

文章编号:1000-582X(2011)08-036-07

静电刚度式谐振微加速度计的结构设计和制造

刘 恒^{1,2},张凤田²,何晓平²,苏 伟²,张富堂^{1,2}

(1. 重庆大学 通信工程学院,重庆 400044;2. 中国工程物理研究院电子工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要:基于静电刚度的谐振式微加速度计能通过加载电压来调节灵敏度,减少了灵敏度对结构工艺误差的依赖性。根据单梁谐振加速度计的动力学原理,确定了输出频率与各活动结构位移的非线性关系。对于输出频率与加速度的复杂非线性求解问题,提出在谐振梁刚度远大于折叠梁刚度条件下,可以有效的得到二者的解析关系式,为结构设计提供了约束条件。对于差分结构,推导了面内低阶模态方程,提出应减少音叉梁连接端的刚度系数来减少工艺误差造成的模态扰动误差。采用 ICP 干法体硅工艺,在很少的工艺步骤下能实现高深宽比结构的流片。实验测试发现结构完整可动,但存在同频干扰问题,提出了高频调制开关解调的信号处理办法。理论分析和实验测试为设计新型谐振式微加速度计提供了依据。

关键词:微加速度计;静电刚度;模态分析;灵敏度

中图分类号:TN911.71

文献标志码:A

Structure design and fabrication for resonant accelerometer based on electrostatic stiffness

LIU Heng^{1,2}, ZHANG Feng-tian², HE Xiao-ping², SU Wei², ZHANG Fu-tang^{1,2}

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics,

Mianyang 621900, Sichuan, P. R. China)

Abstract: The introduced resonant accelerometer makes use of the equivalent electrostatic stiffness to sense the acceleration. The sensitivity can be adjusted by changing the applied sensing voltage and it is robust for the fabrication error. According to the sensing principle, the dynamic model of the single beam accelerometer is built along with the no-linear relationship of the output frequency and the displacement of all positive components. When the stiffness of the vibrating beam is much bigger than the stiffness of the fold beam, the sensitivity can effective achieve. It is the restriction for the structure design. For the differential structure, mode analysis shows it is a lower mode in plane for the work mode. Decreasing the stiffness of connected end for the double vibrating beam can reduce the disturbance error. The bulk micromachining for the resonant accelerometer can achieve high depth width ration etching. The experiment find the structure is not broken and there is the same frequency disturbance problem. FM is suggested to deal with the disturbance. Theory analysis and test provides some important conclusions for the design of the novel type resonant accelerometer.

Key words: micro-accelerometer; electrostatic stiffness; mode analysis; sensitivity

收稿日期:2011-02-03

基金项目:国防预研资助项目(51305040201);中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2009B0403044)

作者简介:刘恒(1981-),男,重庆大学博士研究生,主要从事传感器信息处理方向研究,(Tel)13814519286;
(E-mail)ghost80boy@163.com。

目前研究较多的谐振梁加速度计就是利用加速度形成的惯性力转化成振梁的轴向应力,从而改变其谐振频率的方法来检测加速度值的^[1-3]。因此,惯性力一轴向应力的转化效率决定了加速度计的灵敏度。常用的微谐振梁加速度计为双音叉梁式。采用差分输出结构,但通过杠杆原理来放大轴向应力,惯性力一轴向应力转化效率低,灵敏度不高,同时由于微构件几何尺寸太小,杠杆抗冲击性弱,重复性差,灵敏度下降快;加速度计性能受工艺误差影响比较大。

基于静电刚度的谐振式微加速度计通过静电刚度来调节频率变化,通过频率变化来敏感外部加速度。即加速度引起质量块的位移,位移带来静电刚度的变化,刚度变化带来频率的变化。为了进一步提高灵敏度,基于静电刚度的谐振式微加速度计多采用频率差分方式,可以通过加载检测电压来调节灵敏度。虽然该型加速度计有一些报道^[4-5],有较好的性能,但其工作原理和输出频率非线性问题却讨论较少,这正是加速度计设计的关键所在。对于差分结构,能够提高灵敏度,但工艺误差容易造成 2 个谐振梁模态的不匹配,会带来面内低阶模态的扰动。给出了单梁谐振加速度计的动力学模型;并获得了频率和各结构位移的非线性关系;给出了在约束条件下,灵敏度的表达式。建立了差分双梁谐振加速度计的面内模态方程,理论分析得出存在面内低阶模态;并提出减少双梁连接端的刚度来增加模态的抗扰动能力;干法体硅深刻蚀技术能够在很少的光刻工艺步骤下实现结构的流片。

1 基于静电刚度的谐振式加速度计原理

差分式基于静电刚度的谐振式微加速度计主要由敏感质量块(阻尼孔)、折叠梁、检测平行板电容器、固定电极、驱动梳齿电容器、音叉谐振梁、固定锚点等,如图 1。 y 方向为驱动检测方向。采用单边驱动,差动敏感的方式。

差分式基于静电刚度的谐振式微加速度计可以在中间对称处将结构分为 2 个相同的单梁谐振加速度计,单梁结构见图 2。

结构检测部分可以等效为 1 个平行板电容器,当折叠梁连接检测电压 V_s ,活动音叉梁接高频方波 V_a ,固定梳齿接交流电压 $V_a \sin \omega t$ 和直流偏置电压 V_d 。谐振梁结构可以等效为 1 个二阶系统,输入输出关系可以类比为 1 个带通滤波器,对于低幅度高频方波电压 V_s ,频率远离谐振频率,可以等效为接地。在驱动电压的直流幅值远大于交流幅值,单谐

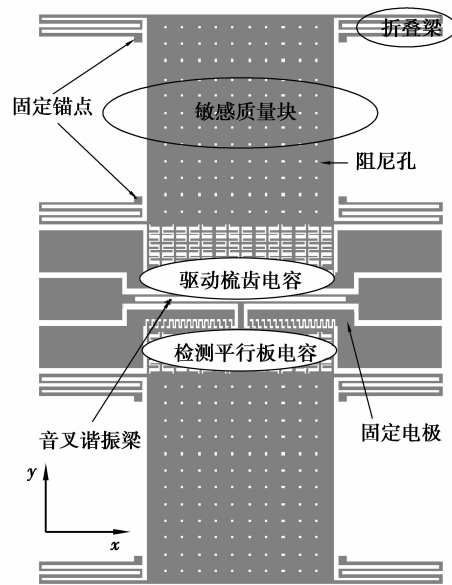


图 1 基于静电刚度的谐振式微加速度计

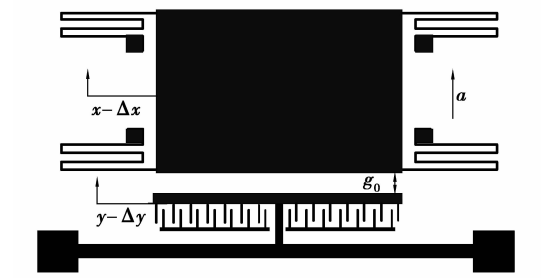


图 2 等效单梁谐振式微加速度计

振梁输出频率 f 可以表示为^[5]

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k - \frac{\epsilon A V_s^2}{(g_0 - (x - \Delta x) - (y_1 - \Delta y))^3}}{m}}, \quad (1)$$

式(1)中, k 为音叉臂横向振动的有效机械刚度, N/m; m 为音叉臂 y 方向振动的有效质量, Kg; A 为平板电容等效正对面积, m^2 ; ϵ 为介电常数; x 为无加速度时折叠梁和质量块在静电力作用下 y 方向的位移, m; Δx 为存在加速度时, 折叠梁和质量块在 y 方向的位移, m。 y_1 为无加速度时谐振梁在静电力作用下 y 方向的位移, m; Δy 为存在加速度时, 谐振梁在 y 方向的位移, m。在静态无加速度时, 对于折叠梁和质量块有^[5]

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon A V_s^2}{(g_0 - x - y_1)^2} = k_s \cdot x, \quad (2)$$

其中: g_0 为平板电容器的初始间距和梳齿横向间距, m; k_s 为折叠梁在 y 方向的等效刚度, N/m。

在静态无加速度时, 对于单谐振梁有

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon AV_s^2}{(g_0 - x - y_1)^2} - \frac{N\epsilon h V_a^2}{2g_0} = k \cdot y_1 \quad (3)$$

当存在加速度 a 时,对于折叠梁和质量块有^[5]

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon AV_s^2}{(g_0 - x - \Delta x - y_1 - \Delta y)^2} = k_s(x - \Delta x) - m_s \cdot a \quad (4)$$

对于谐振梁有

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon AV_s^2}{(g_0 - x - \Delta x - y_1 - \Delta y)^2} - \frac{N\epsilon h V_a^2}{2g_0} = k \cdot (y_1 - \Delta y) - m \cdot a \quad (5)$$

式(3)、(4)中, m_s 为 y 方向折叠梁的振动有效质量, Kg; N 为驱动梳齿的个数; h 为结构的厚度, um。

分析式(1),输出频率 f 与参数 $x, \Delta x, y_1, \Delta y$ 有关,而根据式(2), x 和 y_1 在驱动电压和检测电压确定条件下为常数,与加速度 a 无关, $g_0 - x - y_1$ 也为常数;根据式(3)、(4), Δx 和 Δy 均与 a 有关,很难直接给出输出频率与加速度的对应关系。

比较式(2)、(3)以及式(4)、(5),得到

$$y_1 = \frac{k_s \cdot x}{k} - \frac{N\epsilon h V_a^2}{2k \cdot g_0} \quad (6)$$

$$\Delta y = \frac{k_s \cdot \Delta x}{k} - \frac{(m + m_s) \cdot a}{k} \quad (7)$$

当 $k_s \ll k$ 且 k 比较大时,即谐振梁刚度远大于折叠梁的刚度,同时驱动电压交流幅值 V_a 较大时, $y_1 \ll x$ 且 $\Delta y \ll \Delta x$,相应地有 $y_1 - \Delta y \ll x - \Delta x$ 。实际设计中 $m \ll m_s$ 且 $k_s \ll k$, Δy 比 Δx 小几个数量级。在上述约束条件下,可以忽略谐振梁受力对加速度检测的影响。此时式(4)可以化简为

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon AV_s^2}{(g_0 - x - \Delta x)^2} = k_s(x - \Delta x) - m_s \cdot a \quad (8)$$

在实际设计中,应考虑平板电容器的下拉效应,即尽量增大 g_0 的值,但太大也将带来输出信号的检测困难,一般满足: $x - \Delta x \ll g_0$ 。式(8)泰勒级数展开后求解得到位移 $x - \Delta x$ 与 a 的关系

$$x - \Delta x = \frac{m_s \cdot a}{k_s - \frac{\epsilon AV_s^2}{g_0^3}} + \frac{\frac{\epsilon AV_s^2}{2g_0^2}}{k_s - \frac{\epsilon AV_s^2}{g_0^3}} \quad (9)$$

式(1)可以化简为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k - \frac{\epsilon AV_s^2}{(g_0 - x)^3 (1 - \frac{-\Delta x}{g_0 - x})^3}}{m}} = f_0 \sqrt{1 - \frac{\beta}{(1 - \alpha)^3}} \quad (10)$$

式(10)进一步化简为

$$f \approx f_0 \left(\sqrt{1 - \beta} - \frac{3}{2} \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta}} \alpha + o(\alpha^2) \right) \quad (11)$$

式(6)中, K_e 为等效静电刚度, N/m; β 为刚度比值。结合式(9)有

$$K_e = \frac{\epsilon AV_s^2}{(g_0 - x)^3} \approx \frac{\epsilon AV_s^2}{g_0^3}, \beta = \frac{K_e}{k}, f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$x = \frac{\frac{\epsilon AV_s^2}{2g_0^2}}{k_s - \frac{\epsilon AV_s^2}{g_0^3}}, -\Delta x = \frac{m_s \cdot a}{k_s - \frac{\epsilon AV_s^2}{g_0^3}}$$

$$\alpha = \frac{-\Delta x}{g_0 - x} = \frac{2m_s g_0}{2k_s g_0^2 - 3\epsilon AV_s^2} \cdot a \quad (12)$$

在忽略高阶项后,根据式(11)和(12)知,加速度计输出频率与加速度存在线性关系,这就是基于静电刚度的谐振式微加速度计的敏感原理。

根据灵敏度 S , Hz/m²/s 的定义有

$$|S| \approx \frac{\partial f}{\partial a} \approx \frac{3\epsilon AV_s^2 f_0}{\sqrt{(k^2 g_0^4 - \epsilon AV_s^2 k g_0)}} \frac{m_s}{2k_s g_0^2 - 3\epsilon AV_s^2} \quad (13)$$

根据式(13)知,灵敏度除与结构特征参数有关外,灵敏度还与检测电压 V_s 的平方有关,当存在工艺误差时,可以通过加载不同幅度的检测电压来调整灵敏度;为了使检测频率信号具有较好的线性度,检测电压的平方应为常数^[6]。

2 差分结构的模态分析

对于结构的分析,需要先建立双端固定音叉谐振结构在理想条件下的动力学方程,假设

1) DETF 的动齿齿杆及梁等效硅质量是均匀对称分布的。

2) 动齿及齿杆组成的质量块是刚性的,运动时作平行于驱动轴 y 方向的运动。

3) DETF 的梁对在驱动轴方向的运动而言是弹性的,其他方向的运动是刚性的。

4) 阻尼是线性的,只与梁等效质量块的速度有关。

DETF 等效的质量-弹簧-阻尼模型如图 3,其中 m_1, m_2 为左右音叉梁的集总质量,横向(y 方向)位移及速度分别为 $y_1, y_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2, k_y, k_{y2}$ 分别为梁固连端与基座之间的弹性系数、两根梁横向运动的弹性系数, b_y 为阻尼系数。

则在无驱动力下其动力学方程近似为

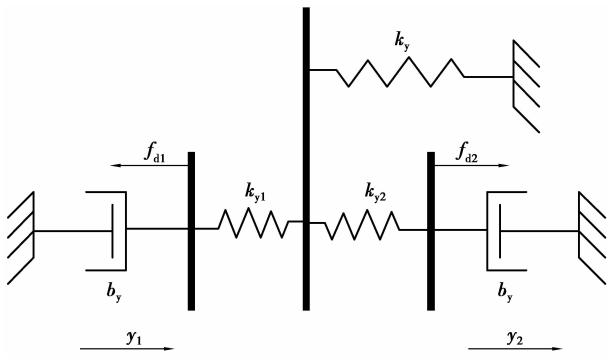


图 3 双梁差分加速度计横向运动等效模型

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ y_1 \\ \dot{y}_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b_y}{m_1} & -\frac{k_{y11}}{m_1} & 0 & \frac{k_{y12}}{m_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_{y21}}{m_2} & -\frac{b_y}{m_2} & -\frac{k_{y22}}{m_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ y_1 \\ \dot{y}_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中

$$k_{y11} = \frac{k_{y1} \cdot k_y + k_{y1} \cdot k_{y2}}{k_y + k_{y1} + k_{y2}},$$

$$k_{y22} = \frac{k_{y2} \cdot k_y + k_{y1} \cdot k_{y2}}{k_y + k_{y1} + k_{y2}},$$

$$k_{y12} = k_{y21} = \frac{k_{y1} \cdot k_{y2}}{k_y + k_{y1} + k_{y2}},$$

当梁的质量相等时, $m_1 = m_2 = m$, 实际加工中可能会出现失配。当梁几何尺寸相等时, 弹性系数 $k_{y1} = k_{y2} = k$, 同样实际加工中可能出现失配。在模态分析时, 不考虑阻尼产生的影响^[7], 假定阻尼 b_y 在此分析为零, 则式(14)可简化为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ y_1 \\ \dot{y}_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_r^2 + k_y \cdot k_r}{(k_y + 2k_r) \cdot m_r} & 0 & \frac{k_r^2}{(k_y + 2k_r) \cdot m_r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_r^2}{(k_y + 2k_r) \cdot m_r} & 0 & -\frac{k_r^2 + k_y \cdot k_r}{(k_y + 2k_r) \cdot m_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ y_1 \\ \dot{y}_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

解之得到系统矩阵的 4 个特征值:

$$\left[j \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \quad -j \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \quad j \sqrt{\frac{k_r \cdot k_y}{m_r \cdot (2k_r + k_y)}} \right]^T, \quad (16)$$

由于在此分析中阻尼系数为 0, 4 个特征值均为纯虚数, 1, 2 为一对共轭, 3, 4 为一对共轭, 在驱动轴方向有 2 个二重根的特征矢量, 对应 1, 2 特征值的特征矢量为: $[1 \ 0 \ -1 \ 0]^T$, 对应 3, 4 特征值的特征矢量为: $[1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ 。即对应前 2 个特征值, 则有 $y_1 = -y_2, \dot{y}_1 = -\dot{y}_2$, 左右梁作沿 y 方向的相向运动, 也称为对称模态, 此时梳齿相向运动, 梁 2 边的动量矩和力方向相反, 相互抵消, 具有较高的品质因数, 振动固有频率 ω_0

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (17)$$

图 4 给出了此模态下结构在 y 方向的位移, 图中不同颜色代表了位移的大小, 可以参照图右下方的标度。2 个梁连接的梳齿虽然颜色不同, 位移大小完全相等, 方向不同。

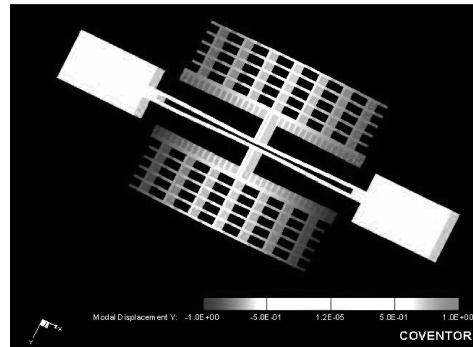


图 4 工作模式下结构在 y 方向的位移

对应后 2 个特征值, 则有 $y_1 = y_2, \dot{y}_1 = \dot{y}_2$, 左右梁作同向运动, 也称为同向模态, 此时振动固有频率 ω'_0 为

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{k \cdot k_y}{m \cdot (2k + k_y)}} \quad (18)$$

图 5 给出了面内另一个模态下结构在 y 方向的位移, 2 个梁连接的梳齿虽颜色相同, 但表示的位移大小完全相等, 方向相同。

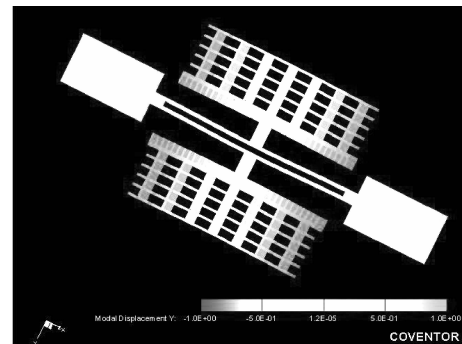


图 5 低阶模态下结构在 y 方向的位移

显然, ω'_0 小于 ω_0 , 即存在低于工作模式频率的低阶模态。同时, ω'_0 随 k_y 的增大而增大, 减小而减小。为了抑制低阶频率, 应该使低阶模态固有频率远离工作模式固有频率, 即减小音叉根部与基座连接端的弹性系数; 也可以给音叉梁施加大小相等、方向相反的力。

图 6 给出了结构的应力分布情况, 从图上可以看出在工作模式下 2 个音叉臂的根部和合并处的轴向应力集中, 而音叉臂中部的轴向应力较小, 可以在上述应力集中的区域制作压敏电阻来检测频率的变化^[8]。

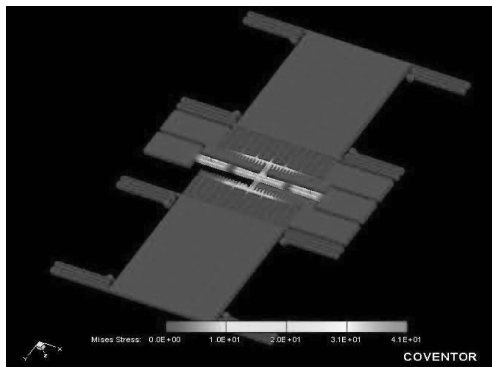


图 6 工作模式的应力分布

3 微加速度计制造工艺

微加速度计敏感结构采用体硅 DRIE 工艺与微键合技术制造(如图 7), 结构材料为浓硼扩散的单晶硅, 衬底材料为 7740 玻璃。

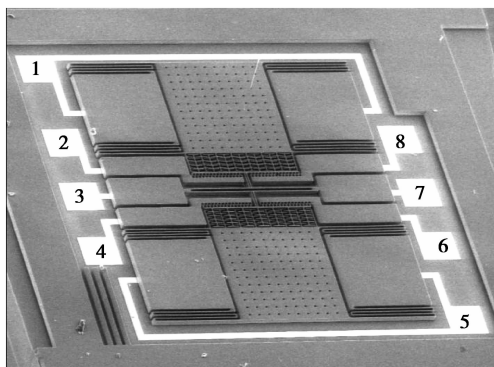


图 7 基于静电刚度的谐振式微加速度计(SEM)

主要工艺步骤为: 浓硼硅片的浓硼面刻出键合台阶→深刻蚀出结构→玻璃基片上制作金属电极→玻璃基片与硅片对位键合→自停止腐蚀, 释放结构。

工艺流程如图 8 所示。整个工艺仅需要三次光刻, 第一块光刻版用来加工键合台阶; 第二块光刻版用来加工整个机械结构, 包括质量块、质量块支撑折叠梁及电容梳齿结构; 第三块光刻版用于加工玻璃上的电极引线 and 焊盘。

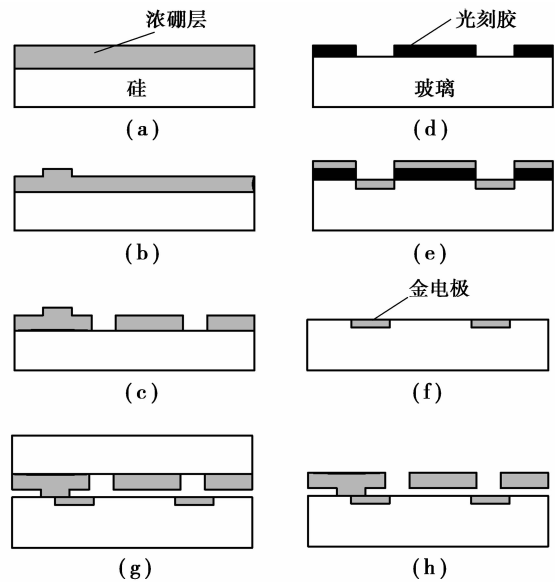


图 8 干法体硅溶片工艺主要流程

- (a) 单晶硅 $\langle 100 \rangle$ 浓硼扩散; (b) 键合台阶刻蚀;
- (c) ICP 深刻蚀; (d) 光刻电极引线;
- (e) 溅射金属 Au; (f) 剥离出电极引线;
- (g) 键合硅片—玻璃片; (h) 自停止腐蚀, 释放结构

当谐振梁长度为 500 μm , 宽度为 7 μm , 平板电容和梳齿初始有效间距为 2.5 μm , 当检测电压为 15 V 时, 单梁输出频率与加速度的关系见图 9。数值分析后得到单梁谐振加速度计的灵敏度为 62 Hz/g。

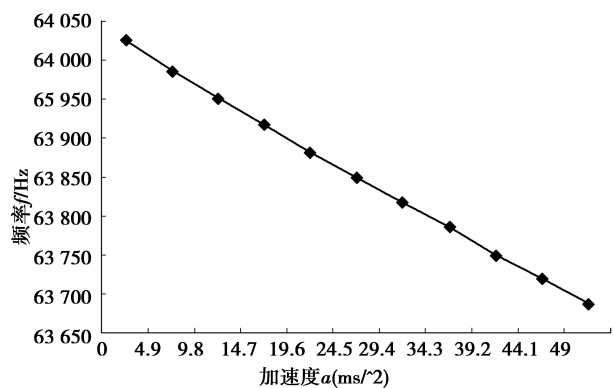


图 9 单梁输出频率与加速度关系

4 微加速度计实验测试

为了对加速度计结构完整性和可动性进行测试,利用计算机光学测振原理,结合 MEMS 运动分析仪 NT1100 对结构进行了测试。MEMS 运动分析仪静电激励部分相当于两通道的信号发生器,能提供较高幅值和较宽带宽的电压信号。但两个通道的相位同步上经过示波器测试还不尽如人意,在差分驱动器件测试上需要关注信号源的误差。测试设备见图 10。



图 10 加速度计测试设备

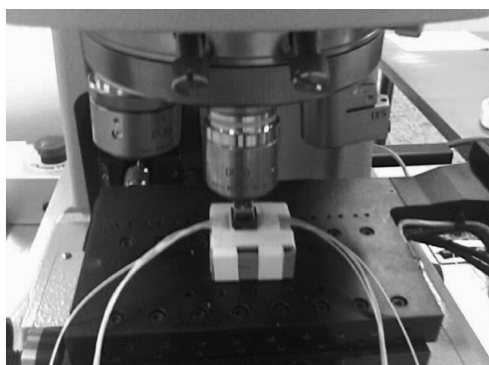


图 11 结构封装和电极连接

结构封装后通过一个 DIP-8 的插座固定在面包板上,引线分别从两侧引出(图 11)。当驱动电极引脚 2、4、6、8 接 NT1100 的驱动信号源时,检测电极 1、5 接地,音叉谐振梁电极 3、7 也接地,电极引脚见图 7。从放大镜里观测,结构是完整的,没有粘接,活动结构有可以移动的空间;电极连接是导通的;音叉梁存在线宽损失^[9-10],设计的宽度为 7 μm ,测试上表面为 5.4 μm ,边缘相对模糊。理想状态下,当音叉梁和检测折叠梁之间电势相等时,不存在静电力,折叠梁不发生运动。在低频模式下(1~3 Hz),为了使结构振动的幅度较大,实验的驱动电压(直流和交

流)均从 5 V 加到 80 V 左右,通过干涉条纹多次实验发现,不单是附着于音叉梁上的平板在动,附着在质量块上的平板也发生振动,振动的周期几乎一致,但相位有差异,排除 50 Hz 的工频干扰可能(振动连续,人眼无法判断),经分析结构中存在同频干扰问题,即驱动端电压信号直接耦合到了检测输出端,干扰信号与有效检测信号频率一致,只是相位有差异,很难通过滤波来消除。如果干扰信号过大,器件的品质因数会显著下降,增大了闭环检测的难度。因此同频干扰的抑制成为谐振式硅微传感器的 1 个需要解决的问题^[11-15]。由于结构是暴露在洁净空间的大气压下,阻尼比较大,在高频时发现振动幅度很小,只有几个 nm,检测信号较微弱,需要对结构进行真空封装。

5 结 论

基于等效静电刚度的谐振式微加速度计输出为数字信号,具有较好的抗干扰性。理论分析结果表明其通过刚度变化来敏感外部加速度是可行的,单梁加速度计输出频率与加速度存在较大的非线性。在结构设计中,当谐振梁刚度远大于折叠梁刚度且驱动电压中直流电压幅度较大时,加速度计的输出频率的线性度能得到显著改善。采用频率差分的结构设计中,理论分析存在面内的低阶模态扰动,通过减少双梁连接端的刚度系数能够抑制由于工艺误差造成的面内低阶模态扰动。采用干法体硅制造工艺能够实现较高的结构深宽比,能增大检测电容幅度,减少了输出信号敏感电路的设计难度。

在结构设计中,振动幅度也会造成频率输出的非线性问题。在实际微加速度计外围电路设计中,需要关注驱动电压对检测信号的耦合,即存在同频干扰问题,否则无法实现闭环驱动控制。由于检测电容只有十几 pf,而变化的电容只有几 fF,直接对微弱信号检测具有难度,应采用真空封装。在不降低输出信号线性度的情况下,检测电压采用高频方波电压,通过解调、滤波来实现微弱信号的检测,消除同频干扰。

参考文献:

- [1] SU S X P, YANG H S, AGOGINO A M. A resonant accelerometer with two-stage micro-leverage mechanisms fabrication by SOI-MEMS technology[J]. IEEE Sensor Journal, 2005, 5(6): 1214-1223.
- [2] 任杰,樊尚春,王路达. 谐振式微加速度计设计的关键技术[J]. 传感技术学报, 2008, 21(4): 593-595.

- REN JIE, FAN SHANG-CHUN, WANG LU-DA. Critical technologies in design of micromechanical resonant accelerometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(4): 593-595.
- [3] 何高法, 唐一科, 周传德, 等. 谐振式微加速度计驱动和检测结构设计及制作[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(8): 997-1001.
- HE GAO-FA, TANG YI-KE, ZHOU CHUAN-DE, et al. Design and fabrication of a novel resonator for resonant accelerometer [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(8): 997-1001.
- [4] SEOK S, CHUN K. Inertial-grade in-plane resonant silicon accelerometer [J]. Electronics Letters, 2006, 42(19): 1092-1093.
- [5] ZHANG F T, HE X P, SU Z G, et al. Structure design and fabrication of silicon resonant micro-accelerometer based on electrostatic stiffness [C] // The World Congress on Engineering 2009, July 1-3, 2009, London, U. K. [S. l.]: Newswood Limited, 2009: 469-473.
- [6] 刘恒, 张凤田, 何晓平, 等. 检测电压对一种新型谐振式微加速度计的影响[J]. 传感技术学报, 2009, 22(9): 1261-1265.
- LIU HENG, ZHANG FENG-TIAN, HE XIAO-PING, et al. The influence of the sensing voltage for a novel type resonant micro-accelerometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(9): 1261-1265.
- [7] MESTROM R M C, FEY R H B, VAN BEEK J T M. Modelling the dynamics of a MEMS resonator simulations and experiments[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 142(1): 306-315.
- [8] 钟莹, 张国雄, 李醒飞. 新型谐振式硅微加速度计[J]. 纳米技术与精密工程, 2003, 1(1): 34-37.
- ZHONG YING, ZHANG GUO-XIONG, LI XING-FEI. A novel silicon micromachined resonant accelerometer[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2003, 1(1): 34-37.
- [9] LIU R, PADEN B, TURNER K. MEMS resonators that are robust to process-induced feature width variations[J]. Journal of Micromechanical System, 2002, 11(5): 505-511.
- [10] DAI C L, KUO C H, CHIANG M C. Microelectromechanical resonator manufactured using CMOS-MEMS technique[J]. Microelectronics Journal, 2007, 38(6/7): 672-677.
- [11] SUN C M, WANG C W, FANG W. On the sensitivity improvement of CMOS capacitive accelerometer [J]. Sensors and Actuators A, 2008, 141(2): 347-35.
- [12] TANAKA K, KIHARA R, SANCHEZ-AMORES A. Parasitic effect on silicon MEMS resonator model parameters[J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84(5/8): 1363-1368.
- [13] 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, 2005, 125: 59-68.
- [14] ZHANG W H, BASKARAN R, TURNER K L. Effect of cubic nonlinearity on auto-parametrically amplified resonant MEMS mass sensor[J]. Sensors and Actuators A, 2002, 102(1/2): 139-150.
- [15] 郝一龙, 贾玉斌. 谐振加速度计的非线性分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2003, 1(1): 31-33.
- HAO YI-LONG, JIA YU-BIN. Nonlinear analysis for micromachined accelerometer based on resonant principle [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2003, 1(1): 31-33.

(编辑 侯 湘)