

一种能满足 MEMS 微梁固支边界条件的锚

戎 华¹ 黄庆安¹ 聂 萌² 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: 在 MEMS 领域, 微梁广泛应用于各种器件及材料参数的提取中, 但是由表面微加工工艺制成的单层台阶型锚, 往往不能使微梁满足理想固支的边界条件, 从而给器件设计和材料参数的提取带来较大的误差。为了解决这一问题, 文中提出了一种结构新颖的锚, 经 Coventorwear 软件模拟表明, 该锚能提供接近理想固支的边界条件。

关键词: 表面微加工; 固支边界条件; 锚; 版图

EEACC: 0590; 2520M

中图分类号: TB302

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)06-0707-04

且制作也仅须修改版图, 而无须变更工艺过程。

1 引言

微梁(包括悬臂梁和两端固支梁)在 MEMS 传感器、执行器、测试结构等方面均有广泛的应用^[1~3]。在有关的物理模型中, 为了数学处理上的方便, 微梁的边界常常看成固支的, 但是, 由表面微加工工艺得到的典型单层台阶型锚常常与理想的固支条件相差甚远, 从而会给器件设计及材料参数的提取带来较大的误差。为了解决这一问题, 通常有三种措施可以采取: 第一种是在模型中引入一些拟合参数, 这种方法使得模型复杂化, 并且精确地确定这些拟合参数往往既困难且费时^[2]。第二种是通过较大地修改工艺步骤, 制造出能很好满足固支条件的锚^[3], 这种方法增加了制作成本。第三种是不改变工艺步骤, 仅仅通过修改版图来制作能满足固支条件的锚^[4]。可是, 如果结构层较薄且牺牲层较厚, 那么文献[4]中提出的方法就不再有效。因为由于特征尺寸的限制, 刻在牺牲层上的孔不可能无限小, 所以在这种情况下, 刻在牺牲层上的孔在结构层的淀积过程中无法被完全填满。本文提出了一种能显著改善微梁边界固支条件的锚, 该锚对于薄的结构层和厚的牺牲层也适用,

2 新锚的结构

所谓理想固支的边界条件, 就是指微梁在边界处既无平动也无转动。而由表面微加工工艺得到的典型台阶锚, 实际上类似于一个悬臂梁, 如图 1 所示。在梁受到外力作用后, 锚必然会产生较大的弯曲

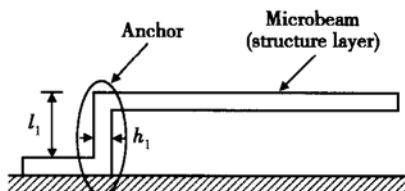


图 1 表面微加工工艺制作的典型台阶锚

Fig. 1 A typical step up anchor obtained from surface micromachined process

和转动, 使微梁边界的固支条件无法满足。由材料力学中有关悬臂梁的理论可知, 锚在外力作用下其自由端的位移 δ 及 θ 转角分别为^[5]:

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

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。

聂 萌 女, 1980 年出生, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 薄膜应力研究。

$$\delta = \frac{Fl_1^3}{3E_1I_1} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{Fl_1^2}{2E_1I_1} \quad (2)$$

其中 F, l_1, E_1, I_1 分别是典型台阶锚自由端受到的外力、锚长、材料的等效弹性模量及惯性距。等效弹性模量 E_1 与材料的杨氏模量 E_1 及锚的宽度 b 和厚度 h_1 有关, 当 $b \geq 5h_1$ 时, $E_1 = E_1/(1 - \nu^2)$, 当 $b < 5h_1$ 时, $E = E(\nu$ 是泊松比) $^{[2]}$. 从(1)和(2)两式可见, 只要能够减小悬臂梁的长度 l_1 或者增加它的抗弯刚度 E_1I_1 , 就可以显著地减小其自由端的位移和转角, 从而有效地改善微梁边界的固支条件。本文通过两种措施来实现微梁边界固支条件的改善。第一, 通常情况下, 微梁和锚是通过淀积并刻蚀结构层形成的, 它们由相同的材料构成。其后一般还要经过淀积铝(或金)和刻蚀铝(或金)等后道工艺以制作电极。为了减小锚的长度并且增加锚的抗弯刚度, 可以在锚区保留后道工艺中淀积的部分层或所有层, 形成所谓的多层锚, 如图 2 所示, 图中在锚区保留了后道工序中淀积的电极层。保留电极层后, 微梁的锚变

