

文章编号 1004-924X(2009)08-1878-06

具有力感知功能的四臂式 MEMS 微夹持器研制

孙立宁¹, 陈 涛¹, 邵 兵¹, 李昕欣²

(1. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点联合实验室, 上海 200050)

摘要: 为使夹持器小型集成化且夹持力可控, 采用体硅加工技术研制了一种基于单晶硅的、具有微力检测功能的新型四臂式 MEMS 微夹持器。以压阻检测技术为基础, 利用 MEMS 侧面压阻刻蚀工艺将力传感器集成在微夹持器的夹持臂末端, 实现夹持力的微力检测。采用有限元软件分析, 微夹持器机构和传感器弹性体, 并通过 S 型柔性梁结构的设计将梳齿驱动的直线运动转化为夹持臂末段的转动, 然后结合四臂式的末段结构, 有效地扩展夹持器的夹持范围。利用硅玻璃键合技术实现夹持臂的电隔离, 通过施加 80 V 电压, 夹持臂的单臂运动范围为 25 μm , 夹持器的夹持范围为 30~130 μm 。实验标定出传感器的最大量程在 1 mN 以上, 分辨率为 3 μN , 可以实现夹持力的有效反馈。

关键词: 微机电系统; MEMS 微夹持器; 侧面压阻; 微操作

中图分类号: TH703.6; TN305 **文献标识码:** A

Design of four-arm MEMS microgripper integrated with force sensor

SUN Li-ning¹, CHEN Tao¹, SHAO Bing¹, LI Xin-xin²

(1. *Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

2. *State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)*

Abstract: A novel four-arm structure single crystal silicon MEMS gripper integrated with force sensors is successfully developed by using a silicon bulk machining method to realize the monolithically fabrication and the control of gripping force. Based on the technology of the piezoresistive detection, an effective technique for fabricating vertical sidewall piezoresistors in planes is used to fabricate the piezoresistor in the end of the end-effectors. The Finite Element Analysis (FEA) is used to analyze the structure of the gripper and the flexible beams of the force sensors. The comb microactuator generates a linear horizontal motion, which is converted into a rotational motion by an S-type flexible beam system to realize the gripping motion. Combined with the four-arm structure, the manipulating range is expanded. The bonding of the silicon and the glass is used to realize the electrical isolation of the gripping arms. At a voltage of 80 V, the deflection of the arm tip is 25 μm and the ranges of the operation are 30~130 μm . Testing results show that the maximum measurement range of the piezore-

收稿日期: 2008-08-28; 修订日期: 2008-10-23.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA04Z256); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50805040)

sistive sensors is better than 1 mN and the resolution is better than 3 μ N, which can be used effectively in the force feedback.

Key words: MEMS; MEMS microgripper; sidewall piezoresistor; micromanipulation

1 引言

随着微机电系统 (MEMS) 的迅速发展,对微组装技术的需求日益迫切。新型材料的深入研究和微细加工技术的发展,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^[1]。90 年代中期,随着深反应离子刻蚀 (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) 技术的出现,体硅加工技术^[2]的发展获得长足的进步,已广泛应用于微传感器^[3]、微夹持器^[4]以及其他微结构^[5]的加工。

自 Kim 等在 1989 年研制基于表面硅工艺的静电致动微夹持器以来^[6],以微夹持器为代表的微操作工具的研制受到国内外广泛的重视。微操作工具是实现微型零件装配的关键部件,是实现宏观与微观联接的重要组成部分。由于微操作的对象具有轻、薄、脆、软的特征,对夹持方式、夹持力的大小提出了十分苛刻的要求和限制。一方面要求操作力大小必须得到精确控制以免造成操作对象的变形或损坏,另一方面操作对象形状特征也对作业工具的夹持方式提出了要求,如对象可接触位置的选择性、可接触面积的大小等,都对操作工具的设计提出很高的要求。因此,结构紧凑、体积小并具有传感功能的微操作工具将有助于微操作机器人系统的集成^[7]。

作者采用体硅工艺成功地研制了基于低成本单晶硅,并集成了微力检测的新型 MEMS 微夹持器。四臂式的末端结构结合 S 型柔性梁结构,使得夹持器的夹持范围得到了拓展。通过侧面压阻工艺将压阻力传感器集成在夹持器的末端,形成夹持过程中的力反馈。并通过硅玻璃键合实现夹持臂的静电隔离,有效地实现了微操作工具的集成化和小型化。

2 结构设计

2.1 微夹持器整体结构

微夹持器的的整体结构如图 1 所示。整个微夹持器主要由以下 5 个部分组成:压阻梁、S 型折

叠梁、柔性双端固支梁、侧向平动梳齿静电驱动器和玻璃基体。静电驱动器采用侧向平动驱动方式,驱动器的直线运动通过 S 型柔性梁转化为夹持器末端的转动,从而实现夹持,如图 2 所示。

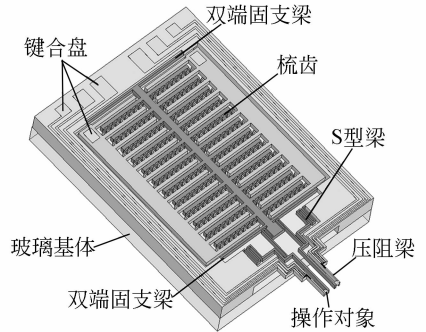
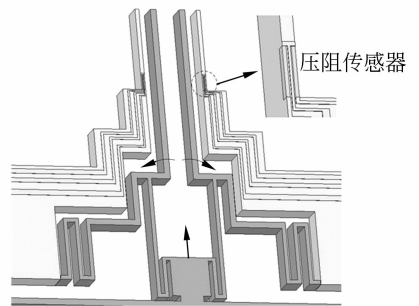


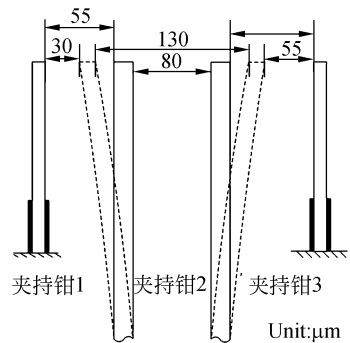
图 1 夹持器结构图

Fig. 1 Structure of microgripper



(a) 夹持器末端

(a) Arms of microgripper



(b) 张合量示意

(b) Sketch of opening range

图 2 夹持器末端示意图

Fig. 2 Sketch of four arms

夹持臂 2 和 3 为活动臂, 1 和 4 为固定臂。压阻传感器集成在臂 1 和 4 的末端, 用于检测夹持力。4 个夹持臂形成了 3 组夹持钳, 这 3 组夹持钳的初始间隔如图 2(b)。当施加驱动电压时, 夹持钳 1 和 3 同时闭合, 并且可以检测夹持力。当取消驱动电压后, 夹持钳 2 闭合, 夹持钳 1 和 3 张开。活动臂的末端转动位移设计为 $25 \mu\text{m}$, 3 组夹持钳的张合量连续互补, 形成 $30 \sim 130 \mu\text{m}$ 的夹持器总张合量。工作过程中可以根据操作对象的尺寸大小, 选择相对应的夹持钳进行操作。由于活动臂的整体刚度比较小, 而固定臂的尺寸和位置相对可以灵活选取, 在传感器集成加工方面工艺简单, 因此只在固定臂上集成了力传感器。将活动臂形成的夹持钳 2 的张合量设计为最大, 可以操作一些尺寸较大, 对夹持力没有严格要求的对象。

2.2 静电驱动梳齿结构

图 3 为夹持器中静电驱动部分的梳齿结构。

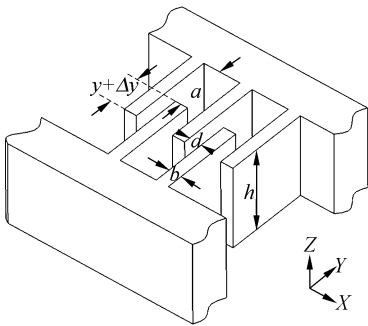


图 3 梳齿结构

Fig. 3 Comb finger electrodes

如果忽略边界效应的影响, 则梳齿间的总电容量为:

$$C = 2n\epsilon \frac{(y + \Delta y)h}{d} + (2n - 1)\epsilon \frac{bh}{a}, \quad (1)$$

式中 $\epsilon = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$ 为空气介电常数, n 是梳齿对数, h 是梳齿厚度, b 是梳齿宽度, d 是梳齿间隙。当驱动电压 U 作用在梳齿对的两端时, 梳齿结构的电场能 E 为:

$$E = \frac{CU^2}{2} = n\epsilon U^2 \frac{(y + y_0)h}{d} + \left(n - \frac{1}{2}\right)\epsilon U^2 \frac{bh}{a}, \quad (2)$$

从而得到静电驱动力:

$$F = \frac{dE}{dy} = \frac{1}{2}U^2 \frac{dC}{dy} = n\epsilon U^2 \frac{h}{d} - \left(n - \frac{1}{2}\right)\epsilon U^2 \frac{bh}{a^2}, \quad (3)$$

由公式(3)可知, 驱动力与梳齿对数、梳齿厚度及驱动电压的平方成正比, 与梳齿间隙成反比, 依此指导工艺和结构尺寸的设计, 设计参数如表 1。

表 1 夹持器参数尺寸

Tab. 1 Detail dimensions of microgripper

| | | | | |
|-------|-------------------|-------|-------------------|------------------|
| 梳齿厚度 | 50 μm | 梳齿间隙 | 2.5 μm | |
| 检测梁长度 | 400 μm | 检测梁宽度 | 20 μm | |
| 器件尺寸 | 6.2 mm × 3.5 mm | | 器件厚度(Si 层) | 50 μm |

2.3 有限元分析

图 4 给出了夹持器的有限元分析图。当施加 80 V 电压时, 梳齿的直线位移为 $8 \mu\text{m}$ 。夹持器的活动臂在驱动力的作用下绕着 S 型梁的固定点转动, 转化成的夹持器末端转动切向位移为 $28 \mu\text{m}$ 左右, 约被放大了 3.5 倍。

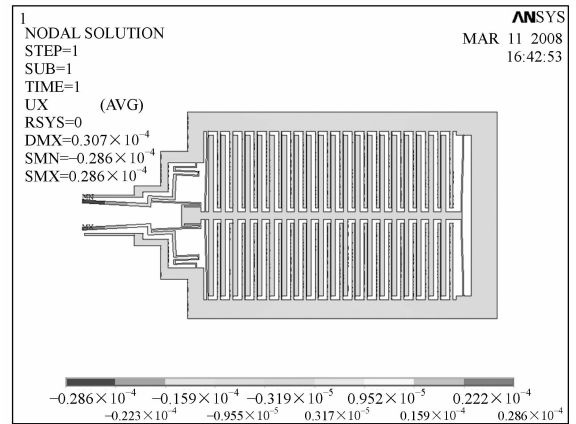


图 4 夹持器有限元分析

Fig. 4 FEA of microgripper

检测梁的受力仿真分析如图 5 所示, 当作用力作用在检测梁的悬臂末端位置时, 检测梁沿纵向的应力分布如图所示。从图 5 中可以看出, 检测梁受横向应力作用非常小, 可以忽略不计, 只考虑纵向应力的作用, 最大应力发生在为检测梁根部, 因此将压阻分别布置在检测梁两端根部的两对应侧面上, 其压阻条的灵敏度为^[7]:

$$S = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\int_0^l \frac{1}{2} \pi_{44} \sigma_{\text{axial}}(x) dx}{l}, \quad (4)$$

式中, π_{44} 为纵向压阻系数, l 为压阻部分长度, σ_{axial} 为梁的应力值。则输出电压为:

$$\Delta U = \frac{\Delta R}{2R} U_{\text{power}} = \frac{1}{4} \pi_{44} \sigma_{\text{axial, max}} U_{\text{power}}, \quad (5)$$

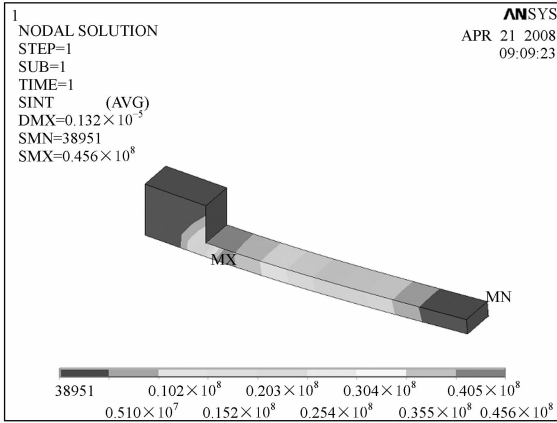


图 5 检测梁有限元分析

Fig. 5 FEA of sensing beam

式中, U_{power} 为压阻传感器电路的输入电压。

3 微夹持器制作工艺

工艺步骤如图 6 所示,具体如下:

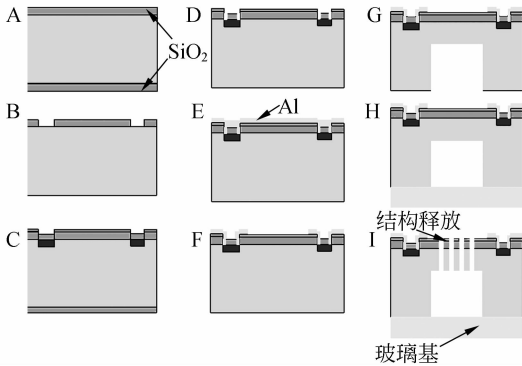


图 6 工艺流程示意图

Fig. 6 Flow chart of fabrication process

- A 选择 n 型(100)硅片漂洗后氧化;
- B 光刻出硼离子注入区域;
- C 浓硼扩散,再生成一层 SiO_2 绝缘薄膜;
- D 光刻出引线孔,用 BOE 溶液在 SiO_2 上腐蚀出引线孔区域;
- E 在硅片的正面 SiO_2 上溅射一层硅铝;
- F 光刻引线 and 焊盘,腐蚀硅铝层形成引线和焊盘;
- G 在硅的背面沉积一定厚度的高质量 SiO_2 ,然后涂胶光刻释放窗口,DRIE 刻蚀出高深宽比结构的释放窗口;
- H 硅-玻璃阳极键合;

I 在硅片正面光刻出结构图形,再一次用 DRIE 刻蚀释放出结构。

其中离子注入和 DRIE 深刻蚀工艺对夹持器的性能影响较大^[8]。在压阻的制备工艺中,带氧化层注入 B 离子,制备 p 型压阻,注入能量为 25 keV、剂量为 $4.8 \times 10^{15}/cm^3$,可获得结深约为 $1 \mu m$ 的 p-n 结,且掺杂浓度超过 $10^{-19}/cm^3$,能够与 Al 引线形成良好的欧姆接触。加工后压阻阻值大小为 2 k Ω 。图 7 为检测梁的三维示意图,离子注入沿着 Z 轴方向,在 XY 面内形成压阻区,通过 DRIE 刻蚀,在 XZ 面的两侧壁上“切”出宽度约为 $1 \mu m$ (即离子注入的 p-n 结深),长度为 100 μm 的侧面压阻区,用来检测侧向夹持力 F 。

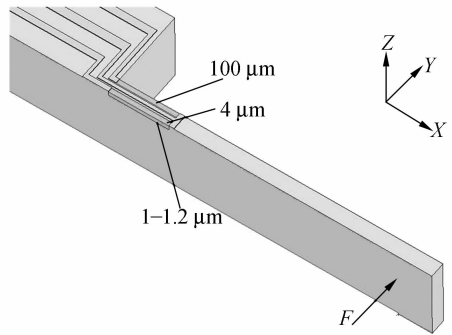


图 7 力检测梁

Fig. 7 Force sensor beam

DRIE 工艺过程中, SF_6 作为刻蚀气体,用 SF_6 来刻蚀硅。使用 C_4F_8 气体形成钝化层。“刻蚀”和“钝化”两个过程交替进行,用来定向地刻蚀硅。通过深刻蚀工艺工程中对光刻胶和 SiO_2 掩模厚度的实验,确定合适的掩模参数,在刻蚀设备

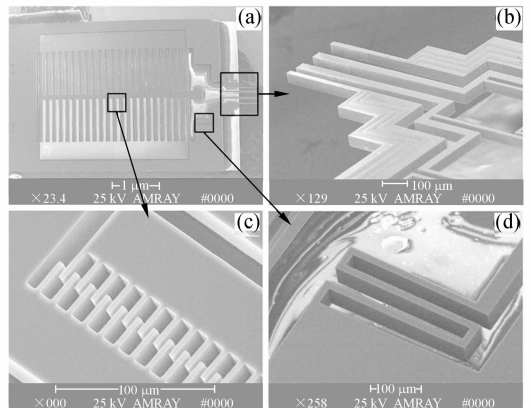


图 8 夹持器 SEM 实物图

Fig. 8 SEM image of microgripper

中严格控制“刻蚀”和“钝化”的时间等参数比例,并在刻蚀中间阶段对刻蚀效果进行检测,以保证最终的刻蚀质量。得到的最终加工微夹持器 SEM 图如图 8 所示,图 8(a)为整体俯视图;图 8(b)为夹持器的 4 个夹持臂;图 8(c)为梳齿驱动器;图 8(d)为 S 型梁结构。图 9 为微夹持器的实物图。



图 9 夹持器 SEM 实物图

Fig. 9 SEM image of microgripper

4 夹持器性能测试

利用压电陶瓷驱动平台结合电子秤对压阻力传感器进行标定。首先将夹持器固定在陶瓷平台上,在平台的驱动下可以 3 nm 的步进运行。在电子秤上固定一根探针,在显微镜的观察下调节夹持器检测梁末端位置,使检测梁末端与探针尖端接触,并相互作用,通过电子秤读出作用力。测得的力与压阻桥电路电压偏差关系如图 10 所示。

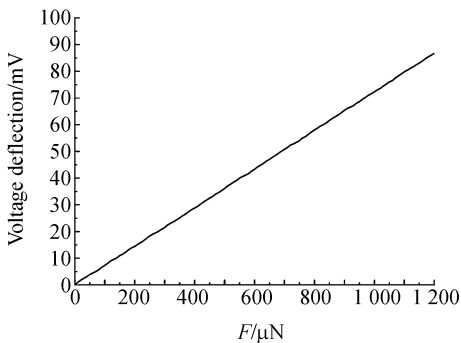


图 10 传感器标定

Fig. 10 Calibration of force sensor

利用像素法对微夹持器张合量进行测试,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,可得微夹持器“电压-位移”特性的数据,绘制曲线如图 11 所示。

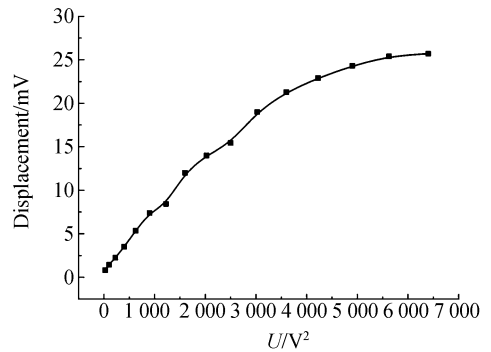


图 11 张合量曲线图

Fig. 11 Curve of opening range

由图 11 可知,在有效驱动电压 0~80 V 时,夹持臂单臂末端的位移在 0~25 μm 。理论上电压的平方与位移之间为线性关系,但由于加工过程中结构的精度偏差,以及 S 型柔性梁的结构特性,在将梳齿的直线运动转化为夹持臂末端摆动后,出现了一定程度的非线性。由于该夹持器具有力反馈功能,因此对单臂的位移线性度要求不高。测试结果满足设计和使用要求。

5 结论

本文介绍了一种基于体硅工艺的四臂式 MEMS 微夹持器的设计和制作工艺,利用侧面压阻技术将力传感器成功地集成在夹持器末端,实现对夹持力的反馈。对夹持器的张合量进行了测试,有效驱动电压取 0~80 V 时,夹持器的张合量范围为 30~130 μm ,其中 30~80 μm 的夹持范围实现了实时的力反馈。室温下压阻传感器的阻值为 2 k Ω ,检测梁上压阻器件的灵敏度达到了 3 μN ,最大量程在 1 mN 以上。整个夹持器利用硅玻璃键合实现操作端的支撑和电隔离,工艺简单,成本低,为传感器与执行器的功能集成积累了经验。

参考文献:

[1] 李勇,李玉和,李庆祥. 基于体硅工艺的静电致动微

夹持器制作工艺分析[J]. 光学精密工程,2003,11(2):109-113.

LI Y, LI Y H, LI Q X. Fabrication process analy-

sis for electrostatically actuated microgripper based on silicon bulk micromachining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(2):109-113. (in Chinese)

- [2] GREGORY T A K, NADIM I M, KURT E P. Bulk micromachining of silicon[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998,86(8):1536-1551.
- [3] KIM D H, KIM B, KANG H. Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation [J]. *Microsystem Technologies*. 2004,10:275-280.
- [4] 尹燕丽,朱邦太,陈海龔,等. 毫米级微型机器人操作手的研制和操作特性[J]. *光学精密工程*,2001,9(6):531-534.
YIN Y L, ZHU B T, CHEN H Y, *et al.*. Design and operational properties of a manipulator for millimeter-size microrobot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(6):531-534. (in Chinese).
- [5] 张培玉,武国英,郝一龙,等. 微夹钳研究的进展与

展望[J]. *光学精密工程*,2000,8(3):292-296.

- ZHANG P Y, WU G Y, HAO Y L, *et al.*. Development of microgripper technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(3):292-296. (in Chinese)
- [6] KIM C J, PISANO A P, MULLER R S. Polysilicon microgripper[J]. *Technical Digest IEEE Solid-State and Actuator Workshop*, 1990(6):48-51.
- [7] CHEN T, CHEN L G, SUN L N, *et al.*. A sidewall piezoresistive force sensor used in a MEMS gripper[C]. *ICIRA 2008, Part II, LNAI*,2009,5315:207-216.
- [8] 王家畴,荣伟彬,孙立宁,等. 基于体硅工艺的定位平台制作工艺分析研究[J]. *光学精密工程*,2008,16(4):636-641.
WANG J CH, RONG W B, SUN L N, *et al.*. Development on a micro-gripper integrating force sensor based on the MEMS technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(4):636-641. (in Chinese)

作者简介:



孙立宁(1964—),男,黑龙江鹤岗人,教授,博士生导师,长江学者,1985年、1988年、1993年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微操作和微驱动的研究。E-mail: ln-sun@hit.edu.cn



陈涛(1980—),男,河南三门峡人,2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,现为哈尔滨工业大学机电学院博士研究生,主要从事微纳定位及微纳操作等方面的研究。E-mail: cht22@sina.com



邵兵(1976—),男,黑龙江庆安人,讲师,2003年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为微操作和微驱动机器人。E-mail: shaobing@hit.edu.cn



李欣(1965—),辽宁辽阳人,教授,分别于1995年、1998年在上海复旦大学获得硕士、博士学位,现为中科院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点联合实验室主任,主要研究方向为微纳检测与传感和 MEMS 技术。E-mail: xxli@mail.sim.ac.cn