

MEMS 薄膜材料参数在线测试方法与技术*

黄庆安[†] 刘祖韬 李伟华 李巧萍

(东南大学微电子机械系统教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 给出了一种 MEMS 薄膜材料参数的在线测试技术与方法. 这种技术包括微测试结构图形、测试硬件设备和测试分析软件. 它能够快速测试 MEMS 薄膜的主要性能参数, 并且测试设备和测试方法都与集成电路测试方案兼容, 即所有材料参数的测试与提取都通过电学激励与电学测量来实现. 文中首先给出了测试技术与方法的工作原理, 然后对用标准表面微机械加工制作工艺制作的多晶硅薄膜进行了测试, 实验结果表明该测试技术与方法的测试效率高、成本低, 具有一定的工业应用价值.

关键词: MEMS; 薄膜; 材料参数; 在线测试

EEACC: 2575; 2560

中图分类号: TP206

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)09-1650-07

1 引言

薄膜是 MEMS 器件的核心, 因此 MEMS 薄膜的参数测试一直受到人们的重视. 研究 MEMS 薄膜参数的测试主要有两方面的意义: 一方面, 为加工线提供检测方法, 从而监控制造工艺过程; 另一方面, 为设计者提供薄膜参数, 从而为 MEMS 器件设计提供依据.

硅基 MEMS 加工技术主要涉及体加工和表面加工两种. 体加工薄膜往往是单晶硅薄膜, 单晶硅薄膜的性质受工艺影响较小, 而表面加工多晶硅薄膜的材料参数与加工工艺密切相关. 因此, 过去人们主要研究多晶硅薄膜参数的检测. 多晶硅薄膜参数主要包括几何结构参数、电学参数、力学参数、热学参数及耦合参数等, 其中电学参数主要是电导率; 力学参数主要包括杨氏模量、泊松比、残余应变、断裂强度和疲劳等; 热学参数包括热导率、热扩散率; 耦合参数包括电阻温度系数、热膨胀系数、压阻系数等. 由于多晶硅薄膜的几何结构参数和电学参数测试在 IC 工业中已经确立, 因此过去人们的研究主要集中在力学和热学参数的测试方法, 并且这种研究只局限于一种或两种参数的测试, 而且大多数并没有考虑在线测试. 在线测试是指: 测试结构或样品的制备与标准的 MEMS 器件制造工艺完全相同, 该测试结构或样品与 MEMS 器件承受相同的工艺条件和流程, 即不为测试结构或样品制备提供附加的工艺或流程; 另一方面, 在线测试要求多参数同时快速测

试, 且要求测试简单.

静电 pull-in 测试结构是国外报导的能够满足电信号激励、电学检测的力学参数(应力、杨氏模量)在线测试结构^[1]以及测试精度的改进方法^[2]. 目前这种方法在锚区的固定边界条件假设会引起误差, 同时仅能测试单层薄膜; 而断裂强度测试结构需要实时观察断裂过程, 不能满足电学检测的要求^[3]; 热导率和热扩散率测试中或者需要在测试结构中制备热偶^[4], 或者要求在真空环境中进行测试^[5]; 热膨胀系数测试中或者需要真空测试环境^[6], 或者需要实时观察并记录位移过程^[7]. 因此, 也不能满足电学检测的要求.

基于这种电学激励与电学检测的考虑, 我们实验室在“863”等计划的支持下, 对多晶硅薄膜的力学和热学参数的在线测试方法进行了系统研究^[8-20], 主要方案是电信号激励测试结构同时测量电学响应. 根据模型提取薄膜参数, 并针对这些测试结构的合理性和精度与其他方法进行了比较. 根据这些测试结构的结果, 本文报导了我们设计的一个能够自动完成对 MEMS 薄膜材料参数的快速在线测试的技术与方法. 该技术包括测试结构图形、测试硬件设备和测试分析软件. 实验表明, 它可以简单、快速地完成多晶硅薄膜的力学和热学参数的在线测试.

2 测试结构

由于 MEMS 薄膜材料参数的测试是通过测试结构的测试来完成的, 所以测试结构的设计是非

* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号: 2003AA404010)

[†] 通信作者. Email: hqa@seu.edu.cn

常重要的. 测试结构是一种专门用于测试 MEMS 薄膜材料参数的微机械结构, 它的设计要求是: 制造测试结构不需要添加额外的工艺步骤, 能够嵌入到由表面牺牲层加工工艺制造的其他 MEMS 功能器件版图中. 通过对测试结构施加测试驱动信号, 测量其反馈电学信号, 将反馈信号代入测试模型计算, 即可获得该工艺条件下待测薄膜的该项材料参数. 通过不同的测试结构可以测量出 MEMS 薄膜的不同材料参数.

2.1 力学参数

本文测试系统的薄膜力学参数包括应力、杨氏模量、泊松比和断裂强度.

在测试薄膜的应力、杨氏模量、泊松比的测试结构设计中, 采用 pull-in 测试结构, 即两端固支梁在静电激励下的响应. 为满足两端固支的条件, 对锚区进行了重新设计, 由于同一个结构有三个未知数, 故需要测量三个不同结构 (长度或宽度不同) 的 pull-in 电压, 测试结构如图 1 所示.

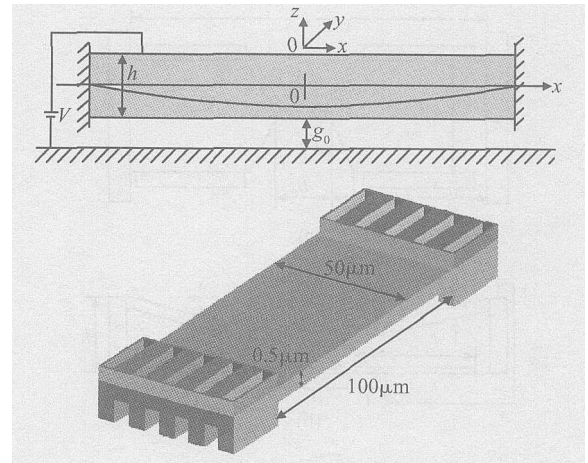


图 1 具有新锚结构的多晶硅两端固支梁

Fig. 1 Schematic of doubly-clamped beam with new anchor

在多晶硅梁和下极板施加逐渐增大的电压, 直至发生 pull-in, 通过外部电流突变的检测, 记录 pull-in 电压值. pull-in 电压值为^[8-13]

$$V_{PI} = \frac{1}{1.1454 [1 - (1 - 0.8894e^{1.0874 \times 10^{-2} g_0/h}) e^{-\frac{2.1064 \times 10^{23}}{\tilde{E}h} \times 1.9252 \times 10^3 (1 - 100 \times 10^{-6} + 0.06724)}]} \times \sqrt{\frac{4(AC_{PI} + BC_{PI}^3) \sqrt{g_0} (g_0 - C_{PI})^{\frac{3}{2}}}{\epsilon_0 (1 + 0.42 \frac{g_0}{b})}} \tag{1}$$

其中 梁长度是 l; 宽度是 b; 厚度是 h; 泊松比是 ν ; 杨氏模量是 E; 沿梁长度方向的残余应力是 σ_0 ; 外加电压为零时, 梁的下表面与下面固定电极间的距离是 g_0 ; ϵ_0 是真空中介电常数; \tilde{E} 是等效弹性模量, 它与梁的宽度有关, 等效弹性模量与泊松比的关系为

系为

$$\text{窄梁 } b < 5h: \tilde{E} = E \tag{2}$$

$$\text{宽梁 } b \geq 5h: \tilde{E} = E / (1 - \nu^2) \tag{3}$$

图 2 给出了实验中制作的测试结构 SEM 照片.

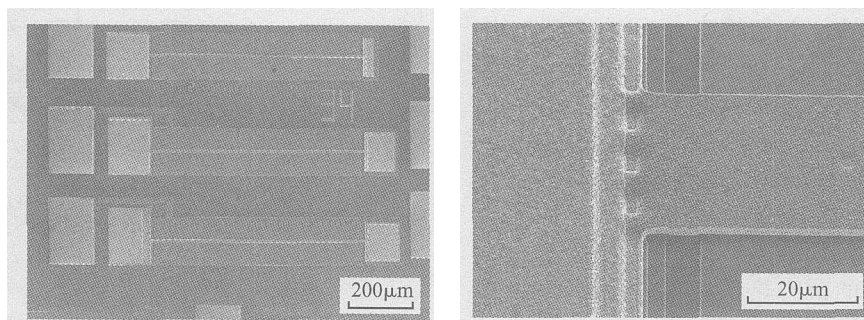


图 2 实验中制作的测试结构 SEM 照片和局部锚区结构照片

Fig. 2 SEM photos of test structure and photo of local anchor structure

在断裂强度的测试结构设计中, 也采用 pull-in 测试结构, 即两端固支梁在静电激励下的响应. 测试结构如图 3 所示, 结构是采用中间窄梁, 两边宽梁, 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, 记录突变的外部电流, 可得断裂发生时的电压^[16].

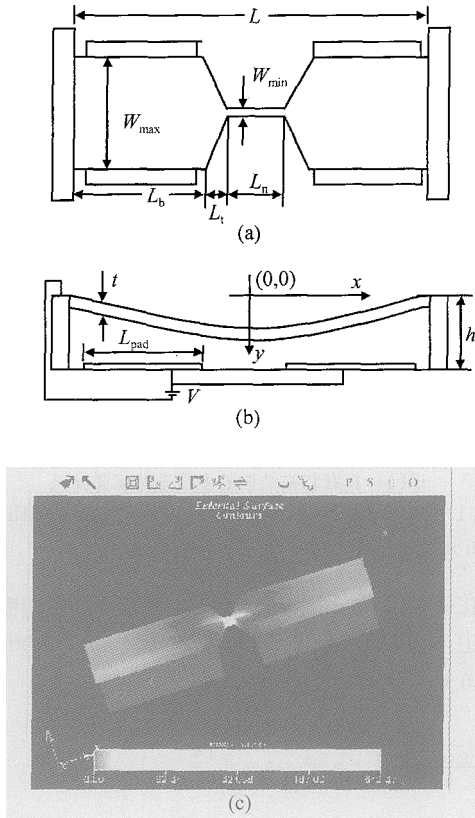


图 3 断裂强度的测试结构及其应力分布模拟图

Fig.3 Measuring structure for rupture strength and simulation of stress

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

式中 E 为杨氏模量, a 为初始应力, 可由上述 pull-in 测试得到, 其他几何尺寸示于图 3. 实验中记录断裂发生时的电压, 再带入电压与挠度的关系, 计算出梁中心挠度 a , 再带入方程 (4), 就得到断裂强度.

图 4 是实验中制作的测试结构的 SEM 照片.

2.2 热学参数

本文测试系统的薄膜热学参数包括热导率、热扩散率和热膨胀系数.

在热导率测试结构中, 设计了两个结构: 一个是参考结构, 如图 5(a) 所示; 另一个是测试结构, 如图 5(b) 所示.

热导率的计算公式为^[16,17]

$$k = \left[\left(\frac{P_t}{T_t} - \frac{P_R}{T_R} \right) - \frac{P_{Rb}}{2 T_R} \times \frac{1}{l_b} \right] \times \frac{1}{w_h} \quad (5)$$

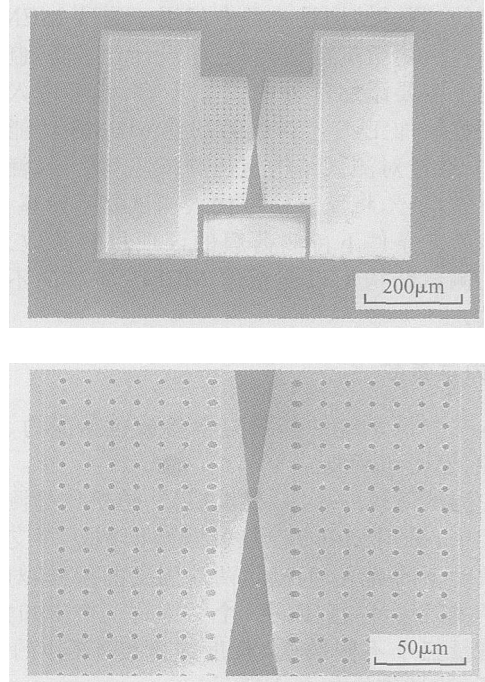


图 4 断裂强度测试结构的 SEM 照片

Fig.4 SEM photos of structure for measuring rupture strength

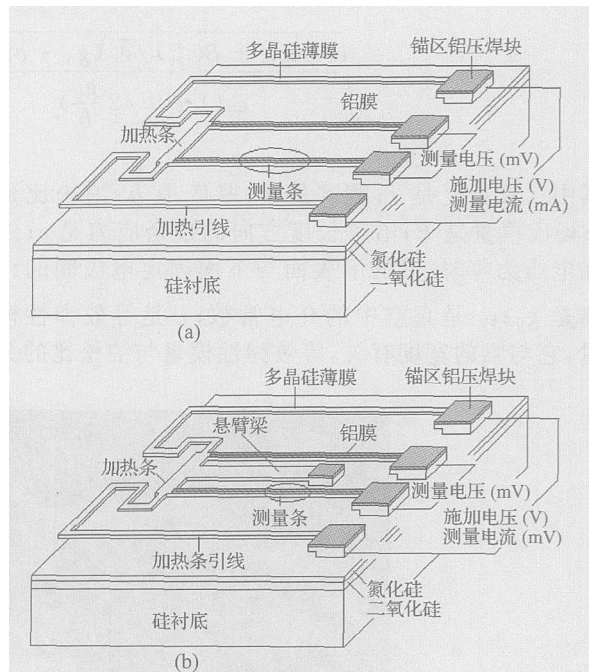


图 5 热导率测试结构示意图 (a) 参考结构; (b) 测试结构

Fig.5 Structure schematic of measuring thermal conductivity (a) Reference structure; (b) Test structure

式中 P_R 表示参考结构中总的加热功率即施加电压与测量电流的乘积; $T_R = T_R - T_0$, T_R 是参考结构中加热条上的温度, T_0 是环境温度; P_t 是测试结构中的加热总功率即施加电压与测量电流的乘

积； $T_i = T_t - T_0$ ， T_t 是测试结构中加热条上的温度； $P_{Rh} = V_{Rh} I_R$ 是参考结构中测量电压与测量电流的乘积（ I_R 是参考结构中的加热电流； V_{Rh} 是参考结构中的加热条上的电压降）； l_h 是加热条的长度； w, h 分别是悬臂梁的宽度与厚度； l 是多晶硅薄膜的总长度。

根据加热条电阻变化量，便可以根据下式计算得到加热条的温度变化，

$$T_i = (T_t - T_0) = \frac{R_t - R_0}{R_0} \cdot \alpha \quad (6)$$

式中 R_0 表示加热条的初始电阻； R_t 表示加热条在温度 T_t 时的电阻值； α 是多晶硅电阻温度系数。

图 6 是实验中制作的参考结构和测试结构的 SEM 照片。

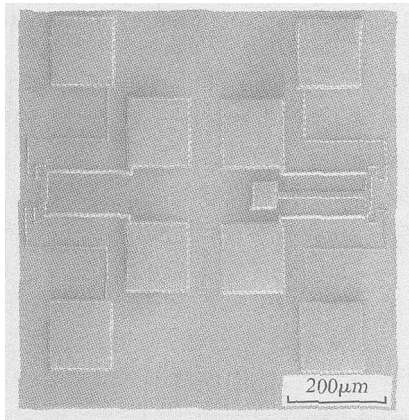


图 6 薄膜热导率的在线测试结构

Fig. 6 On-line measuring structure for thermal conductivity

对热扩散率测试，采用两个表面加工的两端固定支梁，当在梁上施加一恒定电流时，梁受热最终达到热稳态。则有

$$\ln \left[\frac{V(t) - V_0}{V - V_0} \right] = - \frac{t}{\tau} \quad (7)$$

式中 V_0 为固定支梁两端的初始电压； V 为结构达到热稳态之后的电压。

只要测得梁两端的电压变化曲线和最终达到热稳态的电压值，就可以通过 (7) 式线性拟合提取出多晶硅薄膜的热扩散系数为^[19]

$$a_p = \frac{l_1 - l_2}{2 \left(\frac{1}{l_1^2} - \frac{1}{l_2^2} \right)} \quad (8)$$

式中 l_1 和 l_2 分别是梁 1 和 2 的长度； τ_1 和 τ_2 分别是梁 1 和 2 的时间常数。图 7 是实验中制作的测试结构的 SEM 照片。

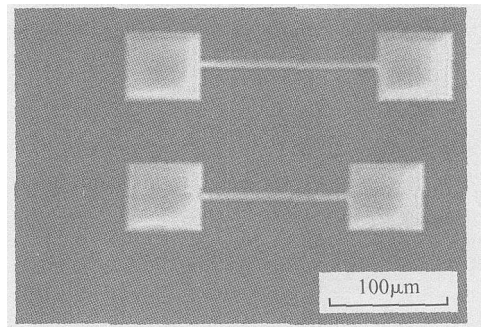


图 7 热扩散率测试结构的 SEM 照片

Fig. 7 SEM photo of measuring thermal diffusivity

热膨胀系数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 2δ ，如图 8 所示。当两弯曲梁未接触时（见图 8(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时刻，它们发生接触（见图 8(c)），欧姆表的读数会发生突变，记录下该时刻所施加的电压值 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。改变梁间间距 2δ ，或者梁的跨度 L ，或者梁与水平面夹角 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 ，就可以得到多晶硅的热膨胀系数^[20]。

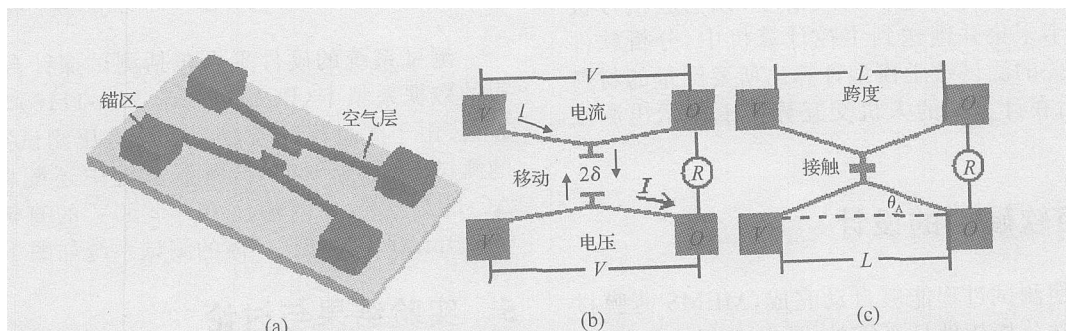


图 8 热膨胀系数测试结构示意图

Fig. 8 Schematic of measuring structure for thermal expansion coefficient

图 9 是实验中制作的测试结构的 SEM 照片.

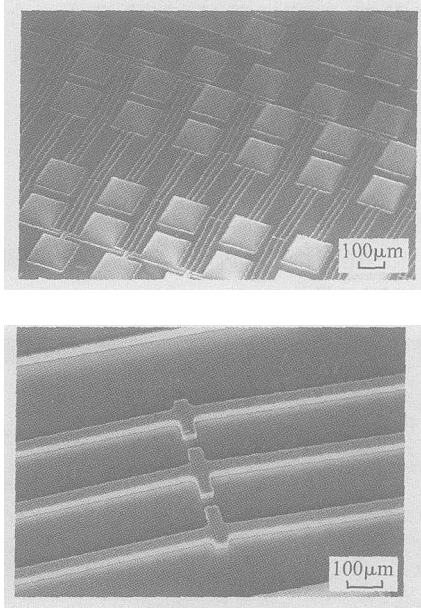


图 9 薄膜热膨胀系数的在线测试结构

Fig. 9 On-line measuring structure for thermal expansion coefficient

3 总体设计

通过对 MEMS 薄膜材料参数在线测试的要求进行分析,本测试技术总体上分为主控计算机和测试平台两大部分,前者包括计算机软件、数据采集卡和信号发生器,后者由探针台和测试结构组成,如图 10 所示.

图 10 详细显示了测试的功能框图,并同时给出测试 MEMS 薄膜单项材料参数的测试流程. 测试人员通过主控计算机的人机交互界面来控制测试系统的工作运行,主控计算机在测试人员的操作下自动选择相应的测试模型,并根据预定义的测试信号序列驱动测试信号发生器,后者将输出测试信号到测试探针台. 硅片上的微测试结构在接受到驱动信号之后将会产生预期的电学响应信号,该响应信号被数据采集卡采集并馈送到主控计算机中,分析软件再根据相关的测试数学模型计算出所要测量的材料参数,最后在计算机的人机交互界面上显示出测试结果.

4 主控软硬件的设计

为了使测试过程能够自动完成, MEMS 薄膜材料参数测试分析软件是必需的. 该软件为由 C++ 语言编译的 Windows 应用程序,主要功能模块包括信号生成适配器和数据采集卡的驱动程序、测试操

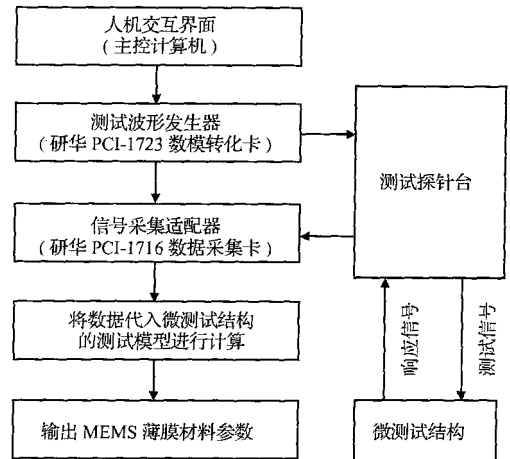


图 10 测试系统模块化组合原理框图

Fig. 10 Schematic of measuring system module

作界面、测试结构的测试模型. 对应于 MEMS 薄膜的每项材料参数,都有相应的测试数学模型. 测试数学模型的接口为相应测试结构的几何尺寸和测量电学数据,返回值为所要测量的物理量. 测试人员通过测试软件界面(如图 11 所示)输入测试结构的几何尺寸数据,之后可以进行自动测试. 主控计算机根据用户的输入,自动向测试平台上的微测试结构施加测试信号并采集其反馈信号,最后计算出用户所要测试的材料参数,并给出测量的误差分析.

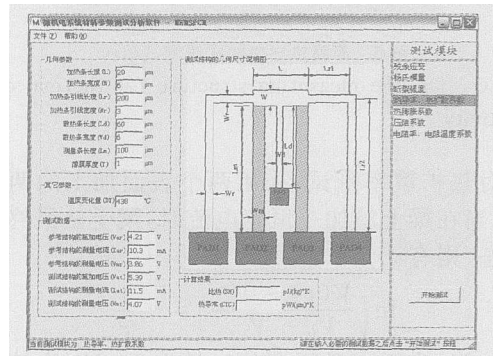


图 11 测试软件界面

Fig. 11 Interface of measuring software

测试系统的硬件平台包括测试探针台、研华公司的数据采集卡(PCF1723 与 PCF1716)与通用计算机. 由于测量杨氏模量的吸合电压测试需要较高的测试电压 ($< 100V$), 所以系统中还配备了可控 AC-DC 电源, 可以输出 $0 \sim \pm 50V$ 的直流电压和 $0 \sim 20mA$ 直流电流. 具体的测试系统如图 12 所示.

5 实验结果与讨论

为了验证本测试技术与方法的可行性,我们在北京大学的标准表面牺牲层双层多晶硅 MEMS 加

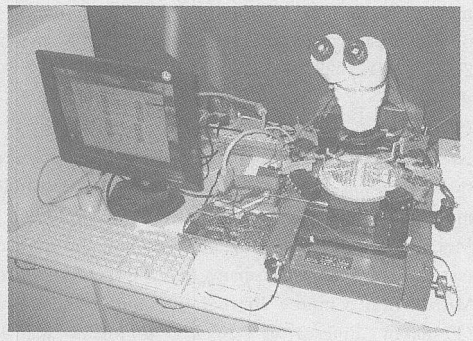


图 12 测试平台照片

Fig. 12 Photo of measuring platform

加工工艺线上加工了多晶硅薄膜的测试结构. 其主要的加工步骤如下所述:

(1) 在厚度为 525 μm 的单面抛光 (100) n 型硅衬底上淀积 0.3 μm 氧化硅层和 0.2 μm 氮化硅层; (2) 低压淀积并光刻 0.3 μm 第一层多晶硅薄膜; (3) 低压淀积 1.6 μm 磷硅玻璃牺牲层; (4) 刻蚀 0.2 μm 深的防粘附坑; (5) 在磷硅玻璃牺牲层上刻蚀锚区; (6) 低压淀积并光刻第二层多晶硅薄膜 2.0 μm ; (7) 溅射并刻蚀 0.8 μm 厚的铝薄膜层. 上面显示了各个测试结构的局部 SEM 照片. 图 13 给出了整个测试结构的 SEM 照片.

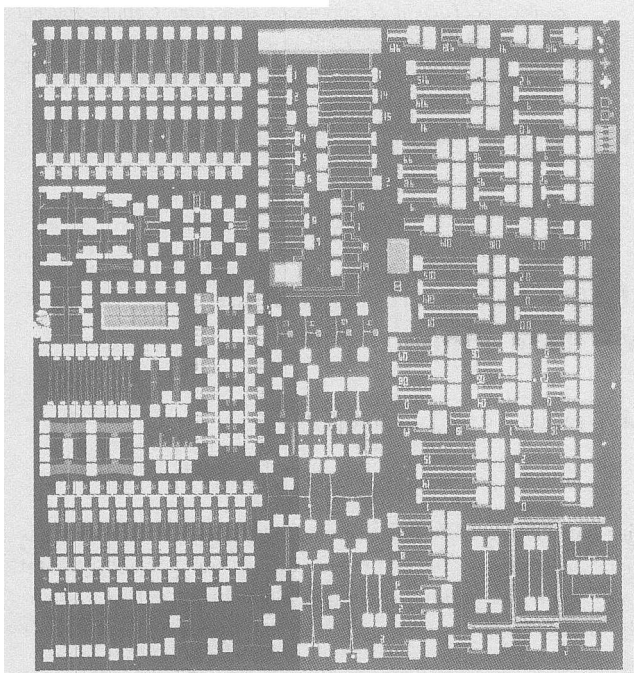


图 13 整个测试结构的 SEM 照片

Fig. 13 SEM photo of the whole test structure

通过照片可以看出,在线测试结构主要由锚区和主体结构组成. 锚区用于施加测试信号和检测响应信号,主体结构的响应信号是所要测量的材料参数的函数.

实验结果如表 1 所示. 每种测试结构都已经与数值模拟结果和与其他的实验方法做了比较与验证. 但是作为比较,本文列出了参考文献[21]给出的单晶硅数据. 由表 1 可以看出,本测试技术的测试误差不大,测试时间短,热学和电学参数的测试时间总共不超过 2min.

表 1 实验结果

Table 1 Experiment results

材料参数	测试结果			
	测试值	测试时间 / s	误差 / %	参考文献 [21]数据
残余应力/ MPa	20.5	< 30	± 5	
杨氏模量/ GPa	169	< 30	± 5	186 111
泊松比	0.23	< 30	± 5	0.26
断裂强度/ GPa	1.5	< 30	± 10	6
热导率/ (W/(m·K))	28.5	< 2	± 10	157
热扩散系数/ (cm ² /s)	0.165	< 2	± 10	0.9
热膨胀系数/ K	2.46×10^{-6}	< 60	± 10	2.33×10^{-6}

6 结论

本文提出了一种 MEMS 多晶硅薄膜材料参数的在线测试技术与方法. 它由三部分组成:测试结构、测试设备和计算分析软件. 该测试技术所提供的测试结构,可以在不增加工艺需求的前提下嵌入到 MEMS 器件版图中参与制造;通过测控计算机向测试结构施加测量信号,并根据测试结构的电学响应数据计算出薄膜的材料参数. 由于测试信号都为电学信号,所以整个测试过程耗时短(小于 2min),能够满足工业生产的大批次测试需求. 鉴于 IC 工业已经建立了 PCM,而 MEMS 正在发展,因此我们正在开发包括几何参数、电学参数、力学参数和热学参数在内的 MEMS PCM 系统.

参考文献

[1] Osterberg P M, Senturia S D. M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures. *J Microelectromech Syst*, 1997, 6: 107

[2] Chen S, Baughn T V. A new in situ residual stress measurement method for a MEMS thin fixed-fixed beam structure. *J Microelectromech Syst*, 2002, 11: 309

[3] 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

[4] Irace A, Sarro P M. Measurement of thermal conductivity and diffusivity of single and multilayer membranes. *Sensors and Actuators*, 1999, 76: 323

[5] Jacquot A, Chen G, Scherrer H, et al. Improvements of on-membrane method for thin film thermal conductivity and emissivity measurements. *Sensors and Actuators*, 2005, A117: 203

- [6] Chae J H, Lee J Y, Kang S W. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-Si using microgauge sensors. *Sensors and Actuators*, 1999, 75:222
- [7] Pan C H. A simple method for determining linear thermal expansion coefficients of thin films. *J Micromech Microeng*, 2002, 12:548
- [8] Rong Hua, Huang Qing'an, Nie Meng, et al. An analytical model for the pull-in voltage of doubly-clamped multi-layer beams. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24 (11) : 1185 (in Chinese) [戎华, 黄庆安, 聂萌, 等. 两端固支多层梁吸合电压的解析模型. *半导体学报*, 2003, 24(11):1185]
- [9] Rong Hua, Huang Qing'an, Nie Meng, et al. A novel anchor for a microbeam with perfect fixed-end boundary conditions. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25 (6) : 707 (in Chinese) [戎华, 黄庆安, 聂萌. 一种能满足 MEMS 微梁固支边界条件的锚. *半导体学报*, 2004, 25(6):707]
- [10] Rong Hua, Huang Qing'an, Nie Meng, et al. An analytical model for pull-in voltage of clamped-clamped multilayer beams. *Sensors and Actuators A*, 2004, 116:15
- [11] Nie Meng, Huang Qing'an, Wang Jianhua, et al. An electrostatically actuated microelectromechanical in-situ extracting method for multi-layer film material property. *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]
- [12] Nie Meng, Huang Qing'an, Li Weihua, et al. An in-situ technique for measuring Young's modulus and residual stress of each layer for multi-layer film. *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Korea*, 2005:836
- [13] Liu Zutao, Huang Qing'an, Li Weihua. An optimized micro-rotating structure for measuring residual strain of thin films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(5):1040 (in Chinese) [刘祖韬, 黄庆安, 李伟华. 一种改进的旋转式微机械结构. *半导体学报*, 2005, 26(5):1040]
- [14] Nie Meng, Huang Qing'an, Li Weihua. An in-situ extracting method for residual stresses of a multilayer film by full-field optical measurement. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(5):1029 (in Chinese) [聂萌, 黄庆安, 李伟华. MEMS 多层膜残余应力全场光学在线测试. *半导体学报*, 2005, 26(5):1029]
- [15] Nie Meng, Huang Qing'an, Li Weihua. Measurement of residual stress in multilayered thin films by a full-field optical method. *Sensors and Actuators A*, 2006, 126(1):93
- [16] Mei Niansong, Huang Qing'an. Modeling and simulation of a test structure for measuring vertical fracture strength of MEMS film. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25 (1) : 82 (in Chinese) [梅年松, 黄庆安. MEMS 薄膜纵向断裂强度的静电测试结构模型与模拟. *半导体学报*, 2004, 25(1):82]
- [17] Xu Gaobin, Huang Qing'an. Design and simulation of on line test structure for the determination of thermal conductivity of polysilicon thin films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(4):430 (in Chinese) [许高斌, 黄庆安. 在线检测多晶硅薄膜热导率测试结构的设计与模拟. *半导体学报*, 2004, 25(4):430]
- [18] Xu Gaobin, Huang Qing'an. On-line extraction for thermal conductivity of surface-micromachined polysilicon thin films. *Proc 3rd IEEE International Conference on Sensors, Vienna, Austria*, 2004:430
- [19] Huang Qing'an, Xu Gaobin, Qi Lina, et al. A simple method for measuring the thermal diffusivity of surface-micromachined polysilicon thin films. *J Micromech Microeng*, accepted
- [20] 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]
- [21] Madou M J. *Fundamentals of microfabrication*. 2nd ed. CRC Press, 2002

A Test System for the in situ Extraction of the Material Parameters of MEMS Thin Films *

Huang Qing'an[†], Liu Zutao, Li Weihua, and Li Qiaoping

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

Abstract: A new system for the in situ extraction of the material parameters of MEMS films is presented. The system is composed of three parts, including the layout of testing structures, test equipments, and a software application for analysis and control. Both the test and measurement signals of the test system are electrical, making it compatible with IC testing and capable for rapid testing. The measurement is executed automatically under the control of a computer.

Key words: MEMS; film; material parameter; in situ; measurement

EEACC: 2575; 2560

Article ID: 0253-4177(2006)09-1650-07

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA404010)

[†] Corresponding author. Email: hqa@seu.edu.cn