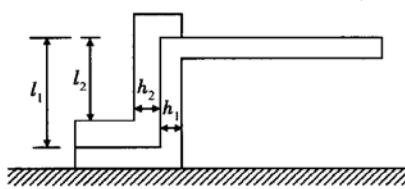


图 2 双层结构的锚

Fig. 2 A bilayer anchor

为双层, 且对微梁的边界条件有影响的锚的有效长度从 l_1 减小为 l_2 , 等效抗弯刚度从 E_1I_1 变为^[6]

$$(EI)_{\text{eff}} = E_1I_1 \frac{h_2E_2}{h_1E_1 + h_2E_2} [4 + 6(\frac{h_2}{h_1}) + (\frac{E_1}{E_2})(\frac{h_1}{h_2}) + 4(\frac{h_2}{h_1})^2 + (\frac{E_2}{E_1})(\frac{h_2}{h_1})^3] \quad (3)$$

其中 $(EI)_{\text{eff}}$ 是双层锚的等效抗弯刚度; h_2, E_2 分别是电极层的厚度和等效弹性模量。由(3)式很容易证明, $(EI)_{\text{eff}} > EI_1$, 并且随着 h_2/h_1 的增加, $(EI)_{\text{eff}}$ 迅速增大。所以, 在锚区保留电极层可以减小锚的有效长度, 增加锚的抗弯刚度, 显著地改善微梁边界的

固支条件。

第二种改善微梁边界固支条件的措施是采用一种具有多个子锚的锚, 如图 3 所示。子锚实际上是一个一个的“凹坑”, “凹坑”沿微梁长度方向的壁(图 3 中的 A)相当于一个悬臂梁, “凹坑”壁的厚度 h_{w1} 相当于悬臂梁的宽度, “凹坑”的宽度 b_{w1} 相当于悬臂梁的厚度。当子锚的个数为 n 时, 共有 $2n$ 个这样的悬臂梁, 如果等效成一个悬臂梁, 那么等效悬臂梁的宽度为 $2nh_{w1}$, 厚度为 b_{w1} , 等效悬臂梁的抗弯能力显著提高。所以, 通过增加子锚的宽度 b_{w1} 或子锚的个数 n 就可以显著增加悬臂梁的抗弯刚度, 而且子锚与微梁相连接的垂直于梁的长度方向的壁(图 3 中的 B)也有一定的抗弯能力, 可见, 具有多个子锚的锚能够改善微梁的边界固支条件。但如果仅增大宽度 b_{w1} , 而子锚的数量太少, 那么子锚与梁相连接的垂直于梁的长度方向的壁的宽度 b'_{w1} 就会较大, 当梁受力后, 它就会发生变形, 从而不利于梁的固支边界条件的改善。所以在实际设计这种多子锚的锚时, 应该根据实际的工艺条件尽可能多地增加子锚的数量。

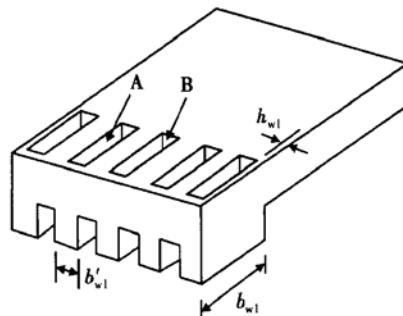


图 3 单层的多子锚结构的锚

Fig. 3 A single layer new anchor with some sub-anchors

如果将上述两种措施结合起来, 制作具有多子锚结构的多层锚, 更有利于边界条件的改善, 如图 4 所示, 这就是本文所提出的新结构的锚。

保留后道工序中的部分层, 可能会由于各层应力的不同导致在释放结构后锚发生形变, 从而在梁上产生附加应力。但由于锚厚度的增加及子锚本身的抗弯能力高于单层台阶锚, 使得释放后锚的形变很小, 对梁的影响一般情况下可忽略, 后面的有限元模拟也证明了这一点。为了加工此新锚仅需要修改版图, 而无须改变制作工艺, 因而不会增加制造难度及制造成本。

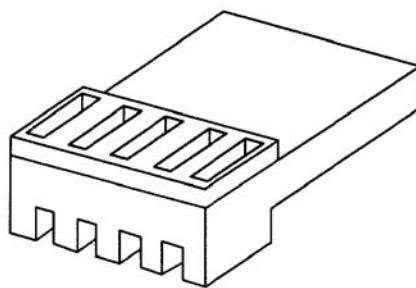


图 4 双层的具有多个子锚的新结构锚

Fig. 4 A bilayer new anchor with some sub anchors

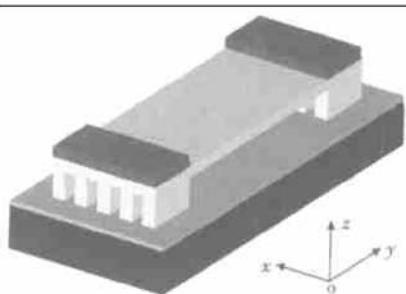


图 5 具有新锚的单层多晶硅两端固支梁

Fig. 5 A polysilicon fixed-fixed beam with new anchors

3 有限元模拟

为了验证本文提出的新锚在改善微梁边界固支条件上的有效性, 我们用 Coventorware 软件中的 MemMech 模块进行了有限元模拟。对于图 5 所示的一个单层多晶硅两端固支梁, 图中画出了具有五个子锚的情况, 且在锚区保留了铝层。图 6、7 分别是版图和工艺步骤。在 Coventorware 中其网格划分见图 8。梁的结构及材料参数如下: 梁长 100 μm , 梁宽 50 μm , 多晶硅结构层厚度 0.5 μm , 牺牲层厚度 1.5 μm ,

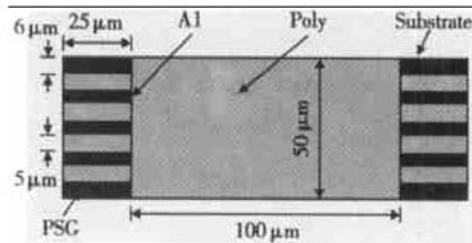


图 6 具有新锚的单层多晶硅两端固支梁的版图

Fig. 6 Layout of the polysilicon fixed-fixed beam with new anchors

ProcessEditor: d:\coventor\Design_Files\BeamDesign\Devices\anchor7.proc									
	Up	Down	Deposit	Etch	Burcifice	Enable/Disable			
Step	Action	Material	LayerName	Type	Thickness	Mask	EtchDepth	Polarity	
0	Base	SILICON	Substrate		2.0	GND			
1	Deposit	SIN	Layer1	Stacked	0.2				
2	Deposit	PSG	Layer2	Stacked	1.3				
3	Etch					PSG	1.3	-	
4	Deposit	POLYSILICON	Layer3	Conformal	0.5	Poly	0.5	+	
5	Etch					Al	0.5	+	
6	Deposit	ALUMINUM(FILM)	Layer4	Conformal	0.5				
7	Etch								
8	Sacrifice	PSG							

图 7 工艺步骤

Fig. 7 Steps of processing

在锚区保留的铝层厚度为 0.5 μm , 多晶硅和铝的弹性模量分别为 165GPa 和 77GPa, 多晶硅和铝的泊松比分别为 0.23 和 0.3。假设铝层中没有残余应力, 当在梁的上表面垂直地施加一个 0.015MPa 的均匀压力时, 对几种不同形式的锚, 用 MemMech 模块分别计算当多晶硅层中没有残余应力和多晶硅层中沿 x 、 y 、 z 三个方向的残余应力为 $s_x = s_y = 100\text{ MPa}$, $s_z = 0$ 时, 固支梁中央的挠度, 结果列在表 1 中。从表中可知, 当子锚数量较多且保留铝层时, 新锚能够很好地改善微梁边界的固支条件, 且锚区各层材料应力的不同所产生的影响可以忽略。

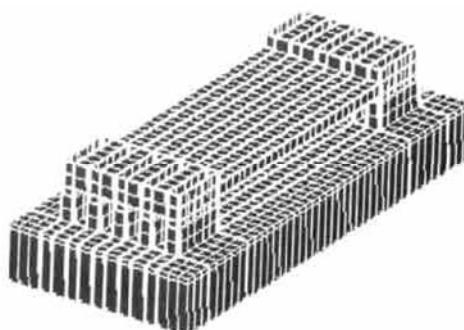


图 8 具有新锚的单层多晶硅两端固支梁的网格划分

Fig. 8 Meshing of the polysilicon fixed-fixed beam

表 1 两端固支梁中央的挠度

Table 1 Central deflection of the fixed-fixed beam

序号	锚的形式	子锚数	梁中央的挠度及与理想固支情况的偏差			
			挠度 ¹⁾ /μm	偏差 ¹⁾ /%	挠度 ²⁾ /μm	偏差 ²⁾ /%
1	理想固支	—	0.8153	—	0.3431	—
2	单层典型台阶	—	1.0453	28.2	0.5820	69.6
3	双层多子锚	1	0.8541	4.7	0.4776	39.2
4	双层多子锚	5	0.8385	2.8	0.3564	3.9
5	双层多子锚	9	0.8324	2.1	0.3504	2.1

1) 多晶硅层中无残余应力; 2) 多晶硅层中有残余应力, $s_x = s_y = 100\text{MPa}$, $s_z = 0$.

4 结论

为了满足微梁的理想固支条件, 本文提出了一种多层且具有多个子锚的新锚, 该锚仅须通过修改版图而无须修改工艺流程就能制作。有限元分析表明此种形式的锚能使微梁很好地满足理想的边界固支条件, 因而有利于提高器件设计及材料参数测量的精度。

参考文献

[1] Zhu Jian, Lin Jinting, Lin Liqiang. DC-20GHz RF MEMS

switch. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(5): 706

- [2] Gupta R K. Electrostatic pull-in test structure design for IN-SITU mechanical property measurement of microelectromechanical systems (MEMS). PhD Dissertation, MIT, 1997: 137
- [3] Li Y X. Plasma planarization for sensor applications. Journal of Microelectromechanical Systems, 1995, 4(3): 132
- [4] Gill J J Y. Elimination of extra spring effect at the step-up anchor of surface micromachined structure. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 7(1): 107
- [5] Liu Qingtan. Mechanics of materials. Beijing: China Machine Press, 2003: 129 (in Chinese) [刘庆潭. 材料力学. 北京: 机械工业出版社, 2003: 129]
- [6] De Los Santos H J, Kao Y H, Caigoy A L, et al. Microwave and mechanical considerations in the design of MEMS switches for aerospace applications. Proceedings of Aerospace Conference, 1997: 235

A Novel Anchor for Microbeam with Perfect Fixed-End Boundary Conditions

Rong Hua¹, Huang Qing'an¹, Nie Meng² and Li Weihua¹

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

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

Abstract: In MEMS community, micro-beams are often used to extract material properties or build various devices, but the typical step-up anchors obtained from surface micromachined process are not often well-defined fixed-ends. In order to get perfect fixed-ends, a novel anchor is presented which can be manufactured only by modifying layout, and no modification in the fabrication process is necessary.

Key words: surface micromachining; fixed-end boundary condition; anchor; layout

EEACC: 0590; 2520M

Article ID: 0253-4177(2004)06-0707-04

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

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

Nie Meng female, was born in 1980. Her research focuses on MEMS.

Received 28 July 2003, revised manuscript received 8 December 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics