

# 基于局部基底弯曲法的高灵敏度薄膜 应力测试技术\*

王莎莎<sup>1</sup> 陈 兢<sup>1,†</sup> 栗大超<sup>2</sup> 黄玉波<sup>2</sup> 李志宏<sup>1</sup>

(1 北京大学微电子技术研究院 微米/纳米加工技术国家重点实验室, 北京 100871)

(2 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 针对 MEMS(micro-electro-mechanical system)和 NEMS(nano-electro-mechanical system)对薄膜应力测试的要求, 开发了一种新型高灵敏度薄膜应力测试技术, 使用自行搭建的准纳米光学干涉测试系统, 利用局部基底弯曲来检测薄膜的内应力. 该方法不仅保留了传统基底弯曲法的所有优点, 而且消除了其系统误差. 使用 ANSYS 对测试结构进行了模拟和优化, 对于 30nm 厚的薄膜, 应力检测的分辨率为 1.5MPa, 优于目前国际上的相关报道. 本测试结构使用各向异性腐蚀和 DRIE(deep reactive ion etching)完成, 加工工艺简单实用. 文中使用该测试技术对常用 MEMS 薄膜的残余应力进行了测量, 结果与其他测试方法得到的结果基本一致, 测量重复性优于 1%. 该技术可以用于测试纳米级薄膜及超低应力薄膜的内应力.

**关键词:** 微机械系统; 内应力; 纳米级薄膜; 基底弯曲法; 光学干涉测量

**PACC:** 0710C; 0630M

**中图分类号:** TN405

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)06-1129-07

## 1 引言

采用 MEMS 表面微机械加工制备的薄膜往往存在不可忽视的残余内应力. 对于使用这种表面微加工的典型微结构如悬臂梁、微桥和微膜片, 薄膜内应力将直接影响器件的刚度和谐振频率等重要的静、动态设计参数及所设计器件的性能, 甚至导致器件失效<sup>[1]</sup>. 薄膜应力常发生在利用各种技术制备薄膜的过程中. 应力可分为两种: 一种是热应力; 另一种是本征应力. 前者主要是由于膜与其基片之间的热膨胀系数不同引起的, 而后者则与薄膜生长过程密切相关<sup>[1]</sup>.

针对 MEMS 器件的特点, 国外的众多研究机构开展了 MEMS 薄膜应力测试方法和技术的研究, 其中比较有代表性的直接测量方法有 X 射线衍射法和喇曼光谱法. 这两种方法虽然能够直接进行测量局部微小区域的残余应力<sup>[2,3]</sup>, 但其仅适用于结晶态材料的应力测量, 测试设备复杂, 在很多情况下, 无法做到准确测量.

针对上述问题, 国内外研究人员设计了一些能反映应力变化的测试结构, 将一个非常复杂的应力测试简化为结构的几何量测试. 近年来, 人们开发了

许多基于表面微机械加工工艺的平面应力测试结构, 根据测试结构关键点的位移来确定应力的大小. 如环结构、金刚石结构和指针旋转结构测量的是关键点的平面位移; 双端固支梁阵列和悬臂梁测量的是关键点的离面位移<sup>[1,2]</sup>. 但是这些方法都存在一些固有的缺点:

(1) 不准确的变形模型对测量结果影响极大. 例如对最简单的悬臂梁结构, 基体的变形往往没有考虑, 而悬臂梁支撑端的边界条件并非固支条件(挠度为零、转角为零). Baker<sup>[4]</sup>等的结果表明, 若不考虑基体这一影响, 会给结果带来很大的误差, 有时高达 50%, 甚至更高. 模型更为复杂的平面位移型测试结构这一问题也同样严重.

(2) 不正确的几何尺寸输入也将影响测量结果, 包括微结构的形状尺寸、支撑部分与基底的夹角、过刻蚀等工艺误差, 这些都严重影响了测量精度.

(3) 薄膜应力的求解往往建立在薄膜杨氏模量和泊松比已知的条件下, 而材料的这些力学参数也与工艺条件密切相关, 需要通过一定的测试方法才能准确提取, 或者通过复杂的阵列或者加载进行解耦, 增加了测试的复杂性.

目前使用最广的薄膜应力测试方法是基底弯曲法<sup>[5]</sup>, 它通过光学干涉仪或者表面轮廓仪测量薄膜

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:50535030)

† 通信作者. Email: jchen@ime.pku.edu.cn

2005-10-26 收到, 2005-12-28 定稿

淀积前后圆片的曲率半径的变化,根据 Stoney 公式计算得到薄膜的应力值,方法简单实用,并且应力值与薄膜其他材料参数无关.但这种方法只能测量硅片的平均应力,而且随着膜厚的减小误差增大<sup>[6]</sup>,分辨率也急剧降低,不适于测量厚度小于 100nm 的薄膜<sup>[6]</sup>.

随着纳机电系统(nano-electro-mechanical system)研究的兴起,纳米尺度下结构材料的力学特性的检测也成为研究热点.目前纳米级的薄膜应力的测试报道较少,国外一些学者使用 SEM/TEM/AFM 等设备结合平面位移型测试结构进行了测量,但其设备复杂,并且需要在真空等特殊的环境中操作,严重制约了其应用<sup>[7,8]</sup>.

针对 MEMS 和 NEMS 对薄膜应力测试的要求,本文开发了一种新型高灵敏度薄膜应力测试技术,使用自行搭建的准纳米光学干涉测试系统,利用局部基底弯曲来检测薄膜的残余应力.其结构加工工艺和检测方法简单实用,不仅保留了传统基底弯曲法的所有优点,而且消除了其系统误差,可以用于检测薄膜的局部应力,同时检测精度和灵敏度也得到了极大的提高(对于 30nm 的薄膜其分辨率可达 1.5MPa),该技术可以用于测试纳米级薄膜及超低应力薄膜的残余应力.

## 2 测试结构设计与制作

### 2.1 基底弯曲法误差分析

在薄膜残余应力的作用下,基底会发生挠曲,这种变形尽管很微小,但通过光学干涉仪或者表面轮廓仪,能够测量到挠曲的曲率半径.基底挠曲的程度反映了薄膜残余应力的大小,由 Stoney 公式<sup>[9]</sup>决定:

$$\sigma_f = \left( \frac{E_s}{1 - \nu_s} \right) \times \frac{t_s^2}{6rt_f} \quad (1)$$

式中下标 f 和 s 分别对应于薄膜和基底;  $t$  为厚度;  $r$  为曲率半径;  $E$  和  $\nu$  分别是基底的弹性模量和泊松比.而未经过特殊处理的硅圆片均存在一定的初始弯曲,考虑这种初始形变,残余应力由经过变换的 Stoney 公式决定:

$$\sigma_f = \frac{E_s}{1 - \nu_s} \times \frac{t_s^2}{6t_f} \times \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

其中  $R_2, R_1$  分别为薄膜淀积前后的曲率半径.由(2)式可知,通过测量薄膜淀积前后曲率半径,就可以得到薄膜中的残余应力.利用 Stoney 公式来测量应力的优点在于,它不依赖薄膜的其他机械参数如弹性模量和泊松比,并且方法简单,易于操作及求解,但是在实际操作中仍然存在以下几个问题:

(1)测试灵敏度较低:由于整个硅片较厚(400 ± 10 $\mu$ m),如果待测薄膜很薄或薄膜应力较小时,衬底本身变形很小,从而造成分辨率下降,基底弯曲法通常只用于测试 100nm 以上的薄膜应力,分辨率在 10MPa 左右<sup>[6]</sup>;另一方面,如果薄膜本身内应力很低,则必须淀积一定的厚度才能得到准确的结果.而由(1)式可知曲率半径与衬底的厚度的平方成正比,在测试薄膜厚度一定的情况下,如果衬底越薄则产生相同弯曲变形所需的应力越小,即测试系统的灵敏度越高,薄膜应力的分辨率也越高.

(2)硅片重力的影响<sup>[10]</sup>:应用 Stoney 公式时,硅片应该满足自由边界条件,但这种理想状况是不存在的,硅片必然需要一定的支撑.这时硅片在自身重力下会产生一定的变形,从而对曲率产生一定的影响.在实际操作时,圆片在薄膜淀积前后两次测量时的支撑条件不可能完全一样(由硅片实际的形变决定).在两种不同的支撑条件下,重力对曲率的贡献不一样,其影响不可能完全消除. Preissig 报道了对于 100mm 硅片( $\rho_g = 2.33\text{g/cm}^3 \times 980.7\text{dyn/g}$ ),其上淀积内应力 20MPa,厚度 0.5 $\mu$ m 的薄膜,在稳定支撑的条件下,由重力产生的测量不确定度可达 29%;对于两点支撑,不确定度高达 220%.如果薄膜厚度进一步减小到纳米尺度,这种不确定度会更高.文中指出如果减小衬底的厚度就可以在很大程度上减小重力带来的影响;另外,如果支撑点可重复,即边界支撑条件固定时,重力的影响也可以在两次测量结果的差中被消除.

(3)厚度不均匀带来的影响<sup>[10]</sup>:由 Stoney 公式易知,应力与硅衬底厚度和薄膜厚度密切相关,而由于制作工艺的原因,圆片上淀积薄膜的厚度不均匀是不可避免的. Preissig 同样列举了在 100mm 玻璃片上淀积氮化硅膜的一个算例,膜厚不均匀给测量曲率带来的不确定度可达 27%.而如果测量选取的数据点集中在硅片上一个较小的局部,这种由膜厚不均匀引起的误差将大大减小.

### 2.2 测试结构设计

由上述分析可知,如果减小基底材料厚度,设计固定支撑,并且将测试范围集中在硅片上一个较小的局部,就可以通过测量局部基底弯曲曲率,得到淀积在基底上的薄膜应力.这种局部基底弯曲法不仅灵敏度高,而且能最大程度的减小传统圆片基底弯曲测试方法的误差,但在测试结构设计时仍需考虑以下问题:

(1)应用 Stoney 公式必须满足一定的条件<sup>[11]</sup>,即薄膜厚度要远小于硅衬底厚度.一般衬底厚度需要比薄膜厚度高一个数量级,因此衬底不能减得太薄,考虑到 MEMS 加工中薄膜材料的厚度一般为 1 $\mu$ m 左

右,所以实验中取衬底的厚度为  $15\mu\text{m}$ 。

(2)自由边界,虽然这一点无法完全实现,但可以通过合理的支撑设计,利用折叠梁,减小支撑的刚度,从而最大程度的减小边界变形对测试结果的影响。

(3)测试结构形状的选取,Preissig<sup>[10]</sup>证明了薄膜应力与基底的形状无关,这给结构设计和曲率的测试都带来了很大的方便。

我们设计出的测试结构如下图 1 所示.测试结构为由四根弹簧结构支撑的悬空的圆形或方形结构,且在晶圆上均匀分布.衬底选用  $15\mu\text{m}$  的单晶硅,薄膜材料不限,MEMS 中常用的多晶硅、氮化硅和金属都能适用.其中圆形和方形的悬空结构大小为  $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ .图 2 为结构的剖面图.由于测试结构具有固定支撑,在淀积薄膜前后曲率半径的测试过程中,约束条件相同,这样就可以消除掉重力造成的影响.其次,在  $1\text{mm}\times 1\text{mm}$  的范围内,硅片厚度及淀积薄膜的不均匀性被大大的降低,减小了误差.由于硅片减薄为  $15\mu\text{m}$ ,仅为圆片衬底厚度的  $1/30$ ,根据(1)式,其分辨率大大提高.这种方法在继承了基底弯曲法测试简单、无需解耦的优点,同时大大降低了其系统误差,提高了测试精度和分辨率,具有很大的应用价值。

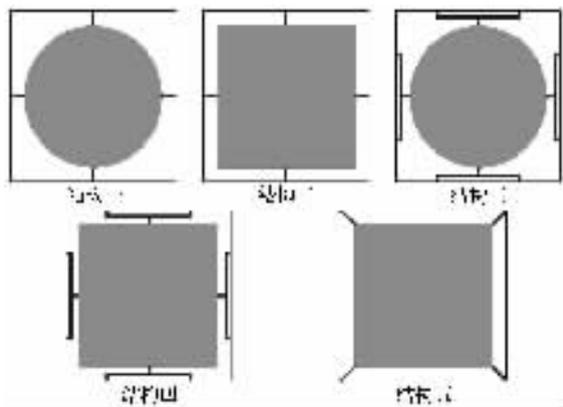


图 1 测试结构示意图

Fig.1 Schematic of five different test structures

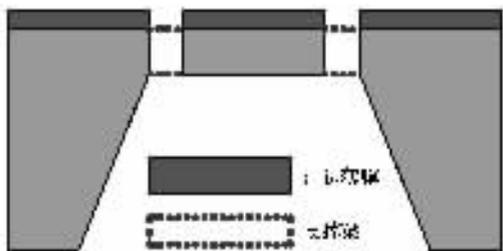


图 2 测试结构剖面图

Fig.2 Cross section of test structure

### 2.3 测试结构的模拟和优化

为了估算非理想的支撑带来的误差并优化结构设计,我们对图 1 中设计的五种测试结构在 ANSYS 软件中进行模拟.图 3 为 ANSYS 模拟结构三的形变图,即直径为  $1\text{mm}$  厚度为  $15\mu\text{m}$  圆形测试结构,覆盖  $1.12\text{GPa}$  应力  $30\text{nm}$   $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜,在薄膜内应力作用下的结构在 Z 方向的形变图.从图 3 中可以看出,测试结构变形后仍然保持着非常理想的球面,径向位移分布非常均匀.同时我们将模拟得到的 Z 方向位移与自由约束下的理想位移进行了比较,计算出了五种测试结构理论上的相对误差,如图 4 所示,横坐标为梁的宽度。

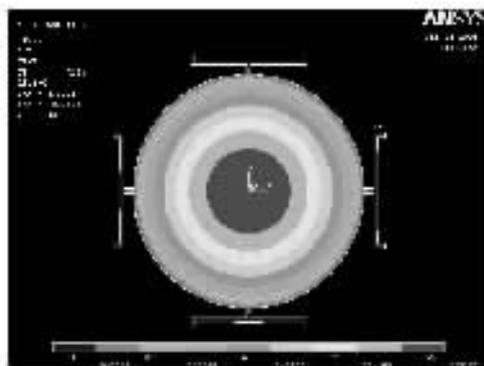


图 3 ANSYS 模拟形变图

Fig.3 Surface profiles of Type-C structure simulated by ANSYS

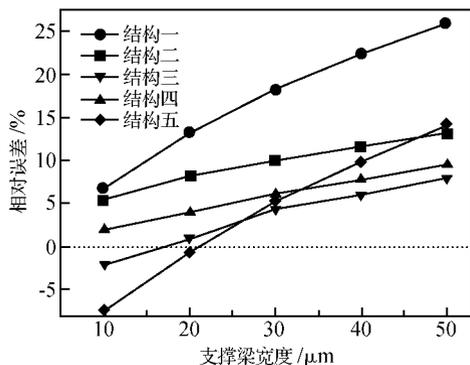


图 4 不同结构的测试相对误差图

Fig.4 Normalized stress deviation of different structures

由图 4 的模拟结果可知,误差随弹簧结构的宽度变宽而增大.这个结果是容易理解的,随着弹簧结构宽度的变大,其刚度随之变大,不易发生弯曲,薄膜的边界所受约束反力越大,偏离 Stoney 公式自由约束的前提越远,因此相对误差也会随之增大。

对于圆形弹簧梁结构(结构三)和方形斜梁结构(结构五),当梁的宽度减小为  $10\mu\text{m}$  时,模拟的相对

误差出现了负值.这是由于在实际工艺工程中得到的结构其支撑梁上仍然存在具有应力的薄膜,在模拟应力下的弯曲时,同样假设支撑梁上存在待测试的薄膜,而这部分薄膜的应力也会引起应变的再分布,如果加以利用,可以对系统误差产生一定的补偿.如结构三的圆形薄膜结构,当梁的宽度为  $20\mu\text{m}$  时误差最小(仅为 1%).

## 2.4 工艺流程

图 5 为测试结构加工的工艺流程图(以  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜为例). (a)在硅片表面 LPCVD 淀积  $300\text{nm}$   $\text{SiO}_2$  及  $110\text{nm}$   $\text{Si}_3\text{N}_4$  作为 KOH 背腔腐蚀的掩膜层; (b)光刻定义出背面图形,进行 KOH 各向异性腐蚀,控制腐蚀深度,留硅膜厚度为  $15\mu\text{m}$ ; (c) HF 去掉 KOH 掩膜层后在硅片正面 LPCVD 生长  $30\text{nm}$   $\text{Si}_3\text{N}_4$ , RIE 去掉背面的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (d)正面光刻,刻蚀  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜形成测试结构图形; (e) DRIE 刻蚀硅膜,形成悬空结构之后进行第一次表面形变测量,得到由薄膜引起的基底曲率; (f) RIE 去掉正面  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜,第二次表面形变测量,得到无薄膜时的基底的初始曲率.最后利用 SEM 进行衬底厚度的测量,得到各个单元精确的厚度值.正面淀积的待测试薄膜材料还可以是氧化硅、多晶硅、金属,该方法对工艺和材料没有限制.图 6 为测试结构三的 SEM 照片.

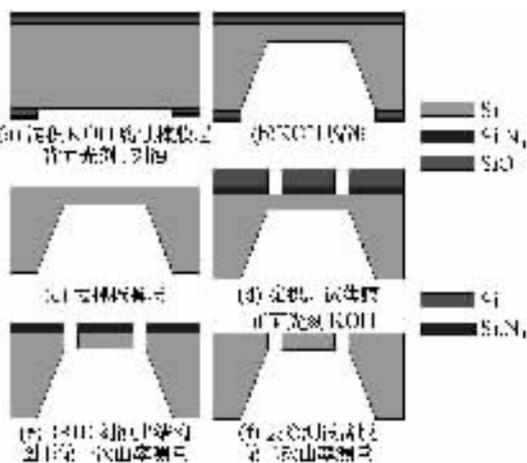


图 5 工艺流程图

Fig.5 Schematic fabrication processes

## 3 光学测试系统

本实验利用一种自行开发的光学系统来完成对基底形变的测试,如图 7 所示.该系统采用了显微干涉技术,利用 Mirau 显微干涉仪实现对表面形变特性的测量,测量过程采用了光学干涉的非接触方法,因此不会对结构产生损坏.图 8 为该系统的核心部分为 Mirau 干涉仪的示意图<sup>[12]</sup>,它由一个分光镜和

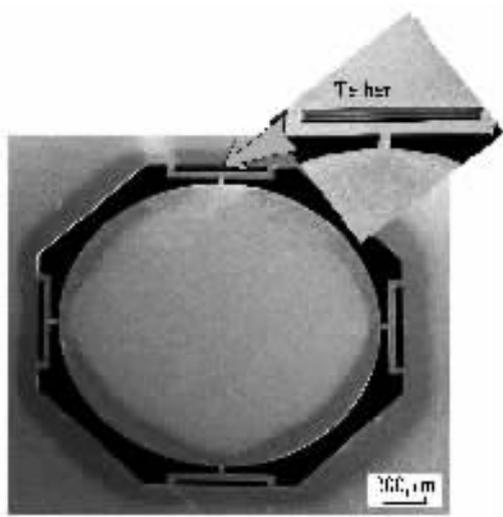


图 6 结构三的 SEM 图

Fig.6 SEM photos of structure Type-C

一个干涉镜组成,均直接安装在一个有较长工作距离的物镜(物镜有  $10\times$ ,  $20\times$  和  $50\times$  可供选择)上.投射至物体上的光线被分光镜分成两束,一束透过分光镜射向物体,而另一束被反射至干涉平面的镜子上.这两束光线经过干涉,最后得到的干涉图像包含了一系列间距为  $\frac{\lambda}{2}$  ( $\lambda$  为测量光源的波长)的干涉条纹,用来表征被测样品表面的相对位置.由于系统采用了改进的相移算法,抑制了相移器误差以及探测器带来的非线性误差,提高了测量精度.该系统用美国 NIST44nm 高纳米台阶标准(国际标准)进行了对比测试,精度优于  $1\text{nm}$ ,在  $1\text{mm}\times 1\text{mm}$  视场内,分辨率可达  $1\text{nm}$ ,离面测试范围为  $10\text{nm}\sim 5\mu\text{m}$ .

针对本文的测试结构,对于  $30\text{nm}$  厚的薄膜,由 Stoney 公式计算得到应力检测的分辨率为  $1.5\text{MPa}$ ,优于目前国际上的所有相关报道.



图 7 测试系统实拍

Fig.7 Photography of the measuring system

## 4 结果和讨论

由上述模拟结果可知,对于弹簧梁支撑的第三

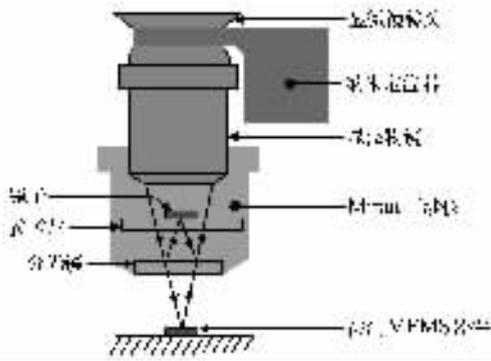


图 8 Mirau 干涉仪的示意图

Fig.8 Schematic of Mirau interferometry measuring system

种测试结构,当弹簧的宽度为  $20\mu\text{m}$  时,相对误差最小,所以我们选取结构三作为主要测试结构,并首先选取了硅片上的 LPCVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$  及热氧化  $\text{SiO}_2$  薄膜

作为测试对象.由于这两种薄膜应力值较大,且比较稳定,已经被多种方法测量,重复性好,可以作为一种新测试方法的验证材料.图 9 为结构三淀积  $30\text{nm}$  LPCVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$  前后的结构表面形变图.表 1 为室温下用本文提出的局部基底弯曲法测得光片上  $30\text{nm}$  LPCVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$  与传统的基底弯曲法测得的光片上厚度为  $30$ 、 $60$  和  $80\text{nm}$  LPCVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的应力值的比较;表 2 为室温下利用本文方法测得的光片上厚度为  $270$ 、 $170$  和  $70\text{nm}$  热氧化  $\text{SiO}_2$  与传统的基底弯曲法测得的光片上  $300\text{nm}$  的热氧化  $\text{SiO}_2$  的应力值的比较.基底弯曲法使用的是 BGS6341 型电子薄膜应力分布测试仪.由结果可知,利用本文提出的局部基底弯曲法得到的两种薄膜应力的值与传统测试方法下测得的数值相吻合,验证了此方法的正确性.

与传统的测试方法相比,使用本测试方法对应

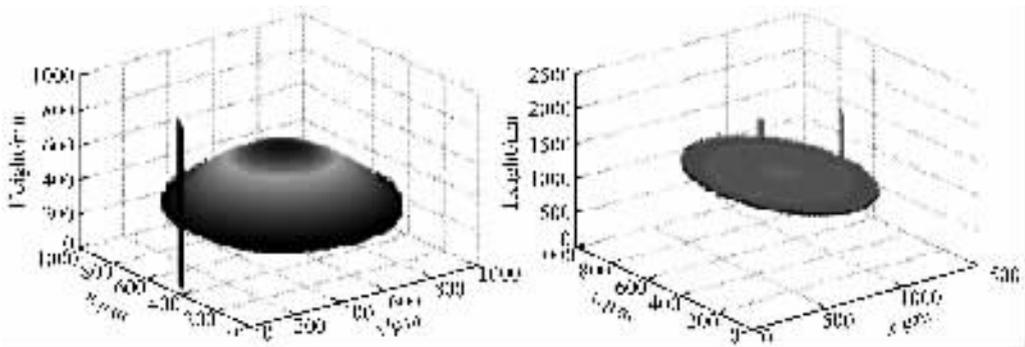


图 9 实验测得结构三的薄膜淀积前后表面形变

Fig.9 Surface profiles of Type-C structure in sequence

表 1 LPCVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$  应力测试结果

Table 1 Stress values of LPCVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$

LPCVD $\text{Si}_3\text{N}_4$	应力/GPa
局部基底弯曲法 30nm	1.140
传统基底弯曲法 30nm	1.15
传统基底弯曲法 60nm	1.09
传统基底弯曲法 80nm	1.09

表 2 热氧化  $\text{SiO}_2$  应力测试结果

Table 2 Stress values of thermal  $\text{SiO}_2$

Thermal $\text{SiO}_2$	应力/GPa
局部基底弯曲法 270nm	-0.362
局部基底弯曲法 170nm	-0.473
局部基底弯曲法 70nm	-0.445
传统基底弯曲法 300nm	-0.323

力的测量不依赖于操作者对特定位置的判断,可重复性好,且系统误差很小.我们使用该测试结构测量了氧化硅、PSG、多晶硅、氮化硅等多种常用 MEMS 薄膜的残余应力,结果与使用其他测试方法得到的结果基本一致<sup>[13]</sup>,其分辨率更高,测量重复性优于

1%,优于其他的测试方法.

下一步我们将使用该测试方法对纳米尺度的薄膜应力进行研究,并对 PECVD、溅射、蒸发、电镀等工艺得到的低应力金属和化合物薄膜的内应力进行精确标定.

## 5 结 论

本文开发了一种新型高灵敏度薄膜应力测试技术,使用自行搭建的准纳米光学干涉测试系统,利用局部基底弯曲来检测 MEMS 和 NEMS 薄膜的残余应力.其结构加工工艺和检测方法简单实用,不仅保留了传统基底弯曲法的所有优点,而且消除了其系统误差,可以用于检测薄膜的局部应力,同时检测精度和灵敏度也得到了极大的提高.对于 30nm 厚的薄膜,该技术应力检测的分辨率为 1.5MPa,优于目前国际上的所有相关报道.使用该测试技术对常用 MEMS 薄膜的残余应力进行了测量,结果与使用其他测试方法得到的基本一致,测量重复性优于 1%,优于其他的测试方法.该技术可以用于测试纳米级薄膜及超低应力薄膜的残余应力.

**致谢** 作者感谢北京大学微电子学研究院微米/纳米加工技术国家重点实验室工艺线人员协助进行加工.

## 参 考 文 献

- [1] Liu Zutao, Huang Qing'an, Jiang Yanfeng. In-situ test structures of micromachined thin films. *Measurement & Control Technology*, 2002, 21(7):6 (in Chinese) [刘祖韬, 黄庆安, 姜岩峰. 微机械薄膜应力的在线测试结构. *测控技术*, 2002, 21(7):6]
- [2] Qian Jin, Liu Cheng, Zhang Dacheng, et al. Residual stresses in micro-electro-mechanical systems. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(4):393 (in Chinese) [钱劲, 刘激, 张大成, 等. 微电子机械系统中的残余应力问题. *机械强度*, 2001, 23(4):393]
- [3] Benrakkad M S, Benitez M A, Esteve J, et al. Stress measurement by micro Raman spectroscopy of polycrystalline silicon structures. *J Micromech Microeng*, 1995, 5:132
- [4] Baker S P, Nix W D. Mechanical properties of compositionally modulated Au<sub>2</sub>Ni thin films; Nanoindentation and microcantilever deflection experiments. *J Mater Res*, 1994, 9:3131
- [5] Nie Meng, Huang Qing'an, Li Weihua. An in-situ extracting method for residual stresses of a multilayer film by full-field optical measurement. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(5):1028 (in Chinese) [聂萌, 黄庆安, 李伟华. MEMS 多层膜残余应力全场光学在线测试. *半导体学报*, 2005, 26(5):1028]
- [6] Thomas M E, Hartnett M P, McKay J G. The use of surface profilometers for the measurement of wafer curvature. *J Vacuum Science and Technology A*, 1988:6
- [7] Haque M A, Saif M T A. Application of MEMS force sensors for in situ mechanical characterization of nano-scale thin films in SEM and TEM. *Sensors and Actuators (A)*, 2002, (97/98):239
- [8] Zhu Y, Barthelat F, Labossiere P E. SEM-AFM-DIC. *Proc SEM ACEEAM 2003, Session 77, Paper 155*
- [9] Stoney G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis. *London: Proc Roy Soc*, 1909, 9:172
- [10] Von Preissig F J. Applicability of the classical curvature-stress relation for thin films on plate substrates. *J Appl Phys*, 1989, 66(9):4262
- [11] Freund L B. Substrate curvature due to thin films mismatch strain in the nonlinear deformation range. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48:1159
- [12] Huang Yubo, Li Dachao, Hu Chunguang, et al. Mechanical characterization of NEMS based on interferometry measurement of beam deflection. *ISTM*, 2005, 3:2205
- [13] Hu Wei, Zhang Dacheng. Standard three-layer polysilicon surface micromachining process and the design of testing structures. Master Thesis of Peking University, 2005: 6 (in Chinese) [胡维, 张大成. 三层多晶硅表面牺牲层工艺标准化及测试结构. 北京大学硕士研究生学位论文, 2005:6]

# A Highly Sensitive Local Curvature Metrology for Internal Stress Detection in Thin Films<sup>\*</sup>

Wang Shasha<sup>1</sup>, Chen Jing<sup>1,†</sup>, Li Dachao<sup>2</sup>, Huang Yubo<sup>2</sup>, and Li Zhihong<sup>1</sup>

(1 *National Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology, Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

(2 *State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

**Abstract:** Novel local curvature test structures combined with a sub-nanometer optical interferometry measurement setup are developed to detect stresses in nanometer-scale films and ultra low stresses in thin films. Several “localized” test structures based on the bending plate measurement method are designed to improve its sensitivity and accuracy. FEM analysis is performed to calculate the deviation of boundary-introduced stress from that predicted by the Stoney formula. Optimized structures are fabricated with anisotropic etching and DRIE. Stress values obtained with this metrology are in good agreement with those extracted by other methods, and repeatability within 1% is achieved. Stress differences as small as 1.5MPa in the 30nm film can be resolved. Such resolution is among the finest in the world.

**Key words:** MEMS; internal stress; nano-film; bending-plate measuring methodology; optical interferometry measurement

**PACC:** 0710C; 0630M

**Article ID:** 0253-4177(2006)06-1129-07

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No.50535030)

† Corresponding author. Email: jchen@ime.pku.edu.cn

Received 26 October 2005, revised manuscript received 28 December 2005