

热激励硅梁谐振器研究¹

陈德勇 崔大付 王 利 韩泾鸿

(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室 北京 100080)

摘 要 作者利用微电子机械加工技术成功研制出用于高精度压力传感器的硅梁谐振器。采用热激励方式,测定了谐振梁的开环振动幅频特性:室温真空中谐振峰 -3dB 带宽 1.2Hz , Q 值大于 33000。

从理论和实验两方面讨论了低热激励功率条件下激励功率与谐振频率的线性关系,二者符合较好。

关键词 热激励, 硅梁, 谐振器

中图分类号 TN815, TP212.1

1 引 言

谐振器件 (Resonator) 通过检测谐振频率的移动或谐振振幅的变化,广泛应用于力学量的传感器中。可以测量应变、应力、加速度、压力、质量变化以及流量等。机械谐振式传感器的特点是高精度、信号以频率输出,适于计算机信息处理,而且其信号输出取决于机械参数,抗电干扰能力强,稳定性极好。目前机械谐振式传感器的漂移已低至 0.01% F.S.(满刻度量程),温度系数小于 5ppm/K 。基于近十年发展起来的微电子机械加工技术基础之上的硅微结构谐振梁(膜)式压力传感器因其体积小、重量轻、精度高、响应快、长期稳定性好以及与大規模集成电路工艺兼容易批量生产等优点,具有广阔的应用前景,是空间用压力传感器的理想选择。在国际上引起广泛的重视。英国 Druck 公司 Greenwood 等人^[1,2] 80 年代中后期开始这方面的研究,90 年代初已有产品问世。日本横河公司 Ikeda 等人^[3]、荷兰 Lammerink 等人^[4] 也作出了采用不同激励拾振方式的高精度压力传感器。国内这方面的工作做得很少,水平也很低。

本文介绍作者利用微机械加工技术研制的用于高精度压力传感器的硅梁谐振器,梁厚 $20\mu\text{m}$,宽 $150\mu\text{m}$,长 2mm 。谐振器在真空中的品质因数 Q 值大于 33000,是国内报道的最高水平 Q 值。并讨论热激励条件下谐振梁的开环振动特性,包括热激励功率与谐振频率移动的关系。

2 工作原理

硅谐振式压力传感器由单晶硅压力膜和单晶硅梁谐振器组成。二者通过硅硅键合成一整体,梁紧贴膜片,其间只留 $2\mu\text{m}$ 左右的空隙,供梁振动。硅梁封装于高真空 (10^{-4}Pa) 之中,硅膜另一边接待测压力源。膜四周与管座刚性连接,可近似看成四边固支矩形膜。当压力 (大于 10^{-4}Pa) 作用于压力膜时,膜两端存在压差,膜感受均布压力 p ,将发生形变,膜内产生应力。与膜紧贴的梁也会感受轴向应力,这个应力将改变梁的固有谐振频率。在一定范围内,固有谐振频率的改变与轴向应力以及外加压力三者之间有很好的线性关系。因此,通过检测梁的固有谐振频率,就可达到压力检测的目的。

为了测定谐振频率,通常对梁施加交流激励信号,使梁作受迫振动,并检测梁的振动信号(称为拾振)。谐振式压力传感器的激励和拾振方式有多种,常用的激励方式有:静电激励、电磁激励、电热激励、激光激励等,拾振方式有:电容拾振、电磁拾振、压阻拾振及激光拾振。本文对电热激励、压阻拾振方式进行研究和讨论。

¹ 1999-09-13 收到, 2000-05-04 定稿

国家 863 计划资助项目

在硅梁上面的中间和端部分别置于两个电阻之间, 梁的中间的电阻为激振电阻, 对该电阻周期地用正弦或矩形电压进行激励, 对梁进行周期性的加热, 使梁发生周期性延伸和收缩形成机械驱动力; 端部置拾振电阻, 将梁的振动信号转变成电压输出信号. 扫描激励信号频率, 当激励频率接近硅梁的固有谐振频率时, 将发生共振, 此时振动幅值最大, 拾振信号最强, 在幅频特性曲线上出现谐振峰. 根据幅频特性曲线上的谐振峰位, 即可以确定硅梁的固有谐振频率. 硅谐振式压力传感器的核心部件是单晶硅梁谐振器, 谐振器的频率特性直接影响到压力传感器的性能. 要得到高精度的压力传感器, 就要求谐振器具有极高的品质因数 Q 值和极高的频率稳定性. 本文着重硅梁谐振器的研制及其振动特性的研究, 有关压力传感器的特性研究, 将另文论述.

3 理论分析与结构设计

3.1 硅梁机械振动及固有频率计算

单晶硅梁谐振器结构是双端固支的矩形梁如图 1 所示. 无阻尼下的自由微幅振动方程

$$EI \frac{\partial^4 \omega(x, t)}{\partial x^4} - \sigma A \frac{\partial^2 \omega(x, t)}{\partial x^2} = -\rho A \frac{\partial^2 \omega(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中 $\omega(x, t)$ 是梁的动挠度, σ 是轴向应力 (拉应力取正, 压应力取负), I , A , E 和 ρ 分别为梁的横截面对中心主轴的惯性矩, 横截面积, 材料的弹性模量和体密度. 式中 $I = bh^3/12$, $A = bh$, b 是梁宽, h 是梁厚.

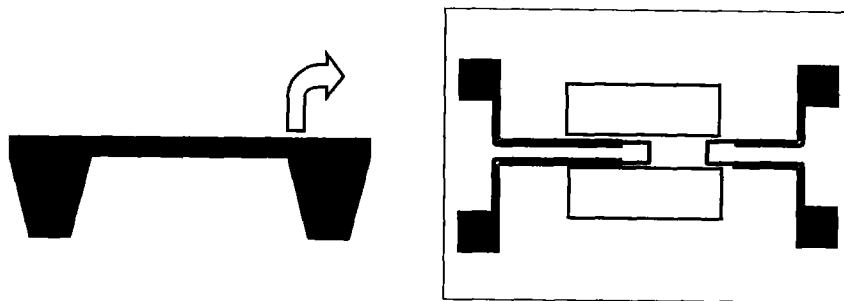
设基模态解为 $\omega(x, t) = W(x)e^{j\omega_1 t}$, $W(x)$ 是振型函数. 边界条件是 $W|_{x=0, l} = 0$, $\frac{dW}{dx}|_{x=0, l} = 0$, 求解振动方程得基模态固有频率与轴向力的关系

$$f_1 = f_{1(0)} \sqrt{1 + \frac{\sigma}{\sigma_c}} \quad (2)$$

式中 $f_{1(0)} = \frac{\alpha_1^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} = 1.028 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h}{l^2}$ 是轴向热应力 $\sigma = 0$ 时梁的固有频率, α_1 是基模态常数, $\alpha_1 = 4.730$. σ_c 是临界欧拉应力:

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{3} \left[\frac{h}{l} \right]^2 \quad (3)$$

式中 l 为谐振器梁长.



(a) 横截面图

(b) 上表面平面示意图

图 1 单晶硅梁谐振器结构

3.2 热激励受迫共振

当谐振梁受到热激励时, 梁的温度会改变, 并会产生轴向热应力和应变。梁上任一点的应变物理方程是^[5]

$$\varepsilon = \sigma/E + \alpha T \quad (4)$$

ε 是轴向热应变, σ 是轴向热应力, E 是弹性模量, α 是线热膨胀系数, T 是任一点的变温, 并且是 x 和 z 的函数 $T(x, z)$ 。轴向热应力可表达成

$$\sigma = E\varepsilon - \alpha ET \quad (5)$$

热应力引起的弯矩表达为

$$\left. \begin{aligned} M &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma z dz \\ M_T &= \int_{-h/2}^{h/2} \alpha ET z dz = \alpha E \int_{-h/2}^{h/2} T z dz \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

假定, T 沿 z 方向是线性变化的, 则梁上面和下面的变温是 $T_1(x)$, $T_2(x)$ (只是 x 的函数), $T = (T_1 + T_2)/2 - (T_2 - T_1)z/h$ 代入 (6) 式得

$$M_T = \alpha E \int_{-h/2}^{h/2} \left\{ \frac{T_1 + T_2}{2} - (T_2 - T_1) \frac{z}{h} \right\} z dz = \frac{\alpha E h^2}{12} (T_1 - T_2) \quad (7)$$

