

静电执行的 MEMS 多层膜材料参数在线提取方法

聂 萌^{1,2} 黄庆安¹ 王建华² 戎 华¹ 李伟华¹

(1 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

(2 合肥工业大学理学院, 合肥 230009)

摘要: 基于静电执行结构, 结合能量法, 推导出不等宽多层两端固支梁在静电作用下发生吸合(pull-in)现象时吸合电压的解析表达式, 并用数值方法进行了拟合修正, 用 Coventorware 软件进行的模拟表明所得拟合表达式具有较高的精度. 由于吸合电压与梁的材料参数和几何尺寸有关, 通过改变梁的几何尺寸可以得到不同的吸合电压值, 从而得到梁各层材料的参数, 即多层膜各层的材料参数.

关键词: 两端固支梁; 吸合; 材料参数提取; 模拟

EEACC: 2560B; 2560Z

中图分类号: TN 401 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)11-1537-07

1 前言

随着 MEMS 加工技术的发展, 表面微机械加工技术已经越来越多的应用于传感器和执行器的制造过程中. 在表面微机械结构的加工过程中薄膜材料参数(例如, 残余应力、弹性模量)的控制就变得尤其重要. 所以, 材料弹性模量、残余应力的在线提取, 已成为 MEMS 领域中日益迫切的需要^[1]. 对于材料参数的提取方法在以往的文献中有很多的介绍, 这些方法包括: 自然谐振法^[2,3], 动态法^[4], 电容/电压测试法^[5], 通过施加已知力使梁发生直接的力学弯曲来测量挠度的方法^[6], 圆片曲率测试法^[7], 静电执行法^[8,9]等等. 但是, 大多数的测量方法所需要的微机械测试结构, 工艺较难实现, 或需要专门的测试仪器, 这使得它们很难应用于在线测试中. 另外, 多数的材料参数测试方法不能达到所需精度^[9]. 以上测试方法大部分仅研究了单层膜的材料参数测试. Gupta^[10], Osterberg^[9] 以及我国清华大学的邹泉波^[11]等人对基于静电执行结构的单层两端固支梁参数提取法做过广泛的研究. Nemirovsky^[12]给出了静电驱动执行器吸合电压的通用模型. 但是在实际的 MEMS 器件中, 很多情况下使用多层膜结构^[13],

所以, 多层膜材料参数的在线测试工作变得日益重要.

在线测试必须具有简便性和准确性, 占用芯片面积小, 并且没有破坏性. 在已经提出的众多方法中, 满足以上要求的最好方法就是静电执行法, 这首先是由 Petersen^[2] 提出的, Najafi, Suzuki^[8], Osterberg^[9] 以及邹泉波等人在此基础上又有所改进.

本文通过选取挠度测试函数, 结合运用能量法, 推导出不等宽多层两端固支梁在静电作用下发生吸合现象时吸合电压 V_{Pl} 的解析表达式, 并用数值的方法进行了拟合修正, 用 Coventorware 软件进行的模拟验证表明所得的拟合表达式具有较高的精度. 由于吸合电压与梁的材料参数和几何尺寸有关, 则通过改变梁的几何尺寸得到不同的吸合电压值, 可解得材料参数.

2 单层固支梁模型

对于图 1 所示的单层两端固支梁静电执行结构, 梁是导体, 其长度是 l , 宽度是 b , 厚度是 h , 材料的杨氏模量是 E , 泊松比是 ν . 沿梁长度方向的残余应力是 σ , 外加电压为 0 时, 梁的下表面与下面固定电极间的距离是 g_0 , V 是外加电压.

聂 萌 女, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事 MEMS 薄膜应力研究. Email: niemengpost@163.com

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

戎 华 男, 1965 年出生, 博士研究生, 主要从事 MEMS 模型与模拟研究.

2003-10-20 收到, 2004-03-05 定稿

© 2004 中国电子学会

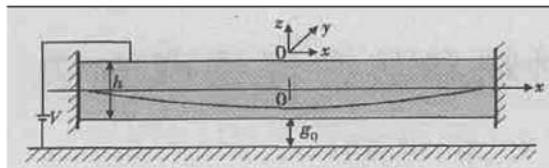


图 1 受静电力作用的单层两端固支梁

Fig. 1 A doubly-clamped single-layer beam under an electrostatic load

当梁由于静电引力的作用而弯曲时, 取挠度试函数^[11, 14] $w(x) = \frac{c}{2}(1 + \cos \frac{2\pi x}{l})$, 其中 c 是待定参数, 实际上也就是梁中心的挠度, 再运用能量法可以得出梁在发生吸合时, 吸合电压 V_{PI} 、梁中央的挠度 c_{PI} 分别是^[14]

$$V_{PI} = \sqrt{4(A c_{PI} + B c_{PI}^3)} - \sqrt{g_0(g_0 - c_{PI})^{\frac{3}{2}}} / \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} c_{PI} = & \frac{g_0}{9} \left(36 \times \frac{A}{B g_0^2} + 8 + \right. \\ & \left. 3 \sqrt{375 \left(\frac{A}{B g_0^2} \right)^3 - 156 \left(\frac{A}{B g_0^2} \right)^2 + 144 \left(\frac{A}{B g_0^2} \right)^{\frac{1}{3}} - } \right. \\ & \left. \left(15 \times \frac{A}{B g_0^2} - 4 \right) g_0 \right. \\ & \left. 9 \times \left(36 \times \frac{A}{B g_0^2} + 8 + 3 \sqrt{375 \left(\frac{A}{B g_0^2} \right)^3 - 156 \left(\frac{A}{B g_0^2} \right)^2 + 144 \left(\frac{A}{B g_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{2}{9} g_0 \right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$A = 2[\frac{E}{3} \times (\frac{\pi}{l})^4 \times \frac{h^3}{4} + \frac{\pi^2}{4l^2} \sigma h] \quad (3)$$

$$B = \frac{\pi^4}{8l^4} Eh \quad (4)$$

式中 ϵ_0 是真空中的介电常数; E 是等效弹性模量^[9], 它与梁的宽度有关, 对于窄梁 $b < 5h$, $E = E$; 对于宽梁 $b \geq 5h$, $E = E/(1 - v^2)$.

考虑电场的边缘效应后^[9]

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{4(A c_{PI} + B c_{PI}^3) \sqrt{g_0(g_0 - c_{PI})^{\frac{3}{2}}}}{\epsilon_0(1 + 0.42 \times \frac{g_0}{b})}} \quad (5)$$

以上等式均是在假定的挠度试函数下得到的, 但实际的挠度函数与假定的挠度试函数是不完全一样的^[15, 16], 假定挠度函数实际上改变了梁的振型, 改变了梁的约束条件, 相当于改变了梁的刚度, 使得(5)式算得的吸合电压比实际的吸合电压大, 所以(5)式的结果不能满足材料参数测量的需要, 必须进行修正. 通过数值方法计算了常用尺寸范围和材料参数范围内数千个不同材料参数或几何尺寸的固支梁的吸合电压后, 再用最小二乘法可得吸合电压的拟合表达式为

$$V_{PI} = \frac{1}{1.1454 \times [1 - (1 - 0.8894 \times e^{1.0874 \times 10^{-2} g_0/h}) e^{-\frac{2.1064 a^{0.623}}{E h} \times 1.9252 \times 10^3 \times (l - 100 \times 10^{-6} + 0.06724)}]} \times$$

$$\sqrt{\frac{4(A c_{PI} + B c_{PI}^3) \sqrt{g_0(g_0 - c_{PI})^{\frac{3}{2}}}}{\epsilon_0(1 + 0.42 \times \frac{g_0}{b})}} \quad (6)$$

3 不等宽多层固支梁模型

由 n 层材料构成的不等宽多层两端固支梁的纵向截面如图 2(a) 所示, 横向截面如图 2(b) 所示, 先暂假设梁的顶层是导体材料, 其余各层均是绝缘体, 梁的下方是表面覆盖着一层绝缘体的固定平面电极, 当在梁的第 n 层(顶层)与它下面的固定平面电极间加上直流电压时, 由于静电引力的作用, 梁会发生弯曲. 图中的梁长度是 l , 第 i 层材料厚度是 h_i , 宽

度是 b_i , 等效弹性模量是 E_i ^[9], 相对介电系数是 ϵ_i (顶层材料是导体, 不考虑介电系数), 覆盖在梁下方电极上的绝缘体的厚度是 h_0 , 相对介电系数是 ϵ_0 , g_0 是外加电压为 0 时, 梁的下表面与固定面上绝缘层间的距离, V 是外加电压.

假设第 i 层材料中沿长度方向有残余应力 σ_i , 梁弯曲后由于两端固定, 必然产生轴向拉伸, 取轴 x 为中性轴, 设中性轴距第一层材料下表面的距离为 z_c , 根据空间力系的平衡条件可由下式确定 z_c ^[17]:

$$\begin{aligned}
 & h_1 - z_c \quad h_1 - z_c + h_2 \quad h_1 - z_c + h_2 + \cdots + h_{n-1} + h_n \quad h_1 - z_c \\
 & - \int_{z_c}^{E_1 \epsilon_{r1} b_1 dz} + \int_{h_1 - z_c}^{E_2 \epsilon_{r2} b_2 dz} + \cdots + \int_{h_1 - z_c + h_2 + \cdots + h_{n-1}}^{E_n \epsilon_{rn} b_n dz} = - \int_{z_c}^{E_1 (\epsilon_{s1} + \frac{\sigma_1}{E_1}) b_1 dz} + \\
 & h_1 - z_c + h_2 \quad h_1 - z_c + h_2 + \cdots + h_{n-1} + h_n \\
 & \int_{h_1 - z_c}^{E_2 (\epsilon_{s2} + \frac{\sigma_2}{E_2}) b_2 dz} + \cdots + \int_{h_1 - z_c + h_2 + \cdots + h_{n-1}}^{E_n (\epsilon_{sn} + \frac{\sigma_n}{E_n}) b_n dz}
 \end{aligned}$$

其中 ϵ_{ri} 为第 i 层材料的总应变, 由弯曲应变 ϵ_{bi} 、拉伸应变 ϵ_{si} 和残余应力引起的应变 $\frac{\sigma_i}{E_i}$ 三部分组成^[14],

即 $\epsilon_{ri} = \epsilon_{bi} + \epsilon_{si} + \frac{\sigma_i}{E_i}$, 可解得

$$z_c = \frac{1}{2} \times \frac{\sum_{i=1}^n E_i b_i \left(\left(\sum_{j=1}^i 2h_j \right) - h_i \right) h_i}{\sum_{i=1}^n E_i b_i h_i}$$

$$z_0 = -z_c$$

$$z_i = \left(\sum_{j=1}^i h_j \right) - z_c \quad (i = 1, \dots, n)$$

z_0, z_n 为梁的上、下表面到中性轴的距离, $z_1 \dots z_{n-1}$ 为层间界面到中性轴的距离.

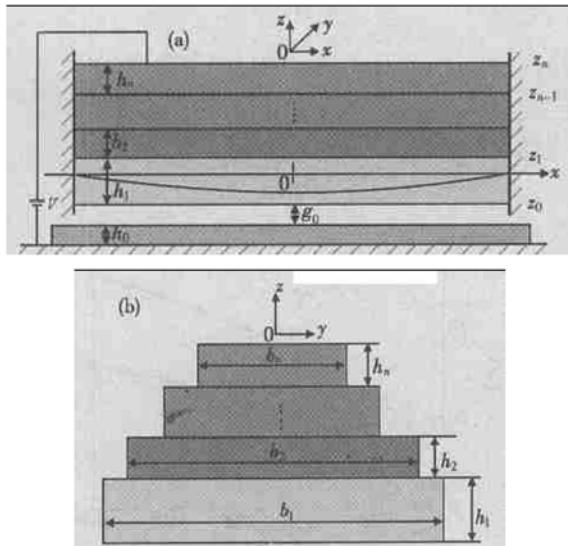


图 2 (a) 受静电力作用的不等宽多层两端固支梁; (b) 不等宽多层两端固支梁横向截面图

Fig. 2 (a) A multi-width doubly-clamped multi-layer beam under an electrostatic load; (b) Cross-section of the multi-width doubly-clamped multi-layer beam

当梁由于静电引力作用而弯曲时, 仍取挠度试函数^[14]

$$w(x) = \frac{c}{2} (1 + \cos \frac{2\pi x}{l}) \quad (7)$$

梁的总拉伸应变能为

$$W_{m1} = \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_i + \Delta\sigma_i)^2}{2E_i} b_i l h_i \quad (8)$$

其中

$$\Delta\sigma_i = E_i \Delta l / l, \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{2l} \int_{l/2}^l (\frac{dw}{dx})^2 dx = \frac{\pi^2 c^2}{4l^2}$$

代入(8)式得

$$\begin{aligned}
 W_{m1} = & c^4 \sum_{i=1}^n \frac{E_i b_i \pi^4}{32l^3} h_i + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2} \times \frac{\sigma_i^2 l}{E_i} h_i + \\
 & c^2 \sum_{i=1}^n \frac{\pi^2}{4l} b_i \sigma_i h_i
 \end{aligned} \quad (9)$$

梁的总弯曲应变能

$$\begin{aligned}
 W_{m2} = & \sum_{i=1}^n \frac{E_i b_i}{2} \int_{i-1}^i \int_{l/2}^{l/2} (z \frac{d^2 w}{dx^2})^2 dx dz = \\
 & c^2 \sum_{i=1}^n \frac{E_i b_i}{3} \times \frac{\pi^4}{l^3} (z_i^3 - z_{i-1}^3)
 \end{aligned} \quad (10)$$

忽略电容的边缘效应, 梁上 $x \sim x + dx$ 间的长度为 dx 的微元与固定电极间形成的电容

$$dC = \frac{b_e \epsilon_0 dx}{g_0 - w(x) + \frac{h_0}{\epsilon_{r0}} + \frac{h_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{h_2}{\epsilon_{r2}} + \cdots + \frac{h_{n-1}}{\epsilon_{r(n-1)}}}$$

其中 b_e 为电极宽度, 由于假定梁中仅顶层是导体, 所以在此处 $b_e = b_n$.

令

$$g_0 = g_0 + \frac{h_0}{\epsilon_{r0}} + \frac{h_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{h_2}{\epsilon_{r2}} + \cdots + \frac{h_{n-1}}{\epsilon_{r(n-1)}} \quad (11)$$

g_0 为等效间隙高度, 则只要再求出多层梁总的等效弹性模量 E_{eff} 、等效厚度 h_{eff} 及等效残余应力 σ_{eff} , 多层梁就可以作为单层梁处理.

令等效宽度 $b_{eff} = b_e$, 从(9)、(10)两式很容易得出

$$\sum_{i=1}^n E_i b_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) = E_{\text{eff}} \frac{h_{\text{eff}}^3}{4} b_{\text{eff}} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i h_i b_i = \sigma_{\text{eff}} h_{\text{eff}} b_{\text{eff}} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n E_i h_i b_i = E_{\text{eff}} h_{\text{eff}} b_{\text{eff}} \quad (14)$$

由(12)~(14)式可得

$$h_{\text{eff}} = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i b_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) / \sum_{i=1}^n E_i h_i b_i} \quad (15)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n \sigma_i h_i b_i / h_{\text{eff}} b_{\text{eff}} \quad (16)$$

$$E_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n E_i h_i b_i / h_{\text{eff}} b_{\text{eff}} \quad (17)$$

这样,就可以把多层固支梁与单层固支梁发生吸合现象时的电压 V_{PI} 的解析公式统一为一个公式。由(6)式可得,不等宽多层两端固支梁吸合电压 V_{PI} 的解析公式为:

$$V_{\text{PI}} = \frac{1}{1.1454 \times [1 - (1 - 0.8894e^{1.0874 \times 10^{-2}g_0/h_{\text{eff}}}) e^{-\frac{2.1064\sigma_{\text{eff}}^{0.623}}{\tilde{E}_{\text{eff}} h_{\text{eff}}} \times 1.9252 \times 10^3 (l - 100 \times 10^{-6} + 0.06724)}]} \times \sqrt{\frac{4(A_{\text{eff}} c_{\text{PI}} + B_{\text{eff}} c_{\text{PI}}^2)}{\epsilon_0 (1 + 0.42 \times \frac{g_0}{b_{\text{eff}}})}} \quad (18)$$

其中

$$A_{\text{eff}} = 2 \left[\frac{E_{\text{eff}}}{3} \times \left(\frac{\pi}{l} \right)^4 \times \frac{h_{\text{eff}}^3}{4} + \frac{\pi^2}{4l^2} \sigma_{\text{eff}} h_{\text{eff}} \right], \quad B_{\text{eff}} = \frac{\pi^4}{8l^4} E_{\text{eff}} h_{\text{eff}}$$

$$c_{\text{PI}} = \frac{g_0}{9} \left(36 \times \frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} + 8 + 3 \sqrt{375 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} \right)^3 - 156 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} \right)^2 + 144 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(15 \times \frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} - 4 \right) g_0} \right) + \frac{2}{9} g_0$$

$$9 \times \left(36 \times \frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} + 8 + 3 \sqrt{375 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} \right)^3 - 156 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} \right)^2 + 144 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}} g_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)$$

与单层两端固支梁吸合电压解析公式(6)的区别在于总的等效弹性模量、等效残余应力、等效间隙高度和等效厚度之上。

在上面的推导过程中曾假设梁中仅顶层是导体,其余各层均是绝缘体,如果梁中不只一层是导体或导电层不是顶层,那么,需要注意电极宽度 b_e 的变化和等效间隙高度 g_0 的变化。

对长度分别为 250 和 400 μm ,下层宽度为 50 μm ,厚度为 0.5 μm ,等效弹性模量为 165 GPa,上层宽度为 25 μm ,厚度为 1.0 μm ,等效弹性模量为 57 GPa,间隙高度为 1.0 μm 的两根双层两端固支梁。图 3 示出了其吸合电压随下层材料中残余应力变化的情况(假设两层材料均为导体,上层材料中的残余应力为零,且下电极表面未覆盖绝缘层),图中虚线是(18)式的结果,实线是用 Coventoware 得到的,可见(18)式具有很高的精度。

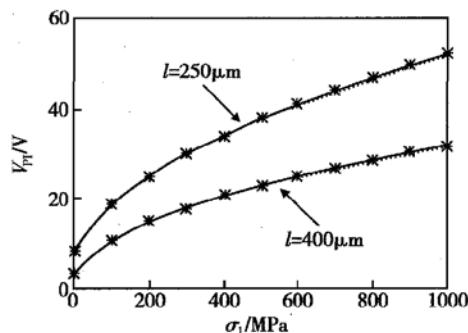


图 3 吸合电压随下层材料中残余应力变化的规律

Fig. 3 Pull-in voltage as a function of the residual stress in the bottom layer

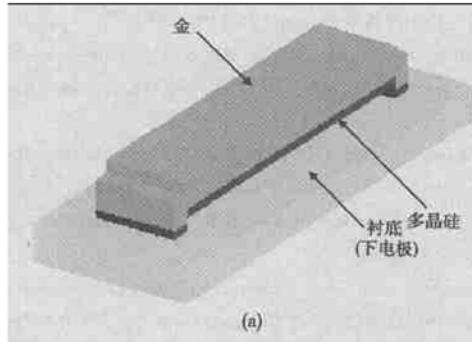
4 材料参数的提取

由于吸合电压是与梁的材料参数和几何尺寸有

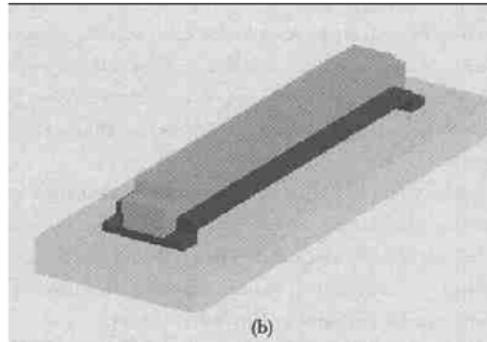
关的量,因此可通过改变梁的几何尺寸得到不同的吸合电压值,从而解得梁各层材料的弹性模量和残余应力。本文提出了一种通过改变梁的长度和宽度提取材料参数的方法,对由 n 层材料构成的多层梁,提取材料参数需要 n 种长度不同的梁,每种长度的梁又需要两种不同形式,其中一种形式是各层材料的宽度都是相等的,另一种形式是各层材料的宽度都是不等的(图2(b))。从这 $2n$ 个梁可以测到 $2n$ 个吸合电压,利用(18)式可以得到一个由 $2n$ 个非线性方程组成的方程组

$$\begin{aligned} V_{\text{Pl}}(E_1, E_2, \dots, E_n, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) - V_{\text{Plt}} &= 0 \\ \dots \\ V_{\text{Pl}n}(E_1, E_2, \dots, E_n, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) - V_{\text{Plnt}} &= 0 \quad (19) \\ \dots \\ V_{\text{Pl}2n}(E_1, E_2, \dots, E_n, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) - V_{\text{Pl}2nt} &= 0 \end{aligned}$$

其中 $(E_1, E_2, \dots, E_n, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ 是所要求解的每一层的弹性模量和残余应力; $V_{\text{Pl}}(i=1, 2, \dots, 2n)$ 是



(a)



(b)

图4 (a) 两层材料等宽的双层两端固支梁;(b) 两层材料不等宽的双层两端固支梁

Fig. 4 (a) A doubly-clamped two-layer beam with same width of layers; (b) A doubly-clamped two-layer beam with different width of layers

表1 双层两端固支梁的结构及材料参数

Table 1 Geometry and material properties of the doubly-clamped two-layer beams

梁长 $l/\mu\text{m}$	200, 250
梁宽 $/\mu\text{m}$	b_1
	50
间隙高度 $g_0/\mu\text{m}$	b_2
	50, 25
厚度 $/\mu\text{m}$	h_1
	0.5
等效弹性模量(预设) /GPa	h_2
	1.8
残余应力(预设) /MPa	E_1
	201
	E_2
	80
	σ_1
	100
	σ_2
	0

表2 材料参数的模拟结果

Table 2 Simulation results of material properties

材料参数	设定值	模拟结果	误差/%
E_1/GPa	201	201.80	0.4
E_2/GPa	80	81.52	1.9
σ_1/MPa	100	103.33	3.3
σ_2/MPa	0	-0.19	~

6 结论

本文采用静电执行结构,结合运用能量法对不等宽多层固支梁吸合电压 V_{Pl} 进行定量计算,由于吸合电压 V_{Pl} 与梁的材料参数和几何尺寸有关,通过对

由(18)式得到的关于 $(E_1, E_2, \dots, E_n, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ 的非线性实函数, $V_{\text{Pl}i}(i=1, 2, \dots, 2n)$ 是实际测得的吸合电压,利用迭代法可解得材料参数值。

5 模拟

本文采用双层梁来验证这种材料参数提取方法的正确性,图4所示是由金和多晶硅构成的双层梁,上层是金,下层是多晶硅,图4(a)中金层和多晶硅层的宽度相等,图4(b)中金层宽度是多晶硅层宽度的1/2,梁下方的电极表面未覆盖任何绝缘层,为了提取梁中每一层的材料参数需要两种长度(200、250 μm)的4个梁,图4中仅画了一种长度的梁,梁的结构及材料参数见表1,其中的材料参数是预先假设的。用假设的材料参数通过Coventoware软件计算出4个吸合电压,再从方程组(19)可计算材料参数(见表2),从表2可见计算的材料参数与假设的材料参数的误差是很小的。

梁几何尺寸的改变得到不同的吸合电压值,从而得到关于残余应力、弹性模量的方程组,用迭代法可同时解得残余应力、弹性模量。与模拟结果比较证明所得到的吸合电压 V_{PI} 、残余应力、弹性模量均具有很高的精度。这种方法测试结构非常简单,占用很少的芯片面积,适用于通常的 MEMS 加工工艺和在线监测。

参考文献

- [1] Senturia S D. CAD challenge for microsensors, microactuators, and microsystems. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(8): 1611
- [2] Petersen K E. Dynamic micromechanics on silicon techniques and devices. IEEE Transactions on Electron Devices, 1978, 25(10): 1241
- [3] Tilmans H A C. Micro-mechanical sensors using encapsulated built-in resonant strain gauges. PhD Dissertation, MESA Research Instit Univ Twente, Enschede, The Netherlands, 1993: 10
- [4] Maseeh F, Schmidt M A, Allen M G, et al. Calibrated measurements of elastic limit, modulus, and the residual stress of thin films using micromachined suspended structures. IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, 1988: 84
- [5] Wang S, Crary S, Najafi K. Electronic determination of the modulus of elasticity and intrinsic stress of thin films using capacitive bridges. Mat Res Soc Symp Proc, 1992: 203
- [6] Schweitz J A. Mechanical characterization of thin films by micromechanical techniques. MRS Bull, 1992: 34
- [7] Ozawa K, Nobuyoshi N, Asama K. Effect of deposition condition on intrinsic in a Si : H films. J Appl Phys, 1983, 22: 767
- [8] Najafi K, Suzuki K. A novel technique and structure for the measurement of intrinsic stress and Young's modulus of thin films. Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems, 1989, 20~22: 96
- [9] Osterberg P M, Senturia S D. M-TEST: a test chip for mems material property measurement using electrostatically actuated test structures. J MEMS, 1997, 6(2): 107
- [10] Gupta R K. Electrostatic pull-in test structure design for in-situ mechanical property measurement of microelectromechanical system(MEMS). PhD Thesis, MIT, 1997: 137
- [11] Zou Q, Li Z, liu L. New methods for measuring mechanical properties of thin films in micromaching: beam pull-in voltage (VPI) method and long beam deflection (LBD) method. Sensors and Actuators A, 1995, 48: 137
- [12] Nemirovsk Y. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators. J MEMS, 2001, 10(4): 601
- [13] Miao Min, Xiao Zhiyong. Capacitive RF MEMS switch with composite beam. Proceedings of SPIE, 2002: 248
- [14] Rong Hua, Hung 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, 2003, 24(11): 1185]
- [15] Hill M. Verification of 2-D MEMS model using optical profiling techniques. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36: 169
- [16] Bochobza-Degani O, Nemirovsky Y. Modeling the pull-in parameters of electrostatic actuators with a novel lumped two degrees of freedom pull-in model. Sensors and Actuators A, 2002, 97/98: 569
- [17] Cai Qianhuang. Mechanics of material. Beijing: Higher Education Press, 1992: 20(in Chinese) [蔡乾煌. 工程力学. 北京: 高等教育出版社, 1992: 20]

An Electrostatic Actuated Microelectromechanical In-Situ Extracting Method for Material Property of Multi-Layer Film

Nie Meng^{1,2}, Huang Qing'an¹, Wang Jianhua², Rong Hua¹ and Li Weihua¹

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

(2 School of Science, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The analytical expression of pull-in voltage of multi-width doubly-clamped multi-layer beam under an electrostatic load is obtained by using energy method, and is fitted by numerical analysis. The result is verified through the CoSolveEM module in Coventorware, showing high accuracy. Since the pull-in voltage is related to material properties and geometry of the beam, material property extraction can be implemented by making a set of beams with different geometry. Compared with simulating results it shows that they agree with each other great well.

Key words: doubly-clamped beam; pull-in; material properties extraction; simulation

EEACC: 2560B; 2560Z

Article ID: 0253-4177(2004)11-1537-07

Nie Meng female, was born in 1980, PhD candidate. Her research focuses on MEMS. Email: niemengpost@163.com

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor, adviser of PhD candidate. He is engaged in teaching and research on microelectronics and MEMS.

Rong Hua male, was born in 1965, PhD candidate. He is engaged in the research on MEMS modeling and simulation.

Received 20 October 2003, revised manuscript received 5 March 2004

© 2004 The Chinese Institute of Electronics