

# 微机械材料杨氏模量的测量

顾利忠, 苏菲, 赵颖, 张以恒  
(清华大学自动化系, 北京 100084)

**摘要:**利用蚀刻硅技术制造的微机械构件,由于特殊的制作工艺而需要对其材料的杨氏模量进行测量。这是随微机械技术的产生而提出的一个新课题。文章综述了已有的测量微机械材料杨氏模量的方法。在此基础上,提出了用声激励谐振法和瞬态激励法来测量微机械材料的杨氏模量,这两种方法具有测试装置简单、测量容易、精度高等特点。

**关键词:**微机械材料; 杨氏模量; 声激励; 瞬态激励

**中图分类号:** TB321 **文献标识码:** A

声激励谐振测量法和瞬态激励测量法。

## 1 引言

人们在认识宏观世界的同时,也在不断地探索微观世界。60年代初,人们开始利用蚀刻硅技术制造微机械构件或装置。目前已有用蚀刻硅技术制造的各种微梁、微膜、以及微齿轮、微弹簧、微型刀具等微机械构件。随后,人们又把控制微机械构件运动的电子系统与这些微机械构件集成于一体,组成微电子机械系统,从而推动了微型传感器、微型智能机器人和微型手术器等微控装置的发展。微电子机械系统已经在工业、国防、生物工程等领域得到了迅速的应用<sup>[1]</sup>。

随着硅材料微机械构件的产生,人们对其材料的机械性能(如杨氏模量、硬度等)的测量也开始进行了研究。事实上,这一研究工作早在蚀刻硅技术刚用于生产半导体器件时就已经开始了。因为人们发现,硅在热氧化时其界面层的二氧化硅呈压缩状态,因而使界面层材料产生应力。当把硅蚀刻掉,留下的二氧化硅层也就具有不同的杨氏模量。此外,为了增强某些硅微机械构件的机械性能,需要对它的表面进行处理,以便生成如二氧化硅、碳化硅、氮化硅一类物质,用于微型手术刀具等机械性能要求较高的场合。在这些情况下都需要进行杨氏模量的测试。

本文首先综述了微机械材料杨氏模量的静态应变测量法和静电激励谐振测量法,然后提出了

## 2 静态应变测量法

早在1965年, Jaccding 和 Schlegel 提出了两种用于测试蚀刻硅构件中 Si-SiO<sub>2</sub> 界面层应力的方法,分别称为“气球”技术和“横梁”技术<sup>[2]</sup>。它们都属于静态应变测量法。

“气球”技术如图1(a)所示。在一块抛光的硅材料一侧表面按规定的温度和时间生成一层二氧化硅膜(厚度为0.2 μm至2 μm)。然后取一个窗口(3 mm×10 mm)。把其中的硅蚀刻掉,只留下二氧化硅膜。将窗口置于一个空腔管道的端部。把一定压力的空气通入空腔管道中,使二氧化硅膜产生“气球”状鼓起。通过精确测量在不同空气压力下二氧化硅膜鼓起的曲率半径,便可计算出二氧化硅膜的杨氏模量。

“横梁”技术如图1(b)所示。在一根硅梁(长、宽尺寸为15 mm×2 mm,厚度小于0.05 mm)的一侧表面生成一层二氧化硅膜(厚度为0.2 μm至2 μm)。由于二氧化硅膜界面层的应力使硅梁产生弯曲。将梁的一端固定在基准平面上,另一端则向上弯曲。通过测量硅梁弯曲的曲率半径来计算硅梁材料的杨氏模量。此时的硅梁为复合材料梁(Si-SiO<sub>2</sub>),在硅的杨氏模量已知的条件下,就可求出二氧化硅层材料的杨氏模量。

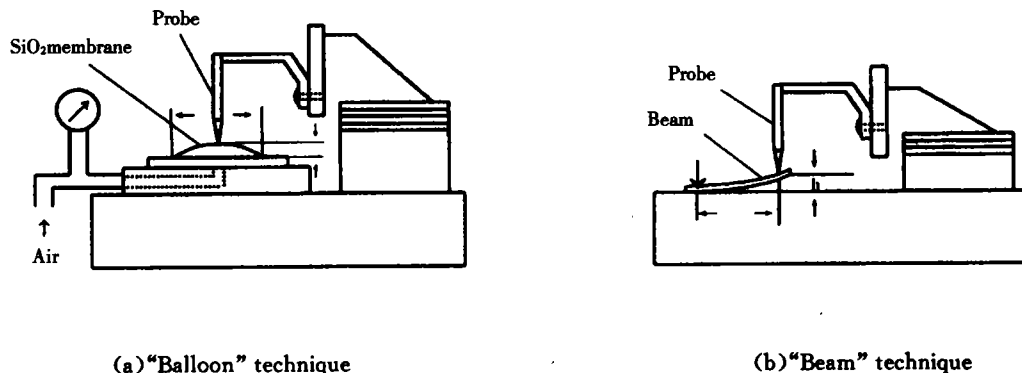


Fig. 1 Static measurement of the strain for micro-machined materials

上述两种技术虽然都能测量微机械材料在不同蚀刻条件下界面材料的杨氏模量,但均有一定的不足之处。首先,样品的制作及实验装置的建立都十分困难;其次,样品特别的易脆裂和变形过程中易出现褶皱等给测量带来了极大的不便和误差。

### 3 静电激励谐振测量法

1979年,Petersen 和 Guarnieri 提出了利用静电激励谐振法来测量微机械材料的杨氏模量<sup>[3]</sup>,如图2所示。

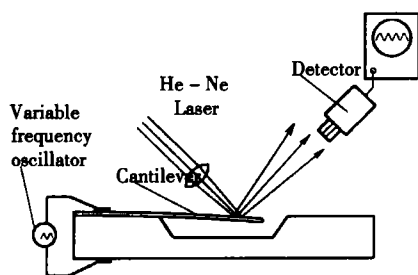


Fig. 2 Young's modulus measurement of the micro-machined materials by using electrostatically-excited method

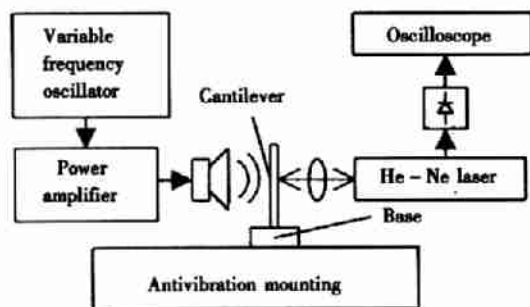
把各种被测微机械材料分别做成悬臂梁,这些悬臂梁是在不同蚀刻条件下(干法或湿法)或用各种不同材料沉积生成的膜,如二氧化硅、碳化硅、氮化硅膜等。长度和宽度分别在 $120\ \mu\text{m}$ 和 $35\ \mu\text{m}$ 以下,厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 至 $0.9\ \mu\text{m}$ 不等。在静电激励下使悬臂梁产生振荡。振荡的检测是通过测量一束聚集的激光在悬臂梁端部的反射来实现的。振幅最大时的频率就是悬臂梁的自然谐振频率。

率。通过它并利用公式来计算出悬臂梁材料的杨氏模量。静电激励谐振法和静态应变法相比较,其最大的优点是避免了对被测样品的微小变形直接进行测量。但必须为悬臂梁镀上金属电极,以便接入激励电源。而金属镀层使悬臂梁成了一个复合材料梁。实际金属镀层的厚度非常小,以便尽可能地减小、直至可以忽略对悬臂梁材料杨氏模量测量的影响。

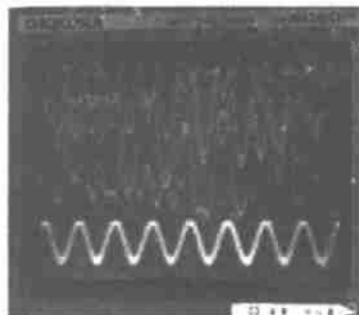
### 4 声激励谐振测量法

声激励谐振法也是一种动态测量法,是我们国家自然科学基金资助下研制开发的。如图3(a)所示。被测材料样品也做成悬臂梁。在声波激励下使悬臂梁产生振荡。确定悬臂梁的尺寸以便使它的自然谐振频率处在声频范围之内。声激励谐振法用一个可调频率的声波直接靠近悬臂梁使之产生谐振,谐振时的声波频率就是悬臂梁的自然谐振频率。然后通过有关的公式计算出被测悬臂梁材料的杨氏模量。声激励谐振法比静电激励法更为简单,操作起来也十分方便。悬臂梁振荡的检测是由一台 He-Ne 激光器完成的。其原理相当于一台激光干涉仪<sup>[4]</sup>。

激励源的信号应采用正弦波。从低到高逐渐调整声波的频率,同时注意观察悬臂梁是否振荡。一旦悬臂梁发生振荡,便通过频率微调使悬臂梁的振幅达到最大。而此时的激励信号频率就等于悬臂梁的自然谐振频率。图3(b)所示为某一被测硅材料悬臂梁在声激励下达到最大振幅时的振荡波形(屏幕上方曲线)。而此时的激励信号(屏幕下方曲线)频率为 $1.54\ \text{kHz}$ 。所以悬臂梁的自然谐振频率也为 $1.54\ \text{kHz}$ 。



(a) Schematic diagram of the measurement system



(b) The waveforms of the vibrating cantilever and excited signal

Fig. 3 Young's modulus measurement of the micro-machined materials by using acoustically-excited method

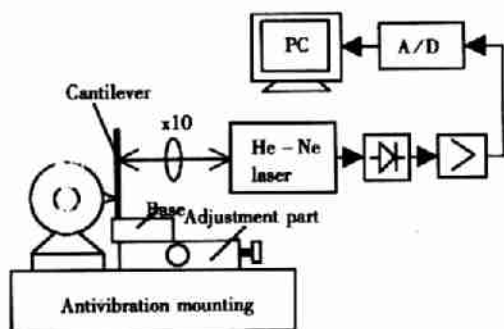
根据悬臂梁固有频率  $f_1$  的计算公式<sup>[5]</sup>  $f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho S L^3}}$ ，就可以求出被测材料的杨氏模量  $E$ 。式中， $S$  为悬臂梁截面积 ( $a \times b$ )， $I$  为截面绕其转动的惯性矩，对于矩形截面， $I = \frac{1}{12} ab^3$ ， $a$ 、 $b$  分别为悬臂梁的宽和厚， $L$  为悬臂梁的长， $\rho$  为材料的密度。实验中的悬臂梁材料为硅。硅的密度为  $2.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。悬臂梁长、宽、厚分别为 20.5 mm、1.5 mm 和 0.45 mm。  $f_1$  用 1.54 kHz 代入，经计算，被测悬臂梁材料的杨氏模量  $E$  为  $1.884 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。

根据悬臂梁固有频率  $f_1$  的计算公式<sup>[5]</sup>  $f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho S L^3}}$ ，就可以求出被测材料的杨氏模量  $E$ 。式中， $S$  为悬臂梁截面积 ( $a \times b$ )， $I$  为截面绕其转动的惯性矩，对于矩形截面， $I = \frac{1}{12} ab^3$ ， $a$ 、 $b$  分别为悬臂梁的宽和厚， $L$  为悬臂梁的长， $\rho$  为材料的密度。实验中的悬臂梁材料为硅。硅的密度为  $2.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。悬臂梁长、宽、厚分别为 20.5 mm、1.5 mm 和 0.45 mm。  $f_1$  用 1.54 kHz 代入，经计算，被测悬臂梁材料的杨氏模量  $E$  为 1.884

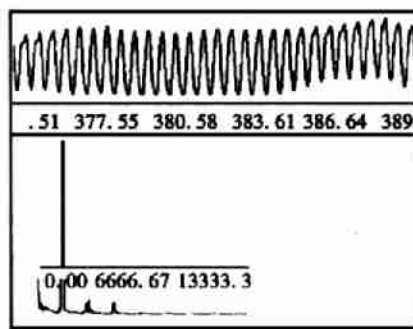
经计算，被测悬臂梁材料的杨氏模量  $E$  为 1.884

#### 4 瞬态激励测量法

瞬态激励法也是我们研制开发的一种动态测量法。当一个弹性物体受到瞬态碰击时，都会产生一个短暂的振荡过程。其振荡过程在开始时是受迫的，然后过渡到自由状态，最后趋于停止。瞬态碰击激励装置实验系统如图4(a)所示。



(a) Schematic diagram of the measurement system



(b) The waveform and frequency analysis of vibrating cantilever at the nature frequence

Fig. 4 Young's modulus measurement of micro-machined materials by using instantly-excited method

如图所示，实验系统由两部分组成，一部分对被测构件（也做成悬臂梁）进行瞬态碰击激励，使之产生一个短暂的振荡；另一部分是对悬臂梁的振荡信号进行检测和处理，以便求出悬臂梁处于自由振荡状态下的频率。当被测悬臂梁的尺寸太小时，采用碰击基座的方法使悬臂梁产生振荡。悬臂梁固定在基座上，基座经由一个二维微调装置

固定在防震台上。基座的质量相对于悬臂梁来说为极大，因而不影响悬臂梁的自然谐振频率。瞬态激励装置的动力部件为一台微型直流调速电动机。在其输出轴的前端，沿轴向粘接了一个极细的碰针。电动机每转动一周，碰针就对悬臂梁进行一次瞬态碰击。通过二维微调装置可以调整碰击强度，从而控制悬臂梁的振荡幅度和衰减时间。实验

中电动机的转速为 $2\pi\text{rad/s}$ ,而悬臂梁完成一次衰减振荡的过程约300ms。

瞬态激励时悬臂梁振荡信号的检测和声激励时的检测方法完全一样。

图4(b)所示为悬臂梁处于自由振荡阶段时的信号波形及频谱图。从波形来看,此时的悬臂梁完全处于单一频率的正弦振荡。从频谱图上来看,2 kHz 谐波的幅值极大,这一频率就是被测硅悬臂梁处于自由振荡下的自然谐振频率。

知道了被测硅悬臂梁的自然谐振频率,就可以计算出其材料的杨氏模量。所用的公式以及计算方法和声激励测量时完全一样。实验中悬臂梁长、宽、厚尺寸为 $18.2\text{ mm} \times 1.26\text{ mm} \times 0.45\text{ mm}$ 。悬臂梁材料为硅。自然谐振频率为2 kHz。经计算,被测悬臂梁材料的杨氏模量为 $1.935 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$ 。这和公布的硅材料杨氏模量 $1.9 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$ 十分接近。

## 5 结 论

本文综述了已有的用于微机械材料的杨氏模量测量方法。重点介绍了自行开发研制的声激励谐振测量法和瞬态激励法两种用于微机械材料杨氏模量的测量方法。这两种方法都将微机械构件做成悬臂梁形式。前者利用声激励的方法使悬臂梁产生谐振。然后根据它的谐振频率并利用现有的计算公式即可求出被测微机械材料的杨氏模量;后者利用瞬态碰击激励的方法使悬臂梁产生一个短暂的衰减振荡。用计算机将该振荡过程记录下来,并找出处于自由振荡时的谐振频率。然后利用现有的计算公式即可求出它的杨氏模量。

声激励谐振测量法和瞬态激励法都具有结构简单、测量精度高等优点。因而应用范围广,可作为一种常规的微机械材料杨氏模量测量方法。

### 参考文献:

- [1] Sastry S S, Cohn M, Tendick F. Mini-robotics for remote, minimally invasive surgery[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1997,21:305-316.
- [2] Petersen K E, Guarnieri C R. Young's modulus measurements of thin films using micromechanics[J]. J. Appl Phys, 1979,50(11):6761-6766.
- [3] Jaccodine R J, Schlegel W A. Measurement of strains at Si-SiO<sub>2</sub> interface[J]. J. Appl Phys, 1966,37(6):2429-2434.
- [4] 顾利忠,蔡庆胜,胡轶. 光激励微型悬臂梁谐振器[J]. 应用激光,1991,11(5):214-216.
- [5] 何祚辅,赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京:国防工业出版社,1981. 178.

## Young's modulus measurement for micro-machined material

GU Li-zhong, SU Fei, ZHAO Jie, ZHANG Yi-heng

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** It is necessary to measure Young's modulus of micro-machined materials because of the special manufacture process by using silicon etching technique. This is a new theme proposed with the appearance of micro-machined parts. In this paper the published methods of Young's modulus measurement for micro-machined materials are summarized, after that, both acoustically-excited and instantly-excited methods of Young's modulus measurement for micro-machined materials are proposed. These two methods have some features such as simplifying the test devices, easy operation and high accuracy.

**Key words:** Young's modulus; micro-machined material; acoustically-excited; instantly-excited

**作者简介:** 顾利忠(1945—),男,上海市人。副教授,1970年3毕业于清华大学动力机械系热工量测及自动控制专业,后留校在自动化系任教。从事传感器、仪表方面的教学和科研工作,自1986年以来从事基于MEMS(微电子机械系统)的微型传感技术。