$(T_1 - T_2)$ 与加热电阻的功率成正比, 因此弯矩 $M_T \propto P$ 。梁的受迫振动方程是^[4]

$$EI \frac{\partial^4 \omega(x, l)}{\partial x^4} - \sigma A \frac{\partial^2 \omega(x, l)}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 \omega(x, l)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 M_T(x, l)}{\partial x^2} \quad (8)$$

在激励电阻 R 上施加交流电压 $V = U_0 + U \cos \omega t$, 则功率 P 的表达式为

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{1}{R} \left[U_0^2 + \frac{1}{2} U^2 \right] + \frac{2U_0 U}{R} \cos \omega t + \frac{U^2}{2R} \cos 2\omega t \quad (9)$$

P 由静态功率 P_0 和动态功率 P_1 和 P_2 组成,

$$P_0 = \frac{1}{R} (U_0^2 + \frac{1}{2} U^2), \quad P_1 = \frac{2U_0 U}{R} \cos \omega t, \quad P_2 = \frac{U^2}{2R} \cos 2\omega t$$

由于弯矩 $M_T \propto P$, 因此弯矩的表达式可写为

$$M_T = M_0 + M_1 \cos \omega t + M_2 \cos 2\omega t \quad (10)$$

硅梁在 M_1 和 M_2 两个简谐变化的弯矩作用下作受迫振动。这个弯矩既有一倍频 ω 分量, 又有二倍频 2ω 分量。因此可通过检测一倍频 ω 或二倍频 2ω 的方法来测定硅梁的谐振特性。考虑实际阻尼情况下, 当 $\omega = \omega_{1(\sigma)}$ 或者 $2\omega = \omega_{1(\sigma)}$ 时, 一倍频或二倍频产生基模共振, 这时振动信号幅值达到最大。谐振器最大幅值信号与受迫振动交变激励力或弯矩的幅值成正比, 与阻尼系数成反比。振动信号由梁根部的拾振电阻拾取。

3.3 热应力分析

静态功率在梁上引起静态的温度分布, (忽略其它形式的散热) 只考虑硅梁材料的有限热导率引起的热传导, 将基座看成理想的热沉, 则温度在均匀生热电阻上是抛物线分布, 而在电阻外是线性分布. 近似把电阻等效为 x_0 处的点热源, 则梁的平均温升 ΔT_{av} 为^[4]

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{av} &= \frac{P_0}{2bh\lambda} \frac{(l-x_0)x_0}{l} \\ \frac{\Delta T_{av}}{P_0} &= \frac{(l-x_0)x_0}{2bh\lambda l} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

梁的平均温升会感生轴向热应力 $\sigma = -E\alpha\Delta T_{av}$.

由于临界欧拉应力:

$$\sigma_c = 4\pi^2 \frac{EI}{Al^2} = \frac{\pi^2}{3} E \left[\frac{h}{l} \right]^2 \quad (12)$$

故临界温升

$$\Delta T_c = \frac{\sigma_c}{E\alpha} = \frac{\pi^2}{3\alpha} \left[\frac{h}{l} \right]^2 \quad (13)$$

临界静态加热功率

$$P_{0c} = P_0 \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{av}} \quad (14)$$

梁的基模谐振频率可写为

$$f_1 = f_{1(0)} \sqrt{1 + \frac{\sigma}{\sigma_c}} = f_{1(0)} \sqrt{1 - \frac{\Delta T_{av}}{\Delta T_c}} = f_{1(0)} \sqrt{1 - \frac{P_0}{P_{0c}}} \quad (15)$$

当静态加热功率 $P_0 \ll P_{0c}$ 时, 展开上式得谐振器的基模态固有振动频率与静态热激励功率呈线性关系.

$$f_1 = f_{1(0)} \left[1 - \frac{P_0}{2P_{0c}} \right] \quad (16)$$

式中 $P_0 = V_r^2/R$, $P_{0c} = V_{rc}^2/R$, V_r 和 V_{rc} 是激励电阻两端的激励电压有效值和临界激励电压有效值. (16) 式又可写成

$$f_1 = f_{1(0)} \left[1 - \frac{V_r^2}{2V_{rc}^2} \right] \quad (17)$$

3.4 谐振器结构设计

设计谐振器谐振梁长 $l=2\text{mm}$, 梁宽 $b=150\mu\text{m}$, 梁厚 $h=10\sim 30\mu\text{m}$. 为了获得基模振动, 热激励电阻 (长 $400\mu\text{m}$) 位于梁的正中, 压阻拾振则放在应力最大的梁的根部以得到最大的电阻阻值变化, 使信号输出最大. 谐振器的固有振动频率 (无轴向应力) 只取决于梁的机械结构参数 (主要是梁长 l 和梁厚 h), 一般固定梁的长与宽, 通过控制梁厚来选择谐振器的固有振动频率.

对硅材料, $E = 1.3 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\rho = 2330 \text{kg/m}^3$, 热膨胀系数 $\alpha = 2.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 硅的热导率 $\lambda = 157 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. 将这些参数代入前面推导的公式中得梁的基模态固有频率 $f_{1(0)}$ 为

$$f_{1(0)} = 7679h/l^2 \quad (\text{Hz}) \quad (18)$$

在热激励条件下, 则硅梁的热应力临界温度:

$$T_c = \varepsilon_c / \alpha = 1.316h^2/l^2 \quad (^\circ\text{C}) \quad (19)$$

单位激励功率导致的梁的平均温升:

$$\Delta T_{av}/P_0 = 5.308l/h \quad (^\circ\text{C}/\text{mW}) \quad (20)$$

(18)-(20) 式中, h 的单位是 μm , l 的单位是 mm . $l = 2 \text{mm}$ 硅梁谐振频率与梁厚的关系曲线如图 2 所示, 硅梁的热应力临界温度与梁厚的关系曲线如图 3 所示.

如果 $h = 10 \mu\text{m}$, $l = 2 \text{mm}$, 代入 (18)-(20) 式得: 硅梁基模谐振频率 $f_{1(0)} = 19197.5 \text{Hz}$, 硅梁的热应力临界温度 $T_c = 32.9 \text{ } ^\circ\text{C}$, 单位激励功率导致的梁的平均温升 $\Delta T_{av}/P_0 = 1.062 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mW}$.

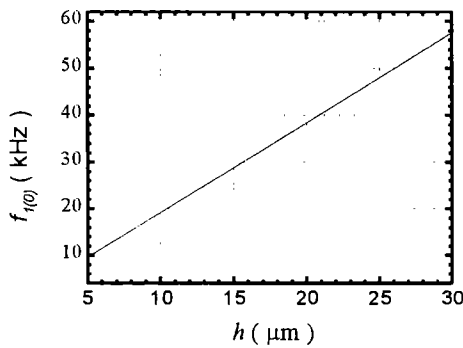


图 2 硅梁谐振频率与梁厚的关系曲线

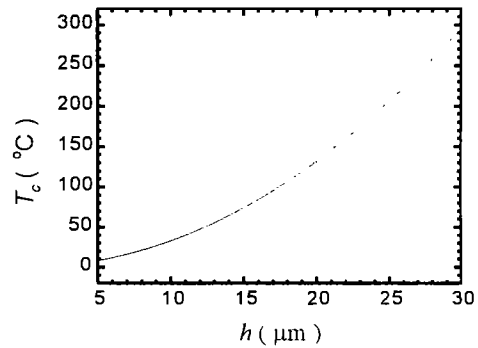


图 3 硅梁临界温度与梁厚的关系曲线

图 4 是梁上激励电阻的激励功率为 1mW 时, 梁端为环境温度 20°C 时, 通过有限元热传导分析得到的谐振梁的温度场分布图 (只考虑硅的热传导).

通过有限元热传导分析得到的梁的平均温升约为 $1.3^\circ\text{C}/\text{mW}$, 比 (20) 式计算的结果稍微大一点, 这与使用的参数及所作的近似有关. 因此, 临界热激励功率大约 33mW , 当热激励功率小于 3mW 时, 梁的平均温升远小于 T_c , 热应变远小于临界应变. (16) 式条件满足, 热应力导致的谐振频率移动与热应变 (热应力) 是线性关系.

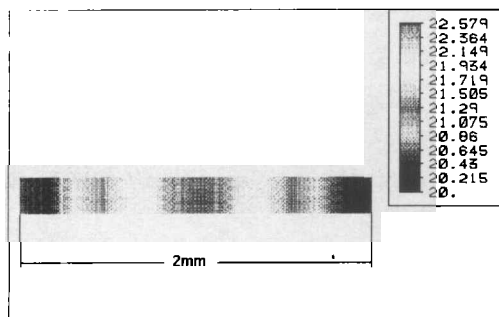


图 4 有限元分析的谐振梁的温度场分布图

4 实验

4.1 器件制作

器件采用微机械加工技术研制。选取双面抛光 N 型 (100) 单晶硅, 电阻率 $\rho = 0.01\Omega\text{cm}$, 厚度 $d \approx 300\mu\text{m}$ 。首先双面高温热氧化为 SiO_2 , 再化学气相沉积 (LPCVD) Si_3N_4 ; 磁控溅射 Pt 电阻薄膜; 蒸发 Au 引线; 正面各向同性或异性腐蚀硅梁浅坑 ($15\mu\text{m}$ 左右); 背面用 KOH 腐蚀液各向异性腐蚀硅至刚好穿透为止, 分离硅片得到硅梁谐振器。图 5 是硅梁的扫描电镜照片。

4.2 谐振器性能测试

将硅梁谐振器粘在管座上, 用超声波压焊引线, 置于真空测试系统中。图 6 是测试系统框图。测试系统由谐振器芯片、信号激励源、拾振恒流源、锁相放大器、微计算机、打印机等组成。本实验选用 SR510 锁相放大器, 通过 RS232 与计算机接口, 使用它的 VCO 输出作为激励信号, 经放大器放大后驱动激振。拾振电阻由恒流源供电, 将电阻交变信号转化为电压交变信号, 由锁相放大器检测其幅值及相位。通过计算机控制频率扫描和数据采集及处理可测得谐振器的振动特性。激励电压由直流和交流两部分组成 $V = V_0 + V_1 \cos \omega t$, 采用 f 和 $2f$ 两种方法进行测试。

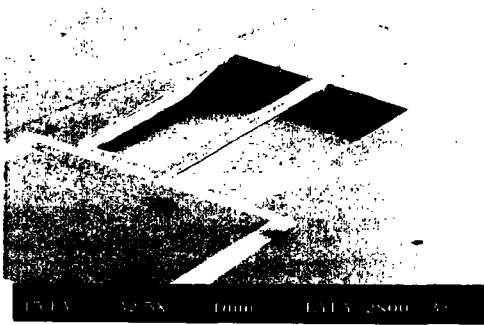


图 5 硅梁的扫描电镜照片

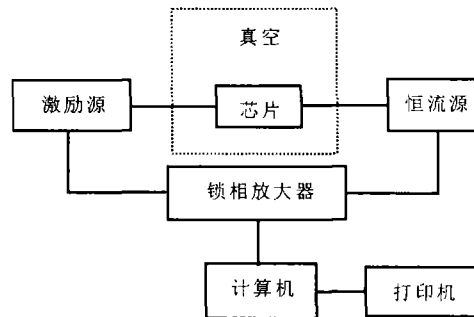


图 6 硅梁谐振器测试系统框图

5 结果及讨论

选取谐振器 No.1 (梁厚 $\sim 20\mu\text{m}$) 进行开环动态测试。根据 (18) 式计算出 No.1 的谐振频率是 $\sim 39\text{kHz}$, 硅梁的热应力临界温度 $\sim 132\text{ }^\circ\text{C}$, 单位激励功率导致的梁的平均温升 $\Delta T_{av}/P_0 = \sim 0.53\text{ }^\circ\text{C}/\text{mW}$, $P_{0c} = \sim 250\text{mW}$, 谐振器激励电阻为 160Ω , 因此临界激励电压有效值 $V_{rc} = \sim 6.3\text{V}$ 。

本实验采用 $2f$ 方法测试, 激励直流偏值 $V_0 = 0$, 只加交流分量 (有效值 V_r)。

图 7 是 No.1 在 1 个大气压的空气中, 交流有效值 $V_r = 1.25\text{V}$, 恒流源电流 $I = 1\text{mA}$ 时的振动幅频特性。谐振峰频率为 38856Hz , -3dB 带宽约 20Hz , 由此推算出谐振器在 1 个大气压的空气中的品质因数 Q 值约 2000。

图 8 是 No.1 在键合上压力敏感膜后, 置于真空度为 0.01Pa 的真空中, 交流有效值 $V_r = 0.2\text{V}$, 恒流源电流 $I = 1\text{mA}$ 时的振动。谐振峰频率为 40041Hz , -3dB 带宽约 1.2Hz , 由此推算出谐振器在高真空中的品质因数 Q 值约 33000, 该峰位比空气中的峰位高出近 1200Hz 。这是压力膜感受外界大气压力所至。

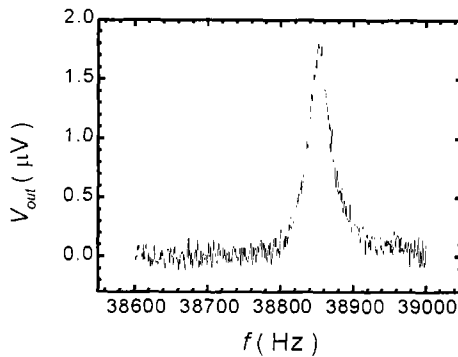


图7 No.1 在空气中的幅频特性曲线

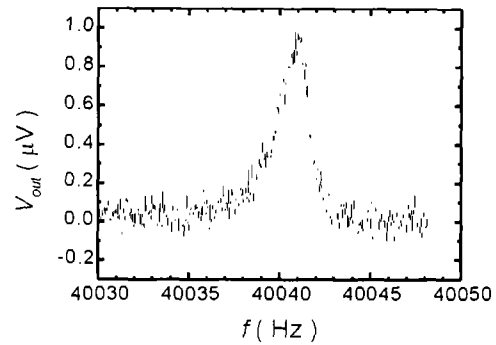


图8 No.1 在高真空中的幅频特性曲线

我们还测定了不同激励电压下谐振器 No.1 在 1 个大气压的空气中的幅频特性, 得到了激励电压有效值及热激励功率与谐振频率以及谐振峰值信号强度的关系曲线如图 9 和图 10。

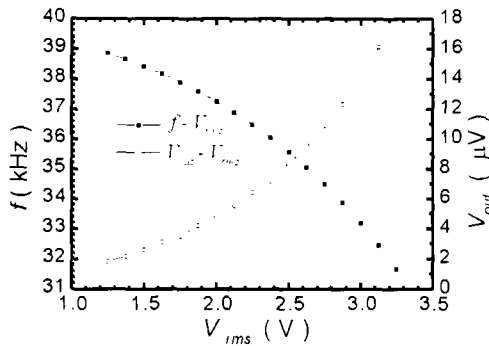


图9 谐振频率、谐振信号峰值与热激励电压有效值的关系曲线

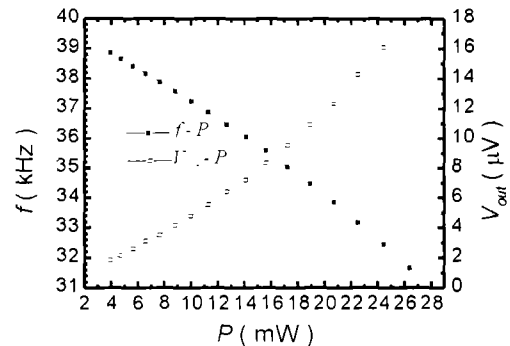


图10 谐振频率、谐振信号峰值与热激励功率的关系曲线

随着热激励功率的增加, 一方面静态功率使谐振梁的平均温度升高, 由于热膨胀谐振梁受到逐渐增大的轴向压缩应力, 因而其谐振频率逐渐降低; 另一方面动态功率的增加使驱动梁横向受迫振动的弯矩也增大, 振动信号相应增大。谐振频率对激励电压曲线近似为抛物线, 谐振峰值信号强度对激励电压曲线也近似为抛物线。谐振频率对激励功率曲线和谐振峰值信号强度对激励电压曲线则近似为一条直线, 说明谐振频率与激励功率呈很好的线性关系, 信号幅值在一定范围内也与激励功率成正比关系, 这与前面所作的理论分析完全一致。从以上的测试结果中, 可以看出: 同一谐振器在真空中与大气中的 Q 值相差近 20 倍, 说明大气中的阻尼就比真空中大 20 倍; 要获得一样大小的谐振峰值, 在大气中的激励力或弯矩 (在热激励情况下体现为热激励功率) 就得比真空中大 20 倍, 但实际二者的热激励功率之差大于 25 倍。产生这个差异的原因是空气的热传导, 激励热功率通过空气散热损失掉一部分, 有效热激励功率有所减小。

由于本实验选用的拾振电阻是铂金, 其压阻系数只有 $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ 左右, 如果采用压阻系数 $100 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ 左右的扩散硅电阻, 同样阻值的硅的灵敏度就提高 20 倍。因此采用扩散硅电阻拾振更容易获得大的信号, 更易实现正反馈闭环测试。

6 结 论

作者利用微电子机械加工技术成功研制出用于高精度压力传感器的硅梁谐振器, 梁厚小于

20 μm 、宽 150 μm 、长 2mm；谐振器最高 Q 值大于 33000；从理论和实验两方面讨论了热激励条件下谐振器的开环振动特性并分析了热激励功率（热应力）与谐振频率的线性关系；理论和实验二者符合较好。

参 考 文 献

- [1] J. C. Greenwood, D. W. Sarchell, A miniature silicon resonant pressure sensor, IEE Proc-D, 1988, 135(5), 369-372.
- [2] J. Greenwood, T. Wray, High accuracy pressure measurement with a silicon resonant sensor, Sensors and Actuators, 1993, A37-38, 82-85.
- [3] K. Ikeda, H. Kuwayama, T. Kobayashi, T. Watanabe, T. Nishikawa, T. Toshiida, K. Harada, Silicon pressure sensor integrates resonant strain gauge on diaphragm, Sensors and Actuators, 1990, A21-23, 146-150.
- [4] T. S. J. Lammerink, M. Elwenspoek, J. H. J. Fluitman, Performance of thermally excited resonators, Sensors and Actuators, 1990, A21-23, 352-356.
- [5] 徐芝纶编著, 弹性力学 (下), 北京, 高等教育出版社, 1998, 第 13 章, 55-63.

STUDY OF THERMALLY EXCITED SILICON BEAM RESONATOR

Chen Deyong Cui Dafu Wang Li Han Jinghong

(State Key Lab of Transducer Tech., Inst. of Electron., CAS, Beijing 100080, China)

Abstract A micro-machined single crystal beam resonator for high accuracy pressure sensors by utilizing Micro-ElectroMechanical System (MEMS) technology has been successfully fabricated. By means of thermal excitation, the frequency response (including amplitude and phase) of the resonator has been characterized with an open-loop frequency sweeping method. The -3dB width of resonant peak (less than 1.2Hz) corresponds a very high quality factor Q value greater than 33000 in vacuum at room-temperature. The frequency response of the resonator at different levels of excitation has been discussed theoretically and experimentally. The result shows a good linearity of frequency versus excitation power at lower excitation power and is coincident with the theory.

Key words Thermal excitation, Silicon beam, Resonator

- 陈德勇: 男, 1967 年生, 副研究员, 从事微结构半导体传感器的研究。
 崔大付: 男, 1941 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为生化传感器及微传感器。
 王 利: 女, 1953 年生, 工程师, 从事半导体器件及工艺的研究。
 韩经鸿: 女, 1943 生, 研究员, 研究方向为生化传感器及微传感器。