

MEMS 薄膜纵向断裂强度的静电测试结构模型与模拟

梅年松 黄庆安

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 根据 Bore 提出的一种 MEMS 薄膜断裂强度静电测试结构, 给出了一种改进的数学模型, 根据此数学模型可以很简单地测出 MEMS 薄膜的断裂强度。对各种不同尺寸的结构用 Coventor 软件对所给模型进行了验证, 结果表明所得出的数学模型比原文中所给出的数学模型更为准确。

关键词: MEMS 薄膜; 断裂强度; 静电测试结构; 数学模型

EEACC: 2220; 2570

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)01-0082-05

1 引言

MEMS 器件可靠性评估和材料特性的研究是 MEMS 发展中的重要课题^[1]。MEMS 器件尺寸较小(一般在微米量级), 在这种尺寸下材料特性参数并不像宏观大尺寸材料特性参数体现出稳定性, 该尺寸条件下材料特性参数会随外界条件的变化而变化, 例如: 在 1100°C 退火之后 LPCVD 多晶硅最大应变为 0.93%, 而未经退火 LPCVD 多晶硅最大应变为 1.72%^[2]。另一方面 MEMS 测试结构制作一般是采用微电子加工工艺, 结构制作会受到工艺规则的限制。以上这些原因促使人们去研究新的测试方法以便及时准确获得 MEMS 材料特性参数。

断裂强度是 MEMS 材料特性重要参数之一。经过二十多年的研究, 断裂强度测试已经取得了很大进展, 目前已经报道了多种不同的测试方法。总的来说可以分为宏观测试法和在线测试法两种。宏观测试法是把原有研究大尺寸材料特性参数方法直接运用于 MEMS 材料特性参数测试, 应用宏观测试法对测试结构本身要求较低, 但它需要特殊的外在测试平台和仪器, 其效率很低且准确性很难保证, 这

种测试法是在 MEMS 发展早期提出的, 例如 Tai 和 Muller 提出的单端可移动桥式结构^[3]。在线测试法是专门针对 MEMS 材料特性参数测试所提出的, 近几年应用非常广泛, 但该测试技术还不成熟, 有待于进一步研究, 其中最具有代表性的是 Bore 和 Jensen 等人提出的静电桥式结构^[4], 以及 Kapels 和 Aigner 提出的热驱动测试结构^[5]。

本文在 Bore 提出静电测试结构的基础上, 结合材料力学以及与电磁学相关的基础推导了与该结构相对应的理论模型。根据此理论模型可直接通过该结构电容的测量决定 MEMS 薄膜断裂强度, 最后通过 Coventor 模拟验证了该理论模型。

2 基本原理

图 1 给出了测试结构的简图, 其中(a)为俯视图, (b)为侧面图^[4]。该结构为两端固定的梁, 梁中间部分窄, 两边较宽。细梁所产生的应力通过结构放大, 放大的倍数是由 W_{\max}/W_{\min} 决定的, W_{\max}/W_{\min} 越大, 放大倍数就越大。测试时电压加在宽梁部分和衬底之间, 慢慢增加两极板的电压, 直至梁断裂。

梅年松 男, 1976 年出生, 硕士研究生, 主要从事 MEMS CAD 的研究。

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

2003-01-19 收到, 2003-04-23 定稿

©2004 中国电子学会

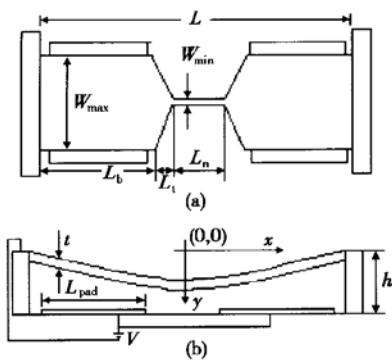


图 1 结构的二维模型 (a) 俯视图; (b) 侧面图

Fig. 1 2-D model of the structure (a) Top view; (b) Side view

2 理论模型

梁的弯曲断裂属于大变形^[5]. 当梁的长度远大于其最大弯曲位移时, 可用正弦或余弦函数来表示其弯曲几何方程. 以梁变形前的轴线为 x 轴, 垂直向下的轴为 y 轴, 梁的中点为坐标原点(如图 1(b) 所示), 设梁的挠曲线方程为^[6]:

$$y = \frac{a}{2} (1 + \cos \frac{2\pi x}{L}) \quad (1)$$

其中 a 为梁断裂时的最大挠度; L 为整个梁长度.

