

文章编号 1004-924X(2008)11-2204-05

# 用于微镜制作的叠层光刻胶工艺及残余应力控制

李加东<sup>1,2</sup>, 张平<sup>1</sup>, 吴一辉<sup>1</sup>, 宣明<sup>1</sup>, 刘永顺<sup>1</sup>, 王淑荣<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 对应用于微反射镜制作的叠层光刻胶牺牲层工艺及微反射镜表面残余应力控制进行了研究。讨论了光刻胶牺牲层在电镀时的污染问题, 提出了用电镀结束后重新制作光刻胶牺牲层的方法来保证牺牲层表面质量。同时提出蒸发-电镀相结合的工艺, 解决了上层光刻胶溶剂穿过中间结构层浸入底层光刻胶的问题, 并通过控制蒸发与电镀过程中应力状态不同的两层金属薄膜的厚度解决了微反射镜镜面存在残余应力问题。最后成功释放了  $620\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ , 悬空高  $12\ \mu\text{m}$  的微反射镜结构。

**关键词:** 微反射镜; 叠层光刻胶; 牺牲层; 残余应力

**中图分类号:** TN305.7 **文献标识码:** A

## Laminated photoresist layer technology and residual stress control for micromirror fabrication

LI Jia-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>, WU Yi-hui<sup>1</sup>, XUAN Ming<sup>1</sup>, LIU Yong-shun<sup>1</sup>, WANG Shu-rong<sup>1</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The laminated photoresist sacrificial layer technology and residual stress control in micromirror fabrication were investigated. Pollution problems in electroplating related to the photoresist sacrificial layer were discussed and their solutions were proposed. Through experiments, a new fabrication process is developed to solve the problem that the solvent in upper photoresist penetrates the electroplating base metal layers and dissolves the sacrificial layer to damage middle layer; the thicknesses of two kinds of metal films with different stress states in evaporating and electroplating processes are controlled to remove the residual stress on the surface of a micromirror. Employing these new technologies, the perfect flat micromirror with the size of  $620\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ , and air gap height of  $12\ \mu\text{m}$  is fabricated successfully.

**Key words:** micromirror; laminated photoresist; sacrificial layer; residual stress

收稿日期: 2008-04-07; 修订日期: 2008-05-08.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(B类)(No. 2006AA04Z358); 基于 MEMS 工艺的微型生化分析仪的研制(No. 20060335)

## 1 引言

采用表面微细加工工艺制作微反射镜时,牺牲层工艺与薄膜残余应力控制是其制作工艺中的两个关键工艺,它直接影响到微反射镜的质量及可靠性。

目前常用作牺牲层的材料有:二氧化硅、多晶硅、聚酰亚胺、金属 Cu、光刻胶等。大多数牺牲层的制备往往需要气相沉积、氧化、电镀等工艺,去除也不太方便,特别是当牺牲层较厚时,其制备过程中产生的内应力会给悬空结构带来应力的影响。光刻胶牺牲层工艺在这方面就显得比较有优势<sup>[1-3]</sup>。首先,光刻胶容易成膜,牺牲层厚度容易控制;其次,光刻胶去除时比较容易;再次,降低了工艺成本及工艺步骤。然而实验中发现,采用光刻胶作牺牲层时,光刻胶表面在进行后续的电镀工艺过程中易出现污染的现象。同时,在叠层光刻胶工艺过程中,会发生上层光刻胶溶剂穿过中间金属结构层浸入底层光刻胶,导致中间金属结构层损坏的问题,这些问题都会严重影响到微反射镜的质量。

残余应力是影响 MEMS 器件质量的一个重要因素<sup>[4-8]</sup>。薄膜的压应力过大时,会使薄膜发生翘曲,严重时会与基底分离;拉应力过大时,则会使薄膜产生褶皱,甚至出现裂纹。微反射镜的制作过程中,当采用释放工艺将微反射镜释放时,由于金属薄膜中残余应力的存在,会引起镜面结构向上或向下弯曲,残余应力较大时,甚至出现微反射镜扭转梁断裂的现象。因此,如何有效消除或减小薄膜中的残余应力,成为改进微反射镜性能的一个不容忽视的问题。

本文结合微反射镜的制作工艺,从改善其制作工艺入手,针对光刻胶牺牲层在电镀时的污染问题以及上层光刻胶溶剂穿过中间结构层浸入底层光刻胶的问题,提出了改进方案。同时,讨论分析了微反射镜镜面的残余应力问题,提出了相应的解决方法。最后,实验验证了改进后制作工艺的可行性,为微反射镜的制作奠定了基础。

## 2 实验部分

微反射镜的结构如图 1 所示,微反射镜由两

根扭转梁、两个支撑柱组成。镜面下方有两个静电驱动电极。

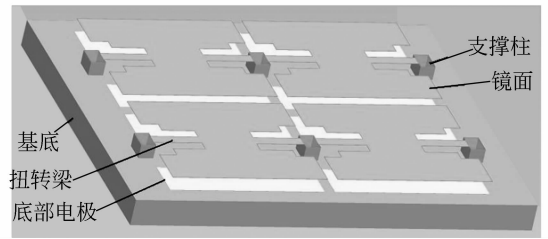


图 1 微反射镜结构示意图

Fig. 1 Scheme of micromirror

其制作工艺如图 2 所示。

A. 取  $380\ \mu\text{m}$  厚的  $\langle 100 \rangle$  硅片,用浓硫酸和去离子水清洗干净;经喷胶(AZ4620)、前烘、曝光和显影,在硅片上制作出设计好的图形,光刻胶厚度为  $12\ \mu\text{m}$ 。采用蒸发沉积的方法在衬底上沉积  $50\ \text{nm}$  的 Cr 和  $100\ \text{nm}$  的 Cu,Cr 主要用于改善 Cu 与 Si 衬底的粘附性,之后将沉积后的器件放入丙酮溶液中,采用剥离工艺制作支撑柱的电镀种子层。

B. 经喷胶、前烘、曝光和显影,在硅片上制作出需要电镀镍柱的区域。电镀镍柱作为微反射镜的支撑柱(电镀方法见文献[9])。

C. 在光刻胶牺牲层上蒸发沉积铜,经甩胶、前烘、曝光、显影及腐蚀工艺,制作出微反射镜的电镀种子层结构。

D. 电镀金属镍,后释放该结构,得到悬空的微反射镜。

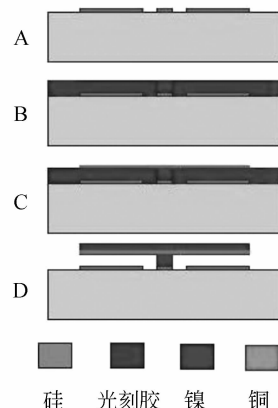


图 2 微反射镜制作工艺

Fig. 2 Fabrication process of micromirror

### 3 工艺分析及改进

#### 3.1 叠层光刻胶牺牲层工艺分析

##### 3.1.1 底部光刻胶牺牲层的污染问题

在微反射镜的制作工艺流程中,牺牲层表面质量的好坏是决定微反射镜制作成功与否的关键。然而电镀微反射镜支撑柱是一个电镀与测量相结合的过程,在连续电镀与测量的操作过程中很容易将光刻胶牺牲层表面污染,光刻胶易损坏的特性决定了其表面上的污染物很难清除干净,如图 3 所示。这直接影响到后续工艺中微反射镜镜面的制作。

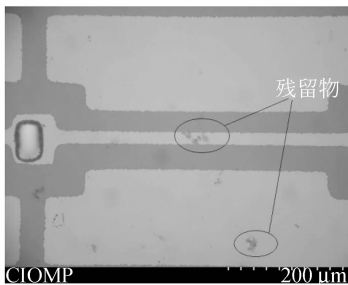


图 3 电镀时被污染的光刻胶表面

Fig. 3 Microscope picture of photoresist surface after electroplating

解决该问题,可在电镀完微反射镜支撑柱后,将光刻胶牺牲层清洗干净,再经喷胶工艺重新制作光刻胶的牺牲层工艺。通过验证,该工艺简单可行,提高了光刻胶牺牲层的表面质量,有利于后续工艺的进行。

##### 3.1.2 上层光刻胶对中间结构层的影响

叠层光刻胶工艺包括上层光刻胶层、中间结构层及底层光刻胶层三层结构,如图 4 所示。实验发现,以光刻胶为基底的制作工艺条件与以硅为基底的传统工艺条件有较大不同。如图 5 所示,按传统的工艺条件,叠层光刻胶工艺过程中,上层光刻胶中的溶剂很容易穿过中间金属结构层浸入底层光刻胶中,从而破坏了中间结构层。经分析发现,其主要原因是因为蒸发沉积得到的中间金属结构层很薄且不致密,甚至有些区域存在缺陷,所以上层光刻胶中的溶剂很容易穿透金属薄膜浸入底层光刻胶,破坏中间结构层。

为保证中间金属结构层的质量,考虑到微反

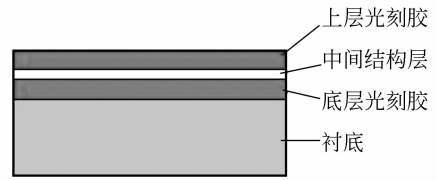
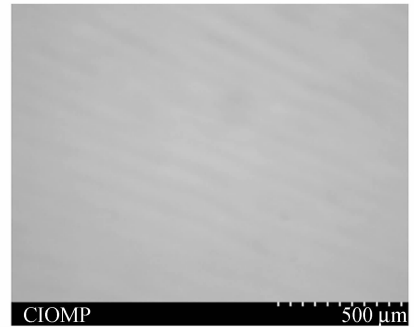


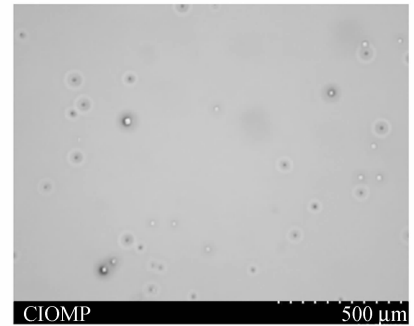
图 4 叠层光刻胶示意图

Fig. 4 Scheme of laminated photoresist



(a) 甩胶之后

(a) After photoresist coating



(b) 去胶之后

(b) After photoresist development

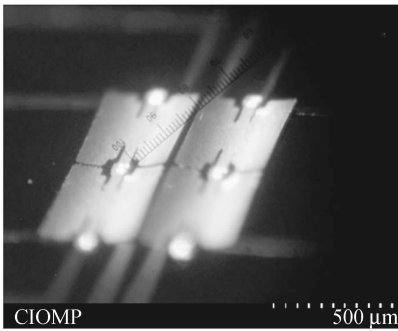
图 5 中间结构层金属被上层光刻胶溶剂破坏的图片

Fig. 5 Microscope pictures of photoresist sacrificial layer with normal baking cycles

射镜薄膜的厚度及后续的电镀工艺,采用了先蒸发电镀,后甩胶光刻的工艺流程。实验证明,该工艺流程有效地避免了中间金属结构层易被上层光刻胶中的溶剂破坏的问题。

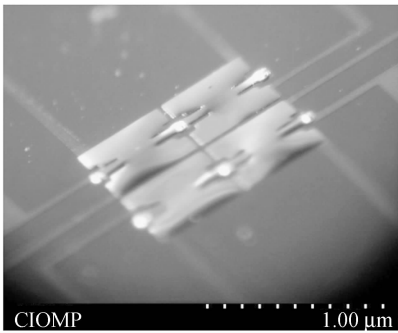
#### 3.2 结构层残余应力控制

残余应力会在微反射镜的制造过程中存在并影响其结构的性能。如图 6 所示,因残余应力的存在,释放后的微反射镜镜面出现上翘或者是向下弯曲的现象。



(a) 微反射镜镜面向上弯曲

(a) Micromirror plate curling up



(b) 微反射镜镜面向下弯曲

(b) Micromirror plate curling down

图 6 受残余应力影响的微反射镜镜面

Fig. 6 Micromirror plate curling due to residual stress

为满足微反射镜表面质量的要求,必须对工艺过程中产生的残余应力进行研究分析,通过了解残余应力的产生根源,采取一定的措施来消除或大幅度减小结构内部的残余应力,避免可能由残余应力引起的各种问题。

从残余应力产生根源着手,常用的薄膜残余应力控制方法大致有下面 3 种:

(1) 研究并分析工艺中各个参数对 MEMS 薄膜残余应力的影响,在此基础上确定一组最佳的工艺参数组合,从薄膜形成的微观层面上控制膜内的本征应力。

(2) 利用应变相消的原理<sup>[10-11]</sup>,控制工艺使金属膜内呈现与结构薄膜相反的应力状态,通过实验确定最佳的尺寸配置,可有效抵消由热应变引起的结构变形。

(3) 利用快速热退火对 MEMS 结构进行后续热处理<sup>[12-13]</sup>。

上述 3 种方法中,采用方法(1)时,需要分析的工艺参数很多,分析过程十分复杂。采用方法(3)时,为防止退火过程中金属薄膜氧化,需要在真空环境下进行,其实验条件较为苛刻。相对于上述两种方法而言,方法(2)是一种十分适合 MEMS 器件应力控制的方法。依据此原理,实验分析了蒸发及电镀得到的金属薄膜的应力情况,实验发现,通过蒸发工艺获取的金属薄膜存在拉应力,而电镀可获取存在压应力的金属薄膜。通过优化两种不同工艺得到的金属薄膜厚度,获取了薄膜残余应力趋近于零状态的工艺条件,并成功释放了微反射镜结构,如图 7 所示。

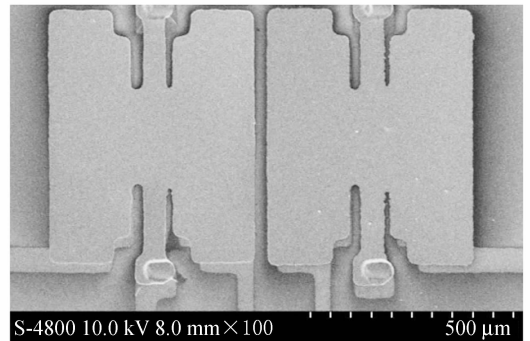


图 7 微反射镜扫描电镜照片

Fig. 7 SEM image of micromirror

## 4 结 论

本文从实验的角度分析了光刻胶在电镀过程中易被污染的问题,提出采用喷胶工艺,重新制作牺牲层的工艺流程。同时分析了叠层光刻胶工艺中,上层光刻胶中的溶剂穿透中间结构层浸入底层光刻胶的问题,指出中间结构层金属薄膜存在的缺陷是导致该问题的主要原因,提出采用先蒸发电镀,后甩胶光刻的工艺流程来避免中间结构层被破坏的问题。最后采用应变相消的应力控制方法,优化了蒸发及电镀工艺的工艺参数,有效地控制了微反射镜的残余应力问题,最后成功释放了应力状态趋于零的  $620 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ , 悬空高  $12 \mu\text{m}$  的微反射镜结构。

## 参考文献:

- [1] ZAVRACKY P M, MAJUMDER S, MCGRUER N E. Mircomechanical switches fabricated using nickel surface micromachining [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 1997, 6 (1): 3-9.
- [2] AHN C H, ALLEN M G. A fully integrated surface micromachined magnetic microactuator with a multilevel meander magnetic core [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 1993, 2(1):15-22.
- [3] 姜政, 丁桂甫, 张永华, 等. 叠层光刻胶牺牲层工艺研究[J]. *微细加工技术*, 2005(3):62-66.  
JIANG ZH, DING G F, ZHANG Y H, *et al.*. Research of terrace photoresist sacrificial layer technology [J]. *Micromicrofabrication Technology*, 2005(3):62-66. (in Chinese)
- [4] ESPINOSA H D, PROROK B C. A novel experimental technique for testing thin films and MEMS materials[C]. *Proceedings of the SEM annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Oregon (USA): Society for Experimental Mechanics*, 2001:446-449.
- [5] ESPINOSA H D, PROROK B C, FISCHER M. A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS mechanicals [J]. *J. Mech. Phys. Solids*, 2003, 51 :47 - 67.
- [6] ZHANG T Y, SU Y J, QIAN C F, *et al.*. Microbridge testing of silicon nitride thin films deposited on silicon wafers [J]. *Acta Mater.*, 2000, 48 :2843 - 2857.
- [7] 郑晓虎, 朱荻. 模糊神经网络在 UV-LIGA 工艺优化中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1):139-144.  
ZHENG X H, ZHU D. Application of fuzzy neural network to optimizing UV-LIGA process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):139-144. (in Chinese)
- [8] 杜立群, 朱神渺. 微机电系统中 SU-8 厚光刻胶的内应力研究[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(9):1377-1382.  
DU L Q, ZHU SH M. Study on internal stress of thick SU-8 layer in MEMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (9):1377-1382. (in Chinese)
- [9] 李加东, 吴一辉, 张平, 等. 掩模电镀镍微结构均匀性的研究[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(3):452-458.  
LI J D, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. Uniformity study of Ni microstructure deposited by through-mask plating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):452-458. (in Chinese)
- [10] CAO K, LIU W, TALGHADER J J. Curvature compensation in micromirrors with high reflectivity optical coatings [J]. *J. MEMS*, 2001, 10 (3):409 - 417.
- [11] TUANTRANONT A, BRIGHT V M. Segmented silicon micromachined microelectromechanical deformable mirrors for adaptive optics [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(1):33-45.
- [12] MAIER-SCHNEIDERT D, MAIBACHT J, OBERMEIER E, *et al.*. Variations in Young's modulus and intrinsic stress of LPCVD polysilicon due to high temperature annealing [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1995, 5:121-124.
- [13] ZHANG X, ZHANG T Y, WONG M, *et al.*. Rapid thermal annealing of polysilicon thin films [J]. *J. MEMS*, 1998, 7(4) :356-364.

作者简介:李加东(1981—),男,山东沂南人,博士研究生,主要从事硅基光致动器及其制作工艺的研究。E-mail:microsoft1224@163.com

导师简介:张平(1958—),女,吉林长春人,副研究员,研究生导师,主要从事集成微光机电系统的研究。E-mail:zhangpingres@163.com