

一种在线测量微机械薄膜残余应力的新结构^{*}

虞益挺[†] 苑伟政 乔大勇 梁 庆

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 西安 710072)

(2007 年 1 月 18 日收到, 2007 年 1 月 29 日收到修改稿)

提出了一种利用临界屈曲法在线测量微机械薄膜残余应力的新结构, 并采用表面微加工技术制作了两种测试样品. 搭建了在线观测实验装置来实时监控释放过程中结构出现的临界屈曲变形模态, 由此判断出结构内部的应力状态. 同时在测得临界刻蚀深度的情况下, 采用有限元方法计算出残余应力大小. 借助有限元方法, 先研究了多个参数对临界屈曲应力的影响, 然后利用这种新结构对薄膜残余应力进行了实际测量, 所得结果与微旋转结构的应力测量结果基本吻合. 分析及实验表明, 新结构在测量薄膜残余应力方面有许多优点, 具有较高的实用价值, 不仅能满足大量程的应力检测要求, 而且只用一个结构就可以同时测量压应力和拉应力, 从而极大提高了器件版图空间的利用率.

关键词: 薄膜残余应力, 临界屈曲, 在线测量, 有限元方法

PACC: 0630M, 0710C, 4630L, 6185

1. 引 言

近年来, 微机电系统 (MEMS) 技术获得了飞速发展, 在各行各业得到了广泛应用, 在其基础上制作的各种微结构、微器件或微系统具有体积小、成本和功耗低、性能稳定、可单片集成等一系列显著优点. 薄膜材料和结构因其优良的机械、光学和电磁性能^[1-4]成为制作微传感器和微致动器的首选. 然而, 随着器件尺寸的缩小, 其材料属性表现出与宏观的相应体材料截然不同的性质^[5]. 其中工艺过程中产生的薄膜残余应力就是 MEMS 器件在设计 and 加工制作时必须考虑的一个重要因素, 尤其对于采用表面微加工技术制作的器件更是如此. 因为不管是压应力还是拉应力, 超过某一允许值的时候都将严重影响器件的工作性能、成品率和使用寿命. 所以工艺过程中对薄膜残余应力的实时监控是 MEMS 微加工领域的一大研究课题.

迄今为止, 已经出现了许多的薄膜残余应力测量方法^[6-10], 其中由 Guckel 等人提出的观察两端固支微梁阵列或环形结构阵列的屈曲变形法是应用较广泛的技术之一^[11, 12]. 就表面微加工工艺而言, 采用

这种方法对微机械结构进行屈曲观察通常是在牺牲层释放、结构烘干以后, 需借助干涉仪或扫描电镜 (SEM) 等仪器. 对于一定大小的残余应力, 当微梁或环形结构的尺寸超过某一临界值时, 结构就会出现屈曲变形, 由该临界状态下的结构尺寸就可以推出结构内部的残余应力大小. 然而, 这两种结构阵列都只能用于单一状态的残余应力检测, 如微梁阵列只能用于压应力, 而环形结构阵列则只能用于拉应力. 因此, 如果事先不知道结构内部的应力状态, 则需要同时设计这两种应力测试结构阵列, 从而极大占用宝贵的器件版图空间.

本文提出了一种利用临界屈曲法在线测量微机械薄膜残余应力的新结构. 设计了该结构的表面微加工工艺流程并完成了两种测试样品的制备; 为了对整个释放过程进行实时监控, 搭建了在线观测实验装置, 并记录下微结构在发生临界屈曲变形时的变形模态以及刻蚀深度; 根据已知的微结构几何尺寸以及临界状态下的刻蚀深度, 利用有限元方法计算得到微结构内部的应力大小, 将实验结果与微旋转结构的应力测量结果进行了比较. 借助有限元方法, 本文还详细讨论了不同条件对微结构临界屈曲应力的影响.

^{*} 教育部高等学校科技创新工程 (批准号: 706055), 教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-05-0869), 西安应用材料创新基金 (批准号: XA-AM-200610) 和西北工业大学博士论文创新基金 (批准号: CX200611) 资助的课题.

[†] E-mail: yyt@mail.nwpu.edu.cn

2. 样品制备与实验装置

本文提出的测量微机械薄膜残余应力的新结构其示意图如图 1 所示,为了叙述方便,文中暂且称作微圆板结构.圆形平板通过中心的圆形支撑锚点与基底相连,图 1(b)是图 1(a)在 A-A 向的剖视图.

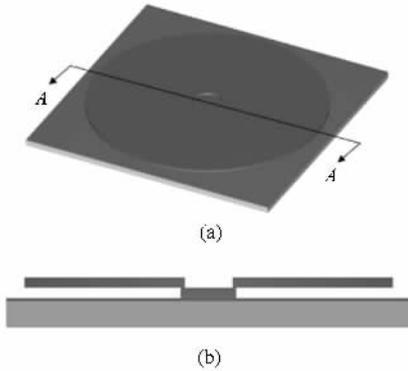


图 1 微圆板结构示意图

微圆板结构采用表面微加工技术制作,其主要工艺流程如图 2 所示.基底采用 N 型的(100)硅片,如图 2(a)所示,首先在硅基底上淀积一定厚度的牺牲层材料,并在其上刻蚀出支撑锚点区域,然后淀积结构层材料,并进行图形化处理,如图 2(b);最后在刻蚀液中腐蚀掉牺牲层材料,使微结构得到释放,如图 2(c).

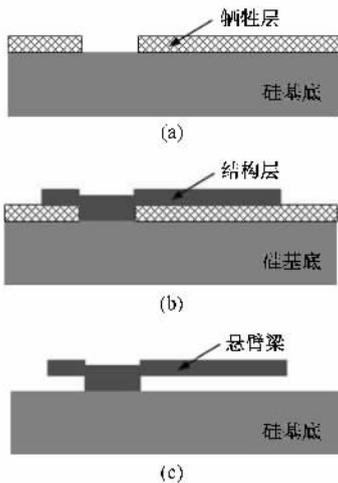


图 2 微圆板结构的主要微加工工艺流程

为了在微圆板结构中引入两种不同状态的薄膜残余应力,设计了两组工艺参数,如表 1 所示.牺牲层和结构层材料均在低压化学气相淀积(LPCVD)炉

内淀积.牺牲层材料为 TEOS 源热分解得到的二氧化硅;多晶硅的淀积温度为 620°C ,以硅烷(SiH_4)为反应源气体;氮化硅的淀积温度为 785°C ,以氨气(NH_3)和二氯硅烷(SiH_2Cl_2)为反应源气体.牺牲层释放以前,两种样品均在 950°C 下退火 1 h.为了能在实时时监控整个释放过程,参照 Zhang 等人^[13,14]的方法设计了如图 3 所示的实验观测装置.释放过程可以被任意中止,以便得到微圆板结构在发生临界屈曲变形时的 SEM 图.

表 1 实验中设计的两组工艺参数

编号	应力状态	牺牲层材料/厚度	结构层材料/厚度
1	压应力	二氧化硅/ $3\ \mu\text{m}$	多晶硅/ $\sim 300\ \text{nm}$
2	拉应力	二氧化硅/ $750\ \text{nm}$	氮化硅/ $\sim 400\ \text{nm}$

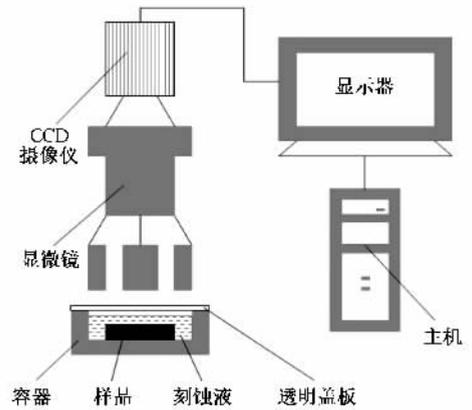


图 3 释放过程在线观测实验装置

3. 建模与分析

图 4 为微圆板结构在释放过程中的示意图, R 和 t 分别表示圆形平板的半径和厚度, δ 为样品置于刻蚀液中一段时间后的刻蚀深度,它随着时间的增加而不断增大.当腐蚀掉牺牲层,上面的结构成为自由端,其内部的残余应力也随之释放.在刻蚀的开始阶段, δ 较小,圆形平板的自由端部分具有足够的刚度来抵抗释放的残余应力,此时在显微镜下观察到的自由端仍保持水平.而随着刻蚀深度 δ 的不断增大,自由端部分的刚度变得越来越大.可以预料,当 δ 达到某一临界值时,结构将在释放的残余应力作用下产生屈曲变形.因此,通过在显微镜下直接观测微结构在释放过程中的临界屈曲变形状态便可以推出结构内部的残余应力大小.然而,推导时需要借助有限元方法.

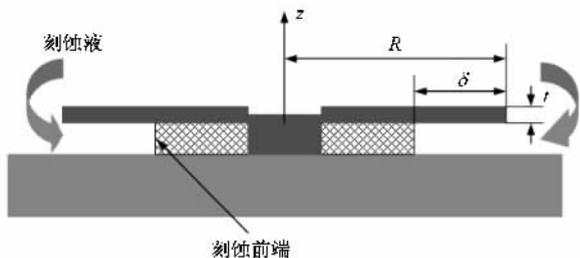


图4 微圆板结构的释放示意图

下面先利用有限元分析工具 ANSYS 中的屈曲分析来研究圆形平板的几何尺寸、刻蚀深度 δ 与临界屈曲应力之间的关系。采用二维有限元模型。释放以后的自由端部分类似圆环结构，内外圆的半径差即为刻蚀深度 δ ，位移约束施加在内圆（与刻蚀前端对应）上。假设结构层材料为多晶硅，其弹性模量、泊松比和热膨胀系数分别为 163 GPa、0.22 和 $2.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，且均是线弹性的。单元类型选用 SHELL63，单元尺寸 $5 \mu\text{m}$ 。图 5 所示为圆环结构的两种典型屈曲变形模式。

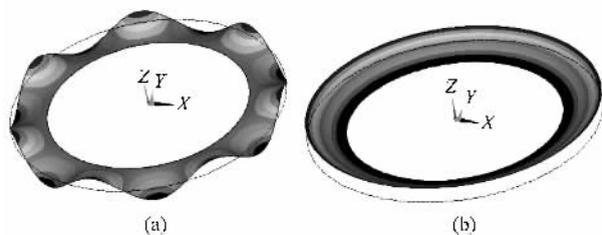


图5 圆环结构的两种典型屈曲变形模式 (a)压应力 (b)拉应力

其中波纹状的图 5(a)表明结构中存在压应力，而碗状的图 5(b)表明结构中存在拉应力。因此，在显微镜下观察微圆板结构自由端部分的临界屈曲变形模式就可以很直观地判断出结构内部的应力状态。

图 6 和图 7 为圆形平板在不同几何参数条件下刻蚀深度 δ 与临界屈曲应力之间的关系曲线，对于大的刻蚀深度，还提供了其局部放大图。所有情况下的圆形锚点的半径均为 $20 \mu\text{m}$ 。从单一曲线可以看

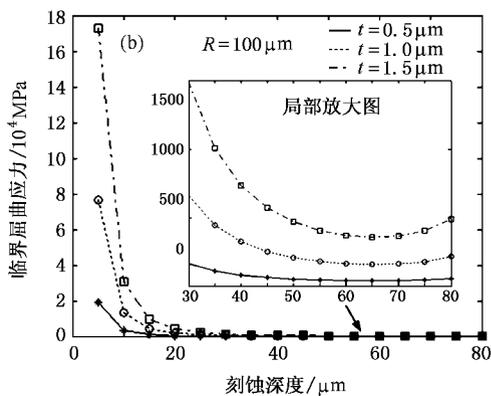
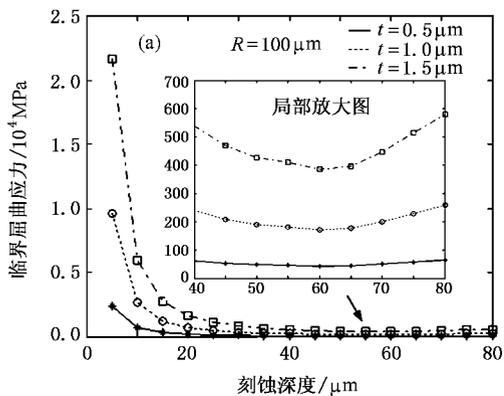


图6 不同厚度情况下的刻蚀深度 δ 与临界屈曲应力之间的关系曲线 (a)压应力 (b)拉应力

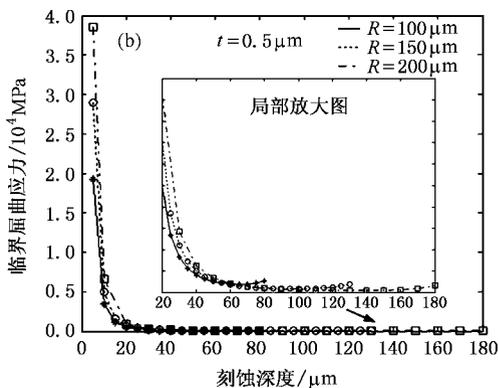
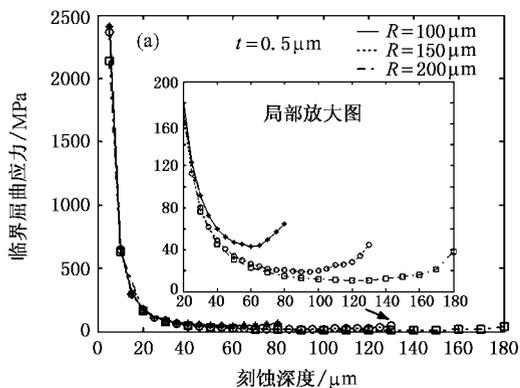


图7 不同半径情况下的刻蚀深度 δ 与临界屈曲应力之间的关系曲线 (a)压应力 (b)拉应力

出:在其他参数给定的条件下,刻蚀深度 δ 与临界屈曲应力一一对应,因此可以通过测定发生临界屈曲变形时刻蚀深度 δ 的值来唯一地确定微结构中的残余应力大小.另外,不管是压应力还是拉应力,临界屈曲应力均随着刻蚀深度的增加而呈现下降的趋势,尤其在开始阶段 δ 的微小变化都将导致临界屈曲应力的大幅下降.由于观测上存在误差,因此这个阶段不适于用来测量残余应力.尽管如此,从曲线上可以看出,利用一个微圆板结构就可以满足大量程(几 MPa—几 GPa)的应力检测需要.从图 6 和图 7 还可以看出,相同情况下,厚度对临界屈曲应力的影响较大,而半径的变化只对曲线的开始阶段有大的影响.厚度越大,结构的刚度增加,使自由端部分抵抗残余应力的能力也相应提高.因此,在利用微圆板结构进行薄膜残余应力测量时需要精确把握结构的厚度.

从图 6 和图 7 还可以发现一个有趣的现象,即每条曲线都存在一个最低点,其对应的纵轴坐标可以被认为这种微圆板结构能够测量的最小临界屈曲应力,它与不同结构几何参数的关系如图 8 所示.从中可以看出:当圆形平板的几何尺寸给定时,其可以测量的最小压应力与拉应力相差并不大,而且厚

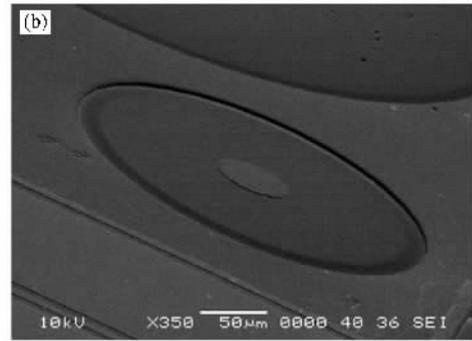
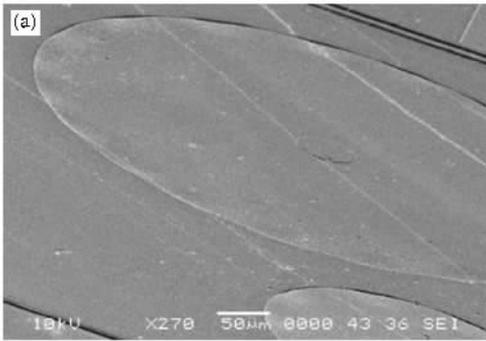


图 9 不同工艺参数条件下制备的样品在发生临界屈曲变形时的 SEM 图

对于采用第 1 组工艺参数制备的样品而言,观察到的结构临界屈曲变形模态总是波纹状的,说明多晶硅结构层内部存在压应力.图 10 为两种不同半径的圆形平板在释放过程中出现的屈曲变形情况.从图 10(a)所示情况可见,两个圆形平板的自由端部分均没有出现屈曲变形,随着刻蚀时间的增加,半径为 $300 \mu\text{m}$ 的大圆板先发生屈曲变形,如图 10(b);一段时间以后,半径为 $150 \mu\text{m}$ 的小圆板也开始出现屈曲变形,如图 10(c).测得的两种圆形平板在发生临界屈曲变形时的刻蚀深度 δ 分别如表 2 所示,由

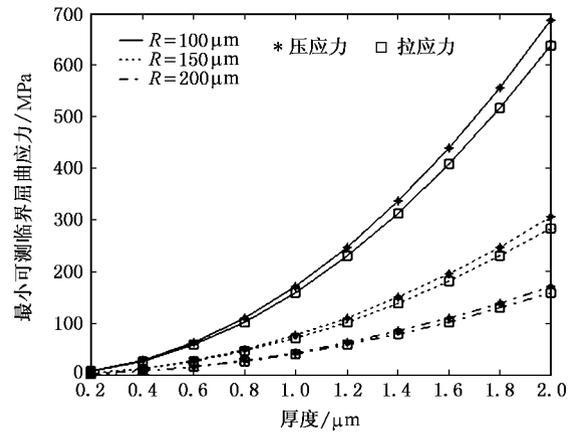


图 8 不同情况下微圆板结构能测量的最小临界屈曲应力

度越小、半径越大时,这种差异性就变得更小.

4. 实验结果

图 9 所示为不同工艺参数条件下制备的微圆板结构样品在发生临界屈曲变形时的 SEM 图,图 9(a) 对应第 1 组工艺参数,图 9(b) 对应第 2 组工艺参数.因此,不同应力状态下导致的结构临界屈曲变形模态与仿真的结果(图 5)完全吻合.

SEM 得到结构的精确厚度为 312 nm .因此,借助有限元方法,计算得到的两种微结构内部的残余应力大小分别为 -36.79 MPa 和 -43.93 MPa (“-”表示压应力).

表 2 不同半径的圆形平板在发生临界屈曲变形时的刻蚀深度 δ

$R/\mu\text{m}$	t/nm	临界刻蚀深度 $\delta/\mu\text{m}$	残余应力/MPa
150	312	27.5	-36.79
300		24.0	-43.93
平均值			-40.36

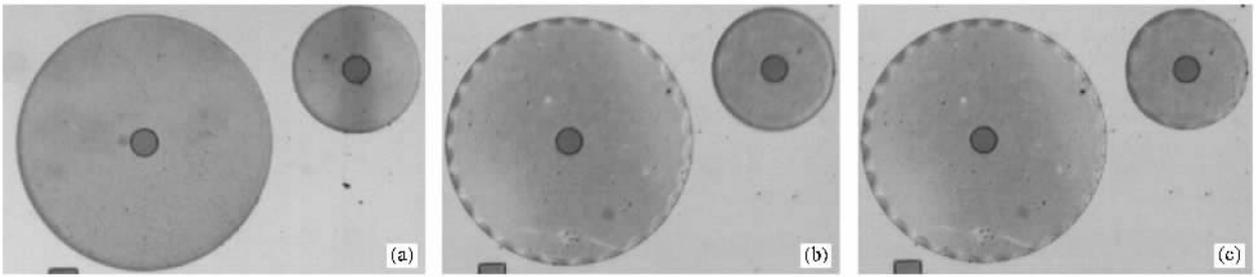


图 10 不同半径的圆形平板在释放过程中出现的屈曲变形

为了验证测量结果,对同一样品上的微旋转结构进行研究,其 SEM 结果如图 11 所示.仍然可以利用有限元方法来计算出结构内部的残余应力大小^[15],并从指针的旋转方向判断应力状态,得到的结果为 -34.23 MPa.因此,由两种方法测得的残余应力基本一致.

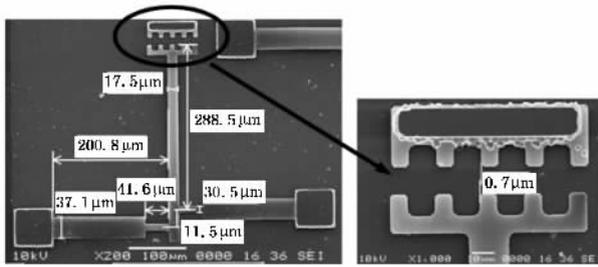


图 11 微旋转结构的 SEM 图

对于采用第 2 组工艺参数制备的样品而言,观察到的结构临界屈曲变形模式总是碗状的,说明其氮化硅结构层内部存在拉应力.为了便于屈曲变形的观察,此种情况下必须使用显微镜的暗场.图 12 为两种不同半径的圆形平板在释放过程中出现的屈曲变形情况.图 12(a)所示,表明半径为 150 μm 的小圆板先出现屈曲变形,随着刻蚀时间的增加,半径为 300 μm 的大圆板随后也出现屈曲变形,如图 12(b).表 3 是测得的不同半径圆形平板在发生临界屈曲变形时的刻蚀深度 δ 值,由 SEM 得到的结构精确厚度为 409 nm.此时,借助有限元方法,计算得到的两种微结构内部的残余应力大小分别为 646.95 MPa 和 689.87 MPa.可以看出:尽管样品经过了退火,这种情况下微结构内部的残余拉应力还是相当的大,导致释放过程中微旋转结构在其连接部分出现断裂

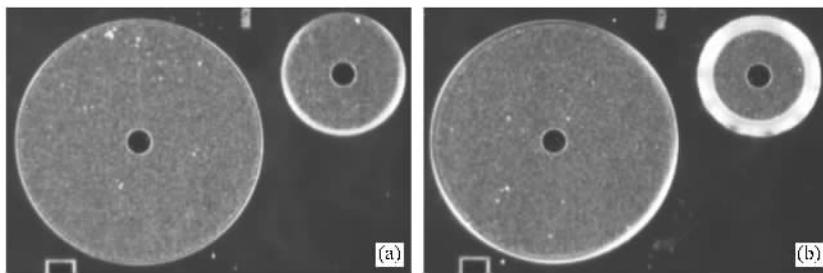


图 12 不同半径的圆形平板在释放过程中出现的屈曲变形

表 3 不同半径的圆形平板在发生临界屈曲变形时的刻蚀深度 δ

$R/\mu\text{m}$	t/nm	临界刻蚀深度 $\delta/\mu\text{m}$	残余应力/MPa
150	409	17.5	646.95
300		21.5	689.87
平均值			668.41

(如图 13 所示),从而无法利用微旋转结构进行残余应力的测量.

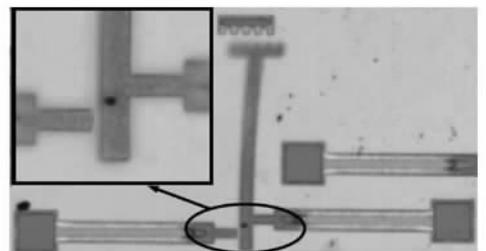


图 13 释放过程中在微旋转结构的连接部分出现断裂

5. 结 论

分析与实验结果表明:本文提出的利用临界屈曲法测量微机械薄膜残余应力的新结构具有许多优点,如利用一个测试结构就能同时对压应力和拉应力进行测量,而且可以满足大量程的应力测试要求,这是利用两端固支微梁阵列或圆环结构阵列所不具备的.利用该方法测得的结果与微旋转结构测得的结果基本吻合.然而,在观测微圆板结构的临界屈曲

变形时也存在一定的误差,精确测量需要借助更先进的观察或检测设备.

本文在求解过程中对许多地方进行了简化,如在进行有限元分析时没有考虑大变形情况下圆形平板与基底的接触,然而这种情况在实际中是可能发生的,不过这不影响最终的测量结果.又如实验中设计的圆形平板在显微镜下均是透明的,以便于观察到其下面的牺牲层刻蚀前端,使刻蚀深度的观测更加方便,如果实际中结构层是不透明的,则可以采用由 Guckel 等^[11,12]人提出的阵列方法.

-
- [1] Ma J H , Meng X J , Lin T , Liu S J , Zhang X D , Sun J L , Chu J H 2005 *Chin. Phys.* **14** 2352
- [2] Li G H , Wu Y C , Zhang L D 2001 *Chin. Phys.* **10** 148
- [3] Zhang X J , Ma H L , Li Y X , Wang Q P , Ma J , Zong F J , Xiao H D 2006 *Chin. Phys.* **15** 2385
- [4] Guan Z Q , Yutaka A , Jiang D H , Lin H , Yoshitake Y , Wu C X 2004 *Chin. Phys.* **13** 105
- [5] Murarka S P , Retajczyk T F 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 2069
- [6] Drieënhuizen B P , Goosen J F L , French P J , Wolffenbuttel R F 1993 *Sensor. Actuat. A* **37-38** 756
- [7] Masters N D , Boer M P , Jensen B D , Baker M S , Koester D 2001 *ASTM Spec. Tech. Pub.* **1413** 1
- [8] Fang Z J , Xia Y B , Wang L J , Zhang W L , Ma Z G , Zhang M L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1028 (in Chinese) [方志军、夏义本、王林军、张伟丽、马哲国、张明龙 2003 物理学报 **52** 1028]
- [9] Di Y X , Ji X H , Hu M , Qin Y W , Chen J L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5451 (in Chinese) [邱玉贤、计欣华、胡明、秦玉文、陈金龙 2006 物理学报 **55** 5451]
- [10] Gu P F , Zheng Z R , Zhao Y J , Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6459 (in Chinese) [顾培夫、郑臻荣、赵永江、刘旭 2006 物理学报 **55** 6459]
- [11] Guckel H , Randazzo T , Burns D W 1985 *J. Appl. Phys.* **57** 1671
- [12] Guckel H , Burns D W , Visser C C G , Tilmans H A C , Deroo D 1988 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **35** 800
- [13] Zhang T Y , Zhang X , Zohar Y 1998 *J. Micromech. Microeng.* **8** 243
- [14] Zhang X , Zhang T Y , Zohar Y 1998 *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **518** 155
- [15] Zhang X , Zhang T Y , Zohar Y 1998 *Thin Solid Films* **335** 97

A novel microstructure for *in-situ* measurement of residual stress in micromechanical thin films^{*}

Yu Yi-Ting[†] Yuan Wei-Zheng Qiao Da-Yong Liang Qing

(*Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory , Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072 , China*)

(Received 18 January 2007 ; revised manuscript received 29 January 2007)

Abstract

A novel microstructure for *in-situ* measuring residual stress in micromechanical thin films by the method of critical buckling observation was proposed and two different samples were fabricated using surface micromachining technique. The experimental apparatus was built for *in-situ* observation of critical buckling patterns of these microstructures during sacrificial layer etching. Then , the states of residual stresses can be distinguished directly by the buckling patterns and the magnitudes can be estimated with finite element method (FEM) when the values of critical etching length have been measured. Before the measurement , effects of various parameters on the critical buckling stress were investigated in detail with FEM in advance. After that , measurements of residual stresses using the new microstructures were carried out and the results were in good agreement with that obtained from micro rotating structures. It is consequently revealed that measurement of residual stresses by this new microstructure has evident advantages over the conventional buckling observation methods. Both compressive and tensile residual stresses in wide ranges of amplitude can be measured , just using a single appropriately designed microstructure. Therefore , the usefulness of layout space can be greatly improved.

Keywords : residual stress in thin films , critical buckling , *in-situ* measurement , finite element method

PACC : 0630M , 0710C , 4630L , 6185

^{*} Project supported by the Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project , Ministry of Education of China (Grant No. 706055) , Program for the New Century Excellent Talents in Universities , Ministry of Education of China (Grant No. NCET-05-0869) , Xi 'an Applied Materials Innovation Fund , China (Grant No. XA-AM-200610) and the Doctorate Foundation of Northwestern Polytechnical University , China (Grant No. CX200611) .

[†] E-mail : yyt@mail.nwpu.edu.cn