

T 形结构在位测量薄膜中残余张应力的理论研究*

徐方迁^{1,2} 徐 联¹ 何世堂¹

(1 中国科学院声学研究所, 北京 100080)

(2 华北科技学院电子信息工程系, 北京 101601)

摘要: 给出了考虑梁的轴向载荷情况下理论计算公式的推导过程, 在变形较大时两种公式计算结果最大相差 9.65%. 用 LPCVD 技术制作了几种大小不同的 T 形梁结构, 给出了残余张应力与杨氏模量比值.

关键词: 应力; 膜; 变形

PACC: 6220; 7360F; 6860

中图分类号: TN 304. 07

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)05-0597-04

1 引言

薄膜内部应力对膜的特性、性能和稳定性有很大的影响, 过大压应力或张应力会导致膜破裂或膜与基底的粘结. 为了器件的稳定性和一致性, 必须测量薄膜中残余应力以控制加工过程.

目前, 测量薄膜中残余应力的方法主要有两种, 一是通过测量薄膜应力引起的基底变形或曲率半径的变化^[1,2], 再转化成薄膜应力. 该方法的优点是测量速度快、操作简单、便于生产线上使用; 缺点是给出的应力是膜与基底复合层的, 而不是基底被刻蚀后薄膜中的残余应力, 同时, 该方法只能给出整个晶片上的平均值. 另一种方法采用微加工结构(micro-fabricated structure) 在位测量(in situ measurement)^[3~9], 该方法是根据膜中的应力特性(张应力或压应力)将膜制成专门的结构, 如 T 形结构^[4]、菱形结构^[5,6]、旋转结构^[7]和螺旋结构^[8]等. 这种方法的优点是给出基底被刻蚀后薄膜中残余应力, 且是晶片上某一局部的值. 但是, 这些结构必须用微加工结构工艺制作, 只适于实验室使用.

T 形结构可以在位测量残余张应力, 其几何结

构对残余张应力敏感. 当基底的支撑去除以后, 薄膜结构被释放, 它的变形是膜机械特性的函数, 包括残余张应力、杨氏模量和泊松比. 用光学显微镜测量变形, 这样可以得到残余张应力和杨氏模量比值.

当 T 形结构两端固定梁中心变形小于其厚度的 30% 时, 用小变形理论, 忽略梁的轴向载荷, 可以得到一个关于残余张应力和杨氏模量比值的简单理论公式^[4]. 但是, 当两端固定梁中心变形大于其厚度的 30% 时, 梁的轴向载荷必须考虑, 在这种情况下, 原来的理论公式不再适用.

本文在考虑两端固定梁的轴向载荷情况下, 给出残余张应力和杨氏模量比值的理论计算公式的推导过程. 我们用 LPCVD 技术制作了几种不同尺寸硅基底、氮化硅膜的 T 形梁结构. 用阿贝比长仪测量梁的变形, 用两种公式计算了残余张应力与杨氏模量比值. 两者计算结果最大相差 9.65%.

2 T 形结构的制作

我们用硅基底上氮化硅膜作为研究对象, 由于该膜中的应力是张应力. 适用 T 形结构在位测量应力. T 形结构的制作过程是: (1) 在 1150°C, 用 “干+

* 中国科学院知识创新工程方向性项目(编号: KGCS2-102)

徐方迁 男, 1965 年出生, 博士研究生, 从事 MEMS 和声波传播理论的研究.

徐 联 男, 1965 年出生, 副研究员, 研究方向为硅微器件、声表面波器件的设计.

何世堂 男, 1965 年出生, 研究员、博士生导师, 研究方向为 MEMS 和声表波.

2003-05-17 收到, 2003-07-16 定稿

©2004 中国电子学会

“湿+干”方法在硅基底上双面热氧化形成 1000nm 厚的 SiO_2 膜, 将其作为牺牲层; (2) 在 850°C 用 LPCVD 方法双面淀积 Si_3N_4 , 制作待测膜; (3) 背面光刻体刻蚀窗, ICP 背面刻蚀 Si_3N_4 , BHF 背面腐蚀 SiO_2 , 在背面形成一个矩形窗口; (4) 在 80°C, 用 KOH 背面腐蚀基底; (5) 正面光刻 Si_3N_4 , ICP 正面刻蚀 Si_3N_4 , 形成 T 形梁结构; (6) BHF 腐蚀 SiO_2 , 腐蚀牺牲层。图 1 是 T 形结构的示意图, 图 2 是 T 形结构的实物照片。

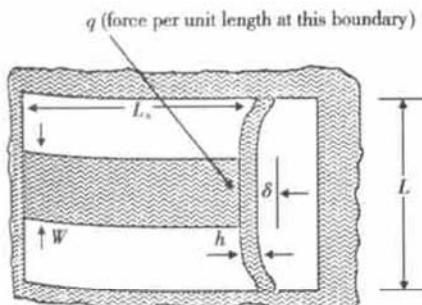


图 1 T 形结构

Fig. 1 T-shaped structure

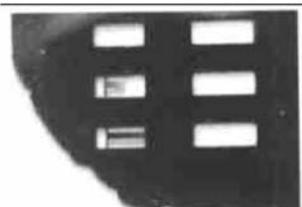


图 2 T 形结构实物照片

Fig. 2 Photograph of T-shaped structure

3 理论分析与测量

3.1 理论

微机械薄膜在制作过程中, 内部产生的应力随着工艺参数的不同其分布是十分复杂的。一般情况下假设膜中应力是均匀分布的, 且在 x 和 y 方向应力大小是相等的, 这样可以认为图 1 中 T 形结构两端固定梁内应力和与梁垂直的杆内应力是相等的。我们将 T 形结构模型化为两端固定, 中间加上均布载荷 q , 且同时受到向外轴向载荷 P 的梁, 如图 3 所示。将限制梁截面转动的约束作为多余约束, 解除多余约束后, 得到的静定基为一简支梁。在简支梁上加上载荷及多余的约束力 m_A 和 m_B , 得到相当系统。

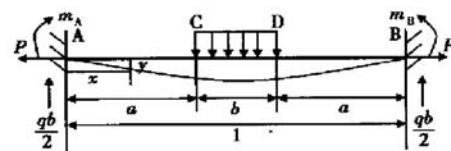


图 3 两端固定的梁

Fig. 3 Two fixed-end beam

静定基弯矩方程为:

AC 段:

$$\begin{aligned} M(x) &= \frac{qb}{2}x - Py \\ EIy'' &= -M(x) = -\frac{qb}{2}x + Py \end{aligned} \quad (1)$$

CD 段:

$$\begin{aligned} M(x) &= \frac{qb}{2}x - Py - \frac{q}{2}(x-a)^2 \\ EIy'' &= -\frac{qb}{2}x + Py + \frac{q}{2}(x-a)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $P = \sigma_0 b_0 h$, 是由膜内张应力产生梁的轴向载荷; $q = b_0 E \left[\frac{\sigma_0}{E} - \frac{\delta}{L_s} \right]$, 是由膜内张应力产生梁的横向均布载荷; $I = \frac{bh^3}{12}$; $M(x)$ 为弯矩; y 为变形; b_0 为膜厚; E 为杨氏模量; σ_0 为张应力。由边界条件得到静定基的中心变形为:

$$\begin{aligned} y|_{\frac{l}{2}} &= \frac{qEI}{P^2} \times \frac{\frac{r_1 l}{2}(\mathrm{e}^{r_1 a} + \mathrm{e}^{-r_1 a})}{\mathrm{e}^{r_1 l} + 1} + \\ &\quad \frac{qb(l+2a)}{8P} - \frac{qEI}{P^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中 } r_1 = \sqrt{\frac{P}{EI}}.$$

在多余约束方向变形协调方程为 $\theta_A = 0$. 得

$$m_A = m_B = \frac{EI}{l} \left[4C_1 r_1 + \frac{qb}{P} \right] \quad (4)$$

$$\text{其中 } C_1 = \frac{qEI}{2P^2} \times \frac{1 - \mathrm{e}^{r_1 b}}{\mathrm{e}^{r_1 l} + 1} \mathrm{e}^{r_1 a}.$$

梁的总的变形为:

$$\begin{aligned} y|_{\frac{l}{2}} &= \frac{qEI}{P^2} \times \frac{\frac{r_1 l}{2}(\mathrm{e}^{r_1 a} + \mathrm{e}^{-r_1 a})}{\mathrm{e}^{r_1 l} + 1} + \frac{qEI r_1 l}{4P^2} \times \\ &\quad \frac{1 - \mathrm{e}^{r_1 b}}{\mathrm{e}^{r_1 l} + 1} \mathrm{e}^{r_1 a} + \frac{qb(l+a)}{4P} - \frac{qEI}{P^2} \end{aligned} \quad (5)$$

在图 1 中 T 形结构尺寸与图 2 中梁的尺寸之间的关系分别为: $y|_{\frac{l}{2}} = \delta$, $l = L$, $W = b$, $a = (L-W)/2$. 将 $q = b_0 E \left[\frac{\sigma_0}{E} - \frac{\delta}{L_s} \right]$ 代入(5)式得到:

$$C_4 \left[\frac{\sigma_0}{E} \right]^2 + C_3 \left[\frac{\sigma_0}{E} \right] + C_2 = 0 \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} C_2 &= -\frac{h}{12} \times \left[\frac{\sigma_0}{E} - \frac{\delta}{L_s} \right] \times \\ &\left[\frac{(e^{r_1(L-W)/2} + e^{-r_1(L-W)/2}) e^{\frac{r_1 L}{2}}}{e^{r_1 L} + 1} + \right. \\ &\left. \frac{L r_1}{4} \times \frac{1 - e^{r_1 W}}{e^{r_1 L} + 1} e^{r_1(L-W)/2} - 1 \right] \\ C_3 &= \frac{b(3L-W)}{8h} \times \frac{\delta}{L_s} \\ C_4 &= \delta - \frac{b(3L-W)}{8h} \end{aligned}$$

当测得变形 δ 后, 可分别求得 C_2, C_3, C_4 , 再由(6)式的一元二次方程求得残余应力与杨氏模量比值 σ_0/E .

将 T 形结构模型化为两端固定、中间加上均匀载荷的梁, 但不考虑其轴向载荷. 此时 σ_0/E 的计算公式为^[4]:

$$\frac{\sigma_0}{E} = \delta \left[\frac{1}{L_s} + \frac{16h^3}{W[L^3 - W^2L + W^3/2]} \right] \quad (7)$$

3.2 测量

我们制作了四种硅基底上氮化硅膜的 T 形结构, 其固定横梁长度都为 $2048\mu\text{m}$ 、竖杆厚度都为 $800\mu\text{m}$, 固定横梁厚度、竖杆长度分别为两种. 用阿贝比长仪测量变形 δ , 仪器精度为 $\pm 4\mu\text{m}$, 这是产生应力测量误差的主要原因.

表 1 给出了四种 T 形结构的尺寸、变形 δ 以及分别由公式(6)和公式(7)(表中分别以 B 和 A 表示)得到的 σ_0/E , 并给出了这两个值之间的相对误差. 从表 1 可以看到: 由以前的公式(7)和由本文推导的公式(6)计算 σ_0/E , 其结果是不一样的, 特别是变形 δ 大于梁厚 h 的 30% 时, 两者之间的最大误差达 9.65%, 不可忽略. 因此, 当变形 δ 大于梁厚 h 的 30% 时, 应使用本文推导的理论公式(6).

表 1 T 形结构实验数据

Table 1 Experimental data on T-shaped structures

	$W/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	$L_s/\mu\text{m}$	$\delta/\mu\text{m}$	σ_0/E		误差/%
					A	B	
1	800	133	3027	32.0	0.0115	0.0122	6.08
2	800	133	4027	45.0	0.0114	0.0125	9.65
3	800	167	4027	36.0	0.0096	0.0100	4.17
4	800	167	3027	33.0	0.0116	0.0121	4.31

4 结论

在考虑 T 形结构固定横梁轴向载荷时, 对其受力变形进行了理论分析, 给出了计算 σ_0/E 新的理论计算公式. 制作了四种不同尺寸的 T 形结构, 分别得到 Si_3N_4 膜中的张应力与杨氏模量的比值. 与以前的理论计算公式比较, 发现当变形大于梁厚的 30% 时, 两种公式的计算结果最大相差 9.65%. 因此, 在用 T 形结构测量薄膜中张应力且变形较大时, 应使用本文推导的理论公式.

参考文献

- Chan K F, Ong C W, Chiy C L. Mechanical, tribological, and stress analyses of ion-beam-deposited boron-rich boron nitride films with increasing N content. *J Mater Res*, 1999, 14 (10): 3962
- Zhang Guobing, Hao Yilong, Tian Dayu et al. Residual stress properties of polysilicon thin film. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(6): 463(in Chinese)[张国炳, 郝一龙, 田大宇, 等. 多晶硅薄膜应力特性研究. 半导体学报, 1999, 20 (6): 463]
- Van Drieenhuijsen B P, Goosen J F L, French P J, et al. Comparison of techniques for measuring both compressive and tensile stress in thin films. *Sensors and Actuators A*, 1993, 37 ~ 38: 756
- Mehregany M, Howe R T, Senturia S D. Novel microstructures for the in situ measurement of mechanical properties of thin films. *J Appl Phys*, 1987, 62(9): 3579
- Guckel H, Burns D, Rutigliano C, et al. Diagnostic microstructures for the measurement of intrinsic strain in thin films. *J Micromech Microeng*, 1992, 2: 86
- Guckel H, Burns D W, Visser C C G, et al. Fine-grained polysilicon films with built-in tensile strain. *IEEE Trans Electron Devices*, 1988, 35(6): 800
- Ericson F, Greek S, Söderkvist J, et al. High-sensitivity surface micromachined structures for internal stress and stress gradient evaluation. *J Micromech Microeng*, 1997, 7: 30
- Singh J, Chandra S, Chand A, et al. Strain studies in LPCVD polysilicon for surface micromachined devices. *Sensors and Actuators A*, 1999, 77: 133
- Guckel H, Randazzo T, Burns D W. A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with application to polysilicon. *J Appl Phys*, 1985, 57(5): 1671

Study of In Situ Measurement of Residual Tensile Stress in Thin Films for T-Shaped Microstructures^{*}

Xu Fangqian^{1,2}, Xu Lian¹ and He Shitang¹

(1 Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 Department of Electronics and Information, North China Institute of Science Technology, Beijing 101601, China)

Abstract: For the in situ measurement of mechanical properties of films with residual tensile stress, the method of the T-shaped structures is developed. When δ , center deflection of the fixed-end beam, is less than 30% of h , beam thickness, the center deflection can be found by the theory of small deflection and the axial load of the fixed-end beam may be neglected. When δ is larger than 30% of h , the axial load of the fixed-end beam must be considered, and the previously formula is not suitable for this case. The detailed theoretical deduction of the formula for the latter case is contained in this paper. The maximum discrepancy of the two calculated results by the two different formulae is 9.65% and several different T-shaped structures are fabricated by LPCVD and their ratios of the residual stress to Young's modulus are given.

Key words: stress; film; flection

PACC: 6220; 7360F; 6860

Article ID: 0253-4177(2004)05-0597-04

* Project supported by Directional Program of Knowledge Innovation Engineering of The Chinese Academy of Sciences (No. KGCS2-I02)

Xu Fangqian male, was born in 1965, PhD candidate. He is engaged in research on MEMS and theory of acoustic wave propagation.

Xu Lian male, was born in 1965, associate professor. His research interests are in the design of silicon condenser microphone and SAW devices.

He Shitang male, was born in 1958, professor and advisor of PhD candidates. He is engaged in research on MEMS and surface acoustic wave.