

MEMS 器件的腐蚀与释放*

欧 毅[†] 石 莎 莉 李 超 波 焦 斌 斌 陈 大 鹏

(中国科学院微电子研究所 微细加工与纳米技术实验室, 北京 100029)

摘要: 以硅微机械 FP 腔器件为代表, 该器件采用了标准的硅表面加工工艺, 分析了此类具有悬空结构的 MEMS 器件在进行牺牲层的腐蚀和最终的结构释放过程中的各种问题. 根据所遇到问题的不同情况对器件的设计和工艺流程进行了改进, 并通过实验验证了其可行性.

关键词: MEMS; 牺牲层; 腐蚀; 释放; 隔离槽

PACC: 4760; 6120Q; 6480G

中图分类号: O363. 2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0347-04

1 引言

在光纤通信技术中, 光学滤波器、光学衰减器都是重要的组成部分. 通常, 这些光学器件都是体器件, 其调谐速度慢、体积大. 而基于表面微机械技术的 FP 干涉型滤波器和衰减器具有体积微小、易于集成、调谐速度快、调谐精度高、插入损耗小、可以连续调谐等优点, 可以广泛应用于光通信 WDM 系统中^[1,2]. 本文介绍一种基于表面薄膜工艺的 MEMS-FP 腔器件, 它是采用化学气相沉积、刻蚀、金属蒸发等工艺进行加工的多用途微型光学器件. 目前, 这种结构可以用作滤波器、衰减器或调制器^[3]. 本文对它的制备过程中的牺牲层腐蚀和机构释放进行了讨论和分析.

悬空的微梁、微板等结构在 MEMS 中是很常见的. 当采用湿法腐蚀去除牺牲层时, 有三个因素影响器件能否最终成功制备. 第一是在腐蚀悬空结构下方的牺牲层的同时, 腐蚀液也会腐蚀悬空结构周围侧向的牺牲层, 最终导致被腐蚀的区域增大, 我们把这种现象称为侧向钻蚀; 第二是微梁、微板的尺寸过大, 造成牺牲层不能完全腐蚀; 第三是在干燥过程中, 悬空膜与衬底之间的液体桥产生的表面张力向衬底拉动结构层, 如果此时结构层的弹性回复力不足以克服这一拉力, 结构层会与衬底接触, 并与衬底粘附. 在 MEMS-FP 腔器件的制备过程中就出现了以上的三方面问题, 下面具体进行讨论.

2 实验和讨论

2.1 MEMS FP 器件的基本结构

硅微机械 FP 腔器件的三维基本结构如图 1 所

示, 其加工过程是首先在低电阻率的掺杂硅片上采用 LPCVD(低压化学气相沉积)生长 $1.16\mu\text{m}$ 左右的氧化硅作为牺牲层, 然后再在氧化硅上采用 LPCVD 生长 $0.2\mu\text{m}$ 左右的氮化硅; 在光刻出上电极图形后, 蒸镀上电极金属 ($\text{Cr} = 10\text{nm}$, $\text{Au} = 50\text{nm}$), 剥离后, 采用 RIE(反应离子刻蚀)刻透四条梁之间梯形部分的氮化硅, 最后用 HF(氢氟酸)湿法腐蚀去除牺牲层, 并释放结构.

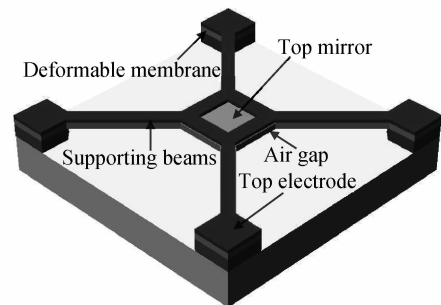


图 1 硅微机械 FP 腔器件的基本三维结构

Fig. 1 Three-dimensional appearance of the device

2.2 侧向钻蚀

由于采用硅表面加工工艺制成的 MEMS 器件, 其在加工的过程中都是分层的, 所以牺牲层不论在悬空的结构下方还是固定结构下方都有分布, 而此时在悬空结构和固定结构下方的牺牲层之间如果没有阻挡层的话, 就会在湿法腐蚀的过程中发生侧向钻蚀, 而侧向钻蚀会导致被腐蚀的区域增大, 最终使悬空结构容易与衬底粘附.

