

# 声激励共振法测量微机械材料的杨氏模量

顾利忠, 左铭旺, 苏菲

(清华大学自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 微机械材料的杨氏模量测量是随着微机械构件的产生而提出的一项新技术。文章综述了已有的测量微机械材料杨氏模量的方法。提出了用声激励共振法来测量微机械材料的杨氏模量。这种方法具有测试装置简单、测量容易、精度高等特点。

**关键词:** 杨氏模量; 声激励; 微机械材料

**中图分类号:** O424 **文献标识码:** A

## Acoustically-excited method for Young's modulus measurement of micro-machined materials

GU Li-zhong, ZUO Ming-wang, SU Fei

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

**Abstract:** Young's modulus measurement of micro-machined materials is a new technique proposed with the appearance of the micro-machined parts. This article summarized the published methods for Young's modulus measurement of the micro-machined materials, and proposed an acoustically-excited method for measurement of the micro-machined materials. This method has some features such as testing devices simple, easy operation and high accuracy.

**Key words:** Young's modulus; acoustically-excited; micromachined materials

### 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年代开始,人们就利用蚀刻硅技术制造微机械构件或装置。近10多年来不仅发展很快,而且成就显著。目前已有各种用蚀刻硅技术制成的微梁、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,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<sup>[1]</sup>。目前,微电子机械系统已经在工业、国防、生物医学工程等领域得到了迅速的应用<sup>[2]</sup>。

随着硅材料微机械构件的产生,人们对它的机械性能(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半导体器件时就已开始了。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,因而使界面层的材料产生应力。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,为增强某些硅微机械构件的机械性能,需要对它的表面层进行处理,以便生成如二氧化硅、碳化硅、氮化硅一类物质,用于如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量。

本文首先对静态应变法和静电激励共振法这两种微机械材料杨氏模量测量方法进行简单的介绍,然后提出了用声激励共振法来测量微机械材料的杨氏模量,并对实验结果进行了分析。

### 2 静态应变和静电激励共振测量法

#### 2.1 静态应变测量法

1965年, Jaccoding 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>[3]</sup>。这两种技术都

收稿日期: 1999-11-06; 修订日期: 1999-12-15

国家自然科学基金资助项目(批准号: 69885005)

作者简介: 顾利忠(1945-),男,上海市人,副教授,研究方向: 微电子机械系统及其应用。

属于静态应变测量法。“气球”技术是这样的：在一块抛光的硅材料表面按规定的温度和时间生成一层二氧化硅膜（厚度为  $0.2\mu\text{m}$  至  $2\mu\text{m}$ ），然后取一个窗口（ $3\text{mm}\times 10\text{mm}$ ），把其中的硅蚀刻掉，只留下一层二氧化硅膜，并把它置于一个空腔管道的端部。将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，便可计算出它的杨氏模量；“横梁”技术是这样的：在一根硅梁的一侧表面生成一层二氧化硅膜。由于二氧化硅膜界面层的应力使硅梁产生弯曲。通过测量硅梁弯曲的曲率半径来计算杨氏模量。此时的硅梁为复合材料梁（ $\text{Si}-\text{SiO}_2$ ），它的长宽尺寸分别为  $15\text{mm}$  和  $2\text{mm}$ ，硅梁的硅层厚度一般小于  $0.05\text{mm}$ ，它的二氧化硅膜厚度为  $0.2\mu\text{m}$  至  $2\mu\text{m}$ 。在硅的杨氏模量已知的条件下，利用复合梁杨氏模量计算公式即可求出二氧化硅层材料的杨氏模量。上述两种方法虽然都能测量微机械材料在不同蚀刻条件下界面层的杨氏模量，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。此外，要测量如此小的变形也是一件非常困难的事情。

## 2.2 静电激励共振测量法

1979年，Petersen 和 Guarnieri 提出了用共振法来测量悬臂梁材料的杨氏模量<sup>[4]</sup>。被测悬臂梁材料是在不同蚀刻条件下（干法或湿法）以及用各种不同的材料沉积生成的膜，如二氧化硅、碳化硅、氮化硅膜等。其长度和宽度分别在  $120\mu\text{m}$  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动，通过测量其简正振动频率来计算出被测悬臂梁材料的杨氏模量。动态共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完全忽略它对悬臂梁材料杨氏模量测量的影响。

## 3 声激励共振测量法

本文提出的声激励共振法也是一种动态测量法。被测材料样品也做成悬臂梁。确定悬臂梁的尺寸以便使它的弯曲简正振动基频处在声频范围之

内。声激励共振法用可调频率的声波直接靠近悬臂梁使之产生共振，共振时的最低声波频率就是悬臂梁的弯曲简正振动基频。然后通过有关的公式计算出被测悬臂梁材料的杨氏模量。声激励共振法比静电激励法更为简单，操作起来也十分方便。

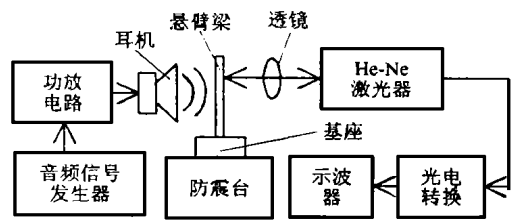


图1 声激励装置及振动信号检测系统图

图1所示为悬臂梁的声激励装置及振动信号检测系统图。

图1中，悬臂梁的声激励装置部分包括一台标准音频信号发生器（ $0\text{Hz}-2000\text{Hz}$ ）、功放电路和一个耳机。耳机发出的声波对准悬臂梁的长宽侧。悬臂梁把声能转换成振动的机械能。悬臂梁经由一个基座固定在防震台上。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简正振动频率。

悬臂梁振荡信号的检测是通过一个 He-Ne 激光器来完成的。其原理相当于一台激光干涉仪<sup>[5]</sup>。该激光器发出的光经 10 倍显微物镜聚焦于悬臂梁的一侧，被反射后馈入到激光器的激光腔中。这样，悬臂梁与激光腔本身又构成了另一只复合腔结构的激光器，其中悬臂梁与激光器前腔镜构成的 F-P 腔，其反射率与悬臂梁表面的反射率、激光器前腔镜反射率和 F-P 腔长引起的光相位差有关。根据激光干涉仪原理，激光器后向输出光功率正比于前腔的反射率。故悬臂梁的振动使激光器后向输出光功率产生变化。将该变化的光功率经光电接收转换并放大后，在示波器上就可显示出悬臂梁振动的波形。

激励源信号应采用连续正弦波。当由低到高逐渐调整音频信号发生器的信号频率的同时，注意观察悬臂梁是否振动。一旦悬臂梁发生振动，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等于悬臂梁的弯曲简正振动频率。图2所示为某一被测硅悬臂梁在声激励下达到最大振幅时的振动波形（屏幕上方曲线）。而此时的激励信号（屏幕下方曲线）频率为  $1.54\text{kHz}$ 。所以悬臂梁的弯曲简正振动频率也为  $1.54\text{kHz}$ 。

当采用方波作为激励源信号时因其中的高次谐

波的作用, 会使悬臂梁在某一个高次谐波激励下产生共振。图 3 所示为悬臂梁在频率为 221Hz 方波激励下的共振波形(屏幕上方曲线), 此时悬臂梁的弯曲简正振动频率也为 1.54kHz 与 221Hz 方波激励信号的 7 次谐波(1.547kHz)相当。但高次谐波激励下的悬臂梁振幅很小。虽然图 3 中的激励信号(方波)与图 2 中的激励信号(正弦波)峰—峰值相同, 但此时悬臂梁在弯曲简正振动基频下的振幅却很小(屏幕上方曲线中迭加在 221Hz 信号上的部分)。

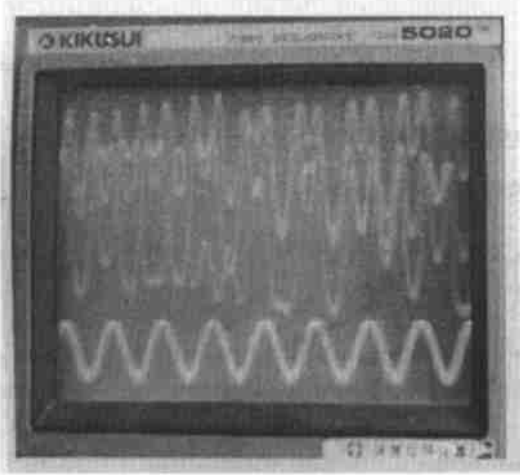


图 2 正弦激励时悬臂梁共振波形



图 3 方波激励时悬臂梁谐振波形

#### 4 声激励实验结果

声激励实验中的悬臂梁由硅材料制成, 其长度  $L=20.6\text{mm}$ , 宽度  $a=1.5\text{mm}$ , 厚度  $b=0.45\text{mm}$ 。用声激励的方法测得悬臂梁的弯曲简正振动基频为

1.54kHz。

根据悬臂梁弯曲简正振动基频  $f_1$  的计算公式<sup>[9]</sup>:

$$f_1 = \frac{(1.875)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho_v S}} \quad (1)$$

可以得到, 被测材料的杨氏模量  $E$  为:

$$E = \frac{(2\pi L^2)^2 f_1^2}{(1.875)^4 I} \rho_v S \quad (2)$$

两式中  $S$  为悬臂梁截面积( $a \times b$ ),  $I$  为截面绕截面中轴转动的惯性矩。对于矩形截面,  $I = (1/12) ab^3$ ,  $\rho_v$  为硅材料密度( $2.33\text{g/cm}^3$ )。

将前面测得的弯曲简正振动基频  $f_1$  用 1.54kHz 代入, 经计算, 被测悬臂梁的杨氏模量为  $1.9 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 。这和公布的硅材料杨氏模量  $1.9 \times 10^{11} \text{N/m}^2$  相同。

#### 5 结束语

微机械构件材料的杨氏模量测量是随着微机械构件的产生而提出的一项新的技术。利用蚀刻硅技术制造的微机械构件, 由于制造的工艺和处理的方法不同, 需要对其材料的杨氏模量进行测量。以便确定它的机械性能。把被测微机械材料做成悬臂梁, 然后采用声激励的方法使悬臂梁产生共振。再根据它的共振频率并利用现有的计算公式求出被测微机械材料的杨氏模量。声激励共振法具有测试装置简单、悬臂梁起振容易、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的测量方法。

#### 参考文献

- [1] 王渭源, 谭淞生, 陆德仁等. 微电子机械基础技术及其应用[J]. 微米纳米科学与技术, 1995, 1: 15-22.
- [2] Sastry S S, Cohn M, Tendick F. Mini-robotics for remote, minimally invasive surgery[J]. Robotics and Autonomous Systems 1997, 21: 305-316.
- [3] Jaccodine R J, Schlegel W. A. Measurement of Strains at Si-SiO<sub>2</sub> Interface[J]. J. Appl. Phys., 1966, 37: 2429-2434.
- [4] Petersen K E, Guarnieri C R. Young's modulus measurements of thin films using micromechanics[J]. J. Appl. Phys., 1979, 50: 6761-6766.
- [5] 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: 214-216.
- [6] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 178.