

高阶谐振模态的超高质量分辨硅微悬臂梁压阻传感器^{*}

刘 剑[†] 李昕欣 金大重 刘 民 王跃林 左国民 余海涛 包菡涵

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 开发了一种在空气中具有几十飞克质量分辨率的谐振式微机械悬臂梁生化质量检测传感器. 在悬臂梁上面实现了使用惠斯通压阻电桥检测和洛伦兹力线圈驱动集成结构. 与通常的一阶模态谐振传感器不同, 为了显著提高传感器特异性反应吸附质量以实现分子水平的检测分辨率, 提出了一种二阶弯曲谐振模态优化驱动的方法. 在悬臂梁上集成了一种回形针状的驱动电流回路, 实现了与第二模态悬臂梁运动两个相反运动峰值相吻合的两处同时反方向驱动. 研究中采用硅微机械技术实现了集成谐振悬臂梁的制作, 并研制出了高性能的谐振传感器闭环接口电路. 在空气中进行谐振实验, 与传统一阶模态传感器相比, 采用该优化驱动的二阶模态, 谐振品质因数从 195 提高到 857, 谐振频率从 49.156 提高到 298.132 kHz. 采用 Allen 方差的方法对谐振频率噪声进行分析, 表明该优化驱动的二阶模态传感器将传统的一阶模态传感器质量分辨率从 0.17 改善到 0.029 pg, 达到了 4 个痘病毒的质量分辨水平.

关键词: 悬臂梁; 压阻敏感; 电磁激励; AGC 式闭环电路; 谐振模态; 质量检测分辨率

PACC: 8780B

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)08-1496-07

1 引言

空气环境下, 质量检测分辨率在 pg (10^{-12} g) 以下的谐振式微机械悬臂梁传感器, 由于具有单细胞的检测能力, 在环境监测和疾病诊断等方面有广阔的应用前景, 而得到了广泛的研究^[1]. 一些实验研究表明, 机械悬臂梁能够在空气中探测到单个细胞或病毒^[2,3]; 真空中, 微机械悬臂梁由于具有很高的品质因数, 质量分辨率能够达到 10^{-18} g^[4,5]. 但是, 这些实验结果都是利用原子力显微镜中精密的光学位置敏感检测器 (PSD) 获得的, 由于没有集成在传感器上实现小型化, 不适于便携、实时的现场生化检测应用^[6]. 一些理论研究表明, 通过减小悬臂梁尺寸来减小悬臂梁的有效质量, 可以改善质量分辨率^[7]. 然而, 为了提高生化传感器的生化探测效率, 必须在悬臂梁上为选择性吸附反应保留足够的面积, 悬臂梁尺寸的缩小也受限于微加工工艺水平, 通过减小有效质量能够改善的质量分辨率非常有限^[8]. 另一方面, 采用闭环反馈电路实现微机械悬臂梁的自激振荡, 可以显著地改善分辨率^[9]. 此外, 一项 2005 年报道的研究表明, 谐振式悬臂梁在高阶模态下显示出

比基频模态更高的品质因数和灵敏度^[10], 但是该实验结果仍然是利用原子力显微镜的驱动和光学检测系统得到的.

在本研究中, 我们设计了一种集成有压阻敏感元件和电磁驱动线圈的高阶模态谐振式硅微机械悬臂梁. 采用优化的洛伦兹力驱动方式激励悬臂梁的二阶弯曲模态, 显著地提高了品质因数; 并采用自动增益控制 (AGC) 式的谐振电路进行闭环反馈, 实现了自激振荡. 实验结果显示, 该优化驱动的二阶谐振模态悬臂梁传感器达到 29 fg (2.9×10^{-14} g) 的质量检测分辨率.

2 器件设计

2.1 高阶模态的质量检测分辨率分析

对于长、宽、厚分别为 l, b, h 的悬臂梁, 通过模态叠加法得到第 n 阶弯曲谐振模态的模式函数为:

$$\begin{aligned} \varphi_n(x) = & \cos(\alpha_n x) - \cosh(\alpha_n x) - \\ & \frac{\cos(\alpha_n l) + \cosh(\alpha_n l)}{\sin(\alpha_n l) + \sinh(\alpha_n l)} \times (\sin(\alpha_n x) - \sinh(\alpha_n x)) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 α_n 是对应于第 n 阶弯曲模态的常数. 根据单

^{*} 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB300405) 和国家自然科学基金 (批准号: 60376038) 资助项目

[†] 通信作者. Email: liujian@mail.sim.ac.cn

2006-01-06 收到, 2006-02-13 定稿

端固支悬臂梁的边界条件： $\cos(\beta_n l) \cosh(\beta_n l) = -1$ ，进一步求解得到谐振模态常数： $\beta_1 l = 1.875$ ， $\beta_2 l = 4.694$ ， $\beta_n l = (n - 0.5)\pi$ ($n > 2$)。由此第 n 阶模态的固有谐振频率可表示为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_n}{M m_{eff}}} \quad (2)$$

其中 $k_n = \frac{(n\pi)^4 E b h^3}{12 l^3}$ 是第 n 阶模态的等效弹性系数； $m_{eff} = \frac{1}{2} m$ 为第 n 阶模态的等效质量， m 为单晶硅密度， E 为单晶硅杨氏模量。

对于二阶谐振模态： $\omega_2 / \omega_1 = (2 / 1)^2 = 6.27$ ，即第二阶模态的固有谐振频率约是基频模态的 6.27 倍。当悬臂梁自由端吸附待测分子，质量载荷增加 m 时，固有谐振频率变为：

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{M m_{eff} + m}} \quad (3)$$

当外加质量载荷 m 远小于悬臂梁等效质量 m_{eff} 时，二阶谐振模态下的悬臂梁的质量检测灵敏度可表示为：

$$S_2 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{m} = \frac{\omega_1}{2 m_{eff}} \quad (4)$$

由于二阶模态悬臂梁比一阶模态具有更高的谐振频率，而其等效质量不变，所以悬臂梁具有更高的质量检测灵敏度。当最小可检测的频率变化值为 $\Delta \omega_{min}$ 时，最小可检测质量变化 m_{min} 可表达为：

$$m_{min} = \frac{2 \Delta \omega_{min} m_{eff}}{\omega_2} \quad (5)$$

在闭环谐振状态下，上式可表示为^[10,11]：

$$m_{min} = \frac{m_{eff}}{Q_2} \quad (6)$$

其中 Q_2 为谐振电路的相位稳定度； Q_2 为悬臂梁的二阶模态谐振品质因数。在空气中，空气阻尼是影响谐振式悬臂梁品质因数的主要因素之一^[11]。通常，悬臂梁在二阶模态下具有比一阶模态更高的品质因数，从而具有更高的谐振频率稳定性，因此通过激励悬臂梁的二阶甚至更高阶模态，能够有效改善质量检测分辨率。

2.2 二阶模态的洛伦兹力优化驱动设计

图 1 给出了悬臂梁在一阶模态和二阶模态谐振下的模态函数和应力分布，一阶模态的模态函数只有一个极值，而二阶模态的模态函数有两个极值，这两个极值分别位于 $x/l = 0.47$ 和 $x/l = 1$ 处且正负相反，这说明悬臂梁在这两点的振动方向相反。一阶模态和二阶模态的应力最大值都位于根部，所以将压阻布置于悬臂梁根部。

基于以上讨论，为了对比研究驱动方式对悬臂

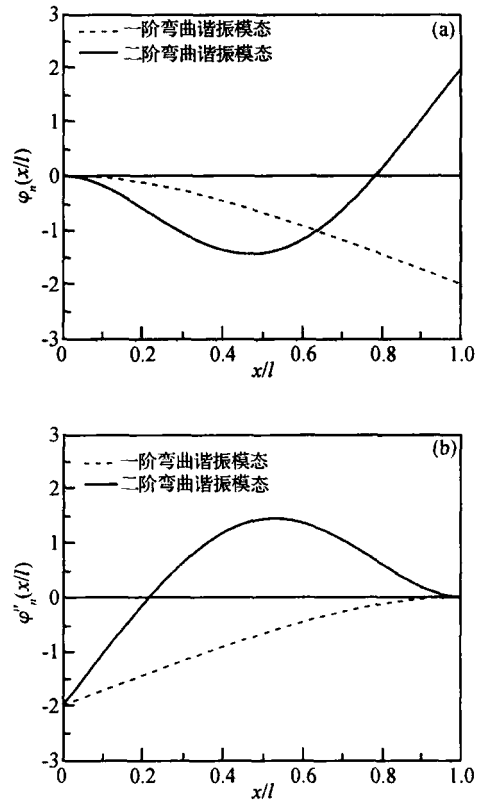


图 1 (a) 一阶和二阶模态下的悬臂梁振动模态函数 $\varphi_n(x/l)$ ；(b) 一阶和二阶模态下的悬臂梁应力分布 $\varphi_n''(x/l)$
Fig. 1 (a) Mode shape function $\varphi_n(x/l)$ of cantilever in 1st and 2nd resonance mode; (b) Stress distribution function $\varphi_n''(x/l)$ of cantilever in 1st and 2nd resonance mode

梁谐振特性的影响，我们设计并制作了两种洛伦兹力驱动的压阻式微机械悬臂梁，一种采用传统的洛伦兹力驱动方式，另一种则采用优化的洛伦兹力驱动方式，分别命名为 A 悬臂梁和 B 悬臂梁。将一块 NdFeB 永磁体安放在悬臂梁前面，在悬臂梁上的铝线圈中通交变电流，产生的洛伦兹力激励悬臂梁振动。图 2(a) 显示最终制成的两种悬臂梁的 SEM 图像。从洛伦兹力驱动线圈的布局上，可以看出，一阶模态 A 悬臂梁只在自由端受到洛伦兹力；而 B 悬臂梁上集成了回形针形状的线圈，使在悬臂梁中部和端部的驱动电流的方向相反，进而在悬臂梁中部和端部产生两个方向相反的驱动力。与图 2(b) 中的模态函数相对比，这两个力的方向恰好与二阶模态悬臂梁的振动方向一致，这样的驱动方式与二阶模态的振形相吻合，可以提高二阶模态的品质因素等谐振性能，进而提高质量分辨率。

由于在悬臂梁上必须保留足够的面积用于质量吸附、压阻和驱动线圈的布置，A 悬臂梁和 B 悬臂梁的尺寸均设计为 $300\mu\text{m} \times 75\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ ，其有效质

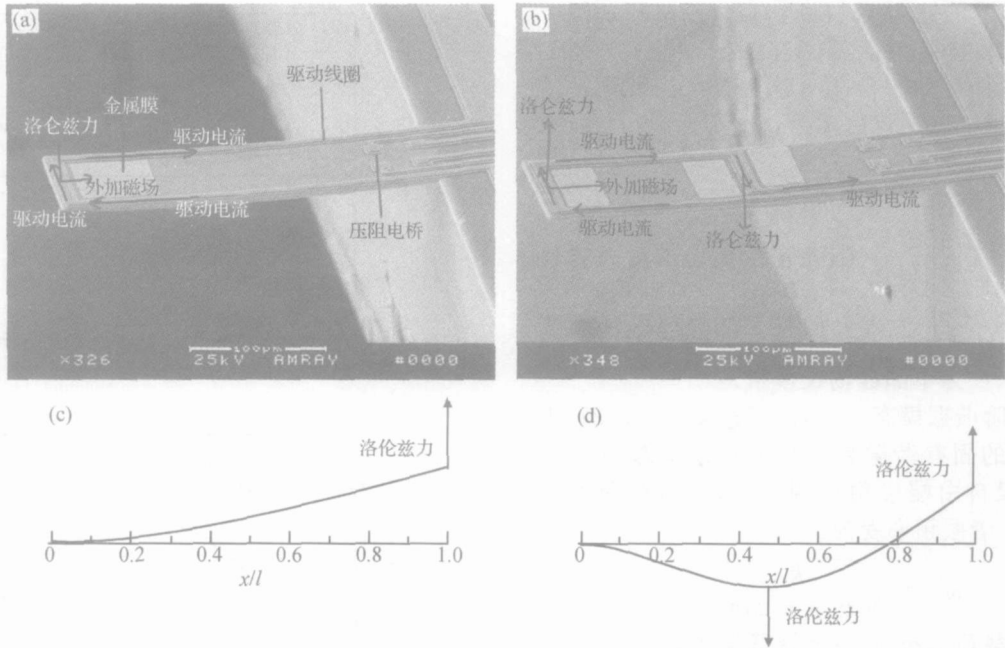


图 2 (a)和(b)分别是集成压阻和激励线圈的 A 悬臂梁和 B 悬臂梁的 SEM 照片;(c)一阶模式的 A 悬臂梁模态函数和洛伦兹力示意图;(d)二阶模式的 B 悬臂梁模态函数和洛伦兹力示意图

Fig.2 (a) and (b) SEM images of the A cantilever and B cantilever with the electromagnetic excitation schemes denoted, respectively; (c) Lorentz-force locations on the A cantilever excited in 1st mode; (d) Lorentz-force locations on the B cantilever excited in 2st mode

量为 52.5pg,一阶和二阶模态固有谐振频率分别为 41.5 和 260.2kHz,对特异性吸附的质量灵敏度分别为 0.43 和 2.70Hz/pg.

3 器件制作工艺

传感器采用 n 型 100 的注氧隔离 SOI 硅片制作.顶层硅的厚度为 3.5μm,电阻率为 1~10 Ω·cm,掩埋氧化层为 0.36μm,衬底厚度为 380μm.传感器制作工艺流程图如图 3 所示,主要制作步骤如下.