图 2 为在制备第一批 FP 器件的过程中所出现的严重的侧向钻蚀. 从图中可以看出在器件的周围有一圈近似圆形的钻蚀痕迹, 这样最终被腐蚀的区

* 国家自然科学基金(批准号: 60576053)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2005AA404210)资助项目

[†] 通信作者. Email: ouyi@ime.ac.cn

2005-12-06 收到, 2005-12-30 定稿

域增大了,导致本来应该悬空的上反射镜与衬底的粘附,器件制备不成功.

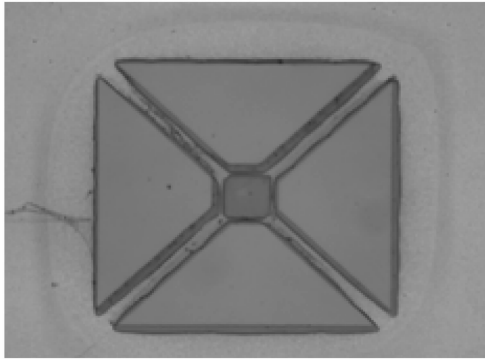


图 2 牺牲层的侧向钻蚀

Fig.2 Wet etching in the underside-lateral of the sacrificial layer

为了解决侧向钻蚀的问题,我们设计了一种隔离槽结构,在生长结构层材料 SiN_x 之前,通过 RIE 干法刻蚀在器件的周围加工出一个防止侧向钻蚀的隔离槽结构.从后来的实验结果看,这个方法有效地阻止了侧向的钻蚀现象.具体的实验结果见下面的论述.

2.3 腐蚀不完全

在 MEMS-FP 器件制备的腐蚀过程中所遇到的第二个问题就是腐蚀不完全的问题.在第二次制作过程中由于功能上的需要,加大了上反射镜的面积,此时需要被去除的牺牲层部分增大了,有非常大的深宽比,超过了湿法腐蚀的极限.也就是在一个非常薄而且非常长的空间内的腐蚀液在与牺牲层反应完之后,很难与外部的腐蚀液进行交换,从而造成了腐蚀的停止,使上反射镜中心部分下面的牺牲层无法被去除,如图 3 所示.从图 3 中可以明显地看到,由于腐蚀自终止而在上反射镜的中心部分遗留下了一个正方形 2 的残余牺牲层.图中的正方形 1 为在腐蚀了一定时间后将器件从腐蚀液中取出进行显微镜观察和拍照后,再放入腐蚀液进行腐蚀所留下的腐蚀痕迹.图 3 中围绕在上反射镜四周的黑色框,是我们为了阻止侧向钻蚀所采用的隔离槽结构,从这张照片上可以看出,隔离槽的方法有效地防止了侧向钻蚀.

为解决在很大深宽比情况下的牺牲层腐蚀,我们采用了在上反射镜面上开腐蚀孔的方法,实验证明这个方法可以很好地解决腐蚀不完全的问题.所以在第三次实验中采用了腐蚀孔加隔离槽的方法,如图 4 所示为尚未腐蚀完的器件照片,在上反射镜上共开了 12 个腐蚀孔,从照片上看,腐蚀液以腐蚀孔为圆心,腐蚀了一个圆形区域,与未开腐蚀孔时相

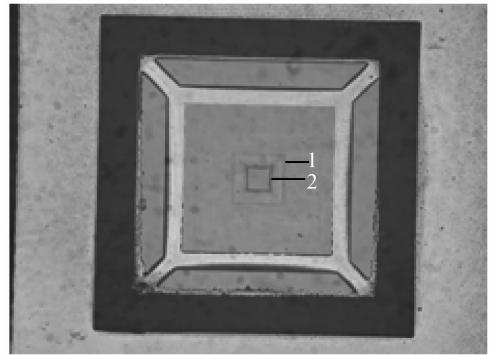


图 3 牺牲层的腐蚀不完全

Fig.3 Imperfect etching of the sacrificial layer

比,中心部分已经不会有残余的牺牲层了.所以经过几次实验,我们摸索了隔离槽加腐蚀孔的工艺路线,很好地解决了基于表面硅工艺中牺牲层腐蚀的侧向钻蚀和腐蚀不完全的问题.

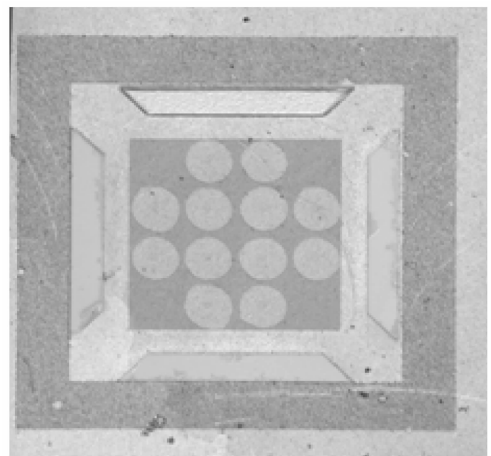


图 4 腐蚀孔加隔离槽

Fig.4 Etching hole and isolation groove

2.4 释放粘附

以上所讨论的是器件在腐蚀的过程中的问题,当器件的牺牲层被完全去除后,要考虑的就是其结构的脱水、干燥.而在干燥过程中,悬空膜与衬底之间的液体桥产生的表面张力向衬底拉动悬空膜,如果此时悬空膜的弹性回复力不足以克服这一拉力,悬空膜会与衬底接触,并与衬底粘附.

造成粘附机制的四个主要因素是:表面张力、水吸附、静电力和范德华力.一旦发生粘附,由于上述四种力的作用,梁就会永久地粘附在衬底上,导致器件失效.为确保器件的安全、有效,必须在器件制作中解决粘附问题.另外,在器件运输、使用过程中,静电力及器件震动导致的加速力如果足够大,也会使得结构和衬底相接触,并导致粘附.为避免应用中的粘附,粘附力需要最小化,这可以通过给器件镀弱粘

附的材料膜,或增加表面的粗糙程度等方法来实现.

在腐蚀液中腐蚀牺牲层以后,通常需要专门的干燥工艺防止悬浮结构粘附在衬底上.标准的干燥程序,诸如甩干或自然干燥,都将在干燥过程中产生表面张力.该表面张力会下拉薄膜结构.一旦物理接触开始,其他的力,诸如范德华力、静电力、氢桥连都会产生作用,导致结构永久地粘附在衬底上.有多种方法能防止或减少粘附,主要是在干燥过程中,防止结构和衬底间的物理接触.这能通过避免弯液面的吸引力,防止结构在干燥过程中和衬底相接触.例如,冷冻升华法、超临界法、HF 气体干刻蚀技术等.

2.4.1 HF 气体刻蚀

采用气态 HF,以 CH_3OH 作为稀释剂,将 HF/ CH_3OH 气注入载有硅片的容器中, HF 和 CH_3OH 分子吸附到牺牲层上进行腐蚀. HF 气体刻蚀技术是很有效的,但却很少使用. HF 的沸点是 19.54°C ,刻蚀中,样品的温度必须升高,这是为了防止 HF 冷缩.此方法能获得高产量,并且能释放较大的结构而仍没有粘附问题,但是此方法腐蚀效率不高,而且设备复杂^[4,5].

2.4.2 超临界法

超临界法利用的是液体的超临界转变以避免液-气界面的形成.液体的超临界区域是在临界温度和临界压强之上,此区域中,液体是气相.当压强大于临界压强,并且液体受热时,此液体在临界温度下,会发生从液态到超临界态的转变.这种转变不会形成液-气界面,液体只是简单的从液相转变成气相.通过把结构浸入液体中,然后进入超临界区,那么所有表面张力影响都能避开.超临界液体的选择是很重要的,要求此材料是化学稳定的、无毒的,具有较低的临界温度和临界压强. CO_2 满足此要求,它的临界温度是 31.1°C ,临界压强是 $7.28 \times 10^6 \text{ Pa}$.

2.4.3 升华法

防止粘附问题的一个有效的方法是冷冻升华法.升华法的原理是在冷冻烘干的过程中,当温度降至熔点之下时清洗液凝固,之后,降低压力使固体升华.图 5 显示出了冷冻升华法和超临界法的过程.

快速冷冻升华技术不需要真空设备,可以在大气压下操作.环己烷的熔点是 6.7°C ,是较好的最后清洗液.凝固和随后升华工艺是把硅片放在一个受控的冷阱内,冷阱的温度比最后腐蚀液的凝固点低,同时通入氮气.凝固-升华过程的总时间依赖于样品的几何形状,一般是几分钟^[6,7].

3 结束语

MEMS 作为一项新兴技术,它的出现与发展促

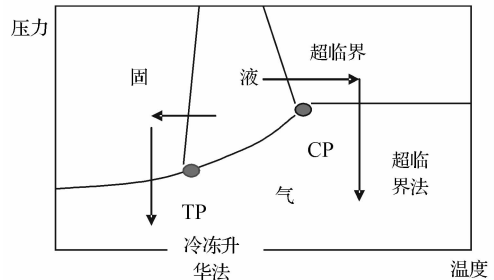


图 5 升华法的过程

Fig.5 Sublimation from the frozen state

进了新的电子机械器件的产生与发展,牺牲层是 MEMS 技术得到广泛应用的关键环节. MEMS 研究的一个中心目标是在未来开发全集成加工工艺,制作更复杂的电子系统.本文以一种具有代表性的 MEMS 器件为基础,分析和讨论了基于表面硅工艺的牺牲层腐蚀和释放问题.提出了一些切实可行的工艺方案,解决了在腐蚀释放过程中经常遇到的问题^[8].

参考文献

- [1] Liu Hongju. Optical multiplexing technology in optical fiber telecommunication. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(6): 544 (in Chinese)[刘洪举. 光纤通信中的光学复用技术. 光子学报, 1995, 24(6): 544]
- [2] Ou Yi, Cui Fang, Sun Yunan. The crosstalk analysis for micromachined tunable Fabry-Perot filters in DWDM system. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1110 (in Chinese)[欧毅, 崔芳, 孙雨南. 微机械 FP 腔可调谐滤波器在 WDM 系统中的串扰分析. 光子学报, 2003, 32(9): 1110]
- [3] Ford E, Walker A, Greywall S, et al. Micromechanical fiber-optic attenuator with $3\mu\text{s}$ response. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 18(9): 1663
- [4] Lee Y I, Park K H, Lee J H, et al. Dry release for surface micromachining with HF vapor-phase etching. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, 6(3): 226
- [5] Lee J H, Chung H H, Youl S, et al. Fabrication of surface micromachined polysilicon actuators using dry release process of HF gas-phase etching. *Electron Devices Meeting*, 1996: 761
- [6] Kim J Y, Kim C J. Comparative study of various release methods for polysilicon surface micromachining. *Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, 1997: 442
- [7] Hao Yilong, Wu Guoying, Wu Lin, et al. Releasing the suspending structure in surface micromachining with the method of sublimation. *Micronanoelectronic Technology*, 2002, 39(9): 22 (in Chinese)[郝一龙, 武国英, 吴琳, 等. 用升华法释放表面硅工艺中的悬浮结构. 微纳电子技术, 2002, 39(9): 22]
- [8] Zhang Yonghua, Ding Guifu, Li Yonghai, et al. Sacrificial layer technology in MEMS. *Chinese Journal of Micronanoelectronic Technology*, 2005, 42(2): 732 (in Chinese)[张永华, 丁桂甫, 李永海, 等. MEMS 中的牺牲层技术. 微纳电子技术, 2005, 42(2): 73]

Wet Etching and Releasing of MEMS*

Ou Yi[†], Shi Shali, Li Chaobo, Jiao Binbin, and Chen Dapeng

(*Laboratory of Nanofabrication and Novel Devices Integration, Institute of Microelectronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract: The FP resonant cavity as a microelectromechanical system (MEMS) device based on silicon is introduced. It is fabricated using silicon micro-machined technology. According the specifications of this kind micro-structure, analyzed some questions in the wet etching and releasing. According to the different situation, the design of the device and the technology are improved. And its feasibility is confirmed by the experiment.

Key word: MEMS; sacrificial layer; wet etching; releasing; isolation groove

PACC: 4760; 6120Q; 6480G

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0347-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 60576053) and the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2005AA404210)

[†] Corresponding author. Email: ouyi@ime.ac.cn

Received 6 December 2005, revised manuscript received 30 December 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics