

硅微结构加速度传感器空气阻尼的研究*

陈 宏 鲍敏杭

(复旦大学电子工程系 上海 200433)

摘要 本文从理论上和实验上对硅压阻式加速度传感器的三种结构:悬臂梁、四梁和双岛-五梁的空气阻尼问题进行了研究.在这三种结构中,四梁结构的质量块具有平行的运动方式,但是悬臂梁和双岛-五梁结构中的质量块既有平动又有转动,对这种非平动状态的空气阻尼的分析尚未见报道.本文从决定平板运动阻尼特性的 Reynolds 方程出发,在平板平动情况解的基础上推导了非平动板的阻尼力以及双面阻尼的阻尼力.用这些结果对三种结构进行了单面和双面阻尼设计,实验结果与理论分析相符.

EEACC: 2560Z, 7230

1 引言

随着微机械加工技术的发展,出现了以硅为材料的微型梁-质量块结构加速度传感器,在加速度作用下结构中的质量块受惯性力作用而发生位移,从而引起梁的形变,通过测量梁上力敏电阻或反映质量块位移的电容变化就可测得加速度的值.目前压阻式加速度传感器有悬臂梁^[1]、四梁^[2]和双岛-五梁^[3]三种形式.

加速度是一种动态信号,因此对加速度传感器要考虑其动态特性.梁-质量块结构在受外力作用下的运动类似于有阻尼的弹簧-质量块系统,存在有一定的共振频率.一般情况,硅微机械梁-质量块系统的 Q 值很高,在空气中约为几百,在真空下可达 200 000^[2],因此如不人为的增加阻尼,器件极易因共振而损坏,使用频率也只能达固有频率的 30% 左右.而在适当的阻尼条件下,器件的工作频率可达固有频率的 90%,器件的瞬态特性也可大大改善,这说明阻尼的设计与实现是加速度传感器实用化的关键技术之一.

早期的结构型半导体加速度传感器器件的尺寸较大,需要采用粘滞系数较大的硅油以提供足够的阻尼.由于硅油粘滞系数的温度系数很大,阻尼比也会随温度明显变化.出现微机械加工技术之后,可在质量块上下增加间距很小的盖板,质量块运动时会将间隙内流体材

* 国家自然科学基金重点项目和传感技术国家重点实验室项目

陈 宏 男,1969年生,理学硕士,从事加速度压力等力敏传感器的科研工作

鲍敏杭 男,1937年生,教授,从事微电子和传感器有关的教学和科研工作

1994年7月18日收到本文

料挤压流动而产生阻力,为器件提供阻尼.由于加工精度可控制得很高,这样就可以采用粘滞系数很小的空气做阻尼材料,空气的粘滞系数随温度的变化很小,可以在较宽的温度范围内为器件提供适当的阻尼,改善器件频率特性.

本文以压阻式加速度传感器为研究对象,利用流体力学的 Reynolds 方程对三种结构质量块的不同运动形式的阻尼特性进行分析,找出控制阻尼的方法,根据需要进行单面或双面阻尼的设计,并给出对器件的测试结果.

2 阻尼分析与设计

悬臂梁、四梁和双岛-五梁三种结构的运动都可看作弹簧-质量块系统,系统的动力学方程为:

$$m\ddot{x} = -kx - f\dot{x} + F \quad (1)$$

其中, m 为质量块质量, k 为系统的刚性系数, f 为阻尼系数, F 为加速度引起的惯性力. 系统的阻尼比为:

$$\zeta = \frac{f}{\sqrt{mk}} \quad (2)$$

从理论分析可知, $\zeta = 0.7$ 为最佳阻尼,此时系统的幅频特性和瞬态响应特性都处在最佳状态,设计时总是希望器件的阻尼比接近最佳值.从公式(2)中可以看出,对于系统而言, m 与 k 为确定值,可以通过调节 f 来控制阻尼比 ζ , 阻尼系数 f 由系统的结构和运动形式及阻尼材料特性决定.对于上述三种结构,质量块与一个盖板之间的关系可看成如图 1 所示的二个平行板之间的相对运动,平板间的空气运动可以用流体力学的 Reynolds 方程^[4]来描述:

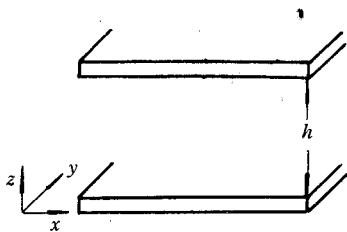


图1

Reynolds 方程^[4]来描述:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12 \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

其中, p 为空气压, h 为板间距, η 为空气粘滞系数. 当板的运动很小时,方程(3)可简化为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{12\eta}{h^3} \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

为求得阻尼系数 f 的表达式,必须从式(4)解出板运动引起的附加压强. 在我们讨论的三种加速度传感器的结构中,四梁结构中的质量块的运动形式为平动,而悬臂梁和双岛-五梁两种结构中的质量块的运动既有平动又有转动,下面我们根据实际情况,分别进行讨论.

2.1 一维的平动情况

设板长远大于板宽,则可采用一维近似,利用图2所示坐标式(4)可简化为:^[5]

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{12\eta}{h^3} \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

式中的 p 可以考虑为板的相对运动引起的板间附加空气压强,利用边界条件:

$$p\left(\pm \frac{B}{2}\right) = 0$$

解出

$$p = -\frac{6\eta}{h^3} \frac{dh}{dt} \left(\frac{B^2}{4} - x^2 \right)$$

这一结果说明,在板的间距减小时,板间空气向两侧流出,由于空气的粘滞力在板间建立了附加压强,在 $x = 0$ 的中心点,压强有极大值。

板在 y 方向单位长度受到的阻尼力可表示为:

$$F/L = \int_{-B/2}^{B/2} p dx = -\frac{\eta B^3}{h^3} \frac{dh}{dt}$$

因此有

$$F = -\frac{\eta B^3 L}{h^3} \frac{dh}{dt}$$

按定义得到阻尼系数:

$$f = \frac{\eta B^3 L}{h^3} \quad (6)$$

从这个式子可以看出,阻尼系数与结构参 B, L 有关,与板间距 h 三次方成反比,与材料的粘滞系数成正比. 通过改变 h 和 η 都可控制 f 的值,从而达到调节阻尼比 ζ 的目的. 从此式也可看出,早期的器件 h 比较大,所以需采用粘滞系数较大的硅油作阻尼材料。

2.2 非平动平板阻尼力的推导

上述平动情况阻尼力的求解,适用于四梁结构器件. 但对于悬臂梁和双岛-五梁结构,其运动既有平动又有转动,不能直接采用前面的结果. 下面我们考虑这种非平动的阻尼系数表达式,以用于这两种结构的阻尼设计. 仍然考虑无限长板,利用图3所示的坐标,运动速度表示为:

$$dh/dt = dh_1/dt + \dot{\theta} x$$

其中, dh_1/dt 为板中心速度, θ 为板的转动角度由边界条件:

$$p(\pm \frac{B}{2}) = 0$$

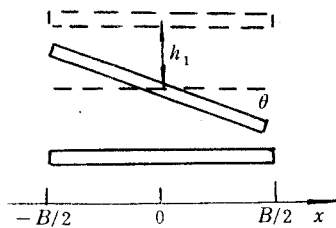


图3

可解出

$$p = \frac{6\eta}{h^3} \left(h_1 + \frac{\dot{\theta}}{3} x \right) \left(\frac{B^2}{4} - x^2 \right)$$

板上在 y 方向单位长度受的力

$$\begin{aligned} F/L &= \int_{-B/2}^{B/2} p dx = \frac{6\eta}{h^3} \int_{-B/2}^{B/2} h_1 \left(\frac{B^2}{4} - x^2 \right) dx + \int_{-B/2}^{B/2} \frac{\dot{\theta}}{3} x \left(\frac{B^2}{4} - x^2 \right) dx \\ &= -\frac{\eta B^3}{h^3} \frac{dh_1}{dt} \end{aligned}$$

因此阻尼系数的表达式:

$$f = \frac{\eta B^3 L}{h^3} \quad (7)$$

从此式可以看出,当方程中选用平板中心速度时,一维非平动阻尼系数的表达式同平动时的一致。

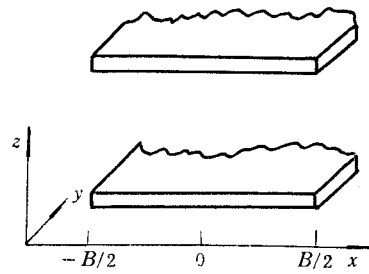


图2

2.3 二维有限平板平动解

实际质量块的形状是矩形的,因此上面的一维近似在定量应用时误差就较大.对于适于四梁结构的二维有限平板平动的阻尼力可以从解二维 Reynolds 方程^[6]得到:

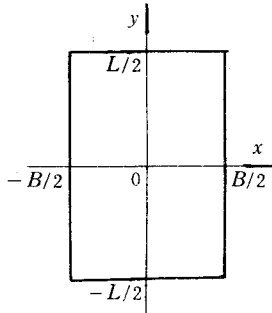


图4

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{12\eta}{h^3} \frac{dh}{dt} = 0 \quad (8)$$

利用边界条件(见图4)

$$\begin{cases} p(\pm \frac{B}{2}, y) = 0 \\ p(x, \pm \frac{L}{2}) = 0 \end{cases}$$

此方程的解可表示为通解 w 和特解 u 的和,即

$$p = w + u$$

根据边界条件,特解可取为

$$u = \frac{\sigma}{2} (x^2 - \frac{B^2}{4}) \quad (9)$$

通解 w 为一拉普拉斯方程的解:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \\ w(\pm \frac{B}{2}, y) = 0 \\ w(x, \pm \frac{L}{2}) = -\frac{\sigma}{2} (x^2 - \frac{B^2}{4}) \end{cases}$$

采用分离变量法解此方程

$$w = \frac{4\sigma B^2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2} \cosh \frac{n\pi y}{B}}{n^3 \cosh \frac{n\pi L}{2B}} \cos \frac{n\pi x}{B} \quad (10)$$

方程的解为:

$$p = u + w = \frac{\sigma}{2} (x^2 - \frac{B^2}{4}) + \frac{4\sigma B^2}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{(-1)^{(n-1)/2} \cosh \frac{n\pi y}{B}}{\eta \cosh \frac{n\pi L}{2B}} \cos \frac{n\pi x}{B} \quad (11)$$

平板上的力为:

$$F = \int dx \int dy p(x, y) = -\frac{LB^3\eta}{h^3} \frac{dh}{dt} [1 - \frac{192B}{L\pi^5} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi L}{2B}] \quad (12)$$

阻尼系数为:

$$f = \beta(B/L) \frac{LB^3\eta}{h^3} \quad (13)$$

其中:

$$\beta(B/L) = [1 - \frac{192B}{L\pi^5} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi L}{2B}]$$

从解的形式可以看出,有限平板的阻尼系数与一维的表达式相似,只是表达式中增加了

一个与结构有关的修正系数 $\beta(B/L)$. 与一维的分析类似, 当我们把质量块的运动考虑为以质量块中心速度运动的平动形式, 这一表达式也可以推广应用于非平动的悬臂梁和双岛-五梁结构. 从以上分析可以看出, 对于三种器件结构, 通过调节盖板与芯片间的距离 h , 即可得到所需的 ζ 值, 这样我们就找到了确定三种不同结构的阻尼条件.

2.4 双面阻尼

上面的分析都是针对器件单面阻尼进行的, 由于器件的封装形式采用上下盖板封装, 当单面的阻尼间距太小时, 可考虑采用双面阻尼, 这样可适当增加阻尼间距, 使工艺上较易控制. 如图5所示, 当可动板在两固定板中心附近运动时, 板所受到的压力为单面阻尼的二倍

$$\begin{aligned} p &= p_1 + p_2 \\ F &= F_1 + F_2 \\ F &= F_1 + F_2 = \frac{\eta B^3 L}{h_1^3} + \frac{\eta B^3 L}{h_2^3} = \frac{\eta B^3 L}{h^3} \\ 1/h &= \sqrt{1/h_1^3 + 1/h_2^3} \end{aligned}$$

h 为等效的单面阻尼间距. 当 $h_1 = h_2 = h'$ 时, $h' = \sqrt[3]{2} h$.

从此式可看出, 相同阻尼条件下, 双面阻尼间距比单面阻尼的间距约大四分之一, 工艺上相对容易控制.

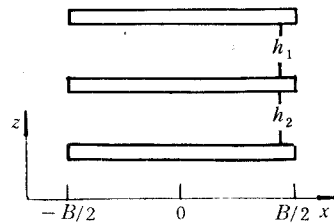


图5

3 实验结果

通过前面的分析, 得到了通过调节盖板与芯片质量块的间距可控制阻尼比的结果, 以此为依据, 我们对器件的阻尼进行了设计和测试.

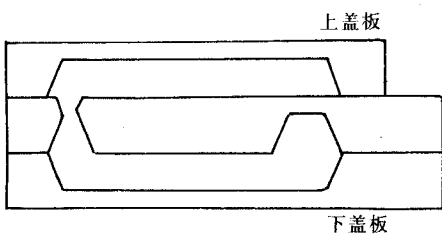


图6

3.1 空气阻尼结构

图6是我们实际器件封装的示意图, 器件封装形式采用上、中、下三层结构, 芯片在中间, 上下为盖板, 盖板与芯片间的距离由阻尼决定.

3.2 阻尼的设计与测试

3.2.1 单面阻尼

对于上下盖板结构, 当一盖板与芯片间距大于另一盖板与芯片间距2倍以上, 其阻它作用可以忽略, 这样只需控制一个盖板与芯片间距即可实现阻尼, 调节参数减少为一个.

对于三种结构, 利用实验中采用的结构参数, 对不同梁厚的器件进行了最佳阻尼间距的计算, 图7给出了三种结构单面阻尼的最佳阻尼间距的值;

从图中可以看出, 由于悬臂梁在三种结构中的刚度最小, 其阻尼间距最大, 最易控制. 对三种不同结构的器件我们进行封装和测试. 以悬臂梁的一个器件#24为例, 设计的单面阻尼间距 $20\mu\text{m}$, 计算的阻尼比为0.58, 测量值为0.65, 从大量的测量结果表明, 实际测出的单面阻尼的阻尼比与理论值符合很好, 一般阻尼比误差在0.1左右.

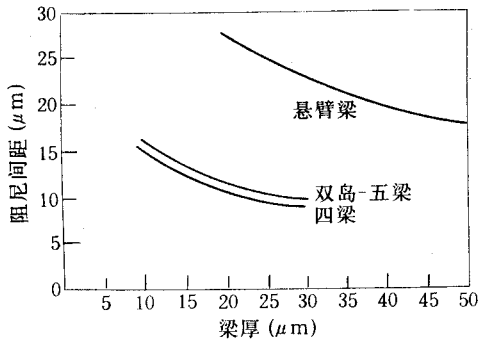


图7 临界阻尼间距与梁厚的关系

3.2.2 双面阻尼

上下盖板的封装形式为器件提供了双面阻尼的条件,我们对悬臂梁结构进行了双面阻尼的设计,对器件进行了测试.以悬臂梁的一个器件#21为例,上盖板与质量块间距为 $25\mu\text{m}$,下盖板与质量块间距为 $28\mu\text{m}$,计算的阻尼比为0.50,测量的阻尼比为0.52,结果表明实际值与理论值相符,证明了分析的正确.

实际应用中,阻尼比一般选取的0.4—0.9之间,经过设计,对于器件的单面和双面阻尼都可控制在0.4—0.9之间,为器件提供了良好的阻尼比.

3.3 阻尼的温度特性

空气做为阻尼材料的最大优点就是空气粘滞系数的温度系数小,在较宽的温度范围内器件有良好的频率特性,对已提供了阻尼的器件我们进行了器件的温度实验,图8给出一个器件的测试结果.从曲线可以看出,随温度的上升,器件的灵敏度有所下降,这是由半导体压阻系数的温度系数引起的,而器件的阻尼比变化不大,证实了空气具有良好的温度特性.

4 讨论

本文对采用硅微机械加工技术研制的梁-质量块结构进行了阻尼特性分析,得到了通过调节质量块与盖板间距离控制器件阻尼比的设计方法,对三种加速度传感器进行了阻尼设计和测试,结果表明,适当利用单面或双面阻尼的方法可将器件的阻尼比控制在0.4—0.9之间.温度实验证明了空气是非常理想的阻尼材料,器件阻尼比随温度的变化很小.由于解决了阻尼这一关键技术,目前三种结构的压阻式加速度传感器都已可供实用.

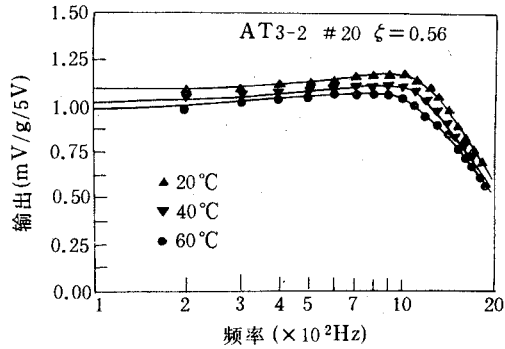


图8 输出与频率关系曲线

致谢 工作中得到研究室的工作同志的大力帮助,特此致谢!

参 考 文 献

- [1] L. M. Roylance, J. B. Angell, IEEE Trans. Electron Devices, 1979, **ED-26**:1911-1917.
- [2] H. V. Allen, S. C. Terry, D. W. De Bruin, Sensors and Actuators, 1989, **20**:153-161.
- [3] Shaoqun Shen, Jian Chen, Minhang Bao, Sensors and Actuators, 1992, **34A**:101-107.
- [4] James B. Starr, Squeeze-film Damping in Solid-state Accelerometer, IEEE Workshop on Solid-State Sensor and Actuator, Hilton head Island, SC, USA, 1990, 44-47.
- [5] W. E. Langlois, Quarterly of Applied Mathematics, 1962, **XX**(2):31-150.
- [6] F. R. Archibald, Cambridge, Mass, Transaction of the ASME, 1956, **78A**:29-35.

Air Damping of Micromechanical Silicon Accelerometers

Chen Hong and Bao Minhang

(*Department of Electrical Engineering, Fudan University, Shanghai 200433*)

Received 18 July 1994

Abstract The damping characteristic analysis of three structures of silicon piezoresistive accelerometers: cantilever beam, quad-beam and twinmass five-beam structures are discussed. The solutions to single side and double side damping coefficients for parallel movement of a quad-beam structure and non-parallel movement of another two structures have been obtained. Based on these analyses, single-sided and double-sided damping structures are designed. The experimental results agree quite well with analytical results.

EEACC: 2560Z, 7230