

硅微机械谐振器特性与激励光斑位置关系的研究*

喻 浩** 丁 纯 王跃林 王亚强 金仲和 徐义刚
(浙江大学信电系, 杭州 310027)

摘 要 阐述了对硅悬臂梁谐振子进行光激励研究的结果。结果表明, 谐振子的振幅与激励光斑的位置以及所激励的模态有关。在模态的两节点的中心位置进行激励, 可得到最大的振幅, 而且振幅随着激励光斑偏离中心位置而下降; 在节点处激励时, 振幅达到最小。上述结论也适用于其它点热源激励的微机械谐振器, 并为点热源激励的微机械谐振器的设计和制作提供了依据。

关键词 悬臂梁, 谐振子, 光激励。

1 引 言

微机械谐振传感器作为微机械传感器的一大分支, 因其具有精度高、抗干扰能力强、适用于长距离信号的传输等特点, 受到各方面的高度关注^[1, 2]。硅谐振传感器是利用谐振子的共振频率随被测物理量的变化而变化来测量的。对于硅微机械谐振传感器的激励, 目前大多采用电激励方法, 如静电驱动法、电致热应力法等。作者则选用了光激励这一途径来实施谐振子的激励。这是因为光激励有许多电激励无法达到的优点, 例如: 它无接触、无电磁干扰、在谐振器上无漏电等, 所以适用于易燃、易爆的危险环境^[3]。

谐振器的输出量是谐振子在谐振状态下的振幅值。在光激励中, 激励光斑的位置影响着谐振子的振幅值。选择使谐振子输出振幅值大的激励位置进行光激励可以提高谐振子的灵敏度和精度。作者从理论和实验两方面对硅微机械谐振器的特性与激励光斑位置关系进行了研究。本文报道了该研究成果。

2 理论分析

作理论分析用的悬臂梁的模型及结构简图如图 1 所示。坐标原点设在悬臂梁根部的中性面上, w 为振动时梁上各点的纵向位移方向。利用经典力学分析中的虚功原理及能量泛函原理等, 可确定悬臂梁的固有频率为^[4]:

* 国家自然科学基金资助项目(69476029)。

** 现工作于杭州市电信局。

收稿日期: 1997-07-10; 收到修改稿日期: 1997-11-06

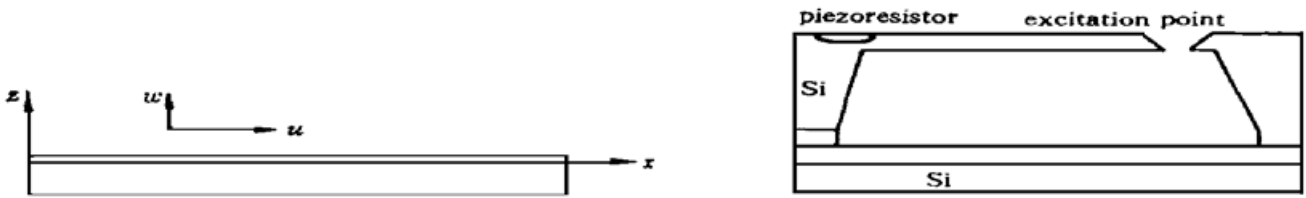


Fig. 1 Model and structure diagram of cantilever

$$\omega_n = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}, \quad (n = 1, 2, \dots) \tag{1}$$

数值计算得到的前三阶主模态如图 2 所示, 其中一阶模较容易激励起来, 而且振幅较大, 效果较为明显, 在实验中所得到的一般都是一阶模。用正弦波信号调制激励光时, 激励光信号可表示为: $I = I_0[1 + \exp(i\omega t)]$, ω 为光的调制频率, 悬臂梁响应由自由振动时的 $w(x)$ 变为 $w(x, t)$ ^[4]:

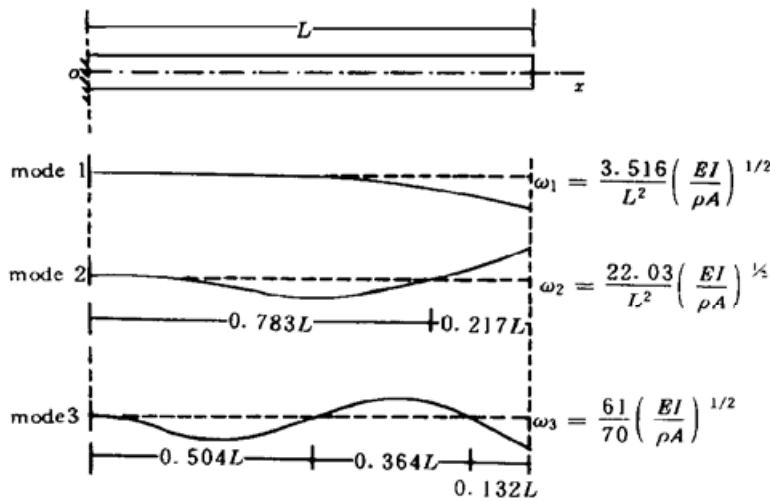


Fig. 2 First three model of cantilever

$w(x, t) = W(x)\zeta(t) = [A \cos \lambda x + B \sin \lambda x + C \operatorname{sh} \lambda x + D \operatorname{ch} \lambda x + \Psi_s(x)]\zeta(t)$ (2)

$\Psi_s(x)$ 为激励振动的位移响应。它与激励光斑的位置有关。当激励光的频率 ω 等于梁的某一固有频率 ω_n 时, $w(x, t)$ 中 $\zeta(t)$ 的表达式为:

$$\zeta(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t + \frac{M_{i0} \int_0^L \eta(x-a) W_s(x) dx}{2i\omega m} t \exp(i\omega t) \tag{3}$$

上式中的第三项随着时间的增长会无限地增长(假设无阻尼的情况下), 这就是共振情况下的特性。在考虑有阻尼的情况下, 悬臂梁的最终稳态响应为:

$$w(x, t) = \sum_s \frac{M_{i0} \eta(x-a) l^3 W_s(x) W_s(a) \sin(\alpha t - \alpha_s)}{\pi^4 EI \sqrt{(s^4 - n^2)^2 + (\mu s^4)^2}} \tag{4}$$

式中 $W_s(x)$ 为悬臂梁自由振动的主模态, 由(2)式表示, α 为激励光斑的位置, μ 为阻尼系数。

当激励频率为 ω_n 时, 据(4)式计算的不同激励光斑位置下悬臂梁悬空端的无量纲振幅 $w(x) \pi^4 EI / M_{i0} L^3$ 的近似值如图 3 所示。从上图可见各条曲线与梁的各阶主模态振型颇相似。

对于一阶模来说, 激励点越接近悬臂梁的悬空端, 梁的响应越强烈, 激励的效果也越好。对于高阶模, 中间有一段较小值, 这与他们本身的主模态有关, 如二阶模的 $0.788L$ 点, 三阶模 $0.5L$ 、 $0.864L$ 点为梁振型的节点, 它们在梁振动时位移一直为 0。在这些点激励时, 力矩就比较小, 对悬臂梁悬空端的振幅的贡献也就小。相应地, 二阶模的 $0.65L$ 、 L 点, 三阶模的 $0.25L$ 、 $0.68L$ 、 L 点的位移较大, 在这些点激励时, 产生的力矩较大, 它们对悬臂梁悬空端

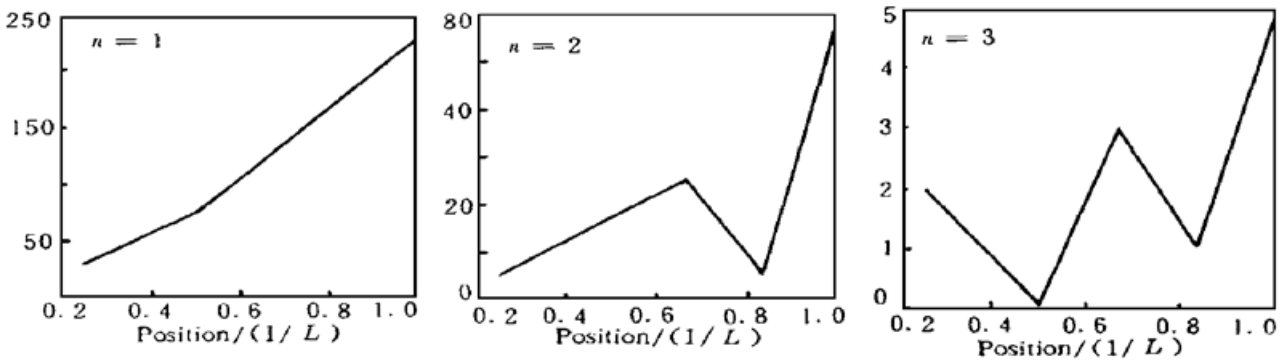


Fig. 3 The curve of amplitude under different excited point

的振幅的贡献就比较大。

上述结果表明, 对于采用光激励的微机械谐振器来说, 其振幅不仅与激励光斑的位置有关, 而且对不同的振动模态, 其振幅与激励光斑位置的关系有很大的区别。但不同的振动模态之间也有相同的地方, 即在各模态的两切点的中心位置进行激励, 可得到最大的振幅, 然后振幅随着激励光斑偏离中心位置而下降, 在节点处激励时, 振幅达到最小。从另一方面来说, 光激励实际上是一个热激励的过程, 所以上述结论对于所有点热源激励的微机械谐振器都适用。例如在电热激励时, 可以根据所要激励起来的振动模态来设计加热电阻的位置, 以达到最佳的性能。在谐振器的应用中, 主要应用一阶主模态, 所以如果选择在悬臂梁的悬空端进行激励, 能提高谐振器的灵敏度和精度。

3 实验结果及讨论

本研究中的样品如图 1 所示, 谐振子是由 Si(100) 的各向异性腐蚀形成的悬臂梁, 在梁的根部制作有横向压阻器件。硅悬臂梁的尺寸是: 长 2400 μm, 宽 750 μm, 厚 20 μm。

实验中的谐振子激励光路如图 4 所示, 激励光源是波长为 650 nm 的半导体激光器, 激光束准直后经显微放镜直接聚焦在样品的悬臂梁表面上, 激励光源由一专用的调制电源对它进行调制。可以测到一条完整的幅频曲线, 如图 5 所示。

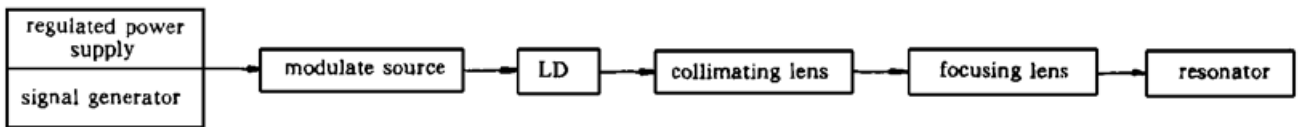


Fig. 4 Optical circuit schematic of optical excitation

根据(1)式, 并结合悬臂梁的尺寸参数, 可以计算得到谐振子的谐振频率为:

$$f_1 = 6.263 \text{ kHz}$$

在所测得的曲线中, 可以十分清楚地看出谐振子的一阶谐振频率为 6.670 kHz。可见理论计算的结果与实验结果较为相符。

在谐振点上, 改变激励光斑在悬臂梁上的位置, 可以发现, 谐振点的峰值大小会发生变化。图 6 是所测得的光斑位置与谐振幅值的关系曲线。谐振子的输出幅值随着激励光斑位置移向悬空端而逐渐增大, 并在悬臂梁的悬空端振幅达到最大。从上面的理论分析可以知道, 在悬臂梁一阶模振动的情况下, 它与理论计算的结果是相符的。这也表明了作者上面分析的结果对点热源激励的谐振器的设计具有很好的指导作用。

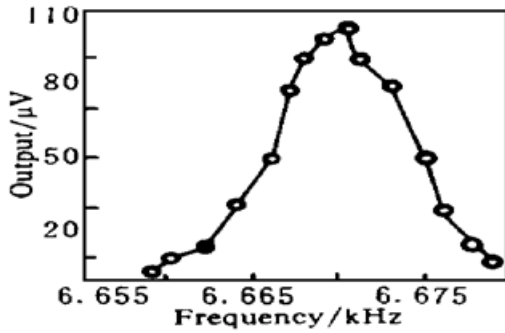


Fig. 5 The amplitude-frequency curve of cantilever

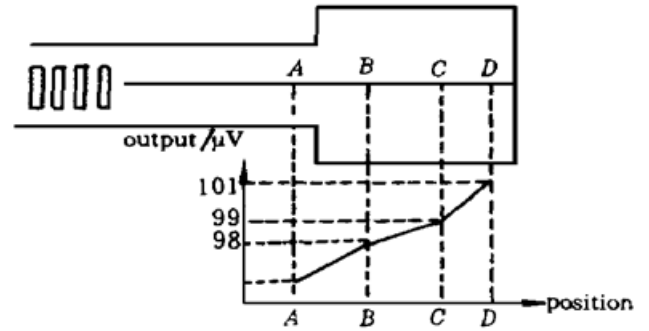


Fig. 6 The curve of relationship between vibration amplitude and excited point

结 论 本文从理论与实验两方面研究了悬臂梁微机械谐振子光激励的特性与激励光斑位置的关系。结果表明,在各模态的两节点的中心位置进行激励,可得到最大的振幅,而且振幅随着激励光斑偏离中心位置而下降,在节点处激励时,振幅达到最小。由于光激励实际上是一个热激励的过程,所以上述结论对于所有点热源激励的微机械谐振器都适用。例如在电热激励时,可以根据所要激励的振动模态来设计加热电阻的位置,以达到最佳的性能。对于一阶主模态,选择在悬臂梁的悬空端进行激励,能提高谐振器的灵敏度和精度。这些结论为点热源激励的微机械谐振器的设计和制作提供了依据。

参 考 文 献

- [1] L. M. Zhang, D. Walsh, D. Uttamchandani *et al.*, Effect of optical power on the resonance frequency of optically powered silicon microresonators. *Sensors and Actuators (A)*, 1991, **29**: 73~ 78
- [2] M. Hoffmann, H. Bezzaoui, E. Voges, Micromechanical cantilever resonators with integrated optical interrogation. *Sensors and Actuators (A)*, 1994, **44**: 71~ 75
- [3] Rebwar M. A. Fatah, Mechanisms of optical activation of micromechanical resonators. *Sensors and Actuators (A)*, 1992, **33**: 229~ 236
- [4] 吴福光等, 振动理论, 北京: 高等教育出版社, 206~ 208

The Relationship Between Silicon Micromechanical Resonators and Excited Point

Yu Hao Ding Chun Wang Yuelin Wang Yaqiang
Jin Zhonghe Xu Yigang

(Department of Information and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 10 July 1997; revised 6 November 1997)

Abstract The optically excited vibrations of silicon cantilever resonators are studied. We give the theoretical results and experimental results of cantilever's coherent frequency and discuss the effect of excited point on the vibration of the cantilever. The amplitude of output signal is related with the position of optical excited point and the vibration mode. We can get the highest amplitude by selecting the center point of two nodal of the vibration mode, then the amplitude decreases with the optical beam move to the nodal of the mode, where we get the lower signal. This result is satisfied to other micromechanical resonators with point heating excitation.

Key words cantilever, resonator, optical excitation.