

# 多晶硅薄膜热膨胀系数的电测试结构\*

胡冬梅 黄庆安<sup>†</sup> 李伟华

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** 提出了一种新型多晶硅薄膜热膨胀系数的电测试结构, 给出了热机电耦合模型和测试方法, 并利用 Coventor 软件和 ANSYS 软件进行模拟和验证. 分析表明模拟结果和理论结果基本一致, 从而验证了该模型. 该方法能够实现多晶硅薄膜热膨胀系数的在线提取, 测量方便, 独立性较高, 以电学量形式输出, 对于薄膜热膨胀系数的在线检测有一定参考价值.

**关键词:** 热膨胀系数; 多晶硅薄膜; 电测试; 吸合

**EEACC:** 2575F; 8460

**中图分类号:** TN307

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)10-2018-05

## 1 引言

MEMS 薄膜在微机械和微电子器件中占有重要的地位. 在设计和制造 MEMS 器件时, 需要很多薄膜材料的机械特性参数, 其中, 薄膜材料的热膨胀系数(TEC)便是一个比较重要的机械材料参数. 一方面, 薄膜材料的热膨胀对微电子器件与 MEMS 结构的性能有较大影响, 例如薄膜和衬底热膨胀系数的失配会产生热应力, 并引起微电子器件或者微机械结构的可靠性下降; 另一方面, 热膨胀也是微热执行器的动力来源. 很多文献给出了物质体材料的热膨胀系数, 然而体材料的热膨胀系数与薄膜材料的热膨胀系数有着一定的差异. 而且, 即使是同一种薄膜材料, 经过不同的工艺加工过程处理以后, 热膨胀系数也不一定相同. 因此, 在线测量微机械薄膜实际热膨胀系数的结构具有重要意义.

薄膜热膨胀系数的测试方法较多, 主要有双层薄膜梁结构、薄膜翘曲结构、T 形结构、不等宽梁结构以及差分电容式结构<sup>[1~6]</sup>. 这些结构和方法各有其优缺点, 能够满足在实验室进行薄膜热膨胀系数的测量要求, 但是它们都不适用于在线检测. 在线检测是指: 测试结构的工艺与待测薄膜的加工工艺应该相兼容, 且不能有特殊要求的工艺步骤, 并且对测试环境和测试仪器的要求不应较高. 本文提出了一种通过电学激励电学测量提取出多晶硅薄膜热膨胀系数的在线结构、模型和方法. 此模型利用双端固支梁的固有特性并从中提取出一系列参数, 经过数据处理, 即可获得多晶硅薄膜的热膨胀系数. 通过 ANSYS 和 Coventor 软件模拟, 验证了本文提出的模型, 该测试方法有望在实际中应用.

## 2 测试原理

笔者测量多晶硅薄膜热膨胀系数的方法是基于双

端固支梁的吸合(pull-in)现象提出的. 测试方法可以简单地归结如下: 第一步, 先在双端固支梁的上下极板间加电压, 测得其发生吸合时的吸合电压值  $V_0$ ; 第二步, 待固支梁恢复到初始状态后, 在梁中通以恒定电流, 用示波器记录下梁两端电压(电阻)的变化曲线, 梁受热最终达到热稳态, 测得热稳态时梁的吸合电压  $V_1$ . 根据前后两次吸合电压的变化可推得残余应力的变化, 从而得到加热后梁中产生的热应力值. 而根据示波器记录的梁两端电压的变化曲线, 可以得到加热后固支梁上温度的变化. 最后, 根据得到的热应力值和梁上的温度变化值, 利用关系式就可以计算得到多晶硅薄膜的热膨胀系数.

## 3 测试结构模型

### 3.1 多晶硅薄膜上温差的提取

图 1 是多晶硅薄膜热膨胀系数测试结构的剖面图, 这是一个表面加工工艺制作的双端固支梁结构, 多晶硅梁的电阻大小由工艺决定.

在一定温度范围内, 通常可以认为多晶硅薄膜的电阻率及其温度系数满足以下线性方程<sup>[5,7,8]</sup>:

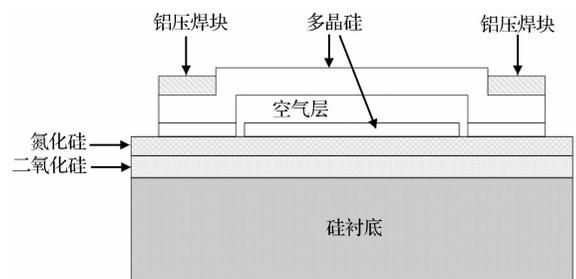


图 1 多晶硅薄膜热膨胀系数测试结构的剖面图

Fig.1 Schematic diagram of the test structure for the thermal expansion coefficient of polysilicon thin films

\* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号:2006AA04Z302)

<sup>†</sup> 通信作者. Email:hqa@seu.edu.cn

2008-04-07 收到, 2008-05-12 定稿

$$\rho = \rho_0 [1 + \xi(T - T_0)] \quad (1)$$

式中  $\xi$  为电阻率的线性温度系数； $\rho$  和  $\rho_0$  分别为梁在温度  $T$  和  $T_0$  下的电阻率。

当在梁上施加恒定电流时，梁受热最终达到热稳态，根据能量守恒定律，综合考虑辐射、对流及对衬底的散热等因素，其瞬态传热方程为<sup>[2,4]</sup>：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a_p} \times \frac{\partial T}{\partial t} + \epsilon \left[ T - T_0 - \frac{J^2 \rho_0}{k\epsilon} \right] \quad (2)$$

该式中的参数如下：

$$\epsilon = \frac{G}{kwh} - \frac{J^2 \rho_0 \xi}{k} \quad (3)$$

$$G = \beta(2h + w) + 4\epsilon^* \delta(2h + w) T_0^3 + \frac{S}{R_T} w \quad (4)$$

$$S = \frac{h}{w} \left( \frac{2t_v}{h} + 1 \right) + 1 \quad (5)$$

$$R_T = \frac{t_v}{k_v} + \frac{t_s}{k} + \frac{t_n}{k_n} + \frac{t_o}{k_o} \quad (6)$$

其中  $T$  为梁的温度分布； $x$  为梁长度方向的位置； $t$  为时间； $w$  和  $h$  分别为梁的宽度和厚度； $a_p$  是多晶硅的热扩散系数； $J$  是加热电流的电流密度； $\rho_0$  是多晶硅电阻的初始电阻率； $T_0$  为衬底温度(室温)； $k$  是多晶硅的热导率； $\xi$  为多晶硅电阻的温度系数； $\beta$  是自然对流系数； $\epsilon^*$  是梁的辐射发射率； $\delta = 5.67 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  是 Stefan-Boltzman 常数； $S$  是热传导形状系数； $R_T$  是空气层、多晶硅电极层、氮化硅层和二氧化硅层的等效热阻； $t_v, t_s, t_n, t_o$  和  $k_v, k, k_n, k_o$  分别是空气层、多晶硅电极层、氮化硅层和  $\text{SiO}_2$  层的厚度和热导率。

瞬态传热的初始条件和边界条件为：

$$\begin{cases} T(x, 0) = T_0 \\ T(0, t) = T_0 \\ T(l, t) = T_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $l$  是梁的长度。

经过计算及合理近似<sup>[5]</sup>，可得梁上平均温度随时间变化的表达式：

$$\begin{aligned} \bar{T}(t) &= \frac{1}{l} \int_0^l T(x, t) dx \\ &= T_0 + \frac{J^2 \rho_0}{k\epsilon} - \frac{2J^2 \rho_0}{k\epsilon l \sqrt{\epsilon}} \times \frac{\exp\left(\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right) - \exp\left(-\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right)}{\exp\left(\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right) + \exp\left(-\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right)} + \\ &\quad \frac{4J^2 \rho_0}{k\epsilon \pi} \left( -\frac{2}{\pi} + \frac{2\pi}{\epsilon l^2 + \pi^2} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{其中 } \tau = \frac{l^2}{a_p(\epsilon l^2 + \pi^2)}. \quad (9)$$

这样，在梁达到热稳态，即  $t \rightarrow \infty$  时，有：

$$\Delta \bar{T} = \frac{J^2 \rho_0}{k\epsilon} - \frac{2J^2 \rho_0}{k\epsilon l \sqrt{\epsilon}} \times \frac{\exp\left(\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right) - \exp\left(-\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right)}{\exp\left(\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right) + \exp\left(-\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right)} \quad (10)$$

根据(1)和(8)式可得到梁上平均电阻随时间的变化关系式

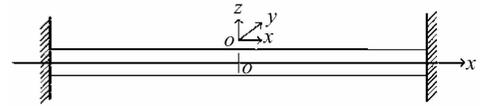


图 2 热应力作用下的双端固支梁

Fig.2 Schematic diagram of the clamped-clamped beam

$$\bar{R}(t) = R_0 [1 + \xi(\bar{T}(t) - T_0)] = R_\infty + AR_0 \exp(-t/\tau) \quad (11)$$

式中  $R_\infty = R_0 + R_0 \xi \times$

$$\left[ \frac{J^2 \rho_0}{k\epsilon} - \frac{2J^2 \rho_0}{k\epsilon l \sqrt{\epsilon}} \times \frac{\exp\left(\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right) - \exp\left(-\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right)}{\exp\left(\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right) + \exp\left(-\frac{\sqrt{\epsilon} l}{2}\right)} \right], \text{可见, } R_\infty \text{ 是}$$

梁达到热稳态时的平均电阻,  $A = \xi \frac{4J^2 \rho_0}{k\epsilon \pi} \times \left( -\frac{2}{\pi} + \frac{2\pi}{\epsilon l^2 + \pi^2} \right)$ .

由(11)式变换得：

$$\ln\left(\frac{R_\infty - \bar{R}(t)}{R_0}\right) = \ln(-A) - \frac{t}{\tau} \quad (12)$$

梁的初始电阻  $R_0$  在实验前可测得，梁的瞬态电阻  $\bar{R}(t)$  和梁达到热稳态时的电阻  $R_\infty$  也可以通过实验测得，这样通过(12)式可线性拟合得到  $\tau$ 。采用多晶硅薄膜热扩散率的测量方法<sup>[9]</sup>，通过(9)式可以得到  $\epsilon$ 。再将  $\epsilon$  代入(10)式可得到多晶硅梁上的温差  $\Delta \bar{T}$ 。

### 3.2 多晶硅薄膜热应力的提取

#### 3.2.1 热应力的理论推导

对双端固支梁加热，如图 2 所示，可知梁内存在热膨胀和轴向应力。因为多晶硅梁两端是固定住的，所以梁的长度不能发生变化，这意味着梁内的应变必须为 0。在这样的约束下，轴向应力引起的轴向应变抵消了热膨胀引起的应变。这样就可推得多晶硅薄膜中因受热产生的热应力为<sup>[10]</sup>：

$$\sigma_{th} = -E\alpha_T \Delta \bar{T} \quad (13)$$

式中  $E$  为杨氏模量； $\alpha_T$  是热膨胀系数； $\Delta T$  是温差。

#### 3.2.2 热应力对吸合电压的影响

通常认为，薄膜中的残余应力分为热应力和内应力两种。内应力也称为本征应力。热应力是由于薄膜和基底材料热膨胀系数的差异引起的，所以也称为热失配应力<sup>[11]</sup>。热应力作为残余应力的一种，必然会影响到双端固支梁的许多特性，这其中包括固支梁的吸合电压。

在温度变化范围不大时，可以近似认为多晶硅的杨氏模量不变<sup>[12]</sup>，因此，对于固定尺寸的固支梁，热应力的变化将直接引起吸合电压的变化。

利用表 1 中的数据，将他们代入到 3.1 节中的热学公式及(13)式中，并且取不同的电流密度值，可得到与之对应的不同的热应力值(图 3 所示)，再将热应力代入双端固支梁吸合电压的解析表达式中<sup>[13]</sup>，可得到不同热应力值影响下的吸合电压值(图 4 所示)。从图 4 可看出，吸合电压确实随热应力的变化而有规律地变化。

表 1 软件模拟所用参数  
Table 1 Parameters in the simulation

长度 $l$	$200\mu\text{m}$	宽度 $w$	$10\mu\text{m}$
多晶硅热导率 $k$	$3 \times 10^{-5}$ $\text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{K})$	厚度 $h$	$2\mu\text{m}$
空气层热导率 $k_v$	$2.6 \times 10^{-8}$ $\text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{K})$	空气层厚度 $t_v$	$2\mu\text{m}$
氮化硅热导率 $k_n$	$2.25 \times 10^{-6}$ $\text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{K})$	氮化硅厚度 $t_n$	$0.18\mu\text{m}$
氧化硅热导率 $k_o$	$1.4 \times 10^{-6}$ $\text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{K})$	氧化硅厚度 $t_o$	$0.3\mu\text{m}$
多晶硅电极厚度 $t_s$	$0.3\mu\text{m}$	初始电阻率 $\rho_0$	$11\Omega \cdot \mu\text{m}$
多晶硅薄膜热容 $C$	$1.134 \times 10^6$ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	多晶硅薄膜密度 $\rho$	$2.3\text{kg}/\text{m}^3$
发射因子 $\epsilon^*$	0.6	泊松比 $\nu$	0.23
热膨胀系数 $\alpha_T$	$2.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	自然对流系数 $\beta$	$10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
温度系数 $\xi$	$1.3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$	初始温度 $T_0$	300K
多晶硅热扩散系数 $a_p$	$1.15 \times 10^{-5}$ $\text{m}^2/\text{s}$	初始残余应力 $\sigma_0$	100MPa
加热电流密度 $J$	$6 \times 10^{-4}$ $\text{A}/\mu\text{m}^2$	杨氏模量 $E$	165GPa

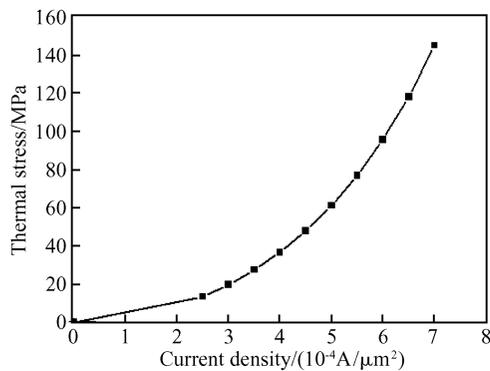


图 3 热应力随电流密度的变化

Fig. 3 Thermal stress changes with the current density

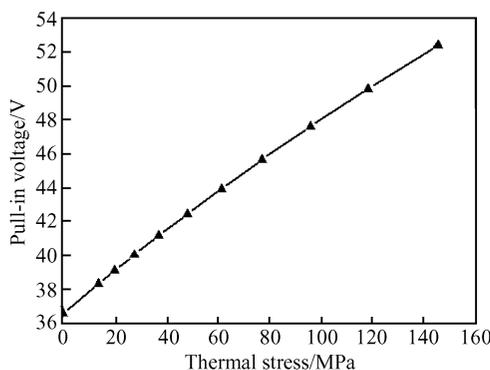


图 4 吸合电压随热应力的变化

Fig. 4 Pull-in voltage changes with the thermal stress

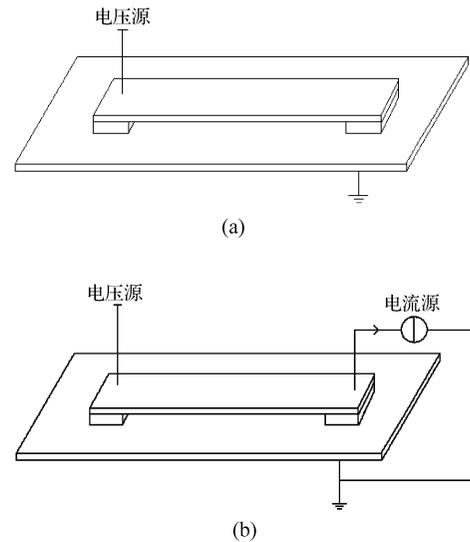


图 5 双端固支梁热应力的测量结构 (a) 梁上未加电流; (b) 梁上通电流

Fig. 5 Schematic diagram of the test structure for the thermal stress of clamped-clamped beams (a) Before the current heating; (b) After the current heating

### 3.2.3 热应力的提取

双端固支梁制作完成后, 如果再对其加热, 那么加热后增加的残余应力可认为是热应力. 我们可通过测量加热前后的残余应力值来得到加热后产生的热应力值.

多晶硅薄膜热应力的测量步骤如下: 先在梁的上下极板间加电压, 如图 5(a) 所示, 测得其发生吸合时的电压值  $V_0$ , 然后利用双端固支梁吸合电压的解析表达式<sup>[13]</sup>, 经迭代计算可得到梁的初始残余应力  $\sigma_0$ ; 待梁恢复到初始状态后, 在梁中通一恒定电流, 如图 5(b) 所示, 梁受热最终达到热稳态, 测得热稳态时梁的吸合电压  $V_1$ , 经迭代计算得到这时的残余应力  $\sigma_1$ . 这样就得到梁受热后产生的热应力  $\sigma_{th} = \sigma_1 - \sigma_0$ .

### 3.3 多晶硅薄膜热膨胀系数的提取

根据(13)式可推得多晶硅薄膜的热膨胀系数为:

$$\alpha_T = -\frac{\sigma_{th}}{E\Delta T} \quad (14)$$

$\sigma_{th}$  可以通过 3.2.3 小节得到,  $\Delta T$  可以通过 3.1 小节得到. 而在温度变化范围不大时,  $E$  可以近似认为不变<sup>[12]</sup>. 这样通过(14)式就可以很容易得到多晶硅薄膜的热膨胀系数  $\alpha_T$ .

## 4 软件模拟验证

用 Coventor 软件和 ANSYS 软件对本文的测试结构进行模拟, 并给出合理的评估. 软件模拟中使用的参数参照表 1.

### 4.1 闭环验证热应力的提取过程

通过预设热应力值, 加上固支梁中初始的残余应力值, 经软件模拟可得吸合电压值, 将此吸合电压代入已

表 2 热应力的模拟结果

Table 2 Simulated result of the thermal stress

热应力值	设定值	模拟结果	误差
$\sigma_a$ /MPa	50	51.32	2.64%
$\sigma_b$ /MPa	100	102.24	2.24%

有的公式中,经计算可得到热应力值,将计算得到的热应力值和预设的热应力值进行比较,完成闭环验证的过程.具体过程如下:

利用表 1 中列出的材料参数以及预设的热应力值,通过 Coventor 软件模拟出吸合电压值,再利用已有的双端固支梁吸合电压的解析表达式迭代计算得到热应力值(见表 2),从表 2 可见计算得到的热应力值与预设的热应力值之间的误差是很小的.这说明通过测量加热前后双端固支梁的吸合电压变化值来得到热应力的方法是可行的.

#### 4.2 验证温差及热膨胀系数的提取过程

在多晶硅双端固支梁中通以电流,用 ANSYS 软件进行模拟,分析其瞬态过程,并对模拟得到的数据用 Matlab 软件进行处理,最终得到梁上的平均温度和电阻随时间变化的曲线分别如图 6 和图 7 所示.从图中可以看出,温度和电阻随时间的变化趋势与模型推导出的(8)和(11)式相符合,以指数形式变化最终达到稳态.

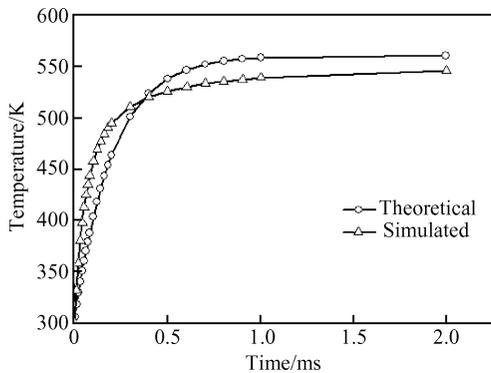


图 6 梁上平均温度随时间的变化关系  
Fig.6 Average temperature changes with time

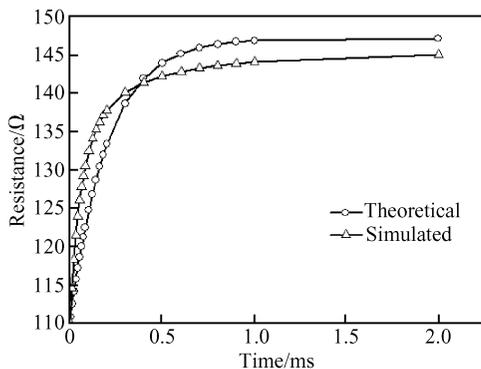


图 7 梁电阻随时间的变化关系  
Fig.7 Resistance changes with time

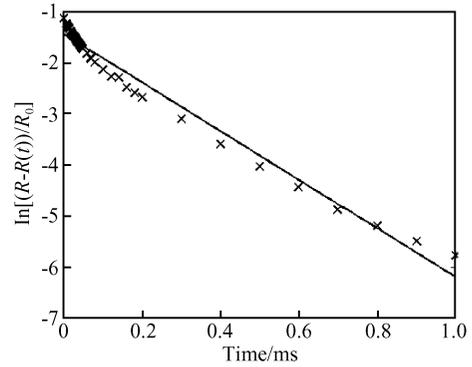


图 8 梁上电阻经线性化处理后随时间变化的关系  
Fig.8 Resistance after linear fitting changes with time

根据模拟得到的  $\bar{R}(t)$  和  $R_\infty$ ,以  $\ln[(R_\infty - \bar{R}(t))/R_0]$  为  $y$  轴,  $t$  为  $x$  轴,经线性拟合可得如图 8 所示的曲线,根据(12)式可知该直线的斜率为  $-\frac{1}{\tau}$ .该曲线的斜率为  $-4.74 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ,将其代入(9)式可得  $\epsilon$  的值为  $1.65 \times 10^8 \text{ m}^{-2}$ ,再根据(10)式可得梁加热达到热稳态时与初始时的温差  $\Delta T$  为 265.41K,与根据公式理论推得的 260.33K 相比,误差为 1.96%.

同时,ANSYS 软件模拟出了加热达到热稳态时梁上的应力分布情况,图 9 是提取出的热应力分布曲线图.经过数据读取和处理,可得梁上因加热产生的应力值为 114.09MPa,与根据理论公式推得的 113.38MPa 相比,误差为 0.63%.

将上面模拟得到的  $\Delta T$  和  $\sigma_{th}$  代入(14)式得到多晶硅薄膜的热膨胀系数为  $2.47 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,与模拟初始设置的  $2.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  相比,误差为 1.30%,误差在允许范围内,所以模型的建立和理论的推导都是成立的.

## 5 结论

本文提出了新型多晶硅薄膜热膨胀系数的电测试结构,该结构基于双端固支梁的吸合现象.该结构测量所需材料参数较少,测量不需要真空环境,测量结果以电学量的方式输出.通过软件模拟分析,验证了该模型,该测试结构有望在实际中应用.

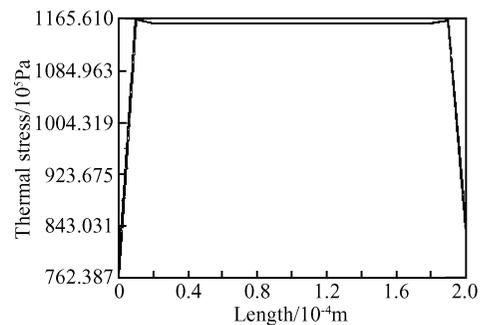


图 9 热稳态时提取出的梁上热应力分布曲线图  
Fig.9 Curve of the thermal stress when the beam is under the steady state

## 参考文献

- [1] Pan C H. A simple method for determining linear thermal expansion coefficients of thin films. *J Micromech Microeng*, 2002, 12: 548
- [2] Fang W E. Determining thermal expansion coefficients of thin films using micromachined cantilevers. *Sensors and Actuators*, 1999, 77: 21
- [3] Tada H, Kumpel A E, Lathrop R E, et al. Thermal expansion coefficient of polycrystalline silicon and silicon dioxide thin films at high temperatures. *J Appl Phys*, 2000, 87(9): 4189
- [4] Ziebart V, Paul O, Baltes H. Extraction of the coefficient of thermal expansion of thin films from buckled membranes. *Mater Res Soc Symp Proc*, 1999, 546: 103
- [5] Jung H C, Jae Y L, Sang W K. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-Si using microgauge sensors. *SPIE*, 1999, 3242: 222
- [6] Chu L L, Que L, Gianchandani Y B. Measurements of material properties using differential capacitive strain sensors. *J Microelectromech Syst*, 2002, 11(5): 489
- [7] Lin L W, Mu C. Electrothermal responses of lineshape microstructures. *Sensors and Actuators*, 1996, 55: 35
- [8] Huang Q A, Lee N K S. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator. *J Micromech Microeng*, 1999, 9: 64
- [9] Qi Lina, Huang Qing'an, Xu Gaobin, et al. Test structure to measure the thermal diffusivity of polysilicon films. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(8): 830 (in Chinese) [戚丽娜, 黄庆安, 许高斌, 等. 表面加工多晶硅薄膜热扩散系数在线测试结构. *仪器仪表学报*, 2006, 27(8): 830]
- [10] Senturia S D. *Microsystem design*. 2nd ed. Kluwer Academic Publishers, 2001: 204
- [11] Zhang Yuxing, Huang Qing'an, Li Weihua. A novel surface-micromachined structure for on-line measuring thermal expansion coefficient of polysilicon thin films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(4): 840 (in Chinese) [张宇星, 黄庆安, 李伟华. 新型多晶硅薄膜热膨胀系数在线测试结构. *半导体学报*, 2005, 26(4): 840]
- [12] Sharpe W N Jr, Eby M A, Coles G. Effect of temperature on mechanical properties of polysilicon. *Proc Transducer 01, Munich, Germany*, 2001, 2: 1366
- [13] Nie Meng, Huang Qing'an, Wang Jianhua, et al. An electrostatic actuated microelectromechanical in-situ extracting method for material property of multi-layer film. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(11): 1537 (in Chinese) [聂萌, 黄庆安, 王建华, 等. 静电执行的 MEMS 多层膜材料参数在线提取方法. *半导体学报*, 2004, 25(11): 1537]

## Structure for Electrical Measurement of the Thermal Expansion Coefficient of Polysilicon Thin Films\*

Hu Dongmei, Huang Qing'an<sup>†</sup>, and Li Weihua

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

**Abstract:** A novel method for electrically measuring the thermal expansion coefficient of polysilicon thin films is presented. A thermal-electro-mechanical compliant model of the polysilicon thin film is established. Finite element software Coventor and ANSYS are used to verify this method. This method is convenient, and its output is in the form of an electrical signal. Thus, it is valuable for in-situ measuring the thermal expansion coefficient of polysilicon thin films.

**Key words:** thermal expansion coefficient; polysilicon thin films; electrical measurement; pull-in

**EEACC:** 2575F; 8460

**Article ID:** 0253-4177(2008)10-2018-05

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA04Z302)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: hqa@seu.edu.cn

Received 7 April 2008, revised manuscript received 12 May 2008