

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0030-05

残余应力对静电驱动 MEMS 微镜性能的影响

胡放荣^{1,2} 姚 军¹ 陈剑鸣³

(¹ 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

(² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650093)

摘要 残余应力是微机械表面加工过程中不可避免的,残余应力的存在会影响微机械器件的性能。通过引入等效力学模型,推导出残余应力作用下静电驱动微镜的吸合电压和行程的表达式,定量地研究了残余应力对吸合电压和行程的影响。同时还研究了残余应力对微镜本征频率的影响,发现本征频率随着残余拉应力的增加而增大。采用白光干涉仪对不同残余应力情况下的微镜表面形貌进行了实验测试,结果表明,残余应力会引起表面翘曲,从而使微镜的斯特列尔比下降,成像质量变差。

关键词 光学器件;微电子机械系统;微镜;残余应力;静电驱动;吸合效应

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL200936s2.0030

Effects of Residual Stress on the Performances of Electrostatically Actuated MEMS Micromirrors

Hu Fangrong^{1,2} Yao Jun¹ Chen Jianming³

(¹ State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

² Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

³ Science College, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract Residual stress is an inevitable factor in microelectromechanical system (MEMS) surface micromachining, it affects the performances of the devices. In this paper, the formulas for calculating the pull-in voltage and the stroke of an electrostatic micromirror with residual stress existed have been derived by introducing an equivalent mechanical model, and the effect of the residual stress on the eigen-frequency of the micromirror is analyzed. The result shows that the eigen-frequency increases with the residual stress. The micromirror surface profile, under different residual stress, is tested by a white light interferometer. Experimental results indicate that the residual stress makes a warp on the surface, and it declines Strehl ratio and lower the image quality.

Key words optical devices; microelectromechanical systems; micromirror; residual stress; electrostatic actuate; pull-in effect

1 引言

静电驱动的微电子机械系统(MEMS)微镜以其体积小、能耗低、响应速度快以及便于集成等优点,而广泛应用于各种波前和相位控制领域^[1~4]。静电 MEMS 微镜的特性主要有行程、静电吸合电

压、本征频率以及表面形貌等。已有关于静电 MEMS 微镜及其他静电驱动器件的性能研究^[5~8],但几乎都是在没有考虑残余应力的情况下进行的,因此得出的结论和公式也只适用于无残余应力的情况。而残余应力在 MEMS 器件制造过程中是不可

基金项目: 中国科学院重点实验室创新基金项目(CXJJ-09-S05)和低维量子结构与调控教育部重点实验室(湖南师范大学)资助项目(QSQC0909)资助课题。

作者简介: 胡放荣(1973—),男,博士研究生,主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail: hufangrong@sina.com

导师简介: 姚 军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术、微光机电系统及其应用等方面的研究。

E-mail: junyao@ioe.ac.cn

避免的^[9],残余应力对 MEMS 器件性能的影响也是不容忽视的。因此,在研究微镜的性能时,考虑残余应力的影响将会使研究结果更加准确。本文将推导有残余应力存在时,静电驱动 MEMS 微镜的吸合电压和行程的解释表达式,同时还将研究残余应力对微镜本征频率和表面形貌的影响。

2 残余应力影响的理论基础

常见的静电 MEMS 微镜为平行板型,其结构如图 1 所示,上极板由 4 根 L 形弹簧支撑。在残余应力作用下,微镜的等效力学模型如图 2 所示。

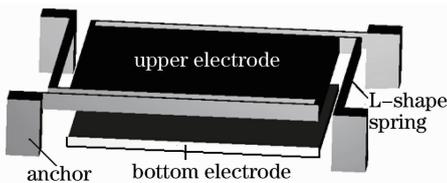


图 1 平行板静电驱动 MEMS 微镜模型

Fig. 1 Model of electrostatically actuated plate MEMS micromirror

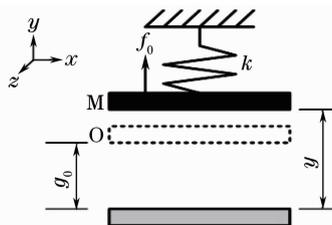


图 2 残余应力作用下的等效力学模型

Fig. 2 Equivalent model of the micromirror with residual stress

图 2 中, g_0 为无残余应力时上下极板的初始间隙, O 点为无残余应力时, 上极板的初始平衡位置。为了研究残余应力的影响, 将残余应力等效成一个实际外力 f_0 。若残余应力为拉应力, 则 f_0 的方向竖直向上; 若残余应力为压应力, 则 f_0 的方向竖直向下。在残余应力作用下微镜上极板的初始平衡位置将不再在原来的平衡位置 O 点, 而是移到新的平衡位置 M 点。

设 4 根 L 形支撑弹簧并联后的总弹性系数为 k , 在激励电压 V 的作用下, 上下极板会产生相互的静电吸引力, 上电极会在静电吸引力的作用下向下运动。若选择竖直向上的方向为正方向, 则上极板所受静电力的表达式为^[8]

$$F_e = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A V^2}{2y^2}, \quad (1)$$

式中 A 为一个极板的面积, ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空介电

常数和极板之间介质的介电常数。由于静电微镜的位移量很小, 可以近似认为支撑梁的形变是弹性的, 产生的机械恢复力为

$$F_m = -k(y - g_0), \quad (2)$$

由上极板的受力平衡条件可得

$$f_0 + F_e + F_m = 0, \quad (3)$$

联立(1),(2)和(3)式可解得残余应力作用下激励电压 V 与上下极板间距 y 的关系式

$$V = \sqrt{\frac{2y^2 [f_0 - k(y - g_0)]}{\epsilon_0 \epsilon_r A}}. \quad (4)$$

3 残余应力对静电微镜特性参数的影响

3.1 静电吸合电压

静电吸合电压是衡量静电微镜驱动电压范围的一个参数。对镜面尺寸为 $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 支撑弹簧宽度 $w = 8 \mu\text{m}$, 长度 $l = 420 \mu\text{m}$, 厚度 $t = 2 \mu\text{m}$ 的微镜, 其弹性系数可表示为^[10]

$$k \approx 4Ew \left(\frac{t}{l}\right)^3, \quad (5)$$

式中杨氏模量 $E = 160 \text{ GPa}$ 计算得 $k = 0.553 \text{ N/m}$ 。由(4)式可得, 当残余应力为零时, 驱动电压和上下电极间距之间的变化曲线如图 3 所示。

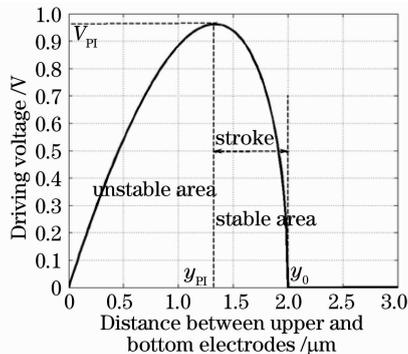


图 3 零应力时驱动电压与极板间距的关系

Fig. 3 Applied voltage versus distance between two plates (without residual stress)

由图 3 可知, 除了曲线的顶点外, 对任意电压都对应两个上极板位置, 实际工作时, 这是不可能的, 只有较大的一个距离值所对应的上极板位置才是稳定位置。随着驱动电压的增加, 上极板将在静电力的作用下从初始位置往下运动, 极板间距也相应地从 y_0 开始下降。当驱动电压达到曲线顶点所对应的电压值时, 上极板处于临界稳定状态, 一旦超过该位置, 上极板将会急剧下降, 直到与下极板发生静电吸合 (pull-in) 效应, 曲线顶点对应的驱动电压即为

微镜的静电吸合电压 V_{PI} 。

由(4)式可知,仅当

$$y = y_{PI} = \frac{2(f_0 + kg_0)}{3k} \quad (6)$$

时,驱动电压 V 才能取得最大值,即达到静电吸合电压

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8(f_0 + kg_0)^3}{27k^2 \epsilon_0 \epsilon_r A}}, \quad (7)$$

由于残余应力的方向和大小直接影响到等效外力 f_0 的大小和方向,从而影响到静电吸合电压的大小。在不同的残余应力作用下,平行板型静电 MEMS 微镜的上下极板的间距与驱动电压之间的关系如图 4 所示。

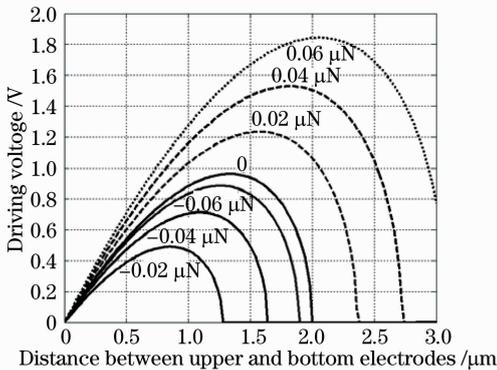


图 4 不同应力状态驱动电压随极板间距的变化

Fig. 4 Applied voltage versus distance between two plates under different residual stress

由图 4 可知,静电吸合电压随残余拉应力的增大而增大,随残余压应力绝对值的增加而增大。

3.2 微镜的行程

在激励电压下,微镜上极板能够移动的最大距离叫作静电驱动微镜的行程。对于静电驱动的 MEMS 微镜来说,行程决定了微镜可校正的波前动

态范围,行程越大,可校正的波前动态范围也越大。由于静电微镜的上极板初始间距与临界位置之间的距离即为行程,由图 2 可知

$$S = y_0 - y_{PI}, \quad (8)$$

而上下极板的初始间距可以表示为

$$y_0 = g_0 + \frac{f_0}{k}, \quad (9)$$

结合(6),(8)和(9)式可得

$$S = y_0 - y_{PI} = \left(g_0 + \frac{f_0}{k}\right) - \frac{2(f_0 + kg_0)}{3k} = \frac{g_0}{3} + \frac{f_0}{3k}. \quad (10)$$

因此,行程随残余应力而发生变化,但并不是线性变化,因为残余应力还会引起弹性系数 k 的变化。残余拉应力可以增大行程,而残余压应力则减小行程。

3.3 微镜的本征频率

本征频率是限制微镜工作带宽的一个重要参数,为了避免微镜本征频率的激振,通常要求微镜的本征频率高于驱动器最高工作频率的 10 倍以上。因此,本征频率越高,微镜的工作带宽就越大。本征频率由微镜的结构参数决定,当存在残余应力时,微镜的结构会发生形变,从而会影响其弹性系数,最终导致微镜的本征频率发生变化。微镜结构层的材料为多晶硅,参数如表 1 所示。

表 1 微镜的材料参数

Table 1 Material parameters of the micromirror

Material	Young's modulus E / GPa	Poisson ratio ν	Density ρ /(kg/m^3)
Polysilicon	160	0.23	2330

当残余应力、质量阻尼和弹性阻尼都等于零时,由多物理场分析软件计算得到的静电微镜前四阶模态的本征频率及其振形如图 5 所示。

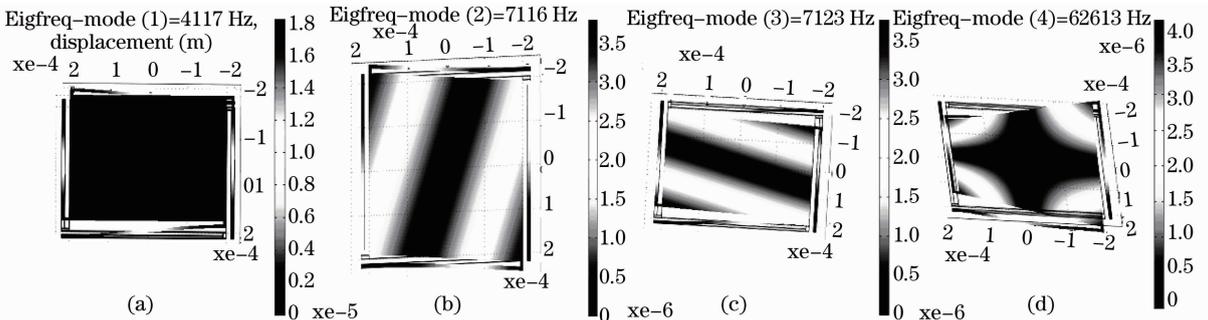


图 5 微镜前四阶模态。(a)第一阶模态;(b)第二阶模态;(c)第三阶模态;(d)第四阶模态

Fig. 5 The first four modes of micromirror. (a) The first mode; (b) the second mode; (c) the third mode; (d) the fourth mode

由图 5 可知,第一阶振动模态的振形为上下运动,这是静电微镜在大多数实际应用中所需要的一

种模态。第一阶模态的本征频率 $f_{01} = 4117$ Hz 是所有模态中最低的,与之最接近的第二、三阶模态的

本征频率都接近它的 2 倍,因此,该静电微镜实际工作时,以第一阶模态的振动为主。当残余应力从 0 到 50 MPa 变化时,微镜第一阶模态本征频率的变化如图 6 所示。

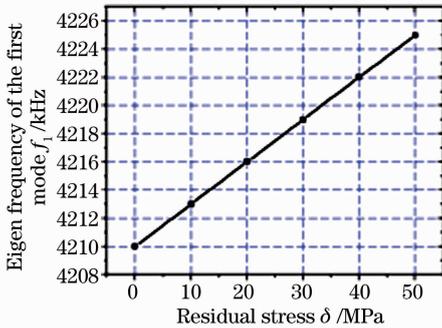


图 6 第一阶模态本征频率随残余应力的变化
Fig. 6 Eigen-frequency of the first mode versus residual stress

由图 6 可知,当残余应力变化时,第一阶模态的本征频率 f_{01} 的变化很快。这是因为第一阶模态的本征频率与有效弹性系数 k_{eff} 以及有效质量 M_{eff} 的关系可以表示为^[11]

$$f_{01} \propto \sqrt{\frac{k_{eff}}{M_{eff}}}, \quad (11)$$

残余应力对有效质量的变化影响很小,但对有效弹性系数的影响很大。残余应力的增加会导致微镜的有效弹性系数增加,因此,会使微镜的本征频率增加。

3.4 微镜表面形貌

表面形貌是所有光学器件制造中的一个重要参数,其好坏直接影响到器件的光学性能,而残余应力是影响 MEMS 器件表面形貌好坏的一个最重要因素。残余应力常常表现为张应力,它会使得 MEMS 器件的边缘产生翘曲,使其表面形貌变差。图 7(a)和 (b)为利用 Zygo 白光干涉仪测得的六边形微镜存在残余应力时的表面强度图和轮廓线图,由图可知,微镜边缘已经明显翘曲,这种翘曲效应会导致微镜斯特列尔比下降[图 7(c)],最终导致成像质量变差。光学 MEMS 器件通常还要在结构层表面镀金属增反膜(金),金属膜的残余应力通常比结构层大,这样在金属层和结构层之间会存在很大的应力失配,从而使表面翘曲得更加厉害,严重时还会出现金属层的褶皱和剥离,最终导致整个器件失效。因此,如何有效地控制残余应力,提高表面质量和成品率,是 MEMS 微镜制造过程中必须解决的一个技术难题。

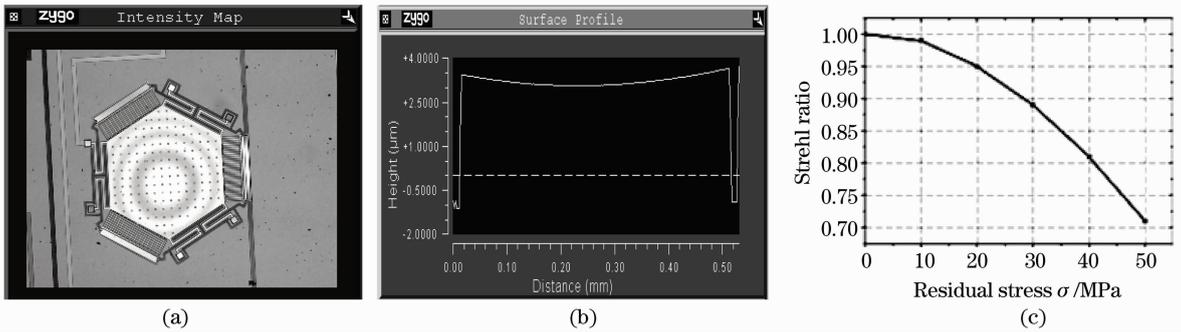


图 7 残余应力对表面形貌和成像质量的影响。(a)存在残余应力时表面干涉图;(b)存在残余应力时的表面轮廓线;(c)残余应力对斯特列尔比的影响

Fig. 7 Effect of residual stress on the surface profile and Strehl ratio. (a) Intensity map of micromirror; (b) surface profile of micromirror; (c) effect of residual stress on Strehl ratio

4 结 论

研究表明微镜的静电吸合电压随残余拉应力的增加而增大,随残余压应力绝对值的增加而增大;残余拉应力可以增大行程,而残余压应力则减小行程。另外,残余应力不仅可以改变微镜的本征频率和工作带宽,还会引起表面翘曲和斯特列尔比的下降,严重时会导致整个器件因金属层褶皱和剥离而失效。本文的研究方法和结论对于静电驱动 MEMS 微镜或其他光学 MEMS 器件的设计和制作具有实际意

义和参考价值。

参 考 文 献

- 1 Xiaoxia Zhao, Yongjun Xie, Wei Zhao. Wide field-of-view foveated imaging system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **8**(10): 261~263
- 2 Fumio Koyama. New functions of VCSEL-based optical devices [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **8**(10): 755~762
- 3 S. M. Jonesa, S. Oliviera, D. Chena. Adaptive optics ophthalmologic systems using dual deformable mirrors [C]. *SPIE*, 2007, **6467**: 64670H
- 4 Il Woong Jung, Yves-Alain Peter, Emily Carr *et al.*. Single-

- crystal-silicon continuous membrane deformable mirror array for adaptive optics in space-based telescopes[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **3**(2): 162~167
- 5 Y. Fuqian. Membrane modeling of pull-in instability in MEMS sensors and actuators [J]. *Proc. IEEE Sensors*, 2002, **2**: 1199~1203
- 6 Yu Hongbin. Study of the design and fabrication of the MEMS-DMs [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005, 25~29
- 7 O. Bochobza-Degani, Y. Nemirowsky. Modeling the pull-in parameters of electrostatic actuator with a novel lumped two degrees of pull-in model[J]. *Sensor Actuat. A, Phys.* 2002, **101**(3): 569~578
- 8 Chang Liu. Foundation of MEMS[M]. Pearson Education Inc., USA, 2006. 108~110
- 9 Jin Qian, Cheng Liu, Dacheng Zhang. Residual stress in micro-electro-mechanical systems [J]. *J. Mech. Strength*, 2001, **23**(4): 393~401
- 10 G. M. Rebeiz. RF MEMS Theory, Design and Technology[M]. John Wiley and Sons, 2003. 20~35
- 11 Liu Yanzhu, Chen Wenliang, Chen Liqun. Vibration Mechanics [M]. Beijing: High Education Press, 1998. 7~8
刘延柱,陈文良,陈立群. 振动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1998. 7~8