

文章编号 1004-924X(2012)07-1500-09

具有三层结构的 SU-8 胶 V 形微电热驱动器

张 然, 褚金奎*, 王海祥, 陈兆鹏

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为解决 SU-8 胶微电热驱动器在工作过程中存在平面外运动的问题,提出了一种具有铜-SU-8 胶-铜三层对称结构的新型 SU-8 胶 V 形微电热驱动器。采用刚度矩阵方法建立了包含被驱动结构刚度的微电热驱动器力学模型,并针对一种柔性微夹钳,利用该模型对微电热驱动器进行了几何参数设计。利用 Ansys 仿真软件对所设计微驱动器进行了分析,仿真结果验证了所建模型的合理性。提出了一种新的 MEMS 加工工艺来制作三层结构微电热驱动器,并测试了它的性能。结果表明,实验结果与仿真结果相差不大,在 150 mV 驱动电压下,所设计微驱动器温度仅升高约 32.93°C,并对微夹钳产生约 2.5 μm 的输入位移,使微夹钳产生 126 μm 的钳口距离改变量。微驱动器仅消耗大约 30.35 mW 的功率,钳口的平面外运动小于 500 nm。最后,利用微电热驱动器驱动的微夹钳成功地对一个长 1.2 mm,宽 135 μm ,厚 50 μm 的 SU-8 胶材料微型零件进行了微操作实验,实验证明了微驱动器实际性能基本满足设计要求。

关键词: SU-8 胶;微电热驱动器;微夹钳;结构设计

中图分类号: TH112.5; TH703.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122007.1500

SU-8 chevron electrothermal micro-actuator with three-layer structures

ZHANG Ran, CHU Jin-kui*, WANG Hai-xiang, CHEN Zhao-peng

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

Abstract: To eliminate the out-of plane actuation of a SU-8 electrothermal micro-actuator, a novel SU-8 chevron electrothermal micro-actuator with a copper/SU-8/copper symmetrical structure was proposed. The mechanical model of the micro-actuator which contains the stiffness of a driven structure was established by using the stiffness matrix method. The geometric parameters of the micro-actuator were designed for a microgripper by using the established model. The designed micro-actuator was simulated by Ansys software and the simulation results verified the reasonability of the mechanical model. Then, the micro-actuator and the microgripper were fabricated by a simple process followed with a performance test. The test results show that when the temperature of the micro-actuator only increases 32.93°C in a driving voltage of 150 mV, the output displacement is 2.5 μm and jaw gap change is 126 μm . During the operation processes, the out-of plane displacement of the tip is always lower than 500 nm. Finally, the micro-manipulation sequence of a SU-8 micro-part with a size of 1.4

收稿日期:2012-03-02;修订日期:2012-05-11.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB302101)

mm \times 135 μ m \times 50 μ m was carried out to verify the driving ability of the micro-actuator.

Key words: SU-8; electrothermal micro-actuator; microgripper; structure design

1 引 言

目前,微执行器驱动方式主要有静电驱动^[1]、压电驱动^[2]、形状记忆合金驱动^[3]及电热驱动^[4-5]等。微电热驱动器利用材料受热膨胀,产生输出力与位移。与其他微执行器相比,微电热驱动器具有输出位移与力大,结构紧凑,驱动电压低和易于控制等优点。按结构形式划分,微电热驱动器主要包括冷热臂式和 V 形微电热驱动器。目前,冷热臂式微电热驱动器使用较多,由于其驱动过程依赖于温度的不均匀分布,所以这种微驱动器不适合在液体环境下工作。V 形微电热驱动器不依赖内部温度差异工作,具有良好的环境适应性。

目前,制作 V 形电热驱动器的材料主要为金属或硅。由于硅及金属的热导系数较大,而热膨胀系数较小,导致由其制成的微电热驱动器工作温度较高(一般为几百摄氏度),不适于对温度要求较高的应用场合,如生物领域。SU-8 胶是一种高度交联的环氧树脂型负性光刻胶,具有高热膨胀系数($52\times 10^{-6}/\text{K}$,是硅的 21.7 倍)、低热导系数、良好的生物兼容性和较好的工艺性^[6-7]等特点,特别适合于制作微电热驱动器。由于 SU-8 胶为绝缘材料,一般配合金属材料构成微电热驱动器。Nikolas 等人^[8]和 Karthik 等人^[9]采用在 SU-8 胶结构层一侧沉积金的方法分别制成了冷热臂式和 V 形微电热驱动器。由于金与 SU-8 胶的杨氏模量及热膨胀系数不同,微驱动器在工作过程中会向金属层一侧弯曲,产生不需要的平面外运动。

为了保留 SU-8 胶微电热驱动器的优点,同时消除驱动过程中的平面外运动,本文提出了一种新型 SU-8 胶 V 形微电热驱动器,并建立了这种驱动器的力学模型。针对一种柔性微夹钳,利用该模型对微电热驱动器进行了几何设计。然后,利用一种新颖的加工工艺制作了微电热驱动器及微夹钳。实验结果表明,所设计的微驱动器达到了设计要求,能够较好地驱动微夹钳,并且几乎不产生平面外运动。最后,为了验证微电热驱动器及微夹钳的工作情况,成功地对一个微型零

件进行了微操作实验。

2 微驱动器结构设计

2.1 结构组成及工作原理

图 1 所示为三层结构 SU-8 胶 V 形微电热驱动器结构示意图,它由铜-SU-8 胶-铜三层材料组成。上、下铜层两侧为电极,中间 SU-8 层两侧为支撑板。微驱动器中部为具有三层结构的 V 形梁。当将电压施加于上下铜层电极时,电流从 V 形梁上下铜层流过,同时产生焦耳热。焦耳热通过热传递传到 V 形梁 SU-8 层中,使其发生热膨胀,从而推动中部的输出杆运动。最后,输出杆将微驱动器产生的力和位移传递给被驱动结构。为了增加输出力,本文设计的微驱动器采用由 4 个 V 形梁组成的阵列结构。由于两铜层厚度一致,微驱动器厚度方向为对称结构,其工作过程不产生平面外运动。同时,由于 SU-8 胶热膨胀系数较大,热传导系数较低,该电热微驱动器工作温度低,产生的热量对被驱动结构影响小。

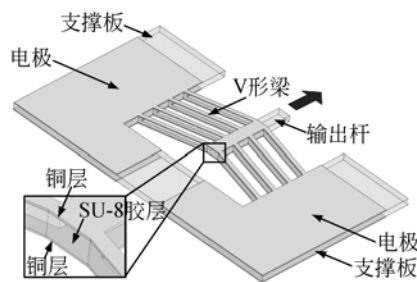


图 1 三层结构 SU-8 胶 V 形微电热驱动器结构示意图
Fig. 1 Schematic drawing of SU-8 chevron electrothermal micro-actuator with three-layer structures

2.2 基于刚度矩阵法建立力学模型

刚度矩阵法是有限元方法的一种,采用较少的梁单元对柔性机构进行建模。图 2 所示为长方体梁单元结构示意图。由于该方法能够与传统有限元方法一样对柔性机构进行分析,并且其模型节点数量远少于传统有限元方法,计算负担小,已被大量运用于柔性机构设计^[10-11]。基于以上原

因,本文采用刚度矩阵法对 V 形微电热驱动器进行建模。另外,微驱动器铜层厚度远小于 SU-8 胶层厚度,因此建模过程仅考虑 SU-8 胶层结构。

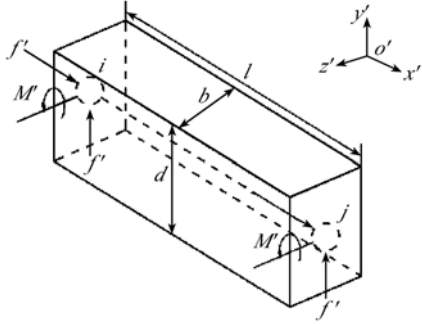


图 2 长方体梁单元结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of cuboid beam element

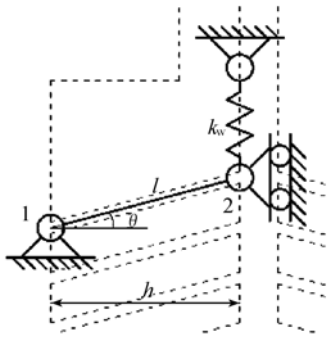


图 3 基于刚度矩阵法建立的微驱动器力学模型示意图

Fig. 3 Schematic drawing of micro-actuator mechanical model based on stiffness matrix method

图 3 为基于刚度矩阵法建立的微驱动器力学模型示意图。由于 V 形微电热驱动器为左右对称结构,并且 V 形梁之间间距较小,为了减少计算量,仅考虑左侧结构,并忽略梁间位移,仅对单根梁进行分析。之前对于 V 形微电热驱动器的研究,一般仅考虑 V 形梁空载时的输出特性。但由于 V 形梁本身在对外做功时自身也会发生变形,导致其输出位移大小不仅与自身刚度有关,也与被驱动结构的刚度有关。因此对微驱动器进行建模时,也需要考虑被驱动结构的刚度。因为在小变形范围内,被驱动结构的刚度恒定,所以可将被驱动结构看作是节点 2 相连,驱动方向为输出方向,刚度为 k_w 的弹簧。

由于结构形变较小,根据胡克定律,假设力与形变成线性关系。当包含力与弯矩的载荷向量 \mathbf{F}' 施加于梁单元节点上时,梁单元节点在局部坐标系 $o'-x'y'z'$ 下的位移向量 \mathbf{U}' 可由如下公式求得:

$$\mathbf{U}' = \mathbf{K}'^{-1} \mathbf{F}', \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{U}' = [\delta_x^1 \quad \delta_y^1 \quad \theta_z^1 \quad \delta_x^2 \quad \delta_y^2 \quad \theta_z^2]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}' = [f_x^1 \quad f_y^1 \quad M_z^1 \quad f_x^2 \quad f_y^2 \quad M_z^2], \quad (3)$$

$\delta_u^w (u = x, y; w = 1, 2)$ 为节点 w 在 u 轴方向的平动位移, θ_z^w 为节点 w 在 z 轴方向的旋转位移, f_u^w 为作用在节点 w 上 u 轴方向的力, M_z^w 为作用在节点 w 上 z 轴方向的弯矩。

$$\mathbf{K}' = \begin{bmatrix} \frac{bdE}{l} & 0 & 0 & -\frac{bdE}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{bd^3 l^3} & \frac{E}{2bd^3 l^2} & 0 & -\frac{E}{bd^3 l^3} & \frac{E}{2bd^3 l^2} \\ 0 & \frac{E}{2bd^3 l^2} & \frac{E}{3bd^3 l} & 0 & -\frac{E}{2bd^3 l^2} & \frac{E}{6bd^3 l} \\ -\frac{bdE}{l} & 0 & 0 & \frac{bdE}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{bd^3 l^3} & \frac{E}{2bd^3 l^2} & 0 & \frac{E}{bd^3 l^3} & -\frac{E}{2bd^3 l^2} \\ 0 & \frac{E}{2bd^3 l^2} & \frac{E}{6bd^3 l} & 0 & -\frac{E}{2bd^3 l^2} & \frac{E}{3bd^3 l} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{K}' 为梁单元在局部坐标系 $o'-x'y'z'$ 下的刚度矩阵。其中 E 为 SU-8 胶杨氏模量, b, d 与 l 为梁单元几何参数,见图 2。在全局坐标系下,对 V 形微电热驱动器建模,可得:

$$(n\mathbf{K} + \mathbf{K}_w)\mathbf{U} = n\mathbf{F}, \quad (5)$$

其中: n 为梁单元个数,这里为 8。

$$\mathbf{K} = \mathbf{T}^T \mathbf{K}' \mathbf{T}, \quad (6)$$

其中: \mathbf{T} 为坐标转换矩阵,其表达式如下:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: θ 为梁单元与水平方向夹角。 \mathbf{K}_w 为被驱动结构附加刚度矩阵, 其第 5 行上第 5 个元素为 k_w , 其余项为 0。 \mathbf{U} 为位移向量, 因为节点 1 被固定, 节点 2 只有 y 方向位移, 所以

$$\mathbf{U} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ u_{out} \ 0]^T, \quad (8)$$

式中: u_{out} 为节点 2 在 y 方向的位移, 也就是微驱动器输出位移。 \mathbf{F} 为由热膨胀引起的热等效载荷向量, 其表达式为:

$$\mathbf{F} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \alpha \Delta t b d \sin(\theta) \ 0]^T, \quad (9)$$

式中: α 为 SU-8 胶热膨胀系数, Δt 为单元温度升高量。整理式(5), 可得微驱动器输出位移表达式:

$$u_{out} = \frac{\alpha \Delta t l^3 b d \sin(\theta)}{\sin^2(\theta) l^2 b d + \cos^2(\theta) b d^3 + \frac{k_w l^2}{n}}. \quad (10)$$

2.3 微电热驱动器几何设计

设计常量见表 1, 其中, 微驱动器 SU-8 胶层厚度 b 由工艺条件及被驱动结构厚度决定, h 由微驱动器封装接口尺寸决定, k_w 由被驱动柔性微夹钳钳体输入刚度决定。图 4 所示为被驱动柔性微夹钳结构示意图。

表 1 设计常量

Tab. 1 Design constants

常量名	值
E/GPa	2.1
$\alpha/(\times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	52
$b/\mu\text{m}$	40
$h/\mu\text{m}$	500
$k_w/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	249.63
n	8
$\Delta t/^\circ\text{C}$	30

当梁宽 d 取值过大时, 虽然可增加微驱动器本身刚度, 但会使驱动过程中梁根部应力过大。因此, 为了避免应力过大造成的破坏, 取 d 小于 $30 \mu\text{m}$ 。图 5 为基于式(10)计算得到的输出位移

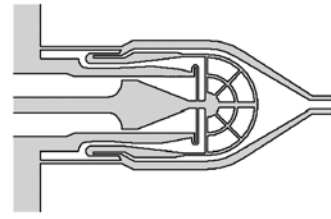
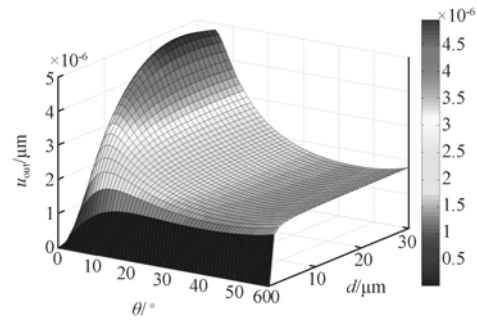


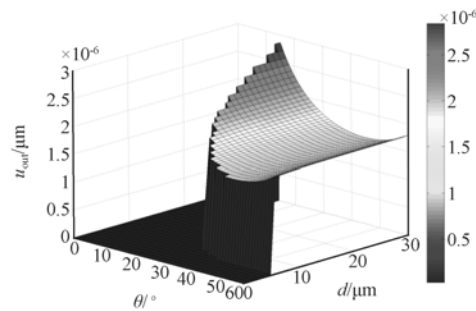
图 4 被驱动柔性微夹钳结构示意图

Fig. 4 Schematic drawing of driven microgripper



(a) 不考虑微驱动器刚度

(a) Without consideration of micro-actuator stiffness



(b) 考虑微驱动器刚度

(b) With consideration of micro-actuator stiffness

图 5 输出位移 u_{out} 与角 θ 和梁宽 d 间关系

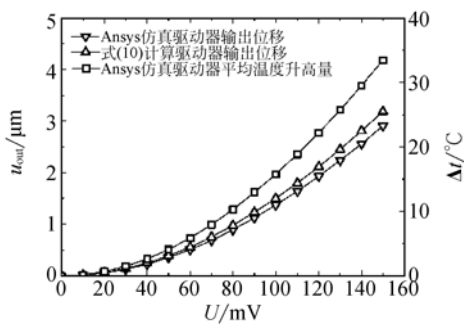
Fig. 5 Output displacement of micro-actuator u_{out} as a function of θ and d

u_{out} 与角 θ 和梁宽 d 的关系。如图 5(a) 所示, 在不考虑微驱动器本身刚度的情况下, 角 θ 和梁宽 d 分别为 5° 与 $23 \mu\text{m}$ 时, 微驱动器可得到最大输出位移, 但此时微驱动器本身刚度仅为 298.09 N/m 。由于被驱动微夹钳为常闭型(即通电后钳口张开), 其夹持力由钳体刚度与微驱动器刚度共同决定, 所以为了避免夹持力过小, 需要考虑微驱动器本身刚度。为考虑微驱动器刚度, 将图 5(a) 中刚度小于 2500 N/m 的点输出位移设为 0, 得

到图 5(b)。由图 5(b)可知,当要求微驱动器刚度大于 2 500 N/m 时,角 θ 和梁宽 d 分别为 15° 与 $30\ \mu\text{m}$ 的微驱动器可获等最大输出位移。因此,为了保证微夹钳具有足够的夹持力,同时能获得最大的输入位移,将设计结果定为 $\theta = 15^\circ, d = 30\ \mu\text{m}$ 。

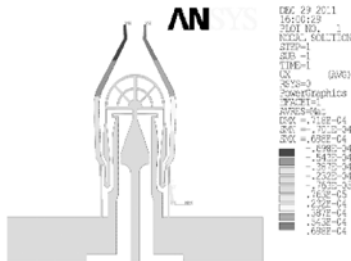
2.4 仿真分析

为验证所设计微驱动器的性能,基于 Ansys 有限元分析软件对设计结果进行分析。图 6 为仿真分析结果,分析过程中所用材料特性见表 2。从图 6(a)可知,当对微驱动器施加 150 mV 驱动电压时,微驱动器可对钳体输出 $2.91\ \mu\text{m}$ 位移,这时 V 形梁的平均温度升高量仅为 $33.44\ ^\circ\text{C}$ 。从该图还可看出,基于式(10)所得计算结果与仿真结果差距较小(10% 以下),验证了所建模型的合理性。图 6(b)为对微驱动器施加 150 mV 驱动电压时,微夹钳的水平方向位移云图。从图 6(b)



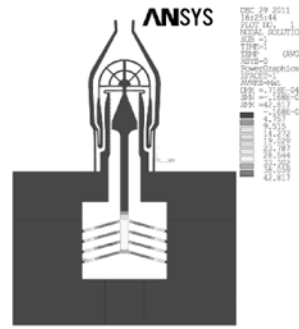
(a) 驱动电压与微驱动器输出位移、V 形梁平均温度升高量间的关系

(a) Output displacement of micro-actuator and average temperature change versus driving voltage



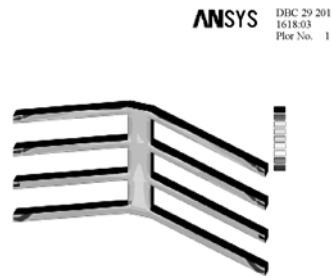
(b) 对微驱动器施加 150 mV 驱动电压时,微夹钳水平方向位移云图

(b) Contour of horizontal displacement for micro-gripper with 150 mV driving voltage of micro-actuator



(c) 对微驱动器施加 150 mV 驱动电压时,微夹钳及微驱动器温度升高云图

(c) Contour of temperature changes of microgripper and micro-actuator with 150 mV driving voltage of micro-actuator



(d) 对微驱动器施加 150 mV 驱动电压时,微驱动器应力图

(d) Contour of micro-actuator stiffness with 150 mV driving voltage of micro-actuator

图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

可知,当对微驱动器施加 150 mV 驱动电压时,微夹钳钳口单侧可产生 $69.80\ \mu\text{m}$ 的水平方向位移,说明该微夹钳钳体的位移放大约 24 倍。因为钳口初始距离为 $60\ \mu\text{m}$,所以在此电压下微夹钳可夹持直径为 $60\sim 199.60\ \mu\text{m}$ 的物体。另外,由仿真分析可知,当夹持直径为 $199.60\ \mu\text{m}$ 的物体时,微夹钳可提供 $17.38\ \mu\text{N}$ 的夹持力。从图 6(c)可知,由于 SU-8 胶材料的热导系数不高,当 V 形梁最高温度升高量为 $42.817\ ^\circ\text{C}$ 时,钳口处温度几乎未升高。由图 6(d)可知,当对微驱动器施加 150 mV 驱动电压时,微驱动器铜层与 SU-8 胶层最大应力分别为 $0.195\ \text{GPa}$ 和 $4.17\ \text{MPa}$,分别小于沉积铜层的屈服应力和 SU-8 胶断裂极限应力,由此可知驱动器工作在此电压下是安全的。

表 2 材料特性参数

Tab. 2 Material property parameters

材料特性	SU-8	铜	空气
杨氏模量 /GPa	2.1	119	
泊松比	0.26	0.326	
电阻率 / $\Omega \cdot m$	10^{10}	1.71×10^{-8}	
热膨胀系数 / $(\times 10^{-6} \cdot K^{-1})$	5.2×10^{-5}	1.77×10^{-5}	
热导系数 / $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.2	4.01×10^2	2.52×10^{-2}
温度电阻 系数/K		3.93×10^{-3}	
比热容 / $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1 500	380	
对流系数 / $(W \cdot m^2 \cdot K^{-1})$			200

3 微驱动器制作工艺

采用如图 7 所示简单 MEMS 工艺步骤,制作了所设计的三层结构 SU-8 胶 V 形微电热驱动器及微夹钳:(1)取一片单面抛光硅片,对其进行清洗后,采用热氧化方法在其表面生成 $1 \mu m$ 厚的二氧化硅作为牺牲层。(2)在硅片上表面旋涂 $40 \mu m$ 厚的 SU-8 2015 光刻胶(Microchem Corp., USA),然后将硅片平放静置 20 min,使 SU-8 胶表面自然平整。经过 1 h 前烘后,采用紫外曝光机对 SU-8 胶层进行光刻。经过 90 s 的后烘之后,使用 SU-8 胶显影液(Microchem Corp.,

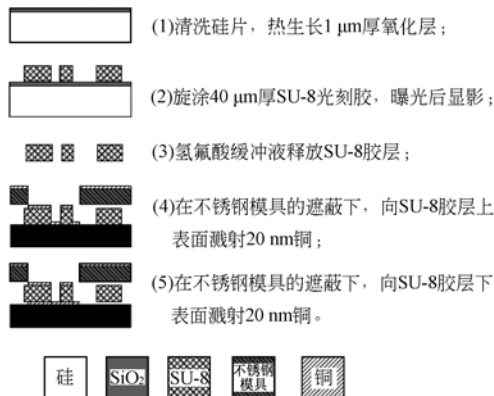


图 7 工艺流程图

Fig. 7 Fabrication process

USA)进行显影。(3)为了增加 SU-8 胶层的刚度并释放其内应力,对其进行 $100^\circ C, 1 h$ 的硬烘,然后使用氢氟酸缓冲液对 SU-8 胶层进行释放。(4)利用激光切割工艺制作一块不锈钢模具,其表面通孔形状与位置和 SU-8 胶层支撑板及 V 形梁对应。将 SU-8 胶层置于不锈钢模具之下,然后在 SU-8 胶上表面溅射 $120 nm$ 厚金属铜,形成电极及 V 形梁铜层。(5)同样采用工艺(4)制成另一厚度同为 $120 nm$ 的铜层,从而完成制作。

完成制作后,将含有微驱动器的微夹钳从 SU-8 胶层上取下,并装配到如图 8 所示印刷电路板(PCB)接口上,从而通过金手指插槽实现与外电源的电器连接。

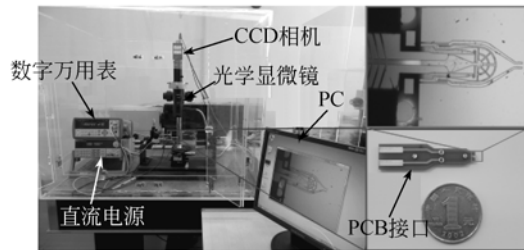


图 8 微驱动器性能测试装置

Fig. 8 Performance test device of micro-actuator

4 微驱动器性能测试实验

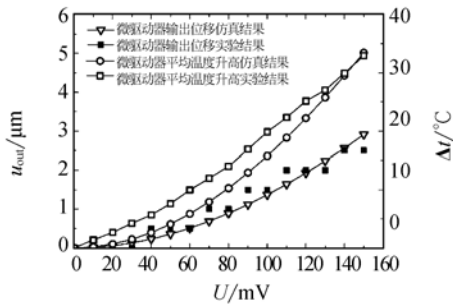
用图 8 所示的测试装置对制作的微驱动器及微夹钳进行了性能测试。测试装置由光学显微镜(Navitara 1-50487), CCD 相机(JAI CM-140GE), 直流电源(ITECH IT6921), 数字万用表(Agilent 34410A)及一台 PC 机组成。被测位移通过图像像素法测得。微驱动器平均温度升高量可由如下公式估算:

$$\Delta t = \frac{R - R_0}{\alpha_R R_0}, \quad (11)$$

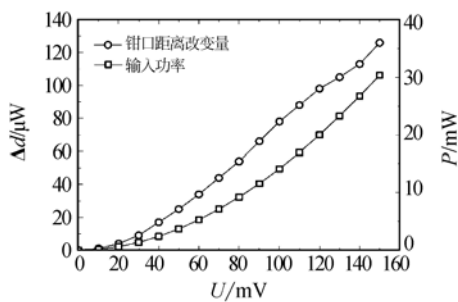
式中: R_0 为微驱动器铜层初始电阻, α_R 为铜的温度电阻系数, R 为驱动过程中驱动器铜层电阻,由实测电压及电流计算得到。

图 9 所示为微驱动器性能测试结果。由图 9(a)可知,当施加 $150 mV$ 驱动电压时,微驱动器温度升高约 $32.93^\circ C$,并产生约 $2.5 \mu m$ 输出位移。从该图还可看出,性能测试实验结果与有限元仿真结果相差不大,两者间差距主要由测量误

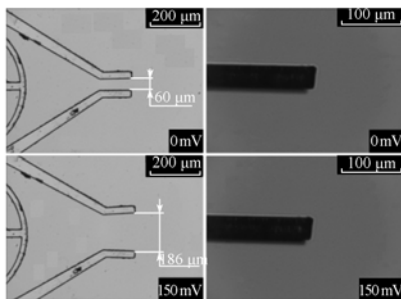
差、仿真环节使用不准确的材料特性参数及加工误差等引起。由图 9(b)可知,当施加 150 mV 驱动电压时,微驱动器能够驱动微夹钳产生约 126 μm 的钳口距离变化量,同时仅消耗大约 30.35 mW



(a) 驱动电压与微驱动器输出位移、V 形梁平均温度升高量间关系
(a) Output displacement of micro-actuator and average temperature change versus driving voltage



(b) 驱动电压与微夹钳钳口距离变化量、微驱动器输入功率间关系
(b) Jaw gap change of microgripper and input power of micro-actuator versus driving voltage



(c) 驱动电压为 0 与 150 mV 时钳口的显微照片
(c) Images of jaws with 0 and 150 mV driving voltage

图 9 微驱动器性能测试结果

Fig. 9 Performance test results of micro-actuator

的功率。图 9(c)为未施加电压与施加 150 mV 电压时钳口俯视及侧视显微照片。由于显微视觉系统分辨率为 500 nm,而在测试过程中未观察到钳口的平面外运动,所以可知钳口的平面外运动小于 500 nm,远小于钳口水平方向 63 μm 的位移。

为了验证微电热驱动器及微夹钳的工作情况,对一个宽 135 μm ,长 1.2 mm,厚 50 μm 的 SU-8 胶材料微型零件进行了微操作实验。如图 10 所示,其流程如下:(a)通过手动位移平台将微夹钳钳口移动到被夹持零件附近;(b)对微驱动器施加 150 mV 电压,使钳口张开,然后将钳口移动到零件中部;(c)停止对微驱动器施加电压,使钳口闭合,从而将零件夹持住;(d)调整手动位移平台,带动微夹钳将零件抬起;(e)~(f)调整手动位移平台,先将被夹持零件向左平移,后向下平移;(g)调整手动位移平台,将零件重新放到下表面,施加 150 mV 电压,使钳口张开,将其从钳口释放;(h)将微夹钳钳口从零件中部移开,后停止施加电压,使钳口回复初始状态,完成微操作。由以上结果可知,微驱动器实际性能基本满足设计要求,可以较好地驱动微夹钳进行微操作。

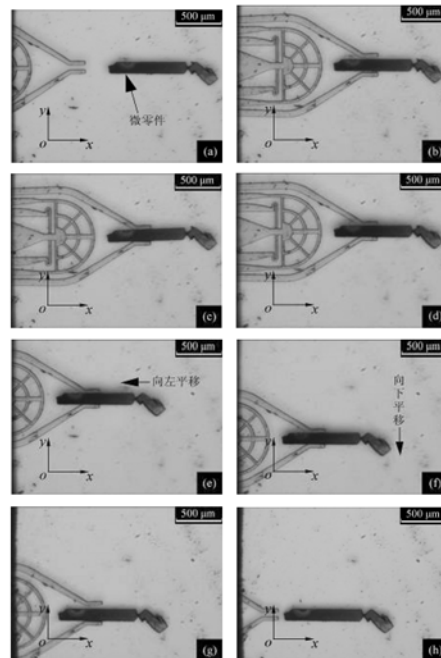


图 10 微操作流程显微照片

Fig. 10 Images of micro-manipulation sequence

5 结 论

提出了一种具有铜-SU-8 胶-铜三层对称结构的新型 SU-8 胶 V 形微电热驱动器,建立了包含被驱动结构刚度的 SU-8 胶 V 形微电热驱动器力学模型。针对一种柔性微夹钳,利用该模型对微电热驱动器进行了几何设计。并基于一种新颖的 MEMS 工艺制作了微驱动器结构同时对其进行了性能测试。测试结果表明,设计的微驱动器在 150 mV 驱动电压下,温度仅升高约 32.93℃,并能对微夹钳产生约 2.5 μm 的输入位移,使微

夹钳产生 126 μm 的钳口距离改变量,同时仅消耗大约 30.35 mW 的功率。在测试过程中,钳口的平面外运动总是小于 500 nm。最后,利用微电热驱动器驱动的微夹钳成功地对一个长 1.2 mm,宽 135 μm,厚 50 μm 的 SU-8 胶材料微型零件进行了微操作实验,结果说明微驱动器实际性能基本满足设计要求,可以较好地驱动微夹钳进行微操作。由于所设计微驱动器铜层裸露在外,会限制其在液相环境中的应用,所以下一步的研究重点主要集中在改进微驱动器结构,增加其表面绝缘性能方面。

参考文献:

- [1] 陈立国,刘柏旭. 复合式 MEMS 微夹持器的研制[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1928-1934.
CHEN L G, LIU B X. Development of hybrid-type MEMS microgripper[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8): 1928-1934. (in Chinese)
- [2] 王代华,朱炜. WTYD 型压电陶瓷微位移器的迟滞特性;建模与实验验证[J]. 光学精密工程,2010,18(1):205-211.
WANG D H, ZHU W. Hysteretic modeling and experimental verification for WTYD type piezoceramic micro-actuators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(1):205-211 (in Chinese).
- [3] 李路明,王立鼎. SMA 微夹钳的研究[J]. 光学精密工程,1997,5(2):37-42.
LI L M, WANG L D. Study on SMA Microclamp[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,5(2):37-42. (in Chinese)
- [4] KARIN N A, KENNETH C, DIRCH H P, *et al.*. Electrothermal microgrippers for pick-and-place operations[J]. *Microelectron. Eng.*, 2008, 85(5-6): 1128-1130.
- [5] HOXHOLD B, BUTTGENBACH S. Easily manageable, electrothermally actuated silicon microgripper[J]. *Microsyst. Technol.*, 2010, 16(8-9): 1609-1617.
- [6] 张立国,陈迪,杨帆,等. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. 光学精密工程,2002,10(3):266-269.
ZHAN L G, CHEN D, YANG F, *et al.*. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 266-269. (in Chinese)
- [7] 黄新龙,熊瑛,陈光焱,等. UV-LIGA 技术制作微型螺旋形加速度开关[J]. 光学精密工程,2010,18(5):1152-1158.
HUANG X L, XIONG Y, CHEN G Y, *et al.*. Fabrication of micro spiral acceleration switch using UV-LIGA technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(5):1152-1158. (in Chinese).
- [8] CHRONIS N, LEE L P. Electrothermally activated SU-8 microgripper for single cell manipulation in Solution[J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2005, 14(4):857-863.
- [9] COLINJIVADI K S, LEE J B, DRAPER R. Viable cell handling with high aspect ratio polymer chopstick gripper mounted on a nano precision manipulator[J]. *Microsyst. Technol.*, 2008, 14(9-11): 1626-1633.
- [10] KOSEKI Y, TANIKAWA T, KOYACHI N, *et al.*. Kinematic analysis of a translational 3-d of micro-parallel mechanism using the matrix method[J]. *Adv. Robot.*, 2002,16(3):251-264.
- [11] PARK S R, YANG S H. A mathematical approach for analyzing ultra precision positioning system with compliant mechanism[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005,(164-165):1584-1589.

作者简介:



张 然(1984—),男,辽宁锦州人,博士研究生,2007 年于大连理工大学获得学士学位,主要从事微执行器及微操作机器人方面的研究。E-mail: zr1111409@yahoo. com. cn



王海祥(1989—),男,山西吕梁人,硕士研究生,2011 年于济南大学获得学士学位,主要从事纳米电铸的工艺研究。E-mail: dlutwhx@sina. com

导师简介:



褚金奎(1965—),男,河南人,博士,教授,博士生导师,1986 年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989 年于西安理工大学获得硕士学位,1992 年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut. edu. cn



陈兆鹏(1987—),男,山东枣庄人,硕士研究生,2009 年于青岛大学获得学士学位,主要从事 MEMS 微传感器的设计与制作。E-mail: chenchaopeng3@126. com

● 下期预告

光热低相干干涉测量大气气溶胶吸收方法研究

李保生¹,李正强²,纪 峰¹,周海洋¹

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥 230009;

2. 中国科学院 遥感应用研究所,100101,北京)

气溶胶吸收在地球大气直接和间接辐射强迫及能见度影响中发挥着重要的作用。光热低相干干涉法具有直接测量大气气溶胶吸收系数、在线原位、低成本,易于进行温度修正等优点。本文提出了增加光热作用区个数提高灵敏度及用低相干干涉法降低成本,建立光热低相干干涉测量大气气溶胶吸收系数的数学模型,分析了干涉仪正交状态测量和干涉条纹细分探测两种方式下的灵敏度,讨论了低相干偏振干涉情况下的探测限。结果显示,在典型条纹细分情况下理论探测灵敏度可达 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$,通过增加光热作用区个数 m ,探测灵敏度理论值可提高到 m 倍。这些理论和方法研究进一步开展实验研究提供了理论依据和参考。