

文章编号 1004-924X(2003)01-0001-05

体硅工艺静电致动微夹持器的试验研究

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: 对一种梳状静电致动微夹持器的特性进行了测试。采用显微镜-CCD-微机测试方案, 微夹持器的状态信息通过数据采集及图像处理获取, 得到“电压-位移”特性曲线并建立了数学方程。对特性方程的分析表明理论设计与试验结果的一致性与合理性。并分析了从设计、加工到测试过程中引起理论设计与实际器件性能差异的主要因素, 表明现有的微机械设计理论与加工水平存在一定的不足。由试验结果中获取了相关微机械器件的设计经验。

关键词: 微夹持器; 图像处理; 实验分析

中图分类号: TG759 文献标识码: A

1 引言

目前对微观条件下的机械系统的运动规律、微小构件的物理特性和力学行为等尚缺乏充分的认识, 还没有形成基于一定理论基础之上的微系统设计理论与方法, 只能凭经验和试探的方法进行研究, 因此微器件检测技术尤为重要, 不仅可检验微器件和微机电系统的质量, 也为基础理论研究提供了验证的手段。

以微夹持器为代表的微操作工具沟通了宏观与微观世界, 是进行微操作的主要工具。本项目研制的微夹持器其臂为悬臂梁形式, 并构成了微夹持器的主体, 同时兼有大的力输出和大的位移输出要求^[1], 如图1所示。该微夹持器是一种基于体硅工艺的梳状静电致动微夹持器, 夹持器由微作部分、限位结构和梳状驱动器等部分组成, 为了减小内应力, 将微夹持臂设计成S形柔性结构。微夹持器结构具有很大的深宽比: 结构厚度 $60\ \mu\text{m}$; 梳齿宽度 $6\ \mu\text{m}$, 深宽比达 10:1; 梳齿间隙 $4\ \mu\text{m}$, 深宽比达 15:1, 微夹持器最大尺寸为 $2\ 456\ \mu\text{m}$, 该夹持器的开合量达 12~140 μm 。采用了夹持臂为导体并接地, 固定梳齿加驱动电压的致动方式, 静电驱动不会对被夹持物体产生负面影响。该夹持器具有工艺简

单、可控性好、夹持范围及夹持力相对较大的特点, 适合多种微操作任务。

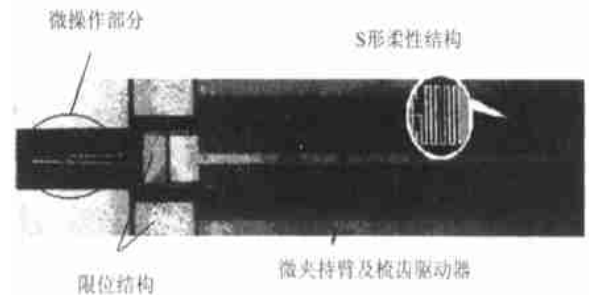


图1 基于体硅工艺的静电致动微夹持器

Fig.1 Electrostatically actuated microgripper based on silicon bulk micromachining

2 微夹持器的测试

2.1 试验系统

静电致动微夹持器为电-机耦合器件, 输入量为电压, 输出量为机械位移。所测试的微夹持器采用静电致动开环控制的方式, 微夹持器尖端的位移范围仅有几十微米, 无法用常规的几何量测工具测量, 故采用显微镜-CCD-微机测试方案, 微夹持器通过显微镜放大成像于 CCD 靶面上, 由微机进行图像处理和信息采集, 如图2所

示。用 CCD 进行图像的量化处理,得到微观信息。微夹持器驱动电压范围设置在 0~80 V,同时为了减小电磁干扰,采用了电池供电的方式。

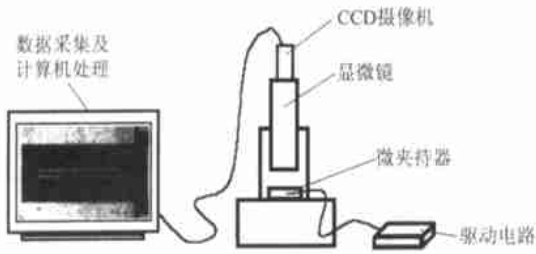


图 2 微夹持器测试系统示意图

Fig. 2 Test system for microgripper

试验过程中发现,器件自身产生的寄生电荷和外界环境的静电干扰对微夹持器的影响很大,主要表现为:未施加驱动电压时,微夹持臂处于偏转位置,微夹持器同仪器、工作台、操作者等接触后常常发生吸合/张开至限位结构的现象。这些问题极大的影响到微夹持器特性的测试工作。因此避免静电干扰是保证实验顺利进行的主要任务。通过控制环境湿度,避免带静电物体接触微器件及其引线,引线接地等方法可以有效的避免外界的静电干扰。微夹持器存放时,将各个电极接地可防止器件自身寄生电荷对器件的影响。

2.2 数据处理

为得到微夹持器在不同电压下的开合量,需要对采集到的图像进行量化处理。采集到的原始图像如图 3 所示,对其进行量化处理很困难,原因如下:

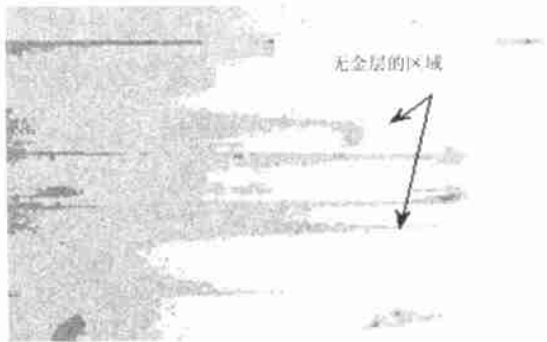


图 3 微夹持器的原始图像

Fig. 3 Original image of the microgripper

⑧ 微夹持器的表面溅射了金膜作为引线的键合层导致图像对比度小,边界不明显;

⑨ 微夹持器制作过程中由于结构阻挡,未溅射金层的“阴影”区域很明显;

⑩ 图像中存在杂质干扰。

可见灰度图像还原物体形貌的质量很差。因此采用如下图像处理方法:

(1) 调整灰度分布

原始图像的灰度分布很窄,如图 4 所示,直接对其进行处理,难以区分识别对象与背景。调整灰度值为 100~255 的像素得到图像增强效果较好。

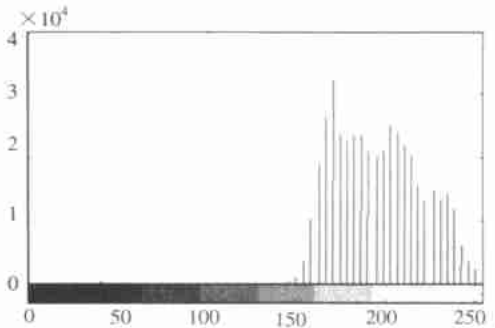


图 4 灰度分布直方图

Fig. 4 Grayscale histogram of original image

(2) 边缘提取

如果直接对图 6 的 x_0 列像素的灰度加以判断进行量化识别,则难以选定微夹持臂边界的灰度阈值。因此采用 Sobel 算子进行边缘提取,得到的结果如图 5 所示。对比原始图像可见,边缘提取的方法可以准确的检测到微夹持臂的轮廓,但是一侧的边缘模糊。

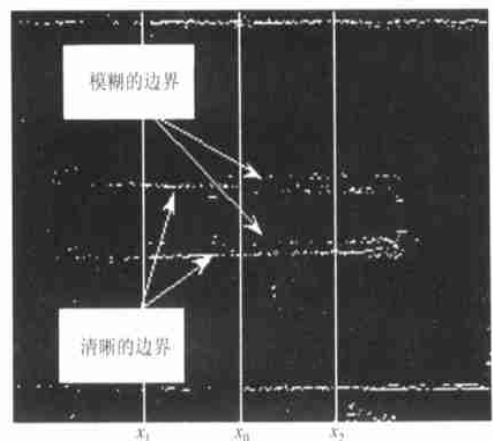


图 5 边缘提取后的图像

Fig. 5 Image of edge detection

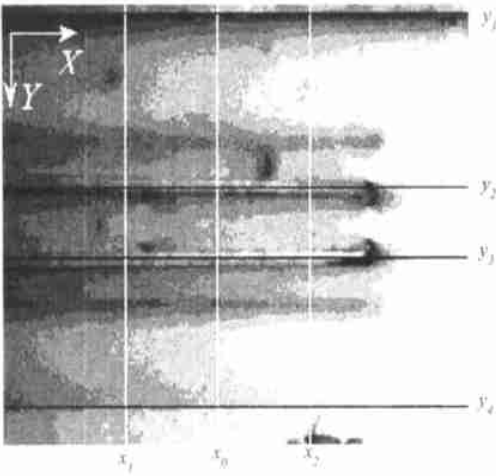


图 6 图像识别结果

Fig. 6 Results of image process

(3) 量化处理

将图 6 中 $x_1 \sim x_2$ 区域内的像素沿 Y 轴投影到 x_0 上。由于 $x_1 x_0 = x_0 x_2$, 按照图像分布的规律性和概率原理, 投影后的微夹持臂尖端 Y 方向的中心与实际位置重合或者误差很小。在此基础上, 沿 x_0 进行搜索, 即可得到微夹持臂的尖端变形量。图 6 中 x_0 与 y_2, y_3 的交点 $(x_0, y_2), (x_0, y_3)$ 即为得到的量化结果。

3 微夹持器的实验分析

3.1 微夹持器位移特性

通过对微夹持器在不同驱动电压下采集到的图像的量化处理, 其中一个微夹持臂由平衡到闭合过程的位移变化得到“电压-位移”特性曲线如图 7 所示。对图 7 中的离散数据进行二次拟合, 形式为:

$$d(u) = a_2 u^2 + a_1 u + a_0$$

可得微夹持器的“电压-位移”方程:

$$d(u) = 0.11092 u^2 - 0.13808 u + 0.47233, \quad (1)$$

式中: u 为所施加的驱动电压, $d(u)$ 为微夹持器在驱动电压 u 作用下的尖端的位移。

公式(1)中有三项:

① $a_2 u^2 = 0.11092 u^2$ 表明了梳状静电驱动器的工作特性, 即静电力与位移无关, 与驱动电压的平方成正比。单一叉指的梳状静电驱动器模型如图 8 所示。

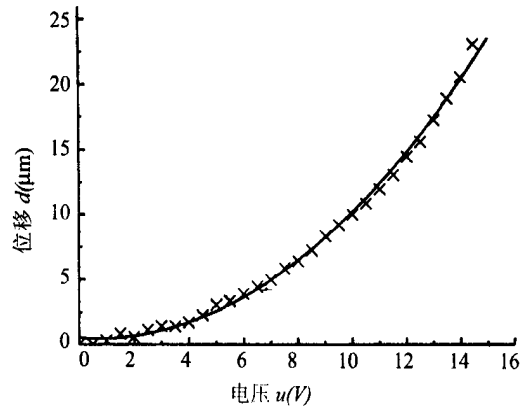


图 7 微夹持器电压-位移特性

Fig. 7 Voltage_displacement characteristics of micro gripper

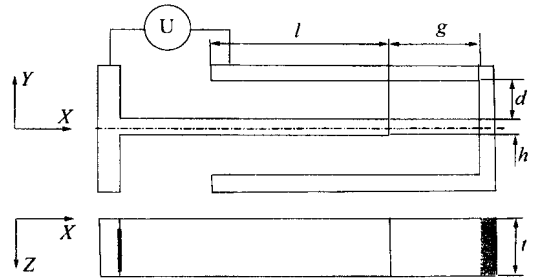


图 8 梳状驱动器模型

Fig. 8 Model of comb-drive actuator

其叉指间距为 d , 宽度为 h , 厚度为 t , 动定叉指的交叠长度为 l , 叉指顶端与对应叉指根部间距为 g 。其静电驱动力表示如下^[2]:

$$F_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) U^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2 \epsilon t l}{d} \right) \right] U^2 = \frac{\epsilon t}{d} U^2, \quad (2)$$

式中: C 为叉指结构的电容, ϵ 为介电常数。式(2)中的 $\epsilon t / d$ 即对应 a_2 , 反映了梳状驱动器的结构参数特征。

② $a_1 u = -0.13808 u$ 表明了微夹持臂在驱动电压的作用下位移发生变化, 因为微夹持臂与固定端采用刚性连接, 其产生的应力与微夹持臂位移成正比。这一项表明了微夹持臂在某一位移处所要克服的应力。

③ $a_0 = 0.47233$ 表明了试验系统误差, 主要来自图像识别的精度以及二次拟合引入的误差, 前者引入误差约为 $0.3 \mu\text{m}$, 二次拟合常数项的误差为 0.19655 , 因此 a_0 的存在以及数值大小是合

理的。

式(2)表明了微夹持器空载状态下的驱动电压与微夹持臂的关系,通过以上分析可见其合理性,并为微夹持器的开环控制提供了依据。

3.2 设计误差分析

按照设计参数,微夹持臂达到最大的位移处的驱动电压为 47.5 V,而试验中仅需 14.5 V。这一差异集中体现了设计误差,影响微夹持力与微夹持臂位移的因素主要集中在以下几方面:

® 实际尺寸与设计值的差异

微夹持器实际几何尺寸如图 9 所示(括号中为设计尺寸),可见器件的实际尺寸与设计尺寸相差较大。导致几何尺寸差异的原因比较多:首先掩模板图形的位置对准误差为 $\pm 0.3 \mu\text{m}$,在光刻时由于过曝光或者欠曝光导致图形尺寸精度变形,还会引入误差,这导致微机械器件各部分的位置及尺寸精度较差。其次 ICP 深蚀刻过程中,由于器件的结构、局部材质、腐蚀温度等因素的差异,导致同一硅片上的不同器件甚至同一器件的不同部分的加工结果的不同,造成几何尺寸差异。本例加工中,实际加工的横向尺寸是设计值的 0.85~0.90。加工实际结构惯性矩仅为设计值的 0.729(0.9³)。这使微夹持臂变得更“柔软”,有利于微夹持臂的变形。

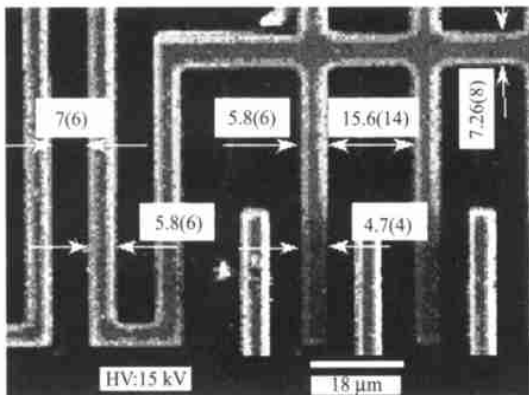


图 9 微夹持器局部 SEM 图像

Fig. 9 SEM image of microgripper

® 静电力估算误差

设计中采用了式(2)作为静电力的计算式,该式未计及电容器的边缘效应,而梳状驱动器的实际边长与梳齿间隙的比值在 7.5~15 之间,边缘效应比较明显^[3,4],因而梳状驱动器实际静电驱动力大于设计值,微夹力的输出也将大于设计值。

® 材料特性对器件的影响

单晶硅的弹性模量分布在 125~202 GPa^[5,6],设计中采用的数值是 169 GPa,大约是常用单晶硅弹性模量的中间值。材料性能的不确定为设计阶段准确估计器件的性能带来困难。

® 钻蚀现象对器件的影响

电感耦合等离子体(ICP)蚀刻过程中出现的主要问题是钻蚀和滞后现象。本例加工中主要问题是钻蚀现象。如图 10 所示,当发生钻蚀现象时,会发生迅速的横向蚀刻,使得结构的深度方向的尺寸自底向上迅速减小。开槽的宽度对蚀刻速率有很大影响,槽越宽蚀刻速率越快,易发生钻蚀现象,对细小结构的影响显著。钻蚀现象即使在正常蚀刻时也会发生,深宽比大时尤其严重,导致结构的深度方向的尺寸和设计值有差异。

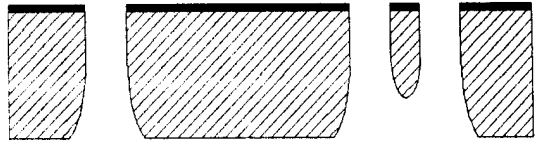


图 10 钻蚀现象示意图

Fig. 10 Schematic of footing effects

4 结论

采用显微镜-CCD-微机测试方案对微夹持器的“电压-位移”特性曲线测试方法简易可行,获得了微夹持器的特性方程。通过对特性方程的分析表明理论设计与试验结果的一致性与合理性。由于微机械器件相对特殊性,微机械器件设计和制作与宏观机械有很大不同,因此微机械设计理论、微加工技术、材料的微观特性等方面尚需进一步研究完善。

参考文献:

- [1] 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991. 184_244.
XUE SH F, LI Q X. *Precision instruments design* [M]. Beijing: Tsinghua Press, 1991. 184_244. (in Chinese)
- [2] TANG W C, NGUYEN T H, HOWE R T. *Laterally driven polysilicon resonant structures* [A]. *Proc IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop* [C]. 1989. 53_59.
- [3] 黄志洵, 王晓金. 微波传输线理论与实用技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 102_106.
HUANG ZH X, WANG X J. *Theory and technology of microwave transmission* [M]. Beijing: Science Press, 1996. 102_106. (in Chinese)
- [4] 韩荔, 龙志峰, 李庆祥, 等. 电子隧道加速计输出信号的分析与处理[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(1): 54_63.
HAN L, LONG ZH F, LI Q X, *et al.* Output signal analysis and processing of an electronic tunneling accelerator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 54_63. (in Chinese)
- [5] 王向军, 王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(6): 511_513.
WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical size inspection technology by microscope precision digital image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 9(6): 511_513. (in Chinese)
- [6] BHUSHAN B, LI X D. Micromechanical and tribological characterization of doped single crystal silicon and polysilicon films for microelectromechanical systems devices[J]. *J mater Res*, 1997, (1): 54_63.

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 characteristics of an electrostatically actuated comb_drive microgripper were tested with its information and status acquired using the test platform of Microscope_CCD_micro_computer. The voltage_displacement characteristic was obtained through image processing and analysis. The analysis of the characteristic equation deduced from miscellaneous factors indicates that the theoretical design is rational and consistent with the experimental results. The difference between theoretical design and practical device is discussed with the design rule, fabrication and experiment process taken into consideration. The causation demonstrates that present theoretical design and fabrication technology need further improvement to meet the design requirements for micro_electromechanical devices.

Key words: microgripper; image processing; experimental analysis

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; Tel: 010_62773608

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。