但是由图6, 当 $l_0 > 15 \mu\text{m}$ 时, 空气阻尼系数也开始快速增长。另外, 综合图6和图8, 当梳齿结构和梳栅结构取相同的灵敏度时, 梳栅结构的空气阻尼要小于梳齿结构。因此在具体设计时, 要根据具体要求来选择最佳结构。

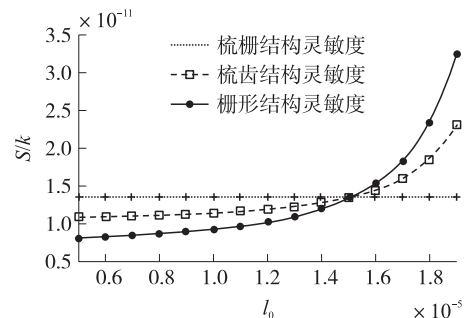


图8 $w_{ba} = 0.35 \mu\text{m}$, 栅形结构传感器的电容灵敏度 S_1 和不同 l_0 的梳齿及梳栅结构传感器灵敏度比较

综上所述,在相同的轮廓尺寸条件下,栅形结构传感器的振子质量最大,空气阻尼力最小。梳齿结构和梳栅结构传感器的空气阻尼力和灵敏度都随 l_0 的增加而增加。因此,当器件要求空气阻尼力很小时,应选择栅形结构,它可以保证较小空气阻尼的同时,灵敏度比其他结构都高;当器件对灵敏度要求较高,而对空气阻尼大小要求不严时,选择梳齿结构比较合适,只要增大 l_0 的值,就可以得到很高的灵敏度;当在空气阻尼和灵敏度之间选择一个折衷值时,应该选择梳栅结构。

另外,从器件制作工艺上来分析,体硅加工工艺制造出来的梳齿电容,其梳齿间存在一定角度,梳齿

不平行对传感器的性能有很大影响^[11];而栅形结构中的栅形条间不平行并不影响检测电容,但刻蚀程度不当,没控制好 w_b 的值,同样会降低器件的灵敏度,所以关键是要确保栅形条底部的宽度^[12]。

3 实例分析比较

以上部分指出了各个结构的参数设定规则及器件各性能的计算方法,并各自进行比较。下面通过一组具体参数,在要求空气阻尼系数较小的条件下,来综合比较三种器件各个性能指标,进一步认证上述结论。器件参数如表1所示,相应的性能指标如表2所示。

表1 结构参数

(单位: μm 、个)

公共参数			栅形参数							梳齿参数							梳栅参数		
A	B	h	w_1	w_{ba}	w_{al}	d_{al}	d_h	n_{ba}	L_{ba}	w_2	w_c	l_c	l_o	w_b	L_b	d_c	n_c	n_b	α
3 500	4 000	100	480	35	32	3	4	50	3 040	960	15	23	13	30	1 520	4	40	16	0.5

表2 性能指标

	栅形	梳齿	梳栅
质量/ $\times 10^{-6}/\text{kg}$	2.047	1.226	1.637
阻尼/ $\times 10^{-6}/\text{N}$	34.09	54.06	44.07
机械噪声/ $\mu\text{g}_n \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$	0.354	0.737	0.498
灵敏度/ $\text{pF} \cdot \text{g}_n^{-1}$	0.167	0.135	0.151
品质因素	377	184	261
谐振频率/Hz	1 000	1 290	1 120
初始电容值/pF	5.38	5.38	5.38

从表2可以看出,在外围尺寸、支撑梁、振子厚度、振子到衬底的距离以及静态电容值均为5.38 pF的条件下,栅形结构、梳齿结构和梳栅结构的共振频率分别为1 000 Hz、1 290 Hz和1 120 Hz,其灵敏度分别为0.167 pF/ g_n 、0.135 pF/ g_n 和0.151 pF/ g_n ,当要求空气阻尼系数较小时,栅形结构振子的质量较大,灵敏度较高,而梳齿结构在相同条件下,由于振子质量较小,所以品质因素最小从而有较大的机械噪声,这和前面的结论一致。

4 结论

本文通过理论分析,对三种不同结构 MEMS 电容传感器的结构特点进行比较,对于文中提出的传感器设计,结果表明在设定外围尺寸、支撑梁、振子厚度、振子到衬底的距离以及静态电容值 C_0 完全相同的条件下,栅形电容结构的振子质量最大,空气阻

尼力最小,采用该传感器结构的机械噪声较小,电容灵敏度较大;梳齿电容结构的空气阻尼力和灵敏度都随 l_0 的增加而增加,且振子质量较小,该传感器结构的机械噪声较大,电容灵敏度较小;而采用梳栅电容结构的特点居于两者之间,适合制作需要折衷考虑灵敏度和分辨率的传感器。对于不同的 MEMS 电容式传感器尺寸设计,虽然其灵敏度和分辨率有相关性,但可以用文中的理论对灵敏度和分辨率进行优化设计,从而研制出合适的传感器结构。

参考文献:

- [1] 董林玺,颜海霞,钱欣,等. 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.
- [2] Dong Linxi, Yan Haixia, Huo Weihong, et al. A Novel MEMS Inertial Sensor with Enhanced Sensing Capacitors[J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(5): 054003-1-054003-7.
- [3] Kùlah H, Hae J, Yazdi N, et al. Noise Analysis and Characterization of a Sigma-Delta Capacitive Microaccelerometer[J]. IEEE journal of solid-state circuits, February 2006, 41(2).
- [4] Han Ki-ho, Cho Young-ho. Self-Balanced Navigation-Grade Capacitive Microaccelerometers Using Branched Finger Electrodes and Their Performance for Varying Sense Voltage and Pressure[J]. Journal of MEMS, 2003, 12(1):11-20.
- [5] 董林玺,刘国华,钱欣. 孔的形状和排列方式对厚孔板微结构压膜空气阻尼的影响分析[J]. 传感技术学报,2007,20(6):1262-1266.
- [6] Gabrielson T B. Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors[J]. IEEE Trans. Electron. Devices, 1993, 40(5): 903-909.
- [7] Bao M. Analysis and Design Principles of MEMS Device[M].

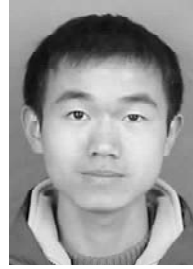
Elsevier Science (June 10, 2005) | ISBN: 0444516166 | 328 pages | PDF | 26.2 Mb.

- [8] Bao Minhang, Yang Heng. Squeeze Film Air Damping in MEMS [J]. Sensors and Actuators A, 2007, 136(1): 3-27.
- [9] Bao M, Yang H, Sun Y, et al. Modified Reynolds' Equation and Analytical Analysis of Squeeze-Film Air Damping of Perforated Structures [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 13: 795-800.

- [10] Timo Veijola, Marek Turowski. Compact Damping Models for Laterally Moving Microstructures with Gas-Rarefaction Effects [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2001, 10(2): 263-273.
- [11] 董林玺, 孙玲玲, 车录锋, 等. 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 [J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 525-530.
- [12] 郑旭东, 曹学成, 郑阳明, 等. 一种电容式微机械加速度计的设计 [J]. 传感技术学报, 2008, 21(2): 226-229.



董林玺(1976-),男,博士,副研究员,硕士生导师,研究方向为超高精度 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;



李寿洛(1986-),男,硕士,研究方向为 MEMS 三维惯性电容加速度传感器研究, lishouluo@163.com;



陈金丹(1982-),女,硕士,研究方向为 MEMS 惯性电容加速度传感器研究, cjdflly2000@hotmail.com。