

文章编号 1004 924X(2003)02 0109 05

基于体硅工艺的静电致动微夹持器制作工艺分析

李 勇, 李玉和, 李庆祥, 訾艳阳
(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要:介绍了一种基于体硅工艺的大尺寸、大深宽比梳状静电致动微夹持器的制作工艺。对微夹持器制作中的关键工艺进行分析,重点分析 ICP 蚀刻工艺的蚀刻时间对结构的影响,总结导致器件失效的原因,探讨了减少失效的方法。加工过程中采用分步加工的办法控制蚀刻时间,成功的释放了宽 $6\ \mu\text{m}$ 、厚 $60\ \mu\text{m}$ 、等效长度达 $5\ 470\ \mu\text{m}$ 的悬臂梁型微夹持臂。研制出一种良好性能的具有 S 形柔性结构夹持臂的梳状静电致动微夹持器。

关键词:体硅工艺;电感耦合等离子体;蚀刻;微夹持器

中图分类号:TN305.2;TP241 文献标识码:A

Fabrication process analysis for electrostatically actuated microgripper based on silicon bulk micromachining

LI Yong, LI Yu_he, LI Qing_xiang, ZI Yan_yang
(Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The fabrication process of a comb_drive electrostatically actuated microgripper based on silicon bulk micromachining is described in detail, with the effect of ICP etch time on structure analysed. Some factors causing microgripper failure identified, and advices provided for avoidance of failure. With a fractional ICP etch method used to control the etch time a gripper finger of $6\ \mu\text{m}$ wide and $5\ 470\ \mu\text{m}$ high was successfully released. A high aspect ratio microgripper with S_shaped flexible fingers has been developed.

Key words: silicon bulk micromachining; ICP(Inductance coupling plasma); microgripper

1 引 言

微纳米技术发展的关键之一是在于微细加工技术的发展。研究微细加工技术与方法是保证微器件特性的重要因素,也是微机械器件质量优劣的关键,因此微细加工技术研究受到广泛的重视^[1-2]。90 年代中期,随着 DRIE(deep reactive ion etching) 技术特别是 ICP 蚀刻技术的出现,体硅加工技术的发展获得长足的进步,多种基于深

蚀刻技术的新工艺被开发出来。体硅工艺发展的特点主要表现为键合与深蚀刻技术的组合,追求大质量块和低应力以及三维加工^[3]。

采用体硅工艺研制的出梳状静电致动微夹持器其结构如图 1 所示,由微操作部分、限位结构、梳状驱动器以及 S 形柔性结构等组成。该夹持器采用夹持臂导电且接地,固定梳齿加驱动电压的致动方式,防止静电对被夹持物产生影响,开合量可达 $12\sim 140\ \mu\text{m}$ 。其工艺简单、可控性好,可适用于多种微操作任务。

收稿日期:2002-11-12;修订日期:2003-01-15.

基金项目:清华大学机械工程学院 985 研究基金

2 微夹持器加工工艺

微夹持器的结构厚度为 60 μm; 梳齿宽度 6 μm, 深宽比达 10:1; 梳齿间隙 4 μm, 深宽比达 15:1; 微夹持器最大尺寸为 2 456 μm。微夹持器采用体硅工艺制作, 截面结构如图 2 所示。硅结构的几何形状(参见图 1) 构成了微夹持器的结构主体, 决定了微夹持器的性能。玻璃用键合方式与硅结构连接, 作为硅结构的支撑; 硅结构的表面溅射有金属膜作为压焊引线的键合层, 同时增强了梳状结构的导电性。



图 1 基于体硅工艺的静电致动微夹持器(闭合状态)

Fig. 1 Electrostatically actuated microgripper based on silicon bulk micromachining (closed)

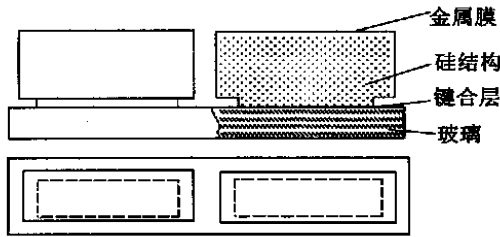


图 2 体硅工艺制作的 MEMS 结构剖面

Fig. 2 Cross section of bulk silicon structure

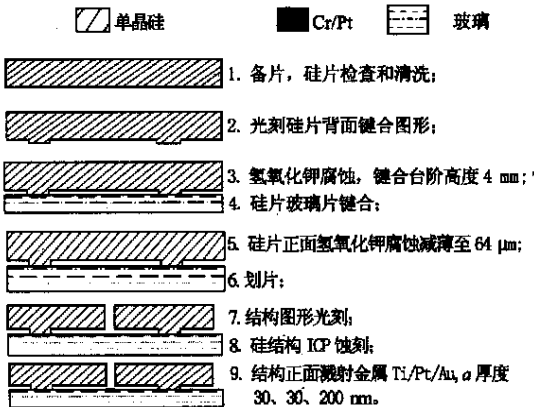


图 3 体硅工艺微夹持器制作工艺

Fig. 3 Fabrication of microgripper based on silicon bulk micromachining

制作工艺共需进行 2 次光刻, 1 次键合。工艺流程如图 3 所示。

3 微夹持器制作中的关键工艺分析

3.1 蚀刻时间对结构的影响

MEMS 器件加工中, 主要难点在于结构复杂、大深宽比的狭长微夹持臂加工。ICP 蚀刻速率的均匀程度和蚀刻时间的控制, 直接影响到梳齿结构以及狭长的夹持臂的质量。蚀刻时间对细梁细缝结构的影响情况如表 1 所示。

表 1 ICP 蚀刻时间对结构的影响

Tab.1 Effect of etch time on structure

蚀刻时间	蚀刻质量
时间不足	欠蚀刻
时间合适	正常蚀刻
时间稍长	过蚀刻
时间过长	严重过蚀刻

ICP 蚀刻主要问题是钻蚀(footing)和现滞后(lag)现象。开槽的宽度对蚀刻速率有很大影响。槽越宽, 蚀刻速率越快, 缝越窄, 速率越慢。因此当蚀刻时间不足时, 宽缝结构底部结构刻开, 窄缝处的结构尚未刻开, 造成欠蚀刻现象, 出现滞后现象。如图 4 所示。

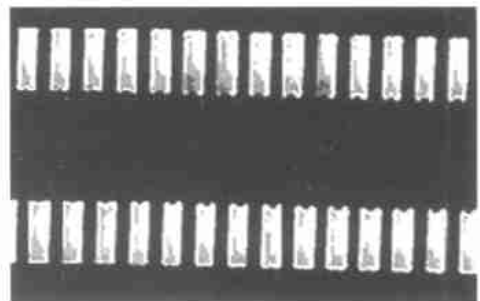


图 4 滞后现象

Fig. 4 Lag effect

当蚀刻继续进行, 宽缝结构横向边沿被侵蚀出现钻蚀现象, 如图 5 所示, 结构的上面 4/5 部分光滑平整, 下面 1/5 部分观察到明显的边缘侵蚀现象。钻蚀现象造成结构底部宽度方向的扩腐蚀, 结构的横向尺寸减小, 深宽比大时尤其严重, 使梁结构变坏

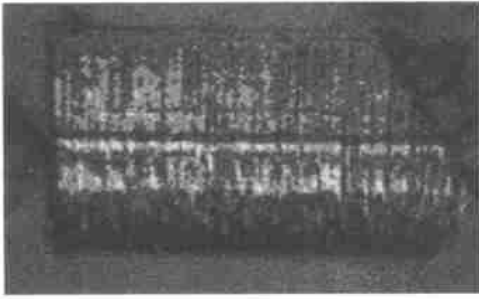


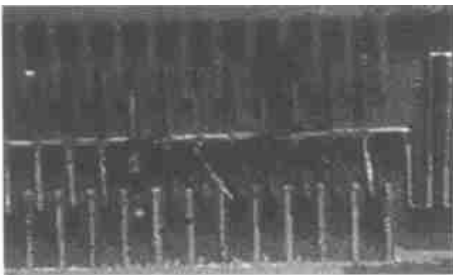
图 5 钻蚀现象
Fig. 5 Footing effect

甚至造成失败。钻蚀现象即使在正常加工细梁结构的情况下也会出现, 导致细梁结构厚度方向的加工尺寸不一致, 影响到器件的静态与动态特性。当发生过蚀刻时, 钻蚀的速率会很快, 对于细梁结构, 将导致梁底部被部分钻蚀, 结构厚度受到严重影响。在严重过蚀刻的情况下, 甚至整个梁结构被完全侵蚀, 只剩下一层掩膜, 如图 6 所示。为改善蚀刻速率在硅片各处的一致性, 应精确控制蚀刻时间, 以提高结构的质量。



(a) 厚度仅剩几微米(设计尺寸 $60\ \mu\text{m}$)

(a) Only several micron of thickness left (design dimension of $60\ \mu\text{m}$)



(b) 夹持臂结构仅剩掩膜硅结构几乎不存在
(b) Only mask left

图 6 过蚀刻的微夹持臂

Fig. 6 Overetched gripping finger

器件的加工失败的主要原因是 ICP 的(局部)过

蚀刻和欠蚀刻, 可见 ICP 深蚀刻加工的关键是蚀刻时间的掌握。设计中关键结构尽量采用等间距的狭缝和等宽度的微梁, 便于协调蚀刻时间, 为整个器件的加工质量创造条件。同时避免采用过窄的狭缝, 本夹持器采用的最小间隙控制在 $4\ \mu\text{m}$ 以上, 基本避免了滞后现象。微夹持器的制作中采取了分步加工的办法进行蚀刻控制。即每蚀刻一段时间便取出硅片进行观察, 随时掌握硅片各处的蚀刻情况。重点保证梳齿结构、细梁结构处的加工。最终成功加工了本例中的微夹持器, 悬臂梁型夹持臂的等效长度可达 $5\ 470\ \mu\text{m}$ 。

3.2 硅片质量的影响

硅片不平整是影响微夹持器特性的重要因素。微夹持器的夹持臂电压-位移特性如图 7 所示。

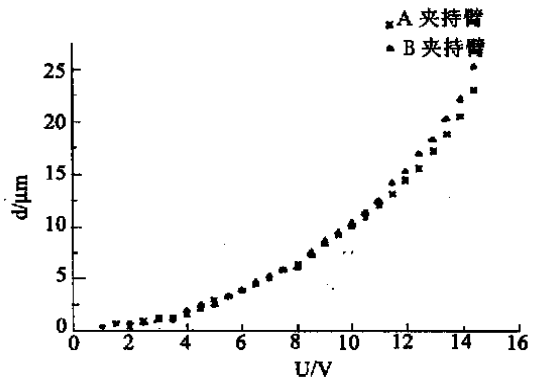


图 7 微夹持臂电压-位移特性

Fig. 7 Displacement of gripper tip under driving voltage

可见同一夹持器的两夹持臂在相同的驱动电压下位移不同。其原因在于两夹持臂的几何尺寸不完全一致。在加工过程中, 各个器件的局部材质、腐蚀液流动、腐蚀温度、速度不同, 会导致加工结果的不同。但是考虑到同一微夹持器的两臂所处的加工条件近似, 结构也完全对称, 因此导致微夹持臂性能差异的重要原因之一是硅片不平整。如图 8 所示, 当较薄的硅片刻穿时, 较厚的硅片仍欠蚀刻; 当较厚的硅片正常蚀刻时, 较薄的硅片处的结构发生过蚀刻, 导致两微夹持臂的厚度不同。控制硅片的材质和减薄工步的加工质量有助于避免这种情况的发生。

3.3 影响加工质量的其他因素

加工过程中还遇到了单晶硅片的材质键合不牢, 溅射的金属层不牢甚至自行剥落等导致器件失效的问题, 如图 9 所示。这些工艺问题影响到器件的性能、质量甚至加工的成败, 应予以足够的重视。

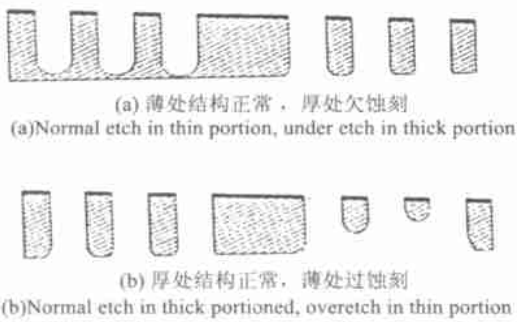
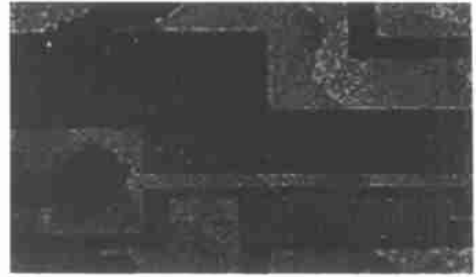


图 8 硅片不平整对结构的影响

Fig.8 Effect of thickness on quality of etch



(c) 键合不牢

(c) Bonding defect

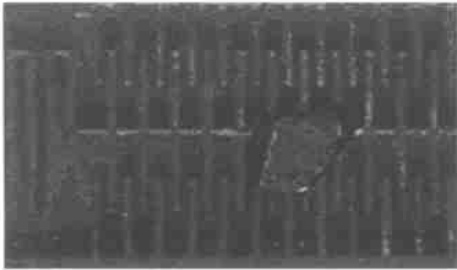
图 9 微夹持器加工工艺中的其他问题

Fig.9 Some problems in process



(a) 金层自行剥落

(a) Au film peeled off



(b) 单晶硅片材质缺陷

(b) Material defect

图 9(a) 所示的溅射金层的质量很差, 部分金属层自行剥落, 导致后续的器件测试中无法压焊引线 (15~ 25 μm 铝线)。原因是溅射 Au 层前未清洗结构。图 9(b) 表明了硅材料的缺陷, 这种随机因素只能依靠选择更好的硅基片来减小此失效因素。图 9(c) 中上侧的微夹持臂固支端键合不牢, 导致微夹持臂脱落。这种局部性键合不牢的主要原因是键合面不平整。解决这种缺陷的主要措施是增大键合面的面积以及提高键合面平行度和平面度。

4 结 论

(1) 微细加工是保证微机械器件特性的重要因素, 是微机械器件质量优劣的关键。采用优化设计的基于体硅工艺, 具有工艺简单成熟、可控性强。加工过程中采用分步加工的办法成功制作了大尺寸微硅夹持器。

(2) 微夹持器的梳齿宽度 6 μm , 深宽比 10:1; 梳齿间隙 4 μm , 深宽比 15:1, 微夹持器最大尺寸为 2 456 μm , 开合量可达 12~ 140 μm , 可适用于多种微操作任务。

参考文献:

- [1] 李庆祥, 徐毓娴, 薛实福, 等. AFM 力传感器机械加工技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 162_164.
LI Q X, XU Y X, XUE SH F, *et al*. Experimental study on the micromachine process of AFM force sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1996, 17(1): 162_164. (in Chinese)
- [2] 龙志峰, 韩荔, 李庆祥, 等. 微硅隧道加速度变换器的优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 192_193.
LONG Z F, HAN L, LI Q X, *et al*. A Micromachined tunneling acceleration transducer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(3): 192_193. (in Chinese)
- [3] 郝一龙, 张立宪, 李婷, 等. 硅基 MEMS 技术[J]. 机械强度, 2001, 23(4): 523_526.
HAO Y L, ZHANG L X, LI T, *et al*. Technology of silicon based MEMS[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23

(4): 523_526. (in Chinese)

- [4] 韩荔, 龙志峰, 李庆祥, 等. 电子隧道加速度计输出信号的分析与处理[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(1): 8_13.
HAN L, LONG ZH F, LI Q X, *et al* . Output signal analysis and processing of an electronic tunneling accelerator[J].
Optics and Precision Engineerng, 2002, 10(1): 8_13. (in Chinese)
- [5] 薛实福, 徐毓娴, 李庆祥. 原子力显微镜传感器的微机械加工技术的研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(4): 43_49.
XUE SH F, XU Y X, LI Q X. Investigation of microfabrication of the force sensor for the atomic force microscope[J].
Optics and Precision Engineering, 1997, 5(4): 43_49. (in Chinese)

作者简介: 李 勇(1977-), 男, 内蒙古自治区人, 北京清华大学精密仪器与机械学系在读硕士研究生, 研究方向: 微夹持技术, MEMS 设计与制作;
李庆祥(1939-), 男, 河北省人, 清华大学精密仪器系教授, 博士生导师, 主要研究方向: 精密仪器测控、微纳米测量技术、微机械技术。

《光机电信息》(月刊)

—— 一本为您提供信息服务的独特专业杂志

《光机电信息》是一份为工程师、研究者、科学家和技术专家提供国内外有关光学、光电子学和精密机械综合消息的月刊。它从技术和商业两方面报道和分析上述领域的最新研究进展和发展趋势, 其特点是信息量大且传播速度快。

完整的报道范围

《光机电信息》以全方位的视角瞄准国际前沿, 紧盯国内外光机电领域发展的热点和焦点, 每期以专题形式发布。主要报道光学、光电子学、光电工程、精密机械、激光、光通信、光学仪器、发光学、显示技术、医用光学、光学材料、微纳技术、微机械系统(MEMS)、先进加工制造技术等诸多读者感兴趣的领域。

有效的报道内容

《光机电信息》是国内致力于光电子领域的工程师、管理人员、科学家、研究者和技术专家的必读之物。《光机电信息》每月都会向其所服务的产业提供以下栏目: 各种专题报道、市场纵横、科技简讯、产品放送、设计与应用和专题信息长廊等。

广告投资的最好选择

《光机电信息》是一份每月发行量达 5000 余份的资深杂志, 这意味着每年有数 10 万人次的顶级工程师和研究人员阅读《光机电信息》。您的广告会被所有《光机电信息》的读者看到。请抓住机遇, 扩大贵公司在中国市场的知名度。

欲投放广告于《光机电信息》 请按下列地址联系

联系人: 高晓萍

传 真: (0431) 5682346

地 址: 长春市工农大路 61 号

电 话: (0431) 5261590

邮 编: 130021

E mail: xxfw@ciomp.ac.cn