3.1 顶层硅减薄

热生长 1μm 厚的氧化硅并用稀氢氟酸腐蚀掉,余下 3.1μm 的硅,再干氧生长 200nm 的氧化硅,使顶层硅达到悬臂梁的厚度.

3.2 压阻的形成

采用 B 离子注入获得 p 型压阻,注入能量为 60keV、剂量为 $8 \times 10^{14}/\text{cm}^3$,用光刻胶作为掩模,去胶后在 950 °C、N₂ 气氛中退火 30min.这个工艺条件可以获得约 0.45μm 深的 p-n 结,使压阻敏感元件靠近悬臂梁表面,有利于获得较高的悬臂梁弯曲应力灵敏度,同时氧化硅-硅界面处 B 离子掺杂浓度超过 $10^{19}/\text{cm}^3$,能够与 Al 引线形成良好的欧姆接触.

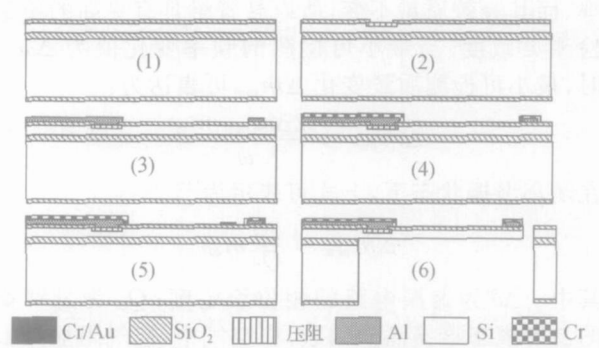


图 3 谐振式微机械悬臂梁制作工艺流程图
Fig.3 Fabrication processes for the integrated resonant cantilever sensors

3.3 互连和电磁激励线圈制作

用光刻胶做掩模,用缓冲氢氟酸腐蚀掉氧化硅开引线孔.溅射 500nm 厚的 Al 膜,光刻 Al 引线和电磁激励线圈图形,用磷酸刻蚀、去胶,在 480 °C N₂ + H₂ 气氛中合金 30min 后,形成压阻引线和电磁激励线圈.

3.4 Al 线钝化层制备

由于后续工艺需要 H₂SO₄ + H₂O₂ 清洁,为了保护 Al 线不被腐蚀,溅射了 350nm 厚的 Cr 作为钝化层,Cr 图形比 Al 线左右各宽出 2μm,这样可以保

证 Cr 钝化层能够很好地覆盖 Al 线上表面和侧壁。

3.5 自组装膜(SAM)衬底制备

为了将具有选择性吸附功能的生化分子探针固定在微机械悬臂梁上,实现其“目标探测”功能,需要在微机械悬臂梁上“生长”自组装膜作为生化分子探针的载体.本研究采用在 Au 薄膜上通过共价键结合巯基化合物的方式“生长”自组装膜.自组装膜生长前需要用 H₂SO₄ + H₂O₂ 清洁 Au 薄膜表面.为了避免在生化分子探测时产生的应力对悬臂梁弹性系数的影响,自组装膜应当“生长”在悬臂梁的自由端^[12].我们用电子束蒸发工艺制备了 60nm 的 Au 薄膜,在其下面先蒸发 30nm 的 Cr 薄膜做黏附层,采用剥离(lift-off)工艺形成 Au/Cr 薄膜.

3.6 悬臂梁结构的形成和释放

用光刻胶做掩模,用感应耦合等离子体深刻蚀(Inductively coupled plasma deep reactive ion etching)正面刻蚀顶层硅形成悬臂梁结构;用厚胶作为掩模,双面光刻在硅片背面形成刻蚀窗口,用感应耦合等离子体深刻蚀从背面刻蚀至 SOI 中间氧化层.此时悬臂梁正面和背面都有光刻胶保护,用缓冲氢氟酸(BOE)腐蚀掉 SOI 中间氧化层,释放悬臂梁结构,完成器件制作.

4 谐振悬臂梁的信号处理电路

4.1 开环检测电路

在室温和空气条件下,采用图 4(a)的电路结构,使用 HP4395A 网络分析仪对传感器进行受迫振动的频率分析.此时悬臂梁的振动方程为:

$$m_{\text{eff}} \frac{\partial^2 z(t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial z(t)}{\partial t} + kz(t) = F_0 \cos(\omega t) \tag{6}$$

将网络分析仪输出的交变电流接入悬臂梁的电磁激励线圈,激励信号 0dB (384mV),对应激励驱动电流 1.0mA,由悬臂梁根部的压阻惠斯通电桥检测悬臂梁的弯曲振动,振动信号经 AD620 放大后,输入网络分析仪.

4.2 闭环检测电路

闭环的电路对悬臂梁的振动信号进行处理,反馈到悬臂梁的驱动线圈中,使整个系统工作在一个自激振荡状态.在闭环的自激振动状态下,悬臂梁的振动方程为:

$$m_{\text{eff}} \frac{\partial^2 z(t)}{\partial t^2} + c_{\text{eff}} \frac{\partial z(t)}{\partial t} + kz(t) = F_0 \cos(\omega t) \tag{7}$$

式中 F_0 为电磁激励驱动力; $c_{\text{eff}} = c - \frac{G}{\omega}$ 是谐振系统的等效阻尼.该式表明通过闭环反馈能够补偿系统的能量耗散,减小系统等效阻尼,来增加品质因数,使系统谐振频率的随机漂移变小,以获得更高的频率稳定度^[13].采用图 4(b)的电路结构满足闭环工作的相位以及幅值条件(环路增益大于或等于 1,环路相移 2π 的整数倍),实现系统自激振荡.

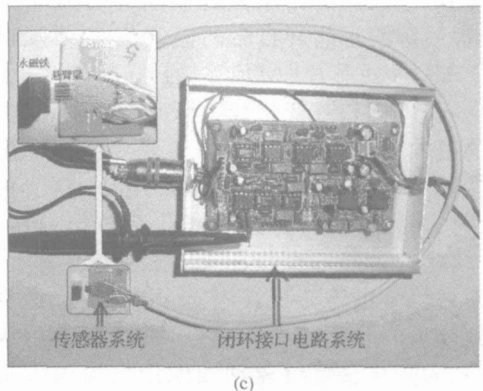
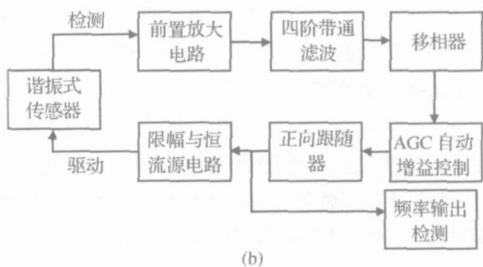
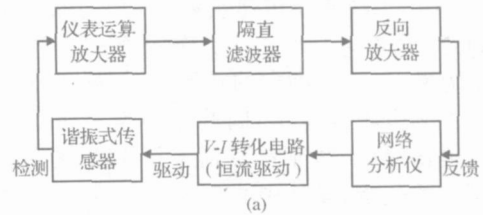


图 4 谐振式悬臂梁振动信号处理电路 (a) 开环检测电路框图; (b) 闭环检测电路框图; (c) 工作状态下悬臂梁及其闭环检测接口电路照片

Fig. 4 Signal processing circuit (a) Open-loop circuit; (b) Close-loop feedback circuit; (c) Photograph of the resonating cantilevers with close-loop feedback circuit

由于传感器输出信号幅值在较微弱的 mV 量级,前置放大器采用仪表运算放大器和反向放大器两级级联方式,放大倍率分别为 20 和 10.同时慎重选择处于级联位置中第一级的仪表运算放大器,保证较小的放大器噪声引入,实现较高的信噪比.

带通滤波器的作用是对悬臂梁的不同振动模式进行选择.采用基于巴特沃兹结构的四阶带通滤波

器形成以悬臂梁谐振频率为中心频率的带通电路,可以对其他模式的信号有效抑制以及对需要检测的模式进行有效选择.带通滤波器的另一个作用是可以改善信噪比,降低噪声,尤其是热噪声.

$$f = \frac{1}{|T(f_0)|^2} \int_0^f |T(f)|^2 df$$

$$= \frac{1}{2Q} f_0, E_n = S(f) \cdot f \quad (8)$$

其中 $T(f)$ 为滤波器传递函数; $S(f)$ 为噪声功率谱密度; f 为频率; f_0 为中心工作频率; f 为噪声带宽; E_n 为噪声.对于固定的热噪声谱,输出噪声和噪声带宽的平方根成正比,因此减小噪声带宽可以有效减少输出噪声.基于传感器本征谐振频率与所需频率漂移的范围,设计中心工作频率、带宽和品质因子分别为 300kHz、30kHz 和 10.综合考虑对噪声的抑制和传感器电路的通用性,带通滤波器的噪声带宽 f 约 4.71kHz.开环时测量经过滤波器的信号约为 200mV,噪声约为 4.7 μ V.

移相电路通过示波器跟踪调节输入信号与输出信号的相位差,以保证闭环谐振的相位条件 $2k$.这里使用具有平坦频率特性的 $\pm 90^\circ$ 的移相电路构成移相网络,通过可调电阻的调节实现相位的可控移动.

AGC 放大器的作用是控制闭环自激系统的增益,确保系统满足闭环自激的幅值条件.本实验构建了基于 VGA 式芯片 (AD603) 的 AGC 电路,工作过程如下:当环境参数变化或者频率发生变化时,传感器的输出幅度变大(小),通过整流和推挽输出电路产生控制 VGA 芯片放大倍数的电压差,使可变增益变小(大),使谐振器通过 AGC 后输出电压不变. AGC 结构的另外一个作用是,限制输出幅值.在谐振频率对信号进行正反馈时,不会使系统达到自激振荡到削顶的非正弦工作状态,并且配合后级的限幅电路,为防止悬臂梁驱动线圈中电流过大提供双重的限幅保护.

正向跟随器保证了输出驱动电路的稳定性,增加了带负载能力.同时,输出送 HP53131A 型频率计数器作为数据采集信号,并通过 PC 机采样记录闭环频率稳定度.

限幅和恒流电路提供电压向电流 ($V-I$) 的转化,产生器件的驱动电流.由于在悬臂梁上溅射了回形针式铝 (Al) 线圈作为信号驱动端,因此对于驱动电流必须进行限流,防止 Al 线圈过热被烧断. $V-I$ 转化电路实现了当驱动电压幅值不变时,无论负载如何变化,输出电流幅值保持不变.保证了当随着环境或者悬臂梁温度变化,而导致 Al 线圈电阻发生变化时,驱动悬臂梁振动的电流保持不变、驱动悬臂梁振动的力保持不变.

5 测试结果和讨论

5.1 开环测试

在空气室温环境下,根据图 4(a) 的开环电路对器件特性进行开环测试.悬臂梁的频谱性质如图 5 所示, A 悬臂梁一阶模式的谐振频率和品质因数分别为 49.156kHz 和 195,二阶模式的谐振频率和品质因数分别为 308.977kHz 和 307. A 悬臂梁的二阶模式谐振频率是一阶模式谐振频率的 6.268 倍,品质因数是一阶模式的 1.6 倍. B 悬臂梁的二阶模式的谐振频率和品质因数分别为 298.132kHz 和 857. B 悬臂梁的二阶模式谐振频率与 A 悬臂梁二阶模式的频率相近,但是品质因数是其 2.791 倍.对于 A 悬臂梁,采用传统洛伦兹力驱动方式激励起悬臂梁的二阶模式,可以提高悬臂梁的品质因数;而对于 B 悬臂梁,悬臂梁自由端和中部的两个驱动力都与悬臂梁二阶振动的运动方向相同(如图 2(d)),相比 A 悬臂梁单驱动力(如图 2(c)),这两个驱动力的共同作用能更好地激励悬臂梁的二阶模式,因此具有比 A 悬臂梁二阶模式更高的品质因数.从上述对比可以发现,相比传统驱动方式,通过优化驱动激励的高阶模式能够进一步提高品质因数,这将显著改善质量检测分辨率.

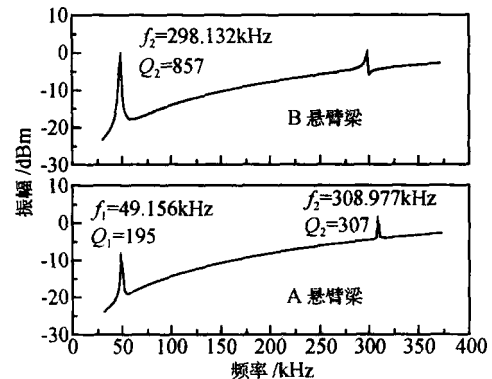


图 5 A 悬臂梁和 B 悬臂梁开环测试的幅-频性质曲线
Fig. 5 Measured amplitude responses to frequency in A and B cantilevers

5.2 闭环测试

通过图 4(b) 所示的闭环测试系统(实物测试系统见图 4(c)),对 A 悬臂梁和 B 悬臂梁进行闭环的一阶和二阶闭环测试,利用 HP53131A 进行 20min 的频率稳定记录,每秒记录一个频率值,以 5s 作为时间间隔求平均值,测量结果如图 6 所示. A 悬臂梁一阶模式的谐振频率随机变化范围为 0.7Hz,相对变化率为 1.4×10^{-5} , B 悬臂梁二阶模式的谐振频

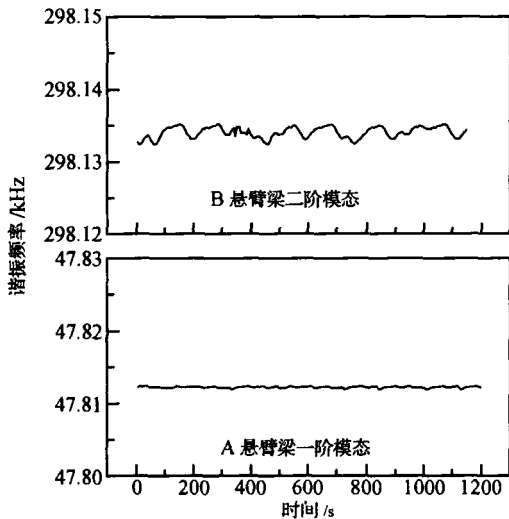


图 6 A 悬臂梁和 B 悬臂梁在一阶和二阶模态时的谐振频率稳定性

Fig.6 Resonant frequency stabilities of A and B cantilevers

率随机变化范围为 2.6 Hz, 相对变化率为 8.7×10^{-6} , 所以 B 悬臂梁的二阶模态具有比 A 悬臂梁一阶模态更小的频率相对随机变化率. 采用艾伦变量 (A) 分析方法来表征谐振频率稳定性. 艾伦变量分析法是美国国家标准局制订的频率稳定度表征标准, 在频率测量方面应用非常广泛^[14,15]. 艾伦变量是通过时域下频率的测量来反映频域中的频率稳定性, 将测量时间分为 $N - 1$ 段, 对每段时间间隔 A 中频率取平均值, 艾伦变量由下式定义:

$$A^2(A) = \frac{1}{2f_c^2} \times \frac{1}{N - 1} \sum_{k=2}^N (\bar{f}_k - \bar{f}_{k-1})^2 \quad (9)$$

式中 \bar{f}_k 是第 k 个时间间隔中的频率平均值; f_c 是名义载波频率, 这里指的是悬臂梁谐振频率. 如表 1 所示, B 悬臂梁二阶模态的艾伦变量显著高于 A 悬臂梁的一阶模态, 这与开环测试时悬臂梁品质因数的变化规律相符, 说明提高品质因数可以获得更高的频率稳定性. 频域中的频率稳定度 $\Delta f/f$ 与艾伦变量 A 的关系为: $(\Delta f/f)^2 = (A)^2 A/B$ ^[15], 根据方程 (5) 可计算得到闭环测试悬臂梁的质量分辨率, 计算结果列入表 1 中. 在空气中, A 悬臂梁一阶模态的质量分辨率为 170 fg; 而 B 悬臂梁二阶模态的质量分辨率可以达到 29 fg, 表明优化驱动方式激励的二阶模态使分辨率提高了近 5.9 倍. 一个大肠杆菌细胞的质量约为 500 fg, 痘病毒的质量约为 7 fg, 这说明在空气环境下, 具有优化驱动方式的 B 悬臂梁具有单细胞的检测能力, 可以探测到最少 4 个痘病毒. 从以上讨论可以发现, 将悬臂梁传感器谐振频率信号利用艾伦变量分析方法进行统计处理, 可以有效抑制测量过程中谐振频率的随机变化, 获得更好

的检测精度. 在后续的工作中, 将把艾伦变量的算法固化在嵌入式系统中, 实现具有传感器信号采集、处理和显示等功能的小型仪表.

表 1 一阶模态的 A 悬臂梁和二阶模态的 B 悬臂梁的谐振特性和质量分辨率

Table 1 Resonance properties and mass-sensing resolution of A and B cantilever sensors

悬臂梁	振动模态	振动模态曲线	谐振频率 / kHz	品质因数	艾伦变量	质量分辨率 / pg
A	一阶		49.156	195	2.1×10^{-6}	0.17
B	二阶		298.132	857	3.3×10^{-7}	0.029

6 结论

本文介绍了一种具有几十 fg 量级的集成电磁激励和压阻检测的谐振式悬臂梁生化传感器, 设计了闭环信号处理电路, 并进行了检测. 在硅微机械悬臂梁上集成洛伦兹力驱动线圈和惠斯通压阻电桥, 采用 AGC 式的闭环反馈电路实现自激振荡. 从测试结果可以看出, 相比传统的一阶模态悬臂梁传感器, 利用符合二阶振形的优化电磁激励方式可以显著提高品质因数, 获得更好的谐振频率稳定度和质量分辨率. 优化过的二阶谐振模态的质量检测分辨率可以达到 29 fg, 相比传统的一阶模态悬臂梁检测方式, 质量分辨率改善了近 5.9 倍.

参考文献

- [1] Lavrik N V, Sepaniak M J, Datskos P G. Cantilever transducers as a platform for chemical and biology sensors. Rev Sci Instrum, 2004, 75: 2229
- [2] Ilic B, Czaplewski D, Zalalutdinov M, et al. Single cell detection with micromechanical oscillators. J Vac Sci Techno B, 2001, 19: 2825
- [3] Gupta A, Akin D, Bashir R. Single virus particle mass detection using microresonators with nanoscale thickness. Appl Phys Lett, 2004, 84: 1976
- [4] Ono T, Li X X, Esashi M, et al. Mass sensing of adsorbed molecules in sub-picogram sample with ultrathin silicon resonator. Rev Sci Instrum, 2003, 74: 1240
- [5] Yang J, Ono T, Esashi M. Mechanical behavior of ultrathin microcantilever. Sensors and Actuators A, 2000, 82: 102
- [6] Boisen A, Thaysen J, Jensenius H, et al. Environmental sensors based on micromachined cantilevers with integrated read-out. Ultramicroscopy, 2000, 82: 11

- [7] Ekinci K L , Huang X M H , Roukes M L . Ultrasensitive nano-electromechanical mass detection. *Appl Phys Lett* , 2004 , 84 : 4469
- [8] Fadel L , Lochon F , Dufour I , et al . Chemical sensing : millimeter size resonant microcantilever performance. *J Microech Microeng* , 2004 , 14 : S23
- [9] Vancura C , R ügg M , Li Y , et al . Magnetically actuated CMOS resonant cantilever gas sensor for volatile organic compounds. *IEEE 12th International Conference on Solid State Sensors and Actuators* , 2003 , 2 : 1355
- [10] Dohn S , Sandberg R , Boisen A , et al . Enhanced functionality of cantilever based mass sensors using higher modes and functionalized particles. *IEEE The 13th International Conference on Solid State Sensors* , 2005 , 2 : 636
- [11] Bao Minhong . Micro mechanical transducers : pressure sensors , accelerometers and gyroscopes. *Handbook of sensor and actuators* , Amsterdam : Elsevier , 2000
- [12] Chen G , Thundat T , Wachter E , et al . Adsorption-induced surface stress and its effects on resonance frequency of micro-cantilevers. *J Appl Phys* , 1995 , 77 : 3618
- [13] Wang Y Q , Wang Y L , Ding Ch , et al . Study on closed-loop driving circuits of micromechanical resonator with constant vibrating amplitude. *Chinese Journal of Scientific Instrument* , 1999 , 20(4) : 351 (in Chinese) [王亚强 , 王跃林 , 丁纯 , 等 . 机械谐振传感器的闭环恒幅驱动电路研究. *仪器仪表学报* , 1999 , 20(4) : 351]
- [14] Walls F L , Allan D W . Measurements of frequency stability. *Proceedings of IEEE* , 1986 , 74 : 162
- [15] Greenhall C A , Howe D A , Percival D B . Total variance , an estimator of long-term frequency stability. *IEEE Trans Ultrasonics , Ferroelectrics and Frequency Control* , 1999 , 46(5) : 1183

Micromachined High Mode Resonant Piezoresistive Cantilever Sensor with Ultrahigh Mass-Sensing Resolution *

Liu Jian[†] , Li Xinxin , Jin Dazhong , Liu Min , Wang Yuelin , Zuo Guomin , Yu Haitao , and Bao Hanhan

(*State Key Laboratory of Transducer Technology , Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology , Shanghai 200050 , China*)

Abstract : An ultrasensitive resonant cantilever sensor with a mass-resolution of tens of femtograms is developed for application in an air environment with a piezoresistive bridge and a metal coil integrated on the same cantilever. To improve mass-resolution, an optimized clip-style Al loop is fabricated on the cantilever especially for the 2nd flexural resonance mode. Such excitation provides two-point driving forces that match the 2nd mode shape-function of the cantilever deflection. In air, the resonant cantilever in the 2nd mode with the clip-style excitation shows a significantly increased quality factor of 857, while the 1st mode cantilever excited by conventional excitation shows a quality factor of 195. A closed-loop feedback circuit is developed to maintain the cantilever's resonant in self-oscillation. By using Allen variance analysis, the resolution of the resonant sensor in air is improved from 0.17pg to 0.029pg by optimized excitation for the 2nd mode, and the resolution of 4 vaccinia viruses is achieved.

Key words : cantilever; piezoresistor; electromagnetic excitation; AGC type closed-loop circuit; resonance mode; mass-detection resolution

PACC : 8780B

Article ID : 0253-4177(2006)08-1496-07

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2006CB300405) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60376038)

[†] Corresponding author. Email: liujian@mail.sim.ac.cn

Received 6 January 2006, revised manuscript received 13 February 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics