

# 光激光拾谐振法确定硅微机械薄膜的杨氏弹性模量\*

张少君<sup>1</sup> 刘月明<sup>1,2</sup>

(1 西安理工大学理学院物理系, 西安 710048)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘 要** 提出了一种采用光热激励和光拾取的全光谐振技术方法, 确定硅微机械薄膜的杨氏弹性模量. 该方法基于光热激励的致动机理, 使用调制光对硅微机械薄膜结构进行光热激励使之谐振, 利用光纤传感技术拾取其谐振频率信号, 进而利用谐振理论模型确定其杨氏弹性模量. 为准确确定杨氏弹性模量, 利用了硅微薄膜结构的前三阶谐振频率进行多次测量, 求均值的方法. 为简化光激励测试系统, 设计了新颖结构的单光源激励测试系统, 同时实现了对微机械薄膜结构的激振和信号拾取.

**关键词** 硅微机械薄膜; 杨氏弹性模量; 光激励谐振; 光纤拾取

**中图分类号** O484.5 **文献标识码** A

## 0 引言

硅微机械薄膜是硅微光机电系统中广泛使用的器件材料, 利用硅微机械薄膜结构可以构造硅微机械传感器、硅微机械致动器和硅微机械全光通讯开关等多种典型微光机电器件<sup>[1~3]</sup>. 在硅微机械薄膜结构的各项性能参数中, 杨氏弹性模量是其最重要的基础材料参数之一, 在相关的器件研究中必不可少. 通常硅微机械硅膜的厚度处于纳米级到微米级, 此时硅薄膜的杨氏弹性模量与大体积的硅材料相比, 具有明显不同<sup>[4]</sup>. 另外, 由于硅薄膜的制取可以采用多种不同的硅微机械加工工艺制作, 不同加工工艺制取的硅薄膜, 其杨氏弹性模量往往相差很大, 即使采用同一种加工方法, 稍有不同的加工条件也会导致硅薄膜的杨氏弹性模量不同. 因此测定具体工艺下制取硅薄膜的杨氏弹性模量非常必要. 由于硅微机械薄膜十分脆弱, 尺寸又很小, 故对其杨氏弹性模量测定的最佳测试方法应为非接触无损测定方法.

采用谐振技术测定硅薄膜的杨氏弹性模量, 其思想就是将硅薄膜结构视做微谐振子结构, 首先通过激励起振准确测定其谐振频率, 然后利用谐振子的谐振频率模型计算其杨氏弹性模量. 为激励硅微薄膜谐振子起振, 可以采用光热激励、电磁激励、静电激励或逆压电激励等多种方法<sup>[5]</sup>. 对于硅微薄膜谐振频率信号的检测, 也有多种方法可以采用, 如压阻检测方法、电容检测方法或光拾取方法<sup>[6]</sup>. 由于典型硅微薄膜悬臂梁谐振子的宽度只有几十到几百

微米, 本文基于谐振技术测试思想, 采用全光激励和光检测方法, 用单根光纤头传感测试方案, 设计了新颖结构的单光源测试和激励系统, 实现了对硅微机械薄膜谐振子结构的激振和谐振信号检测拾取, 对典型硅微机械薄膜结构器件进行了测试, 得到了准确的测试结果.

## 1 硅薄膜杨氏弹性模量测定的理论基础

图 1 为硅微机械薄膜悬臂梁的结构图, 其长、

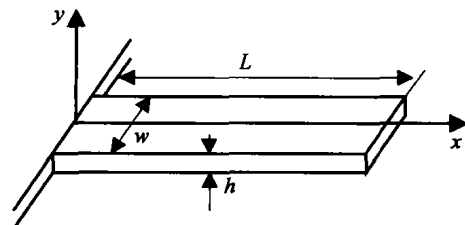


图 1 硅微机械薄膜悬臂梁的结构

Fig. 1 Structure of micro-cantilever resonator

宽、厚分别为  $L$ 、 $w$ 、 $h$ , 假设不计空气阻尼, 则硅膜悬臂梁的自由振动方程为<sup>[7]</sup>

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中,  $E$  为硅微薄膜的杨氏弹性模量,  $I$  为转动惯量, 且  $I = wh^3/12$ ,  $\rho$  为硅膜的密度,  $A$  为硅微悬臂梁的横截面积, 且  $A = wh$ .