对于上述结构, 直接分析该梁弯曲时的应变非常困难, 因此常采用的方法就是分解法^[5]: 首先假设梁的一边在 x 方向可自由移动, 梁受力弯曲变形, 在这个过程可把梁看成简支梁纯弯曲来处理; 然后把自由端拉到原来固定的位置, 在这个过程中, 可把梁看成梁的拉伸来处理, 最终整个梁的应变就是这两种情况的叠加. 这样就把复杂的变形过程化分为两个最基本的梁的变形问题来处理, 表达式写为^[6]:

$$\epsilon_r = \epsilon_{bending} + \epsilon_{stretching} \quad (2)$$

其中 ϵ_r 为总的应变; $\epsilon_{bending}$ 为弯曲应变; $\epsilon_{stretching}$ 为拉伸应变. 首先讨论(2)式第一项: 任取梁的一微小单元, 弯曲变形前后的梁分别示于图 2(a) 和(b). 以梁横截面的对称轴为 y 轴, 且向下为正(图 2(b)), 此时梁的纯弯曲应变就可表示为^[6]:

$$\epsilon_{bending} = - \frac{z}{\rho(x)} = - z \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3)$$

其中 z 为距中性层的距离(如图 2(b) 所示), 把(1)式代入(3)式得:

$$\epsilon_{bending} = \frac{2\pi^2 z}{L^2} \cos \frac{2\pi x}{L} \quad (4)$$

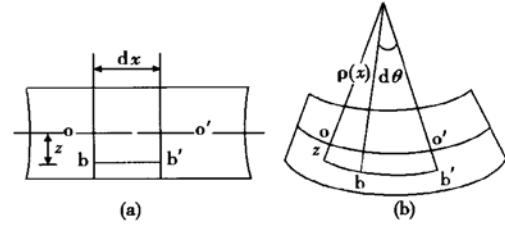


图 2 微元分析图 (a) 受力前; (b) 受力后

Fig. 2 Differential element analysis (a) Before inflict force; (b) After inflict force

现在讨论(2)式第二项: 在如图 1(b) 所示的坐标下, 曲线的长度为:

$$s = \int_{L/2}^{L/2} \sqrt{1 + y'^2} = \int_{L/2}^{L/2} \sqrt{1 + (\frac{\pi a}{L} \sin \frac{2\pi x}{L})^2} dx \quad (5)$$

式中 $\frac{\pi a}{L} \sin \frac{2\pi x}{L} \ll 1$, 可把上式简化为:

$$s = \int_{L/2}^{L/2} [1 + \frac{1}{2} (\frac{\pi a}{L} \sin \frac{2\pi x}{L})^2] dx \quad (6)$$

此梁在受力后由于拉伸所引起的长度变化 Δl 为:

$$\Delta l = s - L = \frac{1}{2} \int_{L/2}^{L/2} (\frac{\pi a}{L} \sin \frac{2\pi x}{L})^2 dx = \frac{\pi^2 a^2}{4L} \quad (7)$$

梁的整个拉伸伸长是由梁的三个不同部分(宽梁、细梁、三角梁(如图 1(a)))共同作用的结果, 从物理方程的角度来看, 梁的伸长可以表示为^[7]:

$$\Delta l = \int_{L/2}^{L/2} \frac{N(x)dx}{EA(x)} \quad (8)$$

式中 $N(x), A(x)$ 分别表示轴力和横截面面积, 在本文中 $N(x)$ 为一不变量, 记为 P , 对(8)式积分得:

$$\Delta l = 2 \frac{PL_b}{EW_{max}t} + \frac{PL_n}{EW_{min}t} + 2 \frac{PL_t}{EtW_{max}} \ln \frac{W_{max}}{W_{min}} \quad (9)$$

