

# MEMS 多层膜残余应力全场光学在线测试\*

聂 萌 黄庆安 李伟华

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** 提出了一种基于背面腐蚀的多层膜残余应力测试方法. 此法可以简化测量过程, 仅需要依次腐蚀基片背面的各层薄膜, 用激光全场测量法测出相应的曲率半径, 而无须腐蚀基片正面有用层, 就可以提取各层薄膜的残余应力. 模拟及实验证明, 这是一种精度较高而且简单易行的薄膜残余应力在线提取方法.

**关键词:** 残余应力; 多层膜; 曲率半径

**EEACC:** 2560B; 2560Z

**中图分类号:** TN401

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)05-1028-05

## 1 前言

随着 MEMS 加工技术的发展, 薄膜材料已经越来越多地应用于传感器和执行器等 MEMS 器件的制造过程中. 薄膜中的残余应力在 MEMS 器件设计、加工和封装过程中起重要作用<sup>[1,2]</sup>, 在线提取薄膜中的残余应力已成为 MEMS 领域中日益迫切的需要. 在线测量必须简便且没有破坏性, 在以往的文献中对此有很多介绍, 这些方法包括: 谐振法<sup>[3,4]</sup>、动态法<sup>[5]</sup>、电容/电压测试法<sup>[6]</sup>、通过施加已知力使梁发生直接弯曲来测量挠度的方法<sup>[7]</sup>、基片曲率测试法<sup>[8]</sup>、静电执行法<sup>[9,10]</sup>、热膨胀法<sup>[11]</sup>等等.

基片曲率测试法是一种常用的在线测量薄膜残余应力的方法. 在工艺线薄膜的生长(热氧化、LPCVD 等)过程中, 通常是基片的正反两面同时生长薄膜, 所以对多层薄膜而言, 常见的提取过程是首先腐蚀掉基片背面的所有薄膜层, 再通过激光干涉仪或者表面轮廓仪测出由基片和正面薄膜层所构成复合结构挠曲的曲率半径, 再自上而下依次腐蚀掉基片正面的薄膜层, 并依次测出对应复合结构挠曲的曲率半径, 最后用传统的 Stoney 公式即可提取各层薄膜中的残余应力. 可见, 由传统的 Stoney 公式提取薄膜应力, 需要很多的腐蚀工序, 并且在完成参

数提取后, 片上的薄膜层已被腐蚀掉, 需要重新生长薄膜, 才能继续后续加工. 本文提出的基于背面腐蚀的多层膜残余应力测试方法, 无需腐蚀基片正面的薄膜层, 只需要依次腐蚀掉基片背面的各层薄膜, 测出对应复合结构的曲率半径, 就可以提取各层薄膜的残余应力, 既简化了腐蚀工艺, 又保留了基片正面的薄膜层.

## 2 Stoney 公式的推广

假设在淀积薄膜之前, 基片中没有应力且基片没有弯曲. 图 1 为在多层薄膜残余应力作用下挠曲的(薄膜/基片)复合结构, 基片的上面有  $n$  层薄膜, 下面有  $k$  层薄膜( $0 < k < n$ ), 上面的第  $i$  ( $1 \leq i \leq k$ ) 层薄膜与下面的第  $i$  ( $1 \leq i \leq k$ ) 层薄膜是在同一种工艺条件下生长的, 其特性完全相同, 即  $d_{uk} = d_{dk}$ ,  $u_k = d_k$ . 各层薄膜的厚度及基片厚度之间满足:

$$d_s \gg d_{u1} + d_{u2} + \dots + d_{un} + d_{d1} + \dots + d_{dn} \quad (1)$$

在图 1 所示的复合结构中取一微元, 受力情况如图 2 所示, 层间界面力等效为力和力矩, 即  $F_{ui}$ ,  $F_s$ ,  $F_{dk}$  和  $M_{ui}$ ,  $M_s$ ,  $M_{dk}$ . 由于薄膜的厚度远远小于衬底的厚度, 则  $M_{ui}$ ,  $M_{dk}$  远远小于  $M_s$ . 由力的平衡条件可知:

$$F_s = \sum_{i=k+1}^n F_{ui} \quad (2)$$

\* 国防预研项目资助(批准号:41308050206)

聂 萌 女, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事 MEMS 薄膜应力研究. Email: niemengpost@163.com

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事微电子技术及 MEMS 的教学与研究.

2004-05-30 收到, 2004-09-29 定稿

$$\frac{d_s}{2} F_s = M_s \tag{3}$$

则

$$\frac{d_s}{2} \sum_{i=k+1}^n F_{ui} = M_s \tag{4}$$

又<sup>[12]</sup>

$$M_s = \frac{E_s d_s^3 w}{12 R} \tag{5}$$

$$F_{ui} = \sum_{i=k+1}^n \sigma_i w d_{ui}, \quad k+1 \leq i \leq n \tag{6}$$

其中  $E_s$  是基片材料的杨氏模量;  $\nu_s$  是基片材料的泊松比. 考虑应力的双轴效应后, (5) 式中的  $E_s$  应用  $E_s / (1 - \nu_s)$  替换.

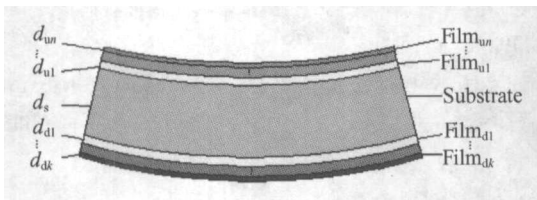


图 1 在薄膜残余应力作用下挠曲的复合结构

Fig. 1 Bended composite structure under residual stresses in thin films

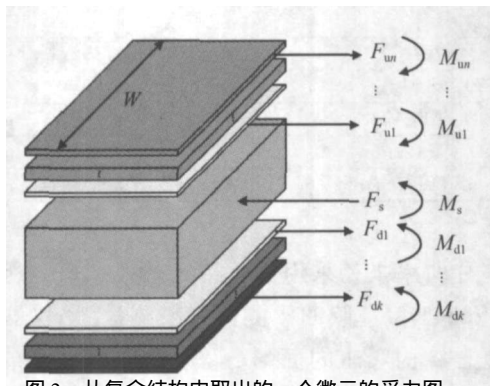


图 2 从复合结构中取出的一个微元的受力图

Fig. 2 Loads acting on a differential element from the composite structure

再将 (5), (6) 两式代入 (4) 式可得:

$$\frac{1}{R} = \frac{6(1 - \nu_s)}{E_s d_s^2} \sum_{i=k+1}^n \sigma_i d_{ui} \tag{7}$$

(7) 式是传统 Stoney 公式的推广.

当  $k=0$  时, (7) 式退化成传统的 Stoney 公式:

$$\frac{1}{R} = \frac{6(1 - \nu_s)}{E_s d_s^2} (\sigma_{u1} d_{u1} + \sigma_{u2} d_{u2} + \dots + \sigma_{un} d_{un}) \tag{8}$$

当  $k=n$  时, 表示复合结构两面薄膜的生长情况相同, 复合结构不会发生挠曲.

当  $0 < k < n$  时, 表示复合结构两面薄膜的情况不同, 即背面已经腐蚀掉了一部分薄膜层, 此时复合

结构会发生弯曲. 依次腐蚀复合结构背面的各层薄膜, 通过光学方法依次测出相应复合结构的曲率半径, 再由 (7) 式就可得到各层薄膜的残余应力.

### 3 薄膜残余应力测试

提取多层膜残余应力的步骤如下:

(1) 腐蚀背面第  $n$  层, 则  $k = n - 1$ , (7) 式变为

$$\frac{1}{R_1} = \frac{6(1 - \nu_s)}{E_s d_s^2} \sigma_{un} d_{un} \tag{9}$$

测出此时的曲率半径  $R_1$ , 由 (9) 式可解得第  $n$  层薄膜中的残余应力  $\sigma_{un}$ .

(2) 再腐蚀背面第  $n - 1$  层, 即  $k = n - 2$ , (7) 式变为:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{6(1 - \nu_s)}{E_s d_s^2} (\sigma_{un} d_{un} + \sigma_{u(n-1)} d_{u(n-1)}) \tag{10}$$

测出此时的曲率半径  $R_2$ , 由 (10) 式可解得第  $(n - 1)$  层薄膜中的残余应力  $\sigma_{u(n-1)}$ .

(3) 依次腐蚀掉背面的所有薄膜层, 由 (7) 式即可依次解得各层薄膜中的残余应力.

### 4 模拟

基于背面腐蚀的多层膜残余应力测量方法的正确性取决于 (7) 式的正确性, 为此, 选取一个在基片两面淀积了三层薄膜的复合结构 (图 3), 用 Coventorware 软件进行有限元分析来验证 (7) 式的正确性. 图 3 所示为背面未经腐蚀的基片上下对称的薄膜结构. 基片厚度  $d_s = 365 \mu\text{m}$ , 杨氏模量  $E_s = 130 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu_s = 0.064$ ; 第一层薄膜厚度  $d_{u1} = d_{d1} = 0.2 \mu\text{m}$ ; 第二层薄膜厚度  $d_{u2} = d_{d2} = 0.2 \mu\text{m}$ ; 第三层薄膜厚度  $d_{u3} = d_{d3} = 0.5 \mu\text{m}$ . 图 4 ~ 6 分别为背面第三层、第二层、第一层薄膜被依次腐蚀掉后, 复合结构发生挠曲的曲率半径与薄膜中残余应力的关

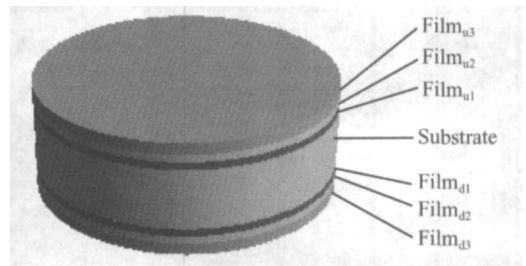


图 3 复合结构三维示意图

Fig. 3 3D schematic diagram of the composite structure

系,其中实线为 Coventorware 的计算结果,虚线为 (7) 式的结果. 由于实线与虚线非常接近,可见,(7) 式具有很高的精度.

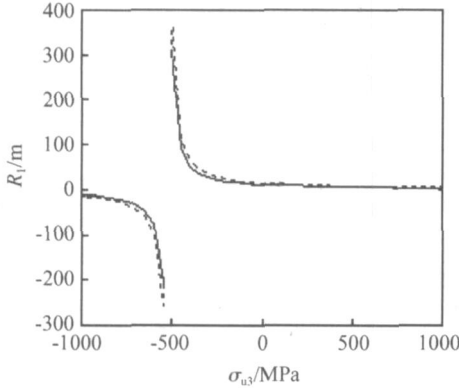


图 4 复合结构的曲率半径  $R_1$  与第三层薄膜中残余应力  $u_3$  之间的关系 背面第三层被腐蚀掉,  $u_1 = d_1 = 500\text{MPa}$ ,  $u_2 = d_2 = 800\text{MPa}$

Fig. 4 Curvature radius  $R_1$  of the composite structure versus residual stress  $u_3$  in the 3rd film layer The back 3rd film layer is etched,  $u_1 = d_1 = 500\text{MPa}$ ,  $u_2 = d_2 = 800\text{MPa}$

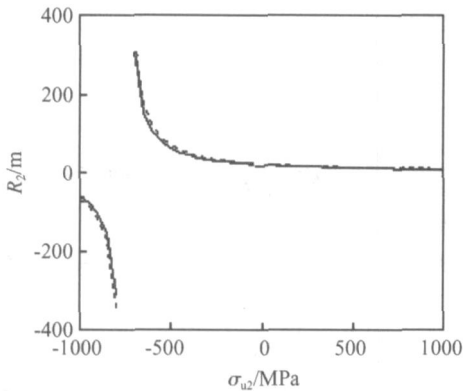


图 5 复合结构的曲率半径  $R_2$  与第二层薄膜中残余应力  $u_2$  之间的关系 背面第三层、第二层被腐蚀掉,  $u_1 = d_1 = 500\text{MPa}$ ,  $u_3 = 100\text{MPa}$

Fig. 5 Curvature radius  $R_2$  of the composite structure versus residual stress  $u_2$  in the 2nd film layer The back 3rd and 2nd film layers are etched,  $u_1 = d_1 = 500\text{MPa}$ ,  $u_3 = 100\text{MPa}$

### 5 实验

实验样品由中国电子科技集团第 13 研究所制备. 基片为双面抛光片,基片与各层薄膜的厚度如表 1 所示.

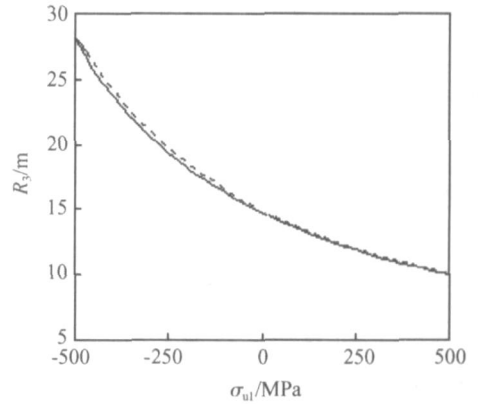


图 6 复合结构的曲率半径  $R_3$  与第一层薄膜中残余应力  $u_1$  之间的关系 背面第三层、第二层、第一层都被腐蚀掉,  $u_2 = 800\text{MPa}$ ,  $u_3 = 100\text{MPa}$

Fig. 6 Curvature radius  $R_3$  of the composite structure versus residual stress  $u_1$  in the 1st film layer The back 3rd, 2nd and 1st film layers are etched,  $u_2 = 800\text{MPa}$ ,  $u_3 = 100\text{MPa}$

表 1 基片与各层薄膜的厚度

Table 1 Thickness of the substrate and each film layer

材料	厚度	单位
Si 基片	$d_s$	365 $\mu\text{m}$
$\text{SiO}_2$ (热氧化)	$d_{u1} = d_{d1}$	0.233 $\mu\text{m}$
$\text{Si}_3\text{N}_4$ (LPCVD)	$d_{u2} = d_{d2}$	0.09 $\mu\text{m}$
$\text{SiO}_2$ (LPCVD)	$d_{u3} = d_{d3}$	0.52 $\mu\text{m}$
poly-Si (LPCVD)	$d_{u4} = d_{d4}$	0.62 $\mu\text{m}$

基片曲率半径采用由北京光电技术研究所研制的 BGS6341 型薄膜曲率测试仪来测量. 该仪器直接测量复合结构弯曲的面形分布,根据面形分布的数据得到复合结构挠曲的曲率半径,测试仪光路如图 7 所示<sup>[13]</sup>.

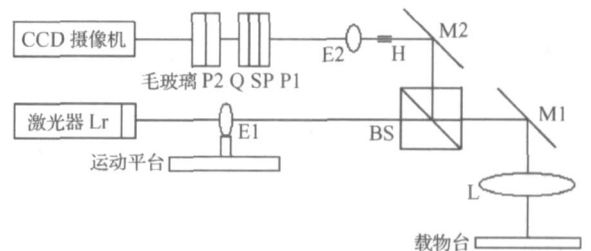


图 7 薄膜曲率测试仪

Fig. 7 Schematic diagram of the curvature measurement instrument

图 8 是用 BGS6341 测得的腐蚀背面 poly-Si (LPCVD),  $\text{SiO}_2$  (LPCVD),  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (LPCVD),  $\text{SiO}_2$

(热氧化)后复合结构弯曲的面形分布图. 根据依次腐蚀背面的每层薄膜后复合结构弯曲的面形分布数据求出曲率半径,再用(7)式求得各层薄膜中的残余应力(见表 2),其中基片的杨氏模量取为  $E_s = 165 \text{ GPa}$ ,泊松比取为  $\nu_s = 0.22$ . 比较已有文献中材料残余应力数据可知<sup>[14]</sup>,表 2 中测得的残余应力数据是可信的.

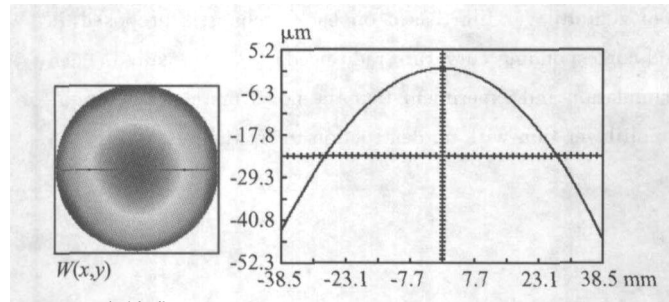


图 8 腐蚀背面 poly-Si (LPCVD), SiO<sub>2</sub> (LPCVD), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (LPCVD), SiO<sub>2</sub> (热氧化)后复合结构的面形分布图

Fig. 8 Profile of the bended composite structure with the back poly-Si (LPCVD), SiO<sub>2</sub> (LPCVD), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (LPCVD), and SiO<sub>2</sub> (thermal-dry) films etched

表 2 复合结构曲率半径及各层膜中的残余应力

Table 2 Curvature radii of the composite structure and residual stress in each film layer

依次腐蚀的背面薄膜层	曲率半径/ m	残余应力/ MPa
poly-Si	15.737	481
SiO <sub>2</sub>	14.826	35
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	18.5	- 699
SiO <sub>2</sub>	18.206	176

注:拉应力为正,压应力为负.

## 6 结论

背面腐蚀法仅仅通过依次腐蚀基片背面的薄膜层就能得到各层薄膜中的残余应力,对正面薄膜没有任何影响. 这种方法既简化了腐蚀工序,又没有破坏性,测试所用的硅片可以继续投入后道工艺. 模拟及实验测试表明,这是一种精度高,而且简单易行的薄膜残余应力在线测量方法.

## 参考文献

[ 1 ] Senturia S D. CAD challenge for microsensors, microactuators, and microsystems. Proceedings of the IEEE, 1998, 86 (8) :1611

[ 2 ] Huang Weidong, Sun Zhiguo, Cai Xia, et al. Distribution of residual stress in packaging assemblies of chip on board. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(6) :649(in Chinese) [黄卫东,孙志国,彩霞,等.板上芯片固化后残余应力分布的有限元模拟.半导体学报,2003,24(6):649]

[ 3 ] Petersen K E. Dynamic micromechanics on silicon techniques and devices. IEEE Trans Electron Devices, 1978, 25 (10) : 1241

[ 4 ] Tilmans H A C. Micro-mechanical sensors using encapsulated built-in resonant strain gauges, PhD Dissertation. University of Twente, Enschede, The Netherlands, 1993 :10

[ 5 ] Maseeh F, Schmidt M A, Allen M G, et al. Calibrated measurements of elastic limit, modulus, and the residual stress of thin films using micromachined suspended structures. IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, 1988 :84

[ 6 ] Wang S, Crary S, Najafi K. Electronic determination of the modulus of elasticity and intrinsic stress of thin films using capacitive bridges. Mater Res Soc Symp Proc, 1992 :203

[ 7 ] Schweitz J A. Mechanical characterization of thin films by micromechanical techniques. MRS Bull, 1992 :34

[ 8 ] Ozawa K, Nobuyoshi N, Asama K. Effect of deposition condition on intrinsic in a Si H films. J Appl Phys, 1983, 22 :767

[ 9 ] Najafi K, Suzuki K. A novel technique and structure for the measurement of intrinsic stress and Young's modulus of thin films. Proceedings of An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots, 1989 :96

[ 10 ] Osterberg P M, Senturia S D. M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures. J MEMS, 1997, 6(2) :107

[ 11 ] Chen S, Baughn T V. A new in-situ residual stress measurement method for a MEMS thin fixed-fixed beam structure. J MEMS, 2002, 11(4) :309

[ 12 ] Senturia S D. Microsystem design. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2001 :213

[ 13 ] Beijing Institute of Opto-Electro Technology. Handbook of BGS6341 Curvature Radius Measuring Instrument, 2000 [北京光电技术研究所. BGS6341型电子薄膜曲率测试仪使用说明, 2000]

[ 14 ] http : www.memsnet.org/material/

## An In-Situ Extracting Method for Residual Stresses of a Multilayer Film by Full-Field Optical Measurement \*

Nie Meng, Huang Qing'an, and Li Weihua

(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** A novel in-situ extracting method for residual stresses of a multilayer film based on back etching is proposed, in which only back films of the substrate need to be etched in turn and corresponding curvature radii needs to be measured. Then residual stress of each film layer can be obtained. It is verified by simulation and experiment that the novel method is a simple and accurate in-situ extracting method for residual stresses of the multilayer film with no destruction to front films.

**Key words:** residual stress; multilayer film; curvature radius

**EEACC:** 2560B; 2560Z

**Article ID:** 0253-4177(2005)05-1028-05

---

\* Project supported by National Defense Pre-Research Foundation of China (No. 41308050206)

Nie Meng female, was born in 1980, PhD candidate. Her research focuses on MEMS. Email: neimengpost@163.com

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor, adviser of PhD candidate. He is engaged in teaching and research on microelectronics and MEMS.

Received 30 May 2004, revised manuscript received 29 September 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics