

新型多晶硅薄膜热膨胀系数在线测试结构^{*}

张宇星 黄庆安 李伟华

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 提出了一种新型多晶硅薄膜热膨胀系数的在线测试结构. 给出了热机械耦合模型和测试方法、结构参数设计的优化方案及误差分析, 并利用 ANSYS 软件进行模拟. 该结构测量方便, 独立性较高, 误差较小, 用电学量形式输出, 对于薄膜热膨胀系数的在线检测有较高的参考价值.

关键词: MEMS; 多晶硅; 热膨胀系数; 在线检测

EEACC: 2575F; 8460

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)04-0840-06

1 引言

薄膜热膨胀系数对于 MEMS (micro-electromechanical systems) 器件的设计是一个非常重要的参数. 一方面, 薄膜材料的热膨胀对器件性能有较大影响, 例如, 薄膜和衬底热膨胀系数的失配会产生热应力, 引起结构变形或损坏; 另一方面, 热膨胀是微热执行器的动力来源. 许多文献给出了体材料的热膨胀系数, 但是体材料的热膨胀系数与薄膜材料的热膨胀系数并不完全相同, 因此不可相互替代. 而且, 同一种薄膜材料经不同工艺, 热膨胀系数也可能不同. 因此, 提出能够精确测量微机械薄膜热膨胀系数的 MEMS 结构具有重要意义.

薄膜热膨胀系数的测试方法较多. 早期人们采用 X 射线衍射法来测量薄膜晶体的热膨胀系数^[1], 但这种方法不适用于非晶体薄膜, 且测试过程较繁琐, 对测试仪器的要求也较高. 最近, 人们采用 MEMS 测试结构. 例如, Chae 等人使用 T 型游标卡尺结构^[2], Pan 使用热执行器式结构^[3]. 但是, 这些结构需要在真空或密封腔中测量, 对仪器的要求较高, 测量的运动轨迹是曲线, 且最终结果采用机械量输出, 因此, 不能满足在线检测的测试要求. Fang 等

人使用双层膜结构^[4], 但这种结构需要预知很多其他的机械参量, 测量的独立性不强, 测量结果不易用电学量表示. Ziebart 等人使用薄膜的热应力翘曲结构^[5], 但测量过程也较为复杂. Chu 使用电容输出方式来检测薄膜的热膨胀系数^[6], 但此结构过于复杂, 占用面积过大, 且测量难度太大.

本文提出了一种新型薄膜热膨胀系数在线测试结构. 这种结构采用表面微机械加工技术, 测试方便, 精度较好, 输出量以电学量表示. 该结构不需预知杨氏模量、泊松比、多晶硅温度系数以及多晶硅下表面与衬底的换热系数等材料参数, 不需要特殊的测试环境和仪器, 因此, 能够满足在线检测的要求.

2 基本原理

该测试结构由两个尺寸、结构完全相同的弯曲梁组成, 实验前两弯曲梁顶端相距 $2l$, 如图 1 所示. 当两弯曲梁未接触时 (图 1(b)), 欧姆计的读数为无穷大. 在弯曲梁两端压焊块上施加一从 0V 逐渐递增的电压 V . 电流流过弯曲梁产生的焦耳热使其发生热膨胀. 在热应力的作用下, 两弯曲梁相互垂直移动. 当所施加的电压增大到某一值时, 它们发生接触 (图 1(a)), 欧姆表的读数会发生突变, 记录下该时

^{*} 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2002AA404010)

张宇星 男, 1980 年出生, 硕士研究生, 研究方向为 MEMS 测试结构.

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事 MEMS 技术和微电子技术的研

李伟华 男, 1957 年出生, 教授, 研究方向为 MEMS CAD.

2004-05-11 收到, 2004-08-05 定稿

刻所施加的电压值 V . 由于两个弯曲梁完全对称, 它们的顶端温度和电势均相同, 因此它们接触的可靠性是有保证的. 改变梁顶间距 2δ , 或者梁的跨度 L , 或者梁与水平夹角 θ_A , 记录相应的施加电压值 V , 并进一步得出梁中电流密度 J , 再通过相应的数学处理就可以得到多晶硅的热膨胀系数.

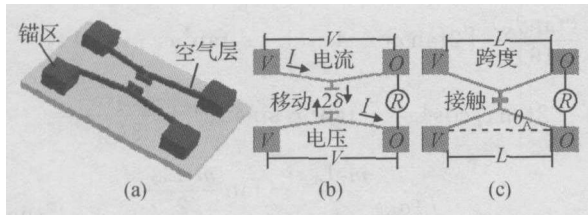


图 1 测试结构俯视图

Fig. 1 Schematic planform of test structure

3 测试结构模型

由于两个弯曲梁的结构完全对称, 因此在分析它们的热学、力学模型时只需分析其中之一即可.

3.1 弯曲梁结构的热学模型

图 2 是测试结构的横截面图, 其中 t_v, t_n, t_o 分别表示空气层、氮化硅层、二氧化硅层的厚度, h 表示梁的厚度. 由于弯曲梁的长度远大于它的宽度和厚度, 因此弯曲梁在宽度和厚度方向上的温度分布

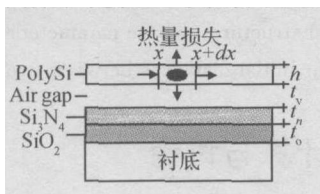


图 2 弯曲梁结构的热学模型

Fig. 2 Thermal module of the bend beam

可以忽略, 只考虑其长度方向一维稳态导热. 又由于该测试结构工作温度范围在室温到 800 K 之间, 因此多晶硅的对流和辐射项可以忽略^[2]. 于是, 弯曲梁的平均温度增量为^[7]:

$$T_{avi} = \frac{J^2 \rho_0}{k_p m^2} \left[\frac{\frac{mL_0}{2} - \tanh\left(\frac{mL_0}{2}\right)}{\frac{mL_0}{2}} \right] \quad (1)$$

$$m = \sqrt{\frac{J^2 \rho_0}{N k_p h} - \frac{J^2 \rho_0}{k_p}} \quad (2)$$

其中 k_p 是多晶硅的热导率; N 是弯曲梁下表面与衬底的等效换热系数; J 是通过弯曲梁的电流密度; ρ_0 是室温时多晶硅的电阻率; L_0 是多晶硅电阻的温

度系数; L_0 是弯曲梁的梁长.

3.2 弯曲梁结构的机械模型

图 3 中弯曲梁在加热前后的位移 可表示为^[8]:

$$\delta = \frac{\tan \theta_A}{k} \left(2 \tan \frac{kL}{4} - \frac{L}{2} \right) \quad (3)$$

其中 θ_A 是弯曲梁与水平的夹角; L 是弯曲梁的跨度; k 是中间变量, 定义为:

$$k = \sqrt{F/EI} \quad (4)$$

其中 F 是弯曲梁的水平受力; E 是多晶硅的杨氏模量; I 是惯性矩; $I = \frac{hw^3}{12}$.

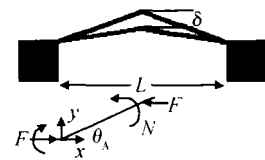


图 3 弯曲梁结构的力学模型图

Fig. 3 Mechanical module of the bend beam

梁在受热前后弯曲梁长度的变化为:

$$L = \frac{(\tan \theta_A)^2}{4k} [2G - kL + kL G^2 + \sin kL - 2G \cos kL - G^2 \sin kL] \quad (5)$$

其中:

$$G = \tan(kL/4) \quad (6)$$

弯曲梁中产生的热应力可表示为:

$$\sigma = E T_{avi} = \frac{E}{L} \left(L + \frac{FL}{Ewh} \right) = E \left(\frac{L}{L} + \frac{k^2 w^2}{12} \right) \quad (7)$$

3.3 综合模型以及参数提取

联立(1)和(7)式得到方程:

$$\frac{(\tan \theta_A)^2}{4kL} [2G - kL + kL G^2 + \sin kL - 2G \cos kL - G^2 \sin kL] + \frac{k^2 J}{wh} = \frac{J^2 \rho_0}{k_p m^2} \left[\frac{\frac{mL_0}{2} - \tanh\left(\frac{mL_0}{2}\right)}{\frac{mL_0}{2}} \right] \quad (8)$$

其中 w, h 分别是弯曲梁的长度和厚度.

$$L = L_0 \cos \theta_A \quad (9)$$

3.3.1 中间变量 m 的提取

由电阻率与温度关系式^[2]:

$$= \rho_0 (1 + \alpha T_{\text{avi}}) \quad (10)$$

令

$$n = \frac{\rho_0}{\rho} - 1 = \frac{J^2 \rho_0}{k m^2} \left[\frac{\frac{m L_0}{2} - \tan\left(\frac{m L_0}{2}\right)}{\frac{m L_0}{2}} \right] \quad (11)$$

其中 ρ 是温度升高 T_{avi} 时多晶硅的电阻率.

室温时在弯曲梁的锚区上施加一微小电压 V_0 (保证弯曲梁的温度几乎没有变化), 测量此时的电流 I_0 , 再根据:

$$\frac{V_0}{I_0} = \rho \frac{L_0}{wh} \quad (12)$$

就可以得出 ρ . 可以通过相似的方法提取, 这样就可以确定 n 了.

对另一参数与之相同但长度不同的一组结构, 通入相同电流(使它们具有相同的 m), 可以得到:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\frac{\frac{m L_{01}}{2} - \tan\left(\frac{m L_{01}}{2}\right)}{\frac{m L_{01}}{2}}}{\frac{\frac{m L_{02}}{2} - \tan\left(\frac{m L_{02}}{2}\right)}{\frac{m L_{02}}{2}}} \quad (13)$$

求解(13)式就可以得出 m , 再代入(11)式, 便可以得到 ρ 和 n . 而 k_p 可以通过简单的方法来得到^[9].

3.3.2 热膨胀系数 α 的提取

关于 α 的求解, 在理论上可以通过求解(3)式及已知的 ρ 解出 k , 然后代入(8)式计算得到 α . 但是, 结构的制作存在工艺误差, 结构中的残余应力会使梁顶偏移初始位置. 因此, 初值 ρ_0 并不是确定的值而是可以表示成为:

$$\rho_i = \rho_{0i} \pm 2 \delta_i \quad (14)$$

是梁顶偏移初始点的位移.

考虑到在同一工艺过程中彼此靠近、尺寸相同的测试结构具有相近的工艺误差及残余应力, 因此它们的初始位移偏差也是相同的. 于是, 可设计两组尺寸大小相同、顶点初始距离不同的两组结构, 如图4所示, 但 $|\rho_1 - \rho_2|$ 不宜太大, 以确保

$$\rho_1 > \rho_2 \quad (T_1) \quad (T_2) \quad (15)$$

将它们分别代入(3)式, 并令

$$x = \frac{KL}{4} \quad (16)$$

可以得到方程组:

$$\rho_1 = \rho_{01} + \frac{L \tan \Delta}{2} \left(\frac{\tan x_1}{x_1} - 1 \right) \quad (17)$$

$$\rho_2 = \rho_{02} + \frac{L \tan \Delta}{2} \left(\frac{\tan x_2}{x_2} - 1 \right) \quad (18)$$

$$\frac{(\tan \Delta)^2}{16 x_1} [2 \tan x_1 - 4 x_1 + 4 x_1 \tan^2 x_1 + \sin 4 x_1 -$$

$$2 \tan x_1 \cos 4 x_1 - \tan^2 x_1 \sin 4 x_1] + \frac{4 x_1^2 w^2}{3 L_{01}^2} =$$

$$\frac{J_1^2 \rho_0}{k_p m_1^2} \left[\frac{\frac{m_1 L_{01}}{2} - \tan \frac{m_1 L_{01}}{2}}{\frac{m_1 L_{01}}{2}} \right] \quad (19)$$

$$\frac{(\tan \Delta)^2}{16 x_2} [2 \tan x_2 - 4 x_2 + 4 x_2 \tan^2 x_2 + \sin 4 x_2 -$$

$$2 \tan x_2 \cos 4 x_2 - \tan^2 x_2 \sin 4 x_2] + \frac{4 x_2^2 w^2}{3 L_{02}^2} =$$

$$\frac{J_2^2 \rho_0}{k_p m_2^2} \left[\frac{\frac{m_2 L_{02}}{2} - \tan \frac{m_2 L_{02}}{2}}{\frac{m_2 L_{02}}{2}} \right] \quad (20)$$

将(17)式减(18)式, 得到:

$$\rho_1 - \rho_2 = \rho_{01} - \rho_{02} = \frac{L \tan \Delta}{2} \left(\frac{\tan x_1}{x_1} - \frac{\tan x_2}{x_2} \right) \quad (21)$$

就可得出 α . 通过以上方法就可消除工艺过程以及初始残余应力所引起的误差了.

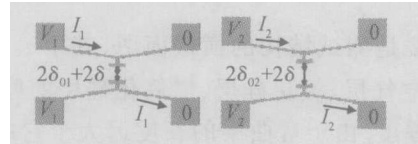


图4 梁顶初始距离不同、其他参数相同的两组结构

Fig. 4 Two structures, whose parameters are same except for their initial distances between two apexes

4 模拟计算与讨论

本文利用 ANSYSTM 8.0, 在 300 ~ 800 K 的温度范围之内就不同跨度, 不同水平夹角, 不同空气层厚度的结构进行了有限元热-电-机械模型模拟和分析.

4.1 跨度的影响

本文分别选择跨度为 $L = 300, 400, 500 \mu\text{m}$ (其他参数为 $w = 3 \mu\text{m}, h = 2 \mu\text{m}, \Delta = 0.05 \text{rad}, t_v = 2 \mu\text{m}, t_n = 0.3 \mu\text{m}, t_o = 0.2 \mu\text{m}, k_v = 0.026 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}), k_n = 2.25 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}), k_o = 1.4 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}), k_p = 131 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (k_v, k_n, k_o 分别表示空气层、氮化硅层、二氧化硅层的热导率), $\alpha = 2.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. 结构所加电压从 5V (电压太小梁顶偏移距离太小, 不利于实际测量) 逐渐递增 (梁的最高温度不超过

800 K), 对流系数为 800, 辐射系数为 0.8) 的结构进行了模拟分析, 其结果如图 5 所示.

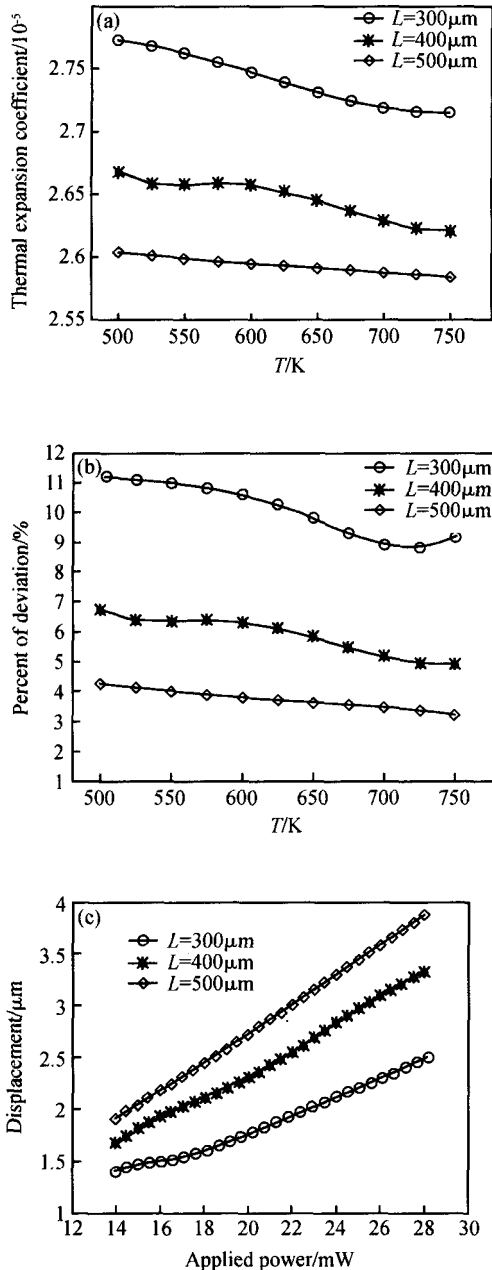


图 5 (a), (b), (c) 分别为不同跨度结构的热膨胀系数-平均温度、热膨胀系数误差率-平均温度、梁顶位移-功率 ANSYS 模拟拟合函数关系曲线

Fig. 5 Simulations of thermal expansion coefficient-average temperature (a), percent of deviation-average temperature (b), displacement-applied power of the apex (c) for bend beams of different spans

比较分析图 5(a), (b), (c) 可得到以下结论:

(1) 模拟计算所得热膨胀系数值都大于设定值 ($= 2.5 \times 10^{-6} K^{-1}$), 这是由于热学模型未考虑结

构位移和形变所消耗的能量, 也未考虑弯曲梁宽度、厚度方向上的温度分布, 而用 ANSYS 模拟时考虑了这些因素. 不过, 其误差基本在 10% 以内 (图 5 (b)), 因此该模型可用来在线测量多晶硅薄膜热膨胀系数.

(2) 梁的跨度越大, 计算误差越小. 这是由于梁越长, 厚度及宽度方向上温度分布效应所带来的影响就相对越小; 梁的尺寸越小, 其相对散热面积就越大^[11].

(3) 由图 5 (c) 可知: 施加相同功率, 梁越长, 梁顶位移就越大. 而弯曲梁顶端位移越大, 越便于测量, 且结构本身工艺误差对测量结果的影响也相对越小.

综上所述, 在选取结构的跨度时, 不易过小, 否则误差相对较大; 也不易过大, 因为测试结构不易占用过大面积. 因此, 在选取结构跨度时, 应综合考虑以上两个因素.

4.2 夹角的影响

本文选取了梁与水平夹角 α 分别为 0.025, 0.05, 0.1 rad 的结构 ($L = 400 \mu m$, 其他参数同上), 进行了模拟, 其结果如图 6 所示.

比较分析图 6 (a), (b), (c) 可以得到以下的结论:

如图 6 (c) 所示, 角度较小时, 梁顶的位移量越大, 但角度越小对应的误差也越大. 因此, 在选取结构的水平夹角时, 也需综合考虑梁顶位移与其所带来的误差.

5 误差分析

测试方法可能的误差来源:

(1) 在热学模型中, 忽略了对流和辐射对结构的影响. 但在 300 ~ 800 K 的温度范围之内, 它们与结构下表面从衬底传热一项要小的多, 因此该处理是合理的.

(2) 梁顶端有一突出部分, 这会对结构的温度分布产生影响. 但这一部分同整个弯曲梁相比, 所占体积相对较小 (长度、厚度、宽度分为 6, 3, 3 μm), 因此它引起的误差可被忽略. 较之传统光学观测法中的游标卡尺, 它所带来的误差要小的多.

(3) 在综合模型中, 电能除了使结构温度升高外, 还使其运动与形变. 而热学模型在计算平均温度

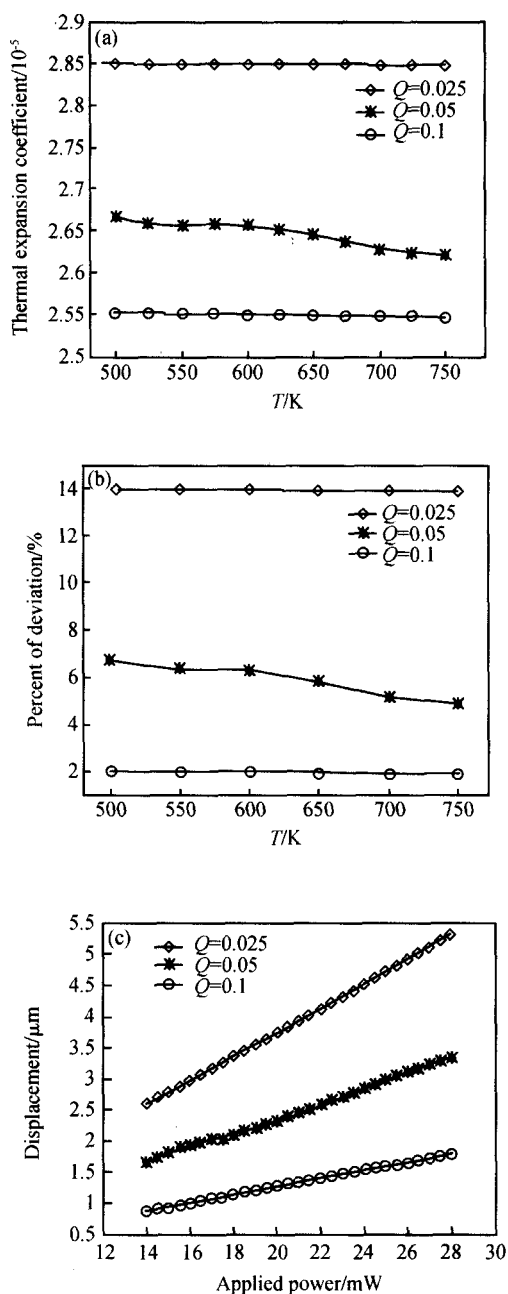


图 6 (a),(b),(c)分别为不同水平夹角结构的热膨胀系数-平均温度、热膨胀系数误差率-平均温度、梁顶位移-功率 ANSYS 模拟拟合函数关系曲线

Fig. 6 Simulations of thermal expansion coefficient-average temperature (a), percent of deviation-average temperature (b), displacement of the apex-applied power (c) for bend beams of different angles

增益时未考虑这一因素,因此,弯曲梁的实际温度略小于理论计算值。

(4) 初始残余应力也会使结构发生非平面翘曲,由于两个弯曲梁完全对称,因此这不会影响它们的

相互接触,但这一因素还是会对计算结果产生误差。

(5) 热学模型假定两端压焊块的温度为恒定值,但实际上可能存在温度分布,因此,这一因素对实际的测量结果也会产生影响^[7]。

(6) 在实际测量过程中,还会引入测量误差。

6 结论

本文介绍了一种新型多晶硅薄膜热膨胀系数的在线检测结构,通过软件模拟和分析,给出了结构设计的优化方法和误差分析。该结构测量所需材料参数较少,测量可于大气中进行,避免了传统测量所需真空密封腔室等诸多复杂要求以及测量所需仪器要求较低、测量结果以电学量的方式输出等传统光学测量方法所带来的不便。因此,本文提出的测试结构与方法,对于表面加工多晶硅薄膜热膨胀系数的在线测试有着一定的参考价值。

参考文献

- [1] Batchelder D N, Simmons R O. Lattice constants and thermal expansion of Si and of CaF_2 between 6K and 322K. *J Chem Phys*, 1964, 41: 2324
- [2] Chae J H, Lee J Y, Kang S W. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-Si using microgauge sensors. *Proc SPIE*, 1999, 3242: 222
- [3] Pan C H. A simple method for determining linear thermal expansion coefficients of thin films. *J Micromechan Microeng*, 2002, 12: 548
- [4] Fang W E. Determining thermal expansion coefficients of thin films using micromachined cantilevers. *Sensors and Actuators*, 1999, 77: 21
- [5] Zibart V, Paul O, Baltes H. Extraction of the coefficient of thermal expansion of thin films from buckled membranes. *Proc MRS*, 1999, 546: 103
- [6] Chu L L, Que L, Ganchandani Y B. Measurements of material properties using differential capacitive strain sensors. *J Microelectromechan Syst*, 2002, 11(5): 489
- [7] Lin L W, Mu C. Electrothermal responses of lineshape microstructures. *Sensors and Actuators*, 1996, 55: 35
- [8] Ganchandani Y B, Najafi K. Bend-beam strain sensors. *J Microelectromechan Syst*, 1996, 5(1): 52
- [9] Xu Gaobin, Huang Qing'an. Design and simulation of on-line test structure for thermal conductivity of polysilicon thin films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(4): 430 (in Chinese) [许高斌, 黄庆安. 在线检测多晶体硅薄膜热导率测试结构的设计和模拟. *半导体学报*, 2004, 25(4): 430]

- [10] Sun Zhizhong, Yuan Weiping, Wen Zhenchu. Digital Analysis. Nanjing: Southeast University Press, 2002:93 (in Chinese) [孙志忠, 袁慰平, 闻震初. 数值分析. 南京: 东南大学出版社, 2002:93]
- [11] Mankame N D, Ananthasuresh1 G K. Comprehensive thermal modelling and characterization of an electro-thermal-compliant microactuator. J Micromechan Microeng, 2001, 11:452

A Novel Surface-Micromachined Structure For On-Line Measuring Thermal Expansion Coefficient of Polysilicon Thin Films *

Zhang Yuxing, Huang Qing'an, and Li Weihua

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

Abstract : This paper presents a novel structure for in situ determining thermal expansion coefficient of polysilicon thin films. A thermal-electro-mechanical compliant model is provided and confirmed with ANSYS software and some optimized parameters are also achieved through simulations. The structure has many advantages such as high precision without any particular requirements (vacuum or sealed chamber). Furthermore, the results of test are all presented in electrical form.

Key words : MEMS; polysilicon; thermal expansion coefficient; in situ measure

EEACC: 2575F; 8460

Article ID : 0253-4177(2005)04-0840-06

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA404010)

Zhang Yuxing male, was born in 1980, master candidate. He is interested in research on MEMS technology.

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor. His major research includes MEMS and microelectronic devices.

Li Weihua male, was born in 1957, professor. His major research is MEMS CAD.

Received 11 May 2004, revised manuscript received 5 August 2004