

# 微机械梁内应力测量方法的研究\*

邹泉波 刘理天 李志坚

(清华大学微电子学研究所 北京 100083)

**摘要** 本文提出了两种测量悬空薄膜内应力的新方法: 阈值电压法和长梁挠曲法. 对两种方法进行了理论分析与实验验证, 并与已有的应力测量方法进行了对比, 取得了吻合的结果. 这两种方法测试非常简单, 且可实现薄膜内应力的“片内”检测. 其中, 阈值电压法既能测膜的张、压应力, 也能提取材料的弹性模量, 这使它成为一种非常有吸引力的应力测量方法.

**EEACC:** 2180B, 7310B; **PACC:** 4630R, 8170

## 1 引言

近年来, 表面微机械加工制造技术发展异常迅速, 由此制出的表面微结构、微机械和微传感器等, 由于有着和 IC 工艺兼容的美好前景, 日益受到重视. 薄膜内应力对膜的机械性能甚至电学性能有着显著的影响. 大的张应力不仅可以影响到传感器的灵敏度等性能参数, 还能使材料发生塑性变形, 甚至断裂; 压应力则会使表面微结构发生屈曲变形, 甚至与衬底永久粘住以致不能工作; 膜厚方向上各层内应力的不一致还可能导致完全自由膜(如悬臂梁、马达转子等)的翘曲变形. 所以, 微机械研究中薄膜内应力的研究十分重要, 且日益迫切.

薄膜内应力的测量方法很多, 传统方法有圆片翘曲法, X 射线法, 谐振法以及 Raman 谱分析法等等. 但这些方法测量都比较麻烦, 对多层膜结构又只能测量其总体效果, 且很难对薄膜进行“片内”应力检测——即在已完成微结构或微传感器的硅片或芯片上直接实现应力的检测. 最近 Delft 大学首次开发了一系列用表面微机械加工制造的测试图形<sup>[1]</sup>, 结构和工艺都很简单. 测试图形根据测量原理大致可分为两类: Buckling 结构和 Rotating 结构. 其中, Buckling 方法必须用一个梁(环)阵列才能测出应力的范围, 当精度要求高时, 就需要一个大的阵列, 这将使测量结构占用相当大的芯片面积, 而且这种方法只能测压应力, 不能测张应力; Rotating 方法不需阵列, 灵敏度高, 但加工时结构易受破坏, 且需要高放大倍数数的显微镜(如 SEM)来精确测定结构尺寸与指针偏转量. 本文提出两种简单确定内应力的方法: 梁阈值电压法和长梁挠曲法. 这两种方法分别仅需一个梁, 可以较精确地确定薄膜内应力. 其

\* 国家自然科学基金资助项目

邹泉波 男, 1968 年生, 博士生, 从事半导体传感器、微电子机械等研究

刘理天 男, 1947 年生, 从事半导体器件、集成传感器及微电子机械研究

李志坚 男, 1928 年生, 中国科学院院士、教授, 从事半导体器件、集成电路、微电子机械研究

1994 年 6 月 10 日收到初稿, 1994 年 7 月 8 日收到修改稿

中,梁阈值电压法还可得到材料的弹性模量等机械性能参量.用这两种方法都可简单地实现“片内”应力的检测.

本文同时用 Buckling 和 Rotating 结构对若干组不同尺寸的长梁和指针偏转结构进行了应力的测量,将其结果与梁阈值电压法和长梁挠曲法的测量结果的比较表明,几种测量方法的结果是基本吻合的.

## 2 测量原理

### 2.1 梁阈值电压( $V_{th}$ )法

基本结构和等效测试电路如图 1 所示,其中, $R_1C_1$  为外加测试元件, $R'$  和  $C_{beam}$  分别是接触电阻和梁电容.设梁长度方向初始内应力为  $\sigma_0$ ,在大挠度弯曲时产生的应力为  $\Delta\sigma$ .对梁作如下假定:

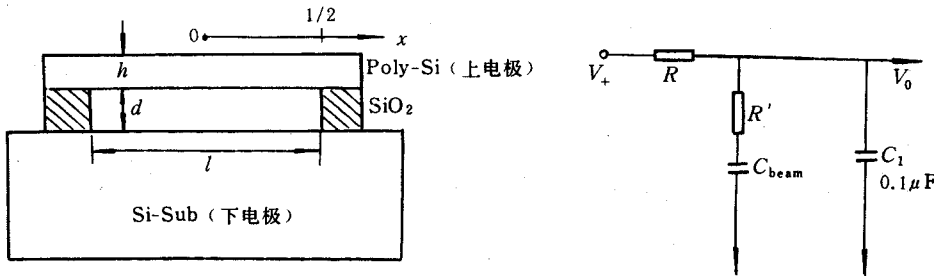


图 1  $V_{th}$ 法基本测试结构和测试电路

- (1) 梁材料均匀,边界理想固支;
- (2) 两极板间的电场发散性可以忽略.

由弹性力学知, $\Delta\sigma$  为沿梁长度方向不变的常量.假设  $\sigma_0$  作用于弹性范围内.设挠曲线方程为

$$W(x) = W_1 \cos^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) \tag{1}$$

其中, $W_1$  为梁中心的挠度.

在考虑了  $\sigma_0$  后,梁的轴向变形能为

$$U_{m1} = \frac{\sigma^2}{2E} V_{beam} = \frac{(\sigma_0 + \Delta\sigma)^2}{2E} hbl \tag{2}$$

将  $\Delta\sigma = E\Delta\epsilon = E\Delta l/l$  代入(2)式,可得

$$U_{m1} = U_0 + \frac{\sigma_0 hb\pi^2 W_1^2}{4l} + \frac{hbE\pi^4 W_1^4}{32l^3} \tag{3}$$

(其中, $E$ 、 $h$ 、 $b$ 、和  $l$  分别是梁轴向的弹性模量、梁厚、梁宽和梁长度)因为  $\Delta l/l$  可表示为

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{2l} \int_{-l/2}^{l/2} \left(\frac{dW}{dx}\right)^2 dx = \frac{\pi^2 W_1^2}{4l^2}$$

梁的弯曲变形能为

$$U_{m2} = \frac{EI}{2} \int_{-l/2}^{l/2} \left(\frac{d^2W}{dx^2}\right)^2 dx = \frac{\pi^4 EI W_1^2}{l^3} \quad (3)$$

其中,  $I = bh^3/12$  为梁的转动惯量.

静电电压  $V$  在析板间产生的静电能为

$$U_e = -\frac{1}{2} \int_{-l/2}^{l/2} \rho V dx = -\frac{1}{2} \epsilon_0 b V^2 \int_{-l/2}^{l/2} \frac{1}{d-W(x)} dx = -\frac{C_0 V^2}{2\sqrt{1-W_1/d}} \quad (5)$$

其中,  $\rho$  为极板间电荷密度,  $C_0 = \epsilon_0 bl/d$  为极板初始电容. 能量泛函  $\Pi = U_{m1} + U_{m2} + U_e$ . 阈值电压  $V_{th}$  点是合力为零的临界点, 也是合力的极值点(此点之前, 合力恒为零; 超过此点后合力不再为零且方向一定), 应满足

$$\frac{\partial \Pi}{\partial W_1} = 0 \quad \text{及} \quad \frac{\partial^2 \Pi}{\partial W_1^2} = 0 \quad (6)$$

两式分别求导, 得

$$\begin{cases} -AW_1 - BW_1^3 + \frac{C}{(1-W_1/d)^{3/2}} = 0 \\ -A - 3BW_1^2 + \frac{3C}{2d(1-W_1/d)^{5/2}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中,

$$A = \frac{\pi^2 \sigma_0}{2l} + \frac{\pi^4 E h^2}{6l^3}, B = \frac{\pi^4 E}{8l^3}, C = \frac{\epsilon_0 l V^2}{4d^2 h}$$

联立(7)中两式, 并令  $y = W_1/d$ , 得

$$9Bd^2 y^3 - 6Bd^2 Y^2 + 5Ay - 2A = 0 \quad (8)$$

在  $E, \sigma_0$  给定后, 对一定的梁, 可用迭代法由(8)式解出  $y$ , 即临界点  $y_c$ , 继而求得临界点  $W_{1c}$ , 再由(7)式可求出  $V_{th}$ .

由此原理可得两种应力计算方法:(一)假定  $E$  已知, 由实测  $V_{th}$  立即得到  $\sigma_0$ ; (二)同时提取  $E$  和  $\sigma_0$ , 这需要至少两个梁的实测  $V_{th}$  值, 调整  $E$  和  $\sigma_0$ , 当计算与实测各点之间的总误差最小时, 认为得到优化的  $E$  和  $\sigma_0$  值.

不同内应力下  $V_{th} \sim l$  关系曲线如图 2 所示.  $V_{th}$  测量电路如图 1 所示. 当  $V_+$  从 0V 上升到一定值时,  $V_0$  突降, 说明两电极(梁与衬底)接触后放电. 这点对应的  $V_0$  (即  $V_+$ ) 即是  $V_{th}$ .

### 2.2 长梁挠曲法

两端固支长梁在压缩应力的作用下, 会产生如图 3 所示的挠曲. 只测出  $W_1$  或挠曲线  $W(x)$ , 即可确定内应变  $\epsilon$ . 计算  $\epsilon$  方法有二:  $W(x)$  假定法和测定法.

#### 2.2.1 $W(x)$ 假定法

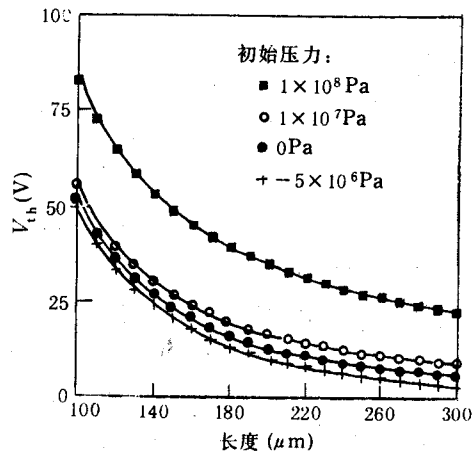


图 2  $V_{th} \sim l$  理论曲线

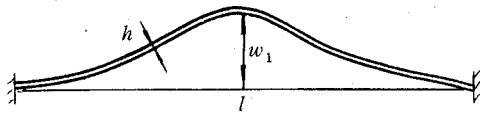


图 3 固支梁挠曲

假定  $W(x) = W_1 \cos^2(\pi x/l)$ , 则压应变  $\epsilon$  为

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{2l} \int_{-l/2}^{l/2} \left( \frac{dW}{dx} \right)^2 dx = \frac{\pi^2 W_1^2}{4l^2} \quad (9)$$

因此, 只要测出  $W_1$  即可定出  $\epsilon$ . 对双端固支梁, 产生弯曲的临界应变  $\epsilon_c$  满足下式<sup>[2]</sup>

$$\epsilon_c = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \quad (10)$$

由此可导出临界点  $W_{1k}$  为

$$W_{1k} = 4[(bh^3/12)/bh]^{1/2} \doteq 1.1h \quad (11)$$

上式实际上可作为梁是否临界挠曲的判据. 由于测量精度限制, 实验中并未直接测量临界点的  $L_c$  和  $W_{1k}$ , 而是测量长梁的挠曲量.

遗憾的是,  $W(x)$  假定法舍去了太多的高次项, 带来了比较大的误差, 这已在实验中观察到. 因此, 应当用更精确的  $W(x)$  测定法.

### 2.2.2 $W(x)$ 测定法

精确测定梁长方向挠曲线分布  $W(x)$  后, 用曲线拟合法得出  $W(x)$ , 由公式(9)算出  $\epsilon$ .

## 3 实验结果及分析

实验所用工艺之一如下: 有 N(100)Si 衬底上 LPCVD 一层约 8000 Å 厚的  $\text{SiO}_2$ , 致密后在 600°C 的温度、0.16SLM  $\text{SiH}_4$ (20%) 流量下 LPCVD 约 1 μm 厚多晶硅, 然后在 945°C 下扩磷 10 分钟, 测得方块电阻为 25 Ω/□. 为消除残余应力, 在 1040°C、 $\text{N}_2$  中退火 40 分钟. 再生长一层厚度为 2000 Å 的 LPCVD  $\text{SiO}_2$  作为刻多晶的掩模, 致密后光刻, 用 BHF 腐蚀  $\text{SiO}_2$  到多晶, 然后干法刻蚀(RIE)多晶硅. 最后在 BHF(1:1) 中进行牺牲层的腐蚀, 时间约为 20 分钟, 完毕后经优化的烘干工艺处理, 即得自由结构. 工艺之二为: 在同样的衬底上 LPCVD 1 μm 厚的  $\text{SiO}_2$ , 致密后刻出牺牲层区, 经氮烘, 在 610°C 温度、0.23SLM  $\text{SiH}_4$ (20%) 流量下 LPCVD 2 μm 厚的多晶硅, 945°C 下扩 P 45 分钟, 得方块电阻为 9 Ω/□, 然后在同样条件下退火 40 分钟, 低氧(LTO)2000 Å 致密作为刻多晶的掩模. 刻完多晶后, 在(1:1)BHF 中进行牺牲层腐蚀(20 分钟), 完成后经特殊的烘干处理即得自由结构. 其中工艺一所得结构为无台阶梁, 且梁与衬底用  $\text{SiO}_2$  作电绝缘, 可用于测  $V_{th}$  等; 工艺二所得结构有台阶, 梁与衬底无电绝缘, 因而只能用其它方法测应力. 以下分别介绍各种测量方法的结果.

### 3.1 阈值电压( $V_{th}$ )法

实验所用测试电路如图 1 所示.  $V_{th}$  测量方法非常简单(见上节). 当  $R, R'$  和  $C_1$  等选择合适时, 只要  $V_+ > V_{th}$ ,  $V_o$  将出现振荡, 产生“充电吸合→放电弹开”的循环过程<sup>[3]</sup>, 此时调节  $V_+$ , 可看到充电过程的变化从而导致的  $V_o$  振荡频率的变化. 由此可很容易地决定出  $V_{th}$  值. 表 1 列出在设定一般所用的  $E$  值不用  $V_{th}$  法测出应力的一组结果.

对同一芯片, 只要测出两个以上梁的  $V_{th}$  值, 即可由机械参数提取程序(原理及提取方法如前所述)同时得到弹性模量  $E$  及应力  $\sigma_o$ . 图 4 和表 2 分别示出不同芯片  $V_{th} \sim l$  关系和参数提取结果. 由图 4 可见, 在不考虑梁的初始应力时, 算出的  $V_{th}$  值与提取值有较大的差异.

表 1  $V_{th}$ 法测多晶硅梁应力(假定  $E=1.69 \times 10^{11} \text{Pa}$ )

样品号	I*-1	I-2	I-3	I-4
梁长( $\mu\text{m}$ )	60	60	100	100
梁厚( $\mu\text{m}$ )	0.67	0.82	1.06	1.11
$V_{th}(V)$	39.1	62.4	26.1	28.9
$\sigma_0(-\text{MPa})$	40.5	24.4	32.5	32.4

(I\*表示第一组工艺,以后 I 表示第二组工艺)

### 3.2 长梁挠曲法

为了精确定出  $W_1, L$  最好取得足够大. 实验发现, 当  $L=1200\mu\text{m}$  时,  $W_1 > 20\mu\text{m}$ . 本文对  $W(x)$  假定法和测定法进行了研究. 一些长梁沿长度方向上的  $W(x)$  分布由显微镜粗略测出, 精度约为  $\pm 1\mu\text{m}$ . SEM 也清晰地看到与实测一致的挠曲线. 对实测  $W(x)$  的拟合, 考虑到目的是计算梁长伸长量  $\Delta l/l$  (即  $\epsilon$ ), 取级数解形式如下:

$$W(x) = \sum_{k=0}^n W_k \cos\left(\frac{2k\pi}{l}x\right) \tag{12}$$

拟合结果表明, 当  $n$  取 2 时, 已有相当高的精度.  $n$  太大时, 反而会使拟合曲线产生“振荡”. 图 5 示出了  $n$  取不同值时的拟合结果. 对样品 I-N<sub>15</sub>, 取  $n=2$ , 则有

表 2 多晶硅梁机械性能参数提取结果

样品序号	I-2		I-3			I-4			I-5	
梁厚( $\mu\text{m}$ )	0.82		1.06			1.11			0.96	
梁长( $\mu\text{m}$ )	60	100	60	100	140	60	100	140	60	100
$V_{th}(V)$	62.4	16.3	91.9	26.1	5.4	98.3	28.9	7.5	72.4	12.0
提取 $E(\text{Pa})$	$1.73 \times 10^{11}$		$1.73 \times 10^{11}$			$1.71 \times 10^{11}$			$1.76 \times 10^{11}$	
$ \sigma_0 (\text{Pa})$	$2.6 \times 10^7$		$3.2 \times 10^7$			$3.4 \times 10^7$			$5.2 \times 10^7$	
$ \epsilon (\text{ppm})$	150.3		190.8			198.8			295.5	

$\epsilon = \Delta l/l = (\pi/l)^2(W_1^2 + 4W_2^2)$  拟合结果为

$W_0=8.06, W_1=11.23, W_2=2.88$  单位:  $\mu\text{m}$

如取  $n=1$  (此时设  $W(x)=W_1 \cos^2(\pi x/l)$ ), 有

$\epsilon = \Delta l/l = \pi^2 W_1^2 / 4l^2$  拟合结果:  $W_1=22.2\mu\text{m}$

可见, 按  $W(x)$  假定法 ( $n=1$ ) 计算出的  $\epsilon$  比精确值 ( $n=2$  为准) 小 23%, 即有较大的误差.

利用实测  $W(x)$  曲线计算出的应变与用假定法得到的值比较如表 3. 用假定法对同一芯片上不同长度的梁的应变进行了测定, 其结果基本一定, 如图 6 所示.

### 3.3 其它方法

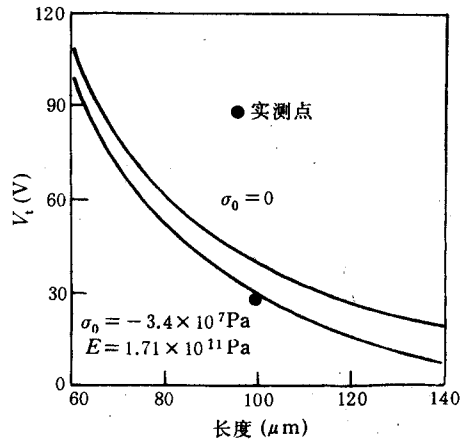


图 4  $E=1.71 \times 10^{11} \text{Pa}$  样品 I-4  $V_{th} \sim l$  关系

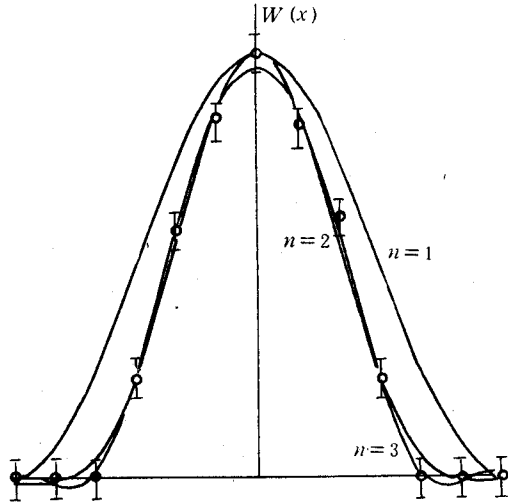


图 5  $n$  值不同值时拟合曲线

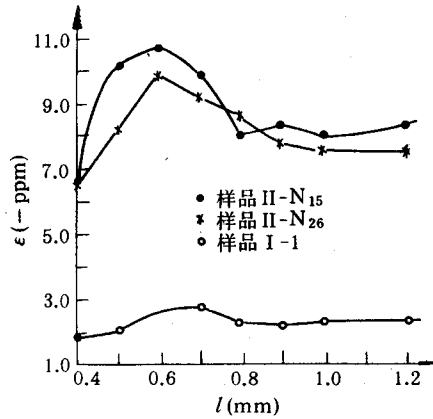


图 6 不同长度梁测  $\epsilon$  结果

主要包括 Buckling 和 Rotating 两种方法.

3.3.1 梁阵列法(Lc 法)——Buckling Structure

实验中作了二十几个长度不同的梁,由此只能粗略确定  $\epsilon$  的上、下界限.

3.3.2 指针偏转法——Rotating Structure

实验设计了细颈宽度分别为 0.6, 0.8, 1.2, 2.0 和 4.0  $\mu\text{m}$  的结构. 经 RIE 后, 2.0、4.0  $\mu\text{m}$  的结构多数保持完好, 且剩很细(约 1—2  $\mu\text{m}$ ) 的连条. 值得指出的是, 文献[1]中由指针偏转量计算  $\epsilon$  的公式中, 只考虑了二维效果. 由于结构易塌, 这会造成指针在零应变下的偏转, 因此, 计算中应考虑到三维效应. 表 4 为考虑和不考虑三维补偿时不同样品中用 Rotating 结构测出的应变结果. (三维补偿中设梁挠曲线如(1)式).

表 3  $W(x)$  假定法与测定法测量结果比较

样 品 号	I - N <sub>15</sub>	II - N <sub>31</sub>	I - 1
假定法 $ \epsilon $ (ppm)	829	439	239
测定法 $ \epsilon $ (ppm)	1020	538	293

表 4 不同样品中的应变(细颈宽 4.0  $\mu\text{m}$ )

样品号	I - 1	I - 2	I - 3	I - 4	I - 5
$\epsilon$ (-ppm)	212	134	194	194	307
$\epsilon'$ (-ppm)	228	150	210	210	323

表中  $\epsilon$  和  $\epsilon'$  分别为不考虑和考虑三维补偿时的应变结果.

3.4 几种应力测量方法比较

各种应力(变)测量方法的结果汇于表 5.

限于条件, 长梁挠曲法测  $W(x)$  曲线时, 仅是在  $\times 600$  倍显微镜下目测结果, 精度有限, 且受膜表面颗粒度的影响, 只有在颗粒较大的情况下, 才能测得较准确的挠曲线. 本实验中,  $W(x)$  精度约在  $\pm 1 \mu\text{m}$ , 对  $W_1 \sim 20 \mu\text{m}$  的长梁来讲,  $\epsilon$  误差在  $\pm 10\%$  范围内. 而用 Lc 法确定挠曲临界点本来就很难, 烘干工艺对 Lc 也有显著影响, 加之结果对厚度和边界条件灵敏, 从而导致较大的误差. Rotating 结构最大的缺点之一就是当指针偏转不明显时, 要用 SEM 或照片放大, 且细颈宽度不够小时要用有限元分析法定出修正因子  $C_F$ . 因此,  $V_{th}$  法更

得简单、方便和有效. 进一步的实验将把  $V_{th}$  法应用于复合膜应力的测量上.

表 5 各种应力测量方法结果比较(表中数据为  $\epsilon[-ppm]$ )

样 品 号	I -N <sub>31</sub>	I -1	I -2	I -3	I -4	I -5
$V_{th}$ 法		240	144	192	192	277
长梁挠曲	439	239	165	210	183	302
Lc 法	230~515	148~330	113~200	114~182	125~207	155~304
Rotating	463	228	150	210	210	323

## 4 结 论

本文通过对测量应力结构的  $V_{th}$  的理论分析, 得到了一种简单、有效的测量应力的新方法, 并在多晶硅的实验中验证了此方法的正确性和可靠性. 本方法易于实现, 测量简单, 占用芯片面积小, 精度也较高. 不仅可测张、压应力, 而且还可提取材料的弹性膜量, 且容易实现薄膜内应力的“片内”检测, 因此本方法在薄膜材料的机械性能参数测试方面有着广阔的应用前景. 另外, 通过对长梁释放后挠度的测定, 也实现了另一种内应力的检测方法, 该法在测量比较大的压应力时也可有足够的精度, 且具有测量结构简单, 易于测量等优点. 也是一种易于实现薄膜内应力的“片内”检测的方法.

**致谢** 本工作曾得到了清华大学微电子所器件物理室各位老师和工人师傅的热心帮助, 在此表示感谢.

## 参 考 文 献

- [1] J. F. L. Goosen *et al.*, *Transducer*'93, 1993, **93**:783.
- [2] H. Guckel *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1985, **57**:1671.
- [3] X. Q. Sun *et al.*, *Sensors and Actuators*, 1993, **A35**:189.

## Study of Techniques for Measuring Residual Stress in Micromachined Films

Zou Quanbo, Liu Litian and Li Zhijian

*(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)*

Received 10 June 1994, revised manuscript received 8 July 1994

**Abstract** New stress measurement methods for measuring both compressive stress and tensile stress and Young's modulus in surface micromechanical devices are presented. The investigation is concentrated on the development of two techniques: (1) Beam Pull-In voltage ( $V_{PI}$ ) and (2) Long Beam Deflection (LBD). Both techniques have been analyzed, tested experimentally and the comparison with other known stress measurement techniques shows good consistence using polysilicon films. The two techniques have been shown to be quite promising for simple and accurate on-chip stress measurements.

**EEACC:** 2180B, 7310B; **PACC:** 4630R, 8170