硅微悬臂梁的边界条件为

$$\begin{aligned} y(0) = 0 & \quad \frac{dy(x)}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \\ \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \Big|_{x=L} = 0 & \quad \frac{d^3 y(x)}{dx^3} \Big|_{x=L} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

以边界条件式(2)求解式(1), 可以求得硅微薄膜谐振子的谐振频率为

$$f_i = 0.046 \Psi_i (h/L^2) \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

\* 陕西省教委专项科研计划项目(O2JK155)和西安理工大学科技创新研究计划项目资助(102-210304)  
Tel: 028-88472090 Email: liuym@xaut.edu.cn  
收稿日期: 2004-12-13

式中  $f_i$  为硅微薄膜悬臂梁谐振子的第  $i$  阶谐振频率,  $\Psi_i$  为对应硅微悬臂梁谐振子第  $i$  阶谐振频率的参数, 其值为

$$\Psi_i = 3.52, 22.4, 61.7, 121.0, 199.9 \dots \quad (4)$$

由式(3)可以得到硅微薄膜谐振子的杨氏弹性模量表达式为

$$E = \frac{\rho(f_i L^2)^2}{0.046^2 \Psi_i^2 h^2} \quad (5)$$

式(5)即为硅薄膜杨氏弹性模量的测定原理式, 在事先知道  $L, h, \rho$  的情况下, 则只需测出微悬臂梁的基本频率  $f_i$  就可确定杨氏弹性模量的值.

## 2 硅微薄膜悬臂梁谐振子的单光源光激光拾实验测定方法

硅微薄膜悬臂梁谐振子的单光源光激光拾实验装置如图 2. 稳定化半导体激光源在调制器提供的直流偏置和交流调制的共同激励下, 发出波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的红外光, 提供给硅微薄膜谐振子作为其谐振的激励光和信号拾取光, 激光器发出的光强可表达为

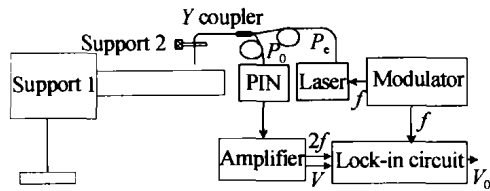


图 2 硅微薄膜悬臂梁的单光源光激光拾实验  
Fig. 2 Set-up of photothermal excitation and optical sensing

$$P_{in} = P_D + P_0 \sin \omega t \quad (6)$$

式中,  $P_D$  为激光器输出的直流光强分量,  $P_0$  为交流调制信号导致的输出光强交变分量的幅值,  $\omega$  为交流调制信号的角频率. 式(6)中的光强  $P_{in}$  提供硅微悬臂梁谐振子的激励光, 其对硅微谐振子的作用机理主要是光热效应, 即经周期调制的激励光经过光纤照射到硅微薄膜谐振子上, 硅微薄膜谐振子吸收部分光能, 并将此光能转换为热能, 沿硅微谐振子形成交变温度梯度分布, 在此交变温度分布的作用下, 硅微薄膜谐振子内部会产生交变热应力, 于是硅微谐振子在此交变热应力激励下产生振动, 如果激励光的频率调制到与谐振子的谐振频率相同, 则硅微悬臂梁谐振子将发生谐振.

图 2 中硅微谐振子的谐振信号拾取由同一根光纤头探测完成, 探测光源同样由激光器发出的光强  $P_{in}$  提供, 其光信号探测拾取原理为: 由激光器发出的激励光  $P_{in}$  照射到硅微薄膜悬臂梁谐振子的自由端, 当硅微悬臂梁振动时, 由微悬臂梁表面反射回光路的检测光可表达为

$$P_{out} = \alpha P_{in} = \alpha P_D + \alpha P_0 \sin \omega t \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  为微悬臂梁表面反射光返回光路的耦

合系数.

当硅微悬臂梁谐振子在  $P_{in}$  激励下产生谐振时, 经硅微悬臂梁表面返回光路的光受到硅微悬臂梁谐振信号的调制, 此调制信号取决于微悬臂梁的谐振状态, 可表达为

$$\Psi = \beta \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

式中,  $\beta$  为取决于谐振子振幅的调制耦合系数,  $\omega$  为谐振角频率,  $\varphi$  为微谐振子相对于激励的相位滞后. 综合式(7)和式(8)可得硅微薄膜悬臂梁谐振时耦合回光路的检测光为

$$P'_{out} = \Psi P_{out} = \frac{P_0 \alpha \beta}{2} \cos \varphi + P_D \alpha \beta \sin(\omega t + \varphi) - \frac{P_0 \alpha \beta}{2} \cos(2\omega t + \varphi) \quad (9)$$

式(9)中共有三项组成: 第一项为恒定光强成分, 第二项为一倍频光强成分, 第三项为二倍频光强成分. 其中一倍频和二倍频光强成分均可由锁相放大器检测硅微悬臂梁谐振信号, 因为这两项的振幅里均含有受谐振子振幅调制的系数  $\beta$ , 当谐振子达到谐振状态时, 振幅最大,  $\beta$  最大, 故由  $\beta$  可以检测到硅微谐振子的谐振频率点. 实验中可以利用式(9)的一倍频成分进行硅微谐振子的谐振检测, 也可以利用式(9)的二倍频光强成分实现谐振检测, 但实测时利用一倍频成分进行检测存在较强的同频干扰, 使得谐振信号提取比较困难, 故采用二倍频成分检测谐振信号更为可靠方便.

实验中使用的硅薄膜微悬臂梁谐振子采用硅微机械工艺技术制作, 方法为: 基于单晶硅的(100)晶面, 使用微机械加工的各项异性湿法刻蚀技术制成, 选用了配比  $\text{KOH} : \text{H}_2\text{O} = 50\text{g} : 100 \text{ mL}$  的  $\text{KOH}$  腐蚀溶液, 制成了一批不同大小的硅微悬臂梁谐振子. 选用其中尺寸为  $2000 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 19 \mu\text{m}$  的悬臂梁谐振子, 利用图 2 中的实验装置进行了实测实验, 得到了硅微谐振子前三阶谐振频率的数据如表 1. 查得硅单晶的密度为  $2330 \text{ Kg/m}^3$ . 由硅微悬臂梁杨氏弹性膜量的计算模型式(5), 代入表 1 中硅微谐振子前三阶谐振频率, 可以得到三阶谐振频率对应的杨氏弹性膜量如表 1, 对三阶谐振频率分别计算出的杨氏弹性膜量求均值, 可以得到硅微薄膜的杨氏弹性膜量准确值为  $133.9 \text{ GPa}$ .

表 1 硅微悬臂梁的前三阶谐振频率及杨氏弹性膜量

谐振振型	一阶	二阶	三阶
谐振频率 / kHz	5.84	36.80	102.84
杨氏弹性膜量 / GPa	134.3	132.0	135.5

## 3 杨氏弹性膜量实验测定结果的误差分析

由式(5)可知, 杨氏弹性膜量实验误差因素主要

有两个:一是硅薄膜微悬臂梁尺寸误差,二是硅膜微悬臂梁谐振频率的测量误差. 硅膜悬臂梁的尺寸误差主要为厚度和长度的制作误差,在上述硅微机械悬臂梁制取过程中,由于采用了准确控制硅膜厚度的制作方法和悬臂梁削角补偿的制作方案,其厚度误差小于  $0.5 \mu\text{m}$ ,长度误差小于  $2 \mu\text{m}$ ,即

$$\begin{aligned} \delta h/h &\leq 0.5/19 \cong 0.026 \\ \delta L/L &\leq 2/2000 \cong 0.001 \end{aligned} \quad (10)$$

硅膜微悬臂梁谐振频率的测量误差主要由空气阻尼引起,在前面的理论分析和实验结果处理时,忽略了空气阻尼的影响,谐振频率即为  $f_i$ ,在考虑空气阻尼的影响下,硅膜微悬臂梁的谐振频率应为<sup>[8]</sup>

$$f'_i = f_i(1 - 1/4Q^2)^{1/2} \quad (11)$$

式中: $f'_i$  为考虑空气阻尼时的谐振频率, $f_i$  为不计空气阻尼时的谐振频率, $Q$  为谐振子谐振的品质因数. 品质因数可由硅薄膜谐振子的谐振幅频特性曲线求出,其计算式为

$$Q = f_i/\Delta f_i \quad (12)$$

式中  $\Delta f_i$  为硅微谐振子的谐振频率特性的半带宽,对实验中使用的硅薄膜微悬臂梁的三阶谐振幅频特性曲线进行了分析计算,发现其谐振品质因数最小为 12,代入式(11)可得

$$\frac{\delta f_i}{f_i} = \left| \frac{f'_i - f_i}{f_i} \right| \cong 0.00086 < 0.0009 \quad (13)$$

由式(5)出发求出杨氏弹性模量的各分量综合误差为

$$\left| \frac{\Delta E}{E} \right| = \sqrt{4 \left( \frac{\delta f_0}{f_0} \right)^2 + 16 \left( \frac{\delta L}{L} \right)^2 + 4 \left( \frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2} \quad (14)$$

将式(10)、式(13)代入式(14),并注意到通常取<sup>[8]</sup>  $|\delta \rho/\rho| \leq 0.02$ ,则可算得杨氏弹性模量的综合测定误差为: $|\Delta E/E| \leq 5.6\%$ ,故最终实验测定结果应表述为  $133.9 \pm 7.5 \text{ GPa}$ .

## 4 结论

硅微机械薄膜是微光机电系统中最常用的器件结构,在不同方法或不同工艺条件下制取的硅薄膜材料,其杨氏弹性模量有明显差别,因此,测定不同

硅微机械薄膜的杨氏弹性模量对相关领域的研究至关重要. 本文基于硅微机械薄膜悬臂梁谐振技术,采用了光热激励、光纤传感拾取的方法,对一种用湿法刻蚀法制取的硅微悬臂梁谐振子进行了测试,得到了其杨氏弹性模量的数值,并给出了实验误差的综合分析结果. 本文所采用的测试方法可以推广到其它类似薄膜材料杨氏弹性模量测定的场合.

## 参考文献

- Pereira S, Chak P, Sipe J E. Gap-soliton switching in short microresonator structures. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, **19**(9): 2191~2202
- Pramanik C, Islam T, Saha H. Impact of self heating in a silicon MEMS piezo-resistive pressure sensor. *Sensor Letters*, 2004, **2**(2): 131~137
- Baker M S, Howell L L. On-chip actuation of an In-Plane compliant bistable micro-mechanism. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, **11**(5): 566~573
- Walsh D, Culshaw B. Optically activated silicon micro-resonator transducers: an assessment of material properties. *Sensors and Actuators*, 1991, **A27**(1-3): 711~716
- Liu Yueming, Tian Weijian, Zhang Shaojun, et al. Determination of Young's modulus of micro-mechanical silicon films using an acoustic excitation and optical detection resonance method. *Proceedings of the sixth ISMTII*, 28 Nov- 1 Dec, 2003, Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, HongKong
- 刘月明,田维坚. 硅微机械悬臂梁红外辐射热探测技术的研究. *光子学报*, 2004, **33**(3): 371~374  
Liu Y M, Tian W J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 371~374
- 师汉民,湛刚,吴雅. 机械振动系统. 武汉:华中理工大学出版社,1992. 143~145  
Shi H M, Zhan G, Wu Y. *Mechanical Vibration system*. Huazhong University of Technology Press, 1992. 143~145
- Ye X Y, Zhou Z Y, Yang Y, et al. Determination of the mechanical properties of microstructure. *Sensors and Actuators*, 1996, **A54**(1-3): 750~754

## Young's Moduli Evaluation of Micro-machined Silicon Membranes Using Optically Excited Resonance and Optical Fiber Sensing Techniques

Zhang Shaojun<sup>1</sup>, Liu Yueming<sup>1,2</sup>

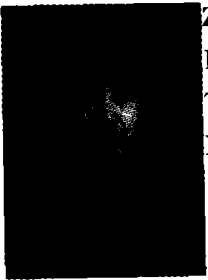
<sup>1</sup> Department of physics, School of science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

<sup>2</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

Received date: 2004-12-13

**Abstract** Owing to Micro-mechanical silicon membrane structures micro size and fragile properties, the method to determine Young's moduli must be non-contact and nondestructive. Based on the photo-thermal effect, a novel method was presented by using optically excited resonance and optical fiber sensing techniques in this paper. This new method utilizes first three resonant modes of the fabricated silicon membranes to get a more accurate evaluation of Young's moduli, and a novel optical exciting and sensing system using only one optical resource was set up to make the evaluation more practical.

**Keywords** Micromechanical silicon membranes; Young's modulus; Optically excited resonance; Optical fiber sensing



**Zhang Shaojun** was born in 1962. She received her B. S degree from Education College of Hebei Normal University in 1988. Currently she is a lecturer at Xi'an University of Technology. Her major research fields include Optical Fiber Sensing and Physical Experiment.