式中 $W_{max}, W_{min}, L_b, L_n, L_t, t$ 如图 1 所示, 分别表示梁的特征尺寸; E 为该材料的弹性模量. 细梁拉伸的应变 $\epsilon_{stretching}$ 为^[7]:

$$\epsilon_{stretching} = \frac{P}{EW_{min}t} \quad (10)$$

把(7), (9)式代入(10)式中化简整理得:

$$\epsilon_{stretching} = \frac{1}{2L_b \frac{W_{min}}{W_{max}} + L_n + 2L_t \frac{W_{min}}{W_{max}} \ln \frac{W_{max}}{W_{min}}} \times \frac{\pi^2 a^2}{4L} \quad (11)$$

把(4), (11)式代入(2)式中得细梁部分总的应变为:

$$\epsilon_r = \frac{2\pi^2 z}{L^2} \cos \frac{2\pi x}{L} + \frac{1}{2L_b \frac{W_{\min}}{W_{\max}} + L_n + 2L_t \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \ln \frac{W_{\max}}{W_{\min}}} \times \frac{\pi^2 a^2}{4L} \quad (12)$$

$$\sigma = E \epsilon_r \quad (13)$$

设想梁是由平行于轴线的横向纤维所组成, 梁的最大应力应在 $x=0, z=t/2$ 处(如图 2 所示), 由(12),(13)式得:

$$\sigma_{\max} = E \left(\frac{\pi^2 t}{L^2 a} + \frac{1}{2L_b \frac{W_{\min}}{W_{\max}} + L_n + 2L_t \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \ln \frac{W_{\max}}{W_{\min}}} \times \frac{\pi^2 a^2}{4L} \right) \quad (14)$$

一般 MEMS 薄膜是在高温条件下生长在另一种材料上面的, 而两种材料的膨胀系数不同, 冷却后在 MEMS 薄膜上就会产生残余应力。残余应力是张应力还是压应力要根据两种不同材料的温度系数来决定。这种应变记为 ϵ_r 。由于固定端不是无限大, 在所受拉力较大时固定端也会发生形变, 大小记为 η , η 对结果的影响虽小, 但准确值很难确定, 因此测试结构两边的固定端在工艺允许的情况下应做得大些, 以便减小这种因素对实验的影响。

考虑以上两因素的影响, (14) 式可表示为:

$$\sigma_{\max} = E \left(\frac{\pi^2 t}{L^2 a} + \frac{1}{2L_b \frac{W_{\min}}{W_{\max}} + L_n + 2L_t \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \ln \frac{W_{\max}}{W_{\min}}} \times \frac{\pi^2 a^2}{4L} \right) + E \frac{W_{\max}}{W_{\min}} \left(\epsilon_r - 2 \frac{\eta}{L} \right) \quad (15)$$

为了便于和原来模型比较, 将原理论公式写出为^[4]:

$$\sigma = E \frac{W_{\max}}{2W_{\min}} \left(\frac{a}{L} \right)^2 + E \frac{W_{\max}}{W_{\min}} \left(\epsilon_r - 2 \frac{\eta}{L} \right) \quad (16)$$

为了使外部检测容易实现, 本文提出用电容的方法检测, 上下极板间的电容为:

$$C = 2 \int_{L_n/2+L_t}^{L_n/2+L_t+L_{\text{pad}}} \frac{\epsilon_0 W_{\max}}{h - 0.5a(1 + \cos \frac{2\pi x}{L})} dx \quad (17)$$

对(17)式积分得:

$$C \approx 2 \frac{L_{\text{pad}} W_{\max} \epsilon_0}{(h^2 - ah)^{1/2}} \quad (18)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数。把实验中测得的断裂电容 C_{fracture} 代入(18)式求得 a , 然后把 a 代入到(15)式求得 σ_{fracture} 。这样就通过电容的测量来决定 MEMS 薄膜的纵向断裂强度。

4 模型验证

本文就不同的 h, L_n 进行了计算和模拟, 并把计算结果和模拟的结果进行了比较(计算和模拟时该结构的其他几何尺寸和材料参数参见表 1)。图 3 为

表 1 结构的几何尺寸和相关材料特性参数

Table 1 Mechanical properties and dimensions of the structure

L	W_{\max}	W_{\min}	L_{pad}	t	E	泊松比
$360\mu\text{m}$	$200\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	$150\mu\text{m}$	$2\mu\text{m}$	170GPa	0.22

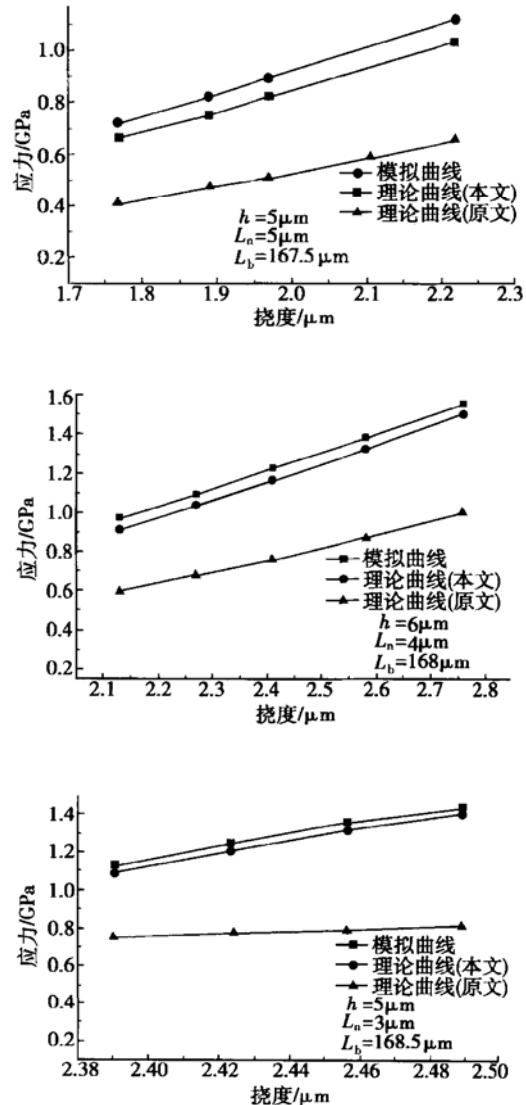


图 3 应力-挠度曲线图

Fig. 3 Maximum stress as a function of maximum deflection

应力-挠度曲线图, 图中的三条曲线分别为本文所得出的数学模型(15)式描绘的曲线, 原文给出数学模型(16)式描绘曲线以及 Coventor 模拟曲线, 由图可见本文所得出数学模型较原文所给出理论模型更符合模拟结果。图 4 为电容-挠度曲线图, 图中两条曲线分别为文中(18)式描绘曲线和 Coventor 模拟曲

