

微机电系统 (MEMS) 中薄膜力学性能的研究

The Study on Mechanical Properties of Thin Film in Micro-electromechanical Systems

陈光红¹ 吴清鑫¹ 于映² 罗仲梓³

1 苏州市职业大学 (江苏苏州 215104) 2 福州大学 (福州 350002)

3 厦门大学萨本栋微机电研究中心 (福建厦门 361005)

摘要 主要介绍微机电系统 (MEMS) 中几种测量薄膜力学性能的方法, 如纳米压入法、单轴拉伸法、基底弯曲法、微旋转结构法, 比较了各种方法的优缺点。这对 MEMS 器件的设计与研究具有重要意义。

关键词 薄膜 力学性能 微旋转结构法 MEMS

Abstract: Some methods of measuring mechanical properties of thin film in Micro-electromechanical systems are introduced including nanoindentation, single axial tension, wafer curvature, micro rotating structure, etc. Their advantages and disadvantages are compared. It is useful for the design and researchment of MEMS devices.

Key words: Thin film Mechanical properties Micro rotating structure MEMS device

1 引言

微机电系统 (Micro Electro-Mechanical System, MEMS) 是由电子和机械元件组成的集成微器件、微系统; 是微型机构、传感器、执行器以及信号处理和电路甚至接口、通讯和电源等集于一体的微型器件或系统。薄膜是在 MEMS 技术中应用最广的材料形态, 经常被制作成 MEMS 器件中的微机械结构。薄膜材料的力学性能, 如弹性模量、残余应力、泊松比、硬度等, 不仅是 MEMS 设计的重要参数, 也是影响 MEMS 器件性能的重要因素。薄膜材料在 MEMS 中表现出来的尺度效应、表面效应、隧道效应都可能超出宏观力学和物理规律范畴, 经典的力学性能测试方法已经很难适用于薄膜材料的研究。而且薄膜材料的力

后处理条件有密切关系。对薄膜的力学性能深入学习与薄膜沉积的方法、沉积的条件及热处理等研究, 是优化 MEMS 设计和提高 MEMS 器件的可靠性和延长 MEMS 器件寿命的关键。

2 薄膜力学性能研究的方法

人们对薄膜力学性能的研究, 早在 19 世纪末就已经开始。从那时起, 不断出现新的测试技术和提出新的测试理论, 其中包括 纳米压入法 (Nanoindentation); 单轴拉伸法、基底弯曲测量法等。

2.1 纳米压入法

纳米压入技术能连续记录加载与卸载期间载荷与位移的变化, 特别适合于薄膜材料力学性能的测量, 是目前在薄膜力学性能测试技术中较为广泛应用的一种测试技术。纳米压入技术能测量薄膜的弹性模量 E 、硬度 H 以及薄膜的蠕变行为等。其理论基础是 Sneddon 所提出的关于轴对称压头载荷与压入深度之间关系的

本项目由国家基金青年基金 (60301006), 福建省自然科学基金 (A0310012) 和国家留学基金项目资助

弹性解析分析, 表示为:

$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (1)$$

式中: P 为载荷, h 为压头压入的深度, $S = dP/dh$ 为试验卸载曲线的薄膜材料刚度 (如图 1 所示), A 是压头的接触面积 (投影面积, 如图 2 所示), E_r 为约化弹性模量, 其定义为:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_f)}{E_f} + \frac{(1-\nu_i)}{E_i} \quad (2)$$

式中: E_f 、 ν_f 分别为待测材料的杨氏模量和泊松比; E_i 、 ν_i 分别为压头的杨氏模量和泊松比。被测材料的硬度 H 定义为:

$$H = P_{max}/A \quad (3)$$

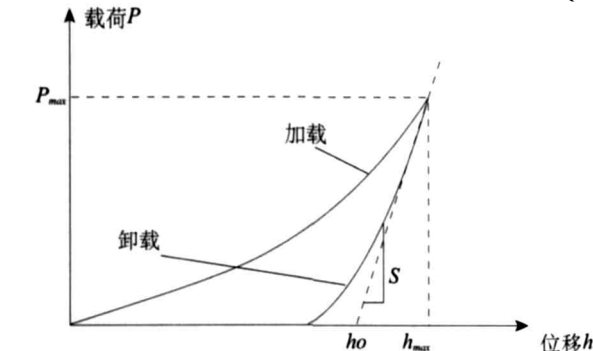


图 1 纳米压痕测试中的载荷图

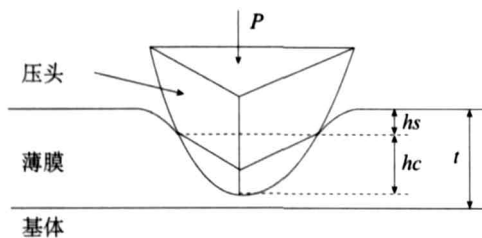


图 2 压头压入薄膜时薄膜变形示意图

当 A 、 dP/dh 、 P_{max} 确定后, 可根据公式 (1)、(2) 和 (3) 分别求出材料的弹性模量 E 和硬度值 H 。

2.2 单轴拉伸法

单轴拉伸法的测量原理与传统的块状材料的单轴拉伸法相似, 需要分别测出位移量和载荷分量。单轴拉伸试验是获得材料应力与应变关系最直接的实验方法, 也是符合美国 ASTM 标准 E 111 关于“杨氏模量、剪切模量、弦向模量的标准测试方法”。薄膜的单轴拉伸实验是根据传统的力学理论基础, 无过多的前提假设, 从而减小因理论处理而引起的实验误差。薄膜拉伸装置大致可分为两类, 即“软拉伸装置”和“硬

拉伸装置”。前者是指加载速率恒定测量伸长率的一类薄膜拉伸装置; 后者是指伸长率恒定测量外加载荷的一类薄膜拉伸装置。

2.3 基底弯曲法

由于薄膜的残余应力会导致基底的弹性弯曲, 通过测量薄膜沉积前后基底的挠度或曲率半径的变化, 可以测得薄膜的平均残余应力。基底弯曲法可分为两种实验方法: 圆盘法和悬臂梁法。

(1) 圆盘法

1909 年, Stoney 最早利用基底曲率的变化测量了电镀薄膜的残余应力, 并提出薄膜残余应力与基底曲率变化的关系:

$$\sigma = \frac{E t_s}{6(1-\nu) t_f} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0} \right] \quad (4)$$

其中:

E 、 ν 分别表示基底材料的弹性模量、泊松比;
 t_s 、 t_f 分别是基底和薄膜的厚度;
 R_0 、 R_1 分别表示基底在薄膜沉积前后的曲率半径。

(2) 悬臂梁法

悬臂梁法是通过测量悬臂梁自由端的位移 (挠度) 或悬臂梁的曲率半径, 如图 3 所示, 薄膜的平均残余应力与悬臂梁的挠度的关系为:

$$\sigma = \frac{E_s t_s^2}{3(1-\nu_s^2) L^2} \frac{\delta}{t_f} \quad (5)$$

式中:

E_s 、 ν_s 和 t_s 分别表示基底的弹性模量、泊松比和厚度;
 L 、 δ 为悬臂梁的长度和挠度;
 t_f 为薄膜的厚度。

这种方法要求基底的长度应比宽度大 3~15 倍; 目前测量梁的弯曲的最灵敏的方法是电感法和电容法。

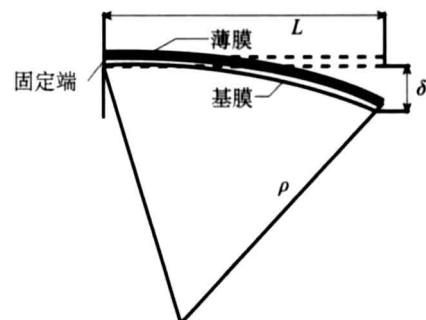


图 3 悬臂梁法测量残余应力的示意图

2.4 微旋转结构法测量薄膜的残余应力

利用微旋转结构测量薄膜的残余应力的方法最早是 Goosen 等提出的。Xin Zhang 等用有限元 ABAQUS 软件对微旋转结构进行模拟仿真,优化结构设计,提出完整的测试薄膜的残余应力的方案,进一步完善了微旋转结构法。微旋转结构法与基底弯曲法相比,最大的特点是能够在线 (in situ) 测量薄膜的残余应力;并且微旋转结构易于制作,实验条件要求也不高。

2.4.1 微旋转结构法的测量原理

如图 4 (a) 所示,微旋转结构,原先在底下的牺牲层的作用下是平衡的。而当底下的牺牲层被释放后,固定梁的残余应力也同时被释放出来,使得固定梁伸缩(当残余应力为张应力时,固定梁收缩,反之,为伸长),通过固定梁的颈部引起旋转梁的偏转,如图 4 (b) 所示。

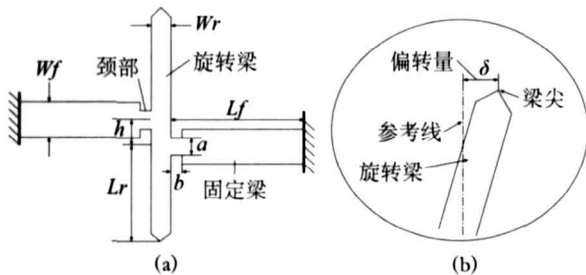


图 4 微旋转结构的示意图

当薄膜的残余应力为压应力时,旋转梁尖向右偏转;而当薄膜的残余应力为张应力时旋转梁尖向左偏转,根据旋转梁尖的偏转方向就可判断薄膜的残余应力是压应力还是张应力。又根据线形弹性力学的原理可知,旋转梁尖端的偏转量 δ 与 σ_{res}/E 成正比(σ_{res} 为薄膜的残余应力, E 为薄膜的弹性模量),所以可以把旋转梁尖端的偏转量 δ 与 σ_{res}/E 关系表示为:

$$\delta = f \sigma_{res} / E \quad (6)$$

f 为微旋转结构的结构修正系数,它取决于微旋转结构的几何形状, f 与旋转梁尖端偏转量 δ 具有相同的量纲,都是长度的单位。根据公式(6)可写出薄膜残余应力的计算公式:

$$\sigma_{res} = E \delta / f \quad (7)$$

在薄膜的弹性模量 E 已知的情况下,通过对微旋转结构的模拟仿真可得出结构修正系数 f ,利用高倍显微镜测量出旋转梁尖端的偏移量 δ ,再根据公式(7)

就可计算出薄膜残余应力。

3 几种薄膜力学性能研究方法的比较

总体来讲, MEMS 中测量薄膜性能的方法有多种,均有各自的优点与不足,其比较如表 1 所示。

表 1 MEMS 中几种测量薄膜性能方法的比较

测量薄膜性能的方法	优点	缺点
纳米压入法	具有极高的力学分辨率和位移分辨率	难以精确确定接触深度和压头的接触面积等
单轴拉伸法	测量原理与传统的块状材料的单轴拉伸法相似	实验时可能会引起试样的机械损伤
基底弯曲法	直观、简单和实验条件容易实现	只能测量薄膜的平均残余应力,测量的灵敏度依赖于基底的厚度等
微旋转结构法	能够在线 (in situ) 测量薄膜的残余应力;并且微旋转结构易于制作	微旋转结构的制作过程可能影响到薄膜的残余应力

4 结论

本文介绍了 MEMS 中几种测量薄膜性能的方法,并比较了其优缺点。关于 MEMS 中薄膜性能的研究对成功制作器件具有指导意义。

参考文献

- 1 李恒德,肖纪美.材料表面与界面.清华大学出版社,1990.
- 2 Sneddon IN. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussiness problem for a punch of arbitrary profile. Int. J. Eng. Sci. 1965 3.
- 3 Neugebauer CA. Tensile properties of thin evaporated gold film. Appl. Phys., 1960, 31.
- 4 D.S. Campbell, Handbook of Thin Film Technology, ed. Maissel, L.I. and Glang, R. McGraw-Hill, New York, 1970, p123.
- 5 Beams J M, et al. Structure and Properties of thin films. In: Neugebauer C A, ads. New York: Wiley & Sons. 1959.

作者简介:陈光红,硕士,主要从事 RF MEMS 技术、薄膜研究。