

文章编号 1004-924X(2013)12-3080-07

斜梁型电热微致动器的输出位移计算及实验

王振禄, 沈雪瑾*, 陈晓阳

(上海大学 机械自动化工程系, 上海 200072)

摘要: 为了计算斜梁型电热微致动器的输出位移, 基于电-热分析和热平衡原理建立了电热微致动器的电热耦合稳态传热方程。对热-结构进行了分析, 运用力法原理建立了微致动器的位移计算模型。然后, 用有限元法和实际测试对比验证了温度分布和输出位移的理论值, 得到了一致性很好的结果。最后, 分析了微致动器输出位移的保持性和重复性, 以及结构参数和工艺对微致动器输出位移的影响。分析表明: 斜梁的长宽比和倾角是影响微致动器输出位移的主要参数, 工艺对输出位移有影响。实验结果表明: 9 V 和 18 V 电压下, 微致动器的最大位移分别为 $0.85 \mu\text{m}$ 和 $2.3 \mu\text{m}$, 与理论计算结果相对误差为 2.2% 和 12.8%, 实测值与理论值误差较小, 表明本文推导的斜梁型电热微致动器的输出位移计算公式合理, 能够为该类微致动器的设计和计算提供理论依据。

关键词: 电热微致动器; 电-热-结构模型; 输出位移; 微机电系统

中图分类号: TH703; TM924.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3080

Output displacement calculation and experiment for inclined beam-type electrothermal microactuator

WANG Zhen-lu, SHEN Xue-jin, CHEN Xiao-yang

(Department of Mechanical Automation Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: shenxj@shu.edu.cn

Abstract: To calculate the displacement of an inclined beam-type electrothermal microactuator, a multiphysics coupling model was established based on the electro-thermal and thermo-mechanical analysis. The thermal structure was analyzed, and the output displacement formula was obtained using the force method. For the purpose of proving the accuracy of the model, a comparison was performed. The comparison shows that the theoretical results of temperature profile and output displacement are in agreement well with the results of Finite Element Analysis (FEA) and experimental measurements. Finally, the output displacement repeatability and reproducibility were measured and the main factors influencing the output displacement of the microactuator were analyzed. Obtained results indicate that the ratio of length to width and the angle of the inclined beam are main influence factors on the output displacement and the different MEMS processes have obviously effects on the output displacement of the microactuator. Experimental results also show that the maximal displacement of the microactuator is $0.85 \mu\text{m}$ and $2.3 \mu\text{m}$ under the voltage of 18 V and 9 V, which means the relative errors with the re-

收稿日期: 2013-07-05; 修订日期: 2013-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075249); 上海市重点实验室资助项目 (No. 3ZK1101)

sults of theoretical calculation are 2.2% and 12.8% respectively. The above analysis indicates that the theoretic calculation values are coincident well with the measured values and the formulas deduced from the inclined beam-type electrothermal microactuator are logical, which can provide theoretical supports for the design and calculation of electrothermal microactuators.

Key words: electrothermal microactuator; electro-thermo-mechanical model; output displacement; Micro-electro-mechanic System(MEMS)

1 引言

微致动器是 MEMS 的动力部件,具有能量转化、运动传递等重要作用。电热微致动器利用温度变化产生形变而致动,输出位移和力大、操作电压小、与 IC 兼容,是现阶段 MEMS 可行的主要致动方式,已在微夹钳、线性马达等器件中得到了广泛的应用^[1-3]。

电流通过微致动器时产生电阻热,经传导、对流和辐射将产生的热量进行传递,微致动器受热膨胀而产生位移,是热-电-结构耦合过程,利用模型计算^[4,5]和有限元分析^[6,7]可获得微致动器的输出位移。运用电-热耦合理论计算微致动器的温度分布,再用法^[8,9]或矩阵位移法^[10]计算微致动器的输出位移。Lin 等^[4]计算了线型微结构的温度;Huang 等^[9]建立了冷热臂致动器的分析模型;Yan^[10]等建立了双热臂致动器的分析模型;刘泽文等^[11]研究了微加热膜下方空气隙厚度的变化对加热器性能的影响,建立了一维 Fourier 导热微分方程组;黎仁刚等^[12]提出一种通过傅里叶变换使用节点分析法动态分析仿真热致动器中热电耦合问题的方法。对斜梁型电热微致动器,可利用变形法计算输出位移^[13],本文利用电-热-结构耦合方法,建立微致动器的温度分布模型,再利用法原理计算输出位移,分析了结构参数和工艺条件对位移的影响,并分析了微致动器输出位移的可重复性和保持性。

2 位移计算模型的建立

2.1 电-热分析模型

由于斜梁微致动器的长度远大于宽度和高度,横截面上温度梯度很小,可用一维微元建立

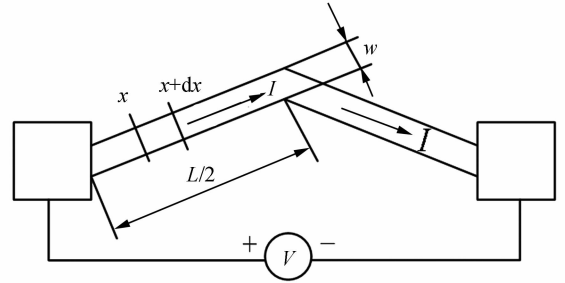


图 1 斜梁型电热微致动器的结构简图

Fig. 1 Schematic structure of inclined beam microactuator

电-热分析模型,如图 1 所示,取长为 dx ,高为 h ,宽为 w 的微元,根据能量守恒定律,微元体散失的热量等于流入微元体的热量加上电流产生的电阻热,可得微元体的一维稳态传热控制方程:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{UP}{Ak_p}(T - T_a) - \frac{V^2}{k_p \rho(T)L^2}, \quad (1)$$

式中: T 为斜梁温度, T_a 为衬底温度, k_p 为梁的热传导率, P 为横截面的周长, $\rho(T)$ 为电阻率, $\rho(T) = \rho_0[1 + 1.25 \times 10^{-3}(T - T_a)]$, U 为空气热传导率的变化梯度, $U = \frac{k_v}{h_v}$, h_v 为结构层与衬底间的空气间隙, k_v 为空气热传导率。

化简整理式(1)可得:

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = m^2 \varphi(x) - n, \quad (2)$$

式中: $\varphi(x) = T(x) - T_a$, $m^2 = \frac{UP}{hwk_p}$, $n = \frac{V^2}{k_p \rho L^2}$ 。

求解式(2),得温度的表达式:

$$T(x) = T_a + \frac{n}{m^2} + c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx}. \quad (3)$$

温度主要通过锚点和空气传向衬底,设锚点与衬底的温度和周围环境的温度相同,可得边界条件:

$$T(0) = T(L) = T_a. \quad (4)$$

求解式(4)可得微致动器沿斜梁长度方向的稳态温度分布。

2.2 热-结构分析模型

求得微致动器的温度后,用式(5)计算热膨胀量:

$$\Delta L = \frac{L}{2} \alpha [\bar{T}(x) - T_a], \quad (5)$$

式中: α 为热膨胀系数, $\bar{T}(x)$ 为平均温度。

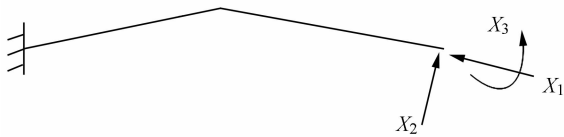
斜梁型微致动器为3次超静定结构,运用力法原理去除右端多余约束,并用 X_1 、 X_2 和 X_3 分别表示水平方向、竖直方向约束力和约束力矩,得到图2(a)所示的力法基本体系,列出力法基本方程:

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \Delta L_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: ΔL_i 表示热应力作用下基本体系沿 X_i 方向的位移, $\Delta L_1 = -\Delta L$, $\Delta L_2 = \Delta L \tan \theta$, $\Delta L_3 = 0$ 。 f_{ij} 为柔度系数,表示基本结构在 $X_j=1$ ($j=1,2,3$)单独作用下,沿 X_i ($i=1,2,3$)方向产生的位移,用图乘法计算可得斜梁型微致动器的柔度系数为:

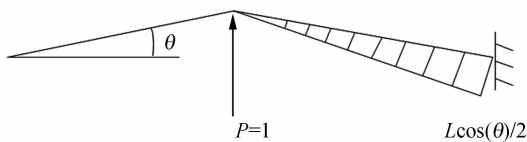
$$\begin{aligned} f_{11} &= \frac{L^3 \sin^2(2\theta)}{24EI}, f_{22} = \frac{L^3 \cos^2 \theta}{3EI} \\ f_{12} &= f_{21} = \frac{5L^3 \sin(2\theta)}{48EI}, f_{33} = \frac{L}{EI} \\ f_{13} &= f_{31} = -\frac{L^2 \sin(2\theta)}{8EI}, f_{23} = f_{32} = -\frac{L^2}{2EI}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: E 为杨氏模量, I 为截面二次矩。



(a) 基本体系

(a) Rigid frame with three redundants



(b) 施加单位虚载

(b) Moment of actuator with unit redundant force

图2 力法计算模型

Fig. 2 Computational model of force method

求出约束力后,运用虚功原理,选取合适体系,在所求位移处施加如图2(b)所示的单位虚载荷 $P=1$,可得微致动器沿运动方向的位移计算模型:

$$D = \int \frac{\bar{M}(x)M(x)}{EI} dx = \frac{L^2}{8EI} \left(\frac{L}{6} X_2 - X_3 \right) \cos \theta. \quad (8)$$

2.3 位移保持性分析模型

在式(1)中计入时间项,分析微致动器的动态特性,可得:

$$\frac{d^2 T(x,t)}{dx^2} = \frac{UP}{Ak_p} [T(x,t) - T_a] - \frac{V(t)^2}{k_p \rho(T)L^2}, \quad (9)$$

式中各参数与前文相同,边界条件为:

$$T(0,t) = T(L,t) = T(x,0) = T_a. \quad (10)$$

利用有限差分法求解,可得温度变化与时间的关系,进一步计算可得输出位移与时间的关系,从而分析微致动器的位移保持性。

3 模型计算、验证与分析

3.1 电阻率测定

电热微致动器利用电流产生的焦耳热致动,微致动器的电阻率对焦耳热影响较大。对北京大学和 PolyMUMPs 两种表面硅工艺制作的电热微致动器做了测试,并计算了室温下的电阻率 ρ_0 ,结果如表1所示。测试结果表明,常温下,不同工艺微致动器的电阻率相差很大,其原因是电阻率由硅的磷掺杂率决定,不同工艺的掺杂率不同,电阻率也不同。

表1 不同工艺的微致动器电阻率测定结果

Tab. 1 Resistivity measuring results of microactuator with different processes

工艺	微致 动器	片1 /kΩ	片2 /kΩ	片3 /kΩ	均值 /kΩ	电阻率均值 /Ωm
北京大学 表面工艺	A ₁	13.72	13.54	13.69	13.65	3.06×10^{-4}
	A ₂	29.64	29.14	29.72	29.50	
PloyMUMPs	A ₁	1.012	0.968	1.063	1.01	2.06×10^{-5}
	A ₂	1.783	1.718	1.878	1.79	

3.2 有限元分析

用有限元法(Finite Element Analysis, FEA)对微致动器进行分析。利用ANSYS软件的电-热-结构多物理场耦合分析功能,选取10节

点四面体 3D 单元 SOLID98, 在电极两端加载电压, 热边界条件为电极与衬底温度相同, 结构边界条件为电极的运动自由度完全约束, 输出为微致动器的温度场和位移场。

选用北京大学表面工艺制作的微致动器进行分析, 图 3 所示为微致动器的温度分布图, 理论计算和 FEA 结果一致, 最高温度出现在微致动器的中间位置。改变电阻率和热传导率, 当电压相同时, 电阻率和热传导率越小, 温度越高。图 4 所示为微致动器输出位移与电压关系, 输出位移随电压增大而非线性增大。

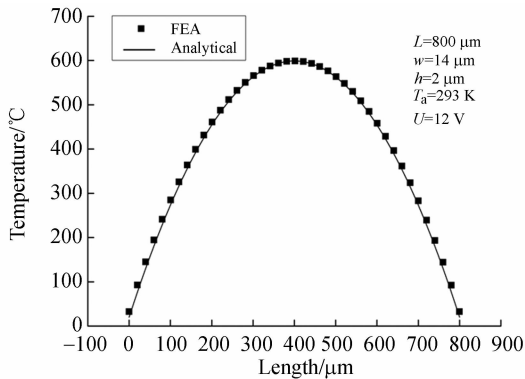


图 3 微致动器的温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution comparison of FEA and analysis

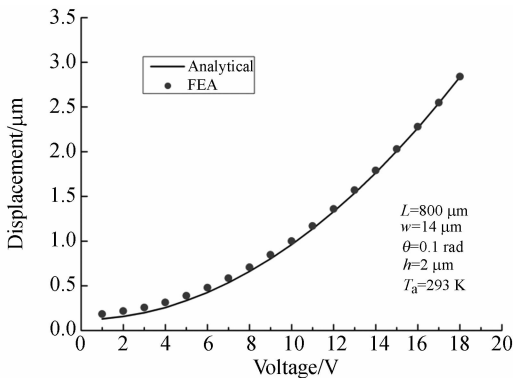


图 4 微致动器的电压与位移关系图

Fig. 4 Displacement as a function of the driving voltage

3.3 实验验证

将微致动器所在的样片放置在微探针台上, 通过探针将电压加到微致动器的电极上, 用装在光学显微镜上的 CCD 拍摄微致动器在不同电压下的照片, 通过图像处理软件, 获得微致动器的精确位移。测试系统的实物照片如图 5 所示, 该系统的测试精度由显微镜物镜的光学分辨率决定。

实验过程中, 为确保探针与电极形成可靠的电接触, 可通过在探针引线间串联的欧姆表测定的阻值判定, 若形成可靠连接, 则阻值显示为稳定值。

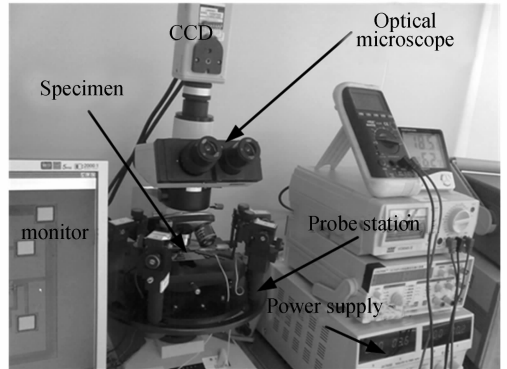


图 5 测量设备照片

Fig. 5 Experiment equipment for measuring displacement

3.3.1 像素对比法比例系数测定

通过像素对比法可将拍摄的位移照片换算成长度单位的位移值, 换算的关键是标定, 即确定实际尺寸和像素值之间的比例系数。相互对比的图像要在相同的放大倍率下和相同的对比度、亮度条件下拍摄, 用图像处理软件处理时, 要在相同放大倍数下测量。为提高测量精度, 标定时可在同一放大倍率下对多个被测对象进行测量。比例尺的大小影响测量误差的传递, 同一结构, 放大倍数越大像素越多, 比例尺越小, 测量越准确^[14-15]。表 2 所示为在 500 倍放大倍率下的标定结果。

表 2 像素对比法比例尺的标定结果

Tab. 2 Results of pixel contrast scale calibration

测量次数	物长 /μm	像素长 /pixel	物长 / 像素长	比例尺 (平均值)	3σ
1	2	15.5	0.129 03	0.127 05	0.005 3
2	4	31.5	0.126 98		
3	7.5	60	0.125 00		
4	9	71.5	0.125 87		
5	12	95.5	0.125 65		
6	15	115.5	0.129 76		

3.3.2 实测位移、FEA 和理论计算结果对比与分析

图 6 所示为实测位移与 FEA、理论计算结果的对比如图。电压较低时, 理论计算、FEA 与实测数据基本一致, 电压小于 9 V 时, 最大相对误差为 2.2%。随着电压增大, 实测位移值略小于 FEA

和理论计算值。电压增大,误差逐渐增大,最大相对误差为 12.8%。高电压下误差较大的原因是微致动器在高电压下温度很高,热传导系数、热膨胀系数随温度升高而发生改变,与带入理论公式的值不同,影响理论计算位移的大小。最大误差发生在 18 V 电压下,因为 18 V 已达到该微致动器的极限电压,此时微致动器最高温度已接近熔点,微致动器的斜梁发生翘曲,实测值小于理论计算值,且断电后不能恢复原位,发生失效。在两个因素的共同作用下,误差增大。另外由于工艺特点,微致动器与衬底间始终有变化的摩擦力,而摩擦力与工作环境、释放方法有关,很难在模型中考虑,且试件尺寸与理论尺寸存在加工误差,这些都会导致实测值与理论计算值出现偏差。

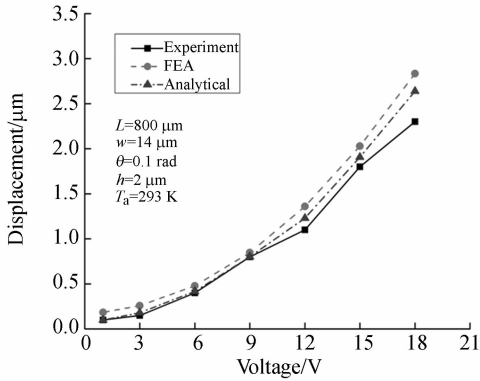


图 6 微致动器的电压位移对比图

Fig. 6 Comparison of analytical model, FEA and experiment displacement results

3.3.3 微致动器输出位移的可重复性和保持性测定

计算式(9)可得,微致动器在前 20 ms 时平均温度增加很快,而后平均温度趋于稳定值。结构尺寸为 $800 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 、倾角为 0.1 rad 的微致动器,在 12 V 电压下,平均温度稳定在 $406.048 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温度稳定后,微致动器的位移也稳定,说明微致动器在 20 ms 后,若电压不发生变化,则微致动器的热量传播与耗散处于稳定,微致动器的位移也保持在稳定值。

为进一步分析微致动器输出位移的可靠性,测试了微致动器在不同时刻施加同样电压后输出位移的可重复性,并测试了同一电压下输出位移的保持性。为保证测试结果的可靠性,每次测试均在相同温度和湿度的净化环境下测定,且每次

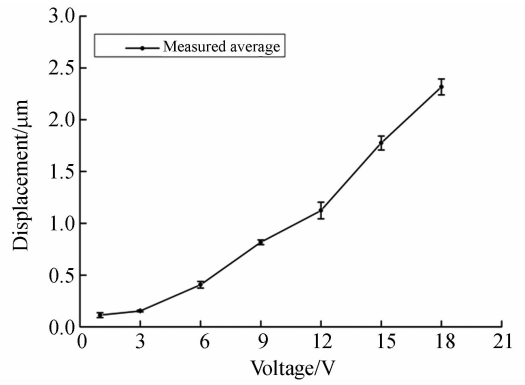


图 7 输出位移重复性测量结果

Fig. 7 Repeatability experiment results of output displacement

测定间隔一定时间,确保微致动器完全冷却,不受上次测量残余温度对微致动器输出位移的影响。图 7 所示为多次测量的平均值,误差为标准偏差,可见在不同时刻的测量中,低电压下输出位移的变化不大,高电压下输出位移稍有波动,总体位移可重复性好。同样,测试了同一电压下微致动器输出位移的保持性,发现微致动器在输出电压不变的情况下,位移输出不变,说明微致动器有良好的位移保持性,与理论计算结果相符。

3.4 结构参数对输出位移的影响

微致动器的输出位移与结构参数有关,由位移计算模型可知,输出位移随微致动器的长度增大而增大,随微致动器的宽度减小而增大,即长宽比越大,位移越大,但长宽比过大,制造困难,发生黏附的几率增大,可靠性降低。微致动器斜梁的倾角也是影响输出位移的主要参数,图 8 所示为

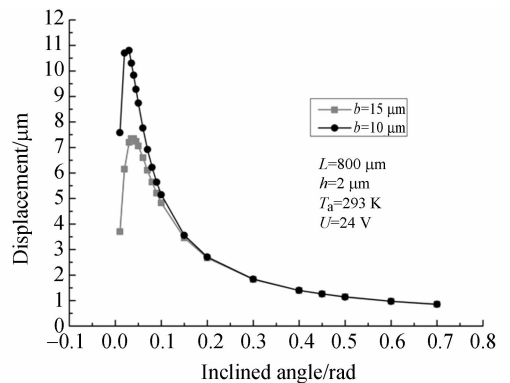


图 8 微致动器位移与倾角的关系

Fig. 8 Displacement as a function of inclined angle of beam

微致动器位移与斜梁倾角的关系曲线,在 0.04 rad 时出现最大输出位移,随后无论倾角增大或减小,位移输出均减小。倾角大于 0.5 rad 以后,倾角变化对最大位移输出的影响将不明显。相同倾角下,位移随宽度增大而减小。由于 0.04 rad 的倾角在工艺上难以保证,因此,设计中斜梁倾角一般取 0.1~0.4 rad。

3.5 工艺对输出位移的影响

文中进一步研究工艺对输出位移的影响,并对比了两种工艺的位移特点。对结构尺寸为 $1\ 300\ \mu\text{m} \times 14\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$,倾角为 0.1 rad 的微致动器进行测试,图 9 所示为两种不同工艺的输出位移与电流的变化关系。北京大学工艺制作的微致动器,承受的最大电压为 50 V,此时电流为 4.82 mA,位移为 $0.829\ \mu\text{m}$ 。PolyMUMPs 工艺

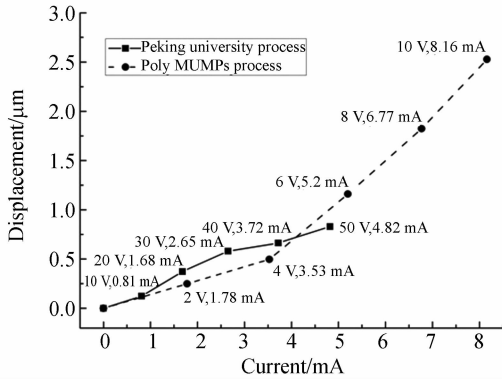


图 9 不同工艺电流位移关系图

Fig. 9 Comparison of displacement with different processes

制作的微致动器,承受的最大电压为 10 V,此时电流为 8.16 mA,位移为 $2.527\ \mu\text{m}$ 。电流小于 4 mA 时,北京大学工艺的微致动器位移略大于 PolyMUMPs 工艺,当电流大于 4 mA 时则相反。说明工艺对微致动器的位移有影响,详细分析两种工艺流程,发现两种工艺的流程基本一致,出现以上结果的原因主要是两种工艺对多晶硅结构层的磷掺杂率不同,导致电阻率不同,从而输出位移不同,这与前面对电阻率的测试结果是一致的。

4 结 论

本文利用电热平衡原理和力法原理,推导了斜梁型电热微致动器的位移计算公式和位移保持性分析模型。应用 FEA 和实验对求得的位移进行了验证:与实验结果相比,电压为 8 V 时,公式计算值与实测值的相对误差为 2.2%;电压为 18 V 时,相对误差为 12.8%。测试了微致动器的位移可重复性和保持性,分析了结构参数对微致动器输出位移的影响。结果显示,位移随梁长度增大、宽度减小而增大,斜梁倾角为 0.04 rad 时位移最大。最后对比了两种不同工艺对微致动器输出位移的影响,结果表明,工艺对微致动器输出位移有影响,设计时应根据工艺特点和负载条件,合理选择设计参数。本文推导的斜梁型电热微致动器的输出位移计算公式合理,能够为该类微致动器的设计和计算提供理论依据。

参考文献:

- [1] 张然,褚金奎,王海洋,等. 具有三层结构的 SU-8 胶 V 形微电热驱动器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1500-1508.
ZHANG R, CHU J K, WANG H X, et al.. SU-8 chevron electrothermal micro-actuator with three-layer structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1500-1508. (in Chinese)
- [2] 刘英明,徐静,钟少龙,等. 垂直梳齿驱动的大尺寸 MOEMS 扫描镜[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 400-407.
LIU Y M, XU J, ZHONG SH L, et al.. Large-scale MOEMS scanning mirror actuated by vertical comb [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 400-407. (in Chinese)
- [3] GUAN C H, ZHU Y. An electrothermal microac-

- tuator with Z-shaped beams [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2010, 20(8): 5014-5020.
- [4] LIN L W, CHIAO M. Electrothermal responses of lineshape microstructures [J]. *Sens. Actuators A Phys.*, 1996, 55(1): 35-41.
- [5] ZHU Y, CORIGLIANO A, ESPINOSA H D. A thermal actuator for nanoscale in situ microscopy testing: design and characterization [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2006, 16(2): 242-253.
- [6] WITTFWER J W, BAKER M S, HOWELL L L. Simulation, measurement, and asymmetric buckling of thermal microactuators [J]. *Sens. Actuators A Phys.*, 2006, 128(2): 395-401.
- [7] PATOWARI P K, BHARALI A S, NATH M M, et al.. Analysis of a monometallic two arm horizontal thermal actuator for MEMS [C]. *In Proceeding*

of the International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, Kyoto, Japan, 1-3 August 2010, 1184-1188.

- [8] HUANG Q A, LEE N K S. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator [J]. *J. Micro-mech. Microeng.*, 1999, 9(1):64-70.
- [9] YAN D, KHAJEPOUR A, MANSOUR R. Modeling of two-hot-arm horizontal thermal actuator [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2003, 13(2):312-322.
- [10] KUANG Y, HUANG Q A, LEE N K S. Numerical simulation of a polysilicon thermal flexure actuator [J]. *Microsyst. Technol.*, 2002, 8(1):17-21.
- [11] 刘泽文, 田昊, 刘冲. 微加热器热传导试验与计算 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 612-619.
LIU Z W, TIAN H, LIU CH. Experiment and thermal calculation of micro heater [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 612-619. (in Chinese)
- [12] 黎仁刚, 黄庆安, 李伟华. 热电耦合微执行器温度分布的节点分析法 [J]. *半导体学报*, 2005, 26(3): 562-566.
LI R G, HUANG Q A, LI W H. A nodal analysis method for temperature distribution of thermo-electrical coupled thermal microactuators [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(3): 562-566. (in Chinese)
- [13] ZHANG Y Y, SHEN X J, CHEN X Y. Model of polysilicon electro-thermal micro actuator and research of micro scale effect [J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science*, 2004, 19(S1): 59-62.
- [14] 张舞杰, 杨义禄, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 294-301.
ZHANG W J, YANG Y L, LI D, et al.. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 294-301. (in Chinese)
- [15] 裴旭, 李远明, 侯振兴. 大行程转动柔性铰链性能测试方法及实验 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4) 927-933.
PEI X, LI Y Y, HOU ZH X. Performance measurement and experiment for rotational flexural joint with large-stroke [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 927-933. (in Chinese)

作者简介:



王振禄(1980—),男,甘肃通渭人,博士研究生,讲师,2006年于兰州交通大学获得硕士学位,主要从事 MEMS 器件设计、MEMS 机械性能分析等方面的研究。E-mail: wangz1928@shu.edu.cn



陈晓阳(1960—),男,江苏镇江人,教授,博士生导师,1993年于浙江大学获得博士学位,主要从事滚动轴承摩擦学、机械设计及 MEMS 性能分析等方面的研究。E-mail: xychen@shu.edu.cn

导师简介:



沈雪瑾(1963—),女,江苏苏州人,教授,博士生导师,2007年于上海大学获得博士学位,主要从事 MEMS 机械学、摩擦学等方面的研究。E-mail: shenxj@shu.edu.cn