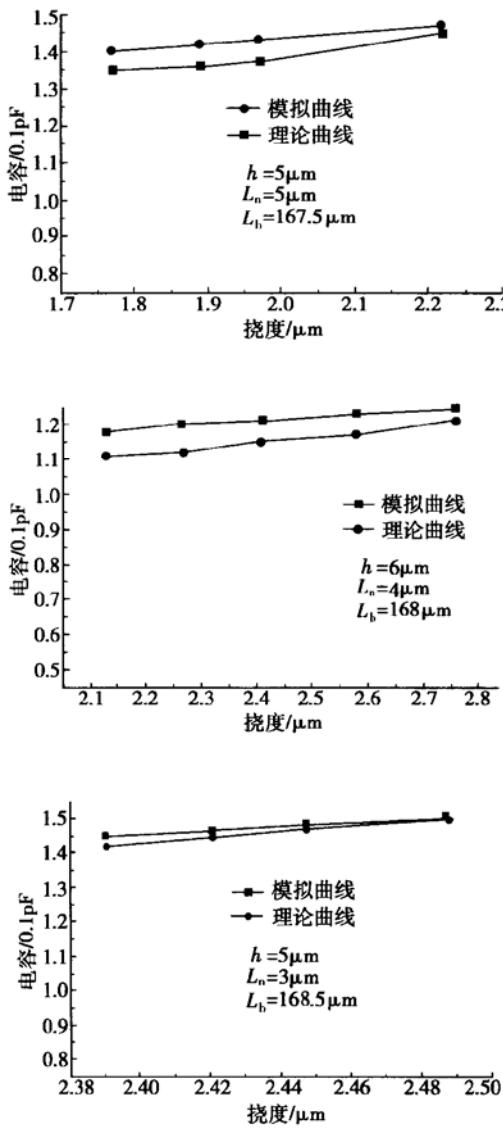


图 4 本文电容-挠度曲线图

Fig. 4 Capacitance as a function of maximum deflection

线。从图 4 可以发现, 模拟曲线和本文给出的数学描绘曲线吻合得相当好, 说明由本文所得出的数学模型是能够用于本结构断裂强度的计算。

5 结论

MEMS 薄膜断裂强度测试是 MEMS 测试方法学的一个重要方面, 同时也是 MEMS PCM (process control monitor) 中的重要部分之一。本文在 Bore 提出的测试结构的基础上给出了一种改进的数学模型。Coventor 模拟表明, 改进后的数学模型比原有的模型更准确。利用此模型能方便地测量薄膜的断裂强度。

参考文献

- [1] Mei Niansong, Huang Qing'an. Beam test structure of MEMS for measuring fracture strength. *Micronanoelectronic Technology*, 2002, 39 (12): 35 (in Chinese) [梅年松, 黄庆安. MEMS 薄膜断裂强度测试结构. 微纳电子技术, 2002, 39 (12): 35]
- [2] Biebl M, Philipsbon H V. Fracture strength of doped and undoped polysilicon. *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 1995, 249: 72
- [3] Tai Y C, Muller R S. Fracture strain of polysilicon. *Proc IEEE Solid State Sensors and Actuators workshop*, 1998: 88
- [4] Bore M P D, Jensen B D, Bitsie F. A small area in-situ MEMS test structure to measure fracture strength by electrostatic probing. *SPIE*, 1999, 3875: 97
- [5] Kapels H, Aigner R, Binder J. Fracture strength and fatigue of polysilicon determined by a novel thermal actuator. *IEEE Trans Electron Devices*, 2000, 47(7): 1522
- [6] Senturia S D. *Microsystem design*. Kluwer Academic Publishers, 2002
- [7] Liu Hongwen. *Material mechanics (Volume 1)*. Beijing: Higher Education Press, 1991 (in Chinese) [刘鸿文. 材料力学(上册). 北京: 高等教育出版社, 1991]

Modeling and Simulation of a Test Structure for Measuring Vertical Fracture Strength of MEMS Film

Mei Niansong and Huang Qing'an

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

Abstract: An improved mathematics modeling based on Bore's testing structure is presented. This mathematics modeling is a facility to measure fracture strength. The modeling is confirmed by Coventor software. Results indicate that this mathematics modeling is more precision than the original text mathematics modeling.

Key words: microcantilever beams; fracture strength; electrostatic test structure; mathematics modeling

EEACC: 2220; 2570

Article ID: 0253-4177(2004)01-0082-05

Mei Niansong male, was born in 1976, master candidate. He is engaged in the research on MEMS CAD.

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor and advisor of PhD candidates. He is engaged in the the reaserch on MEMS technology and Microelectronics teaching.

Received 19 January 2003, revised manuscript received 23 April 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics