

## 多晶硅热执行器阵列的宏模型<sup>\*</sup>

黄庆安 章彬 匡一宁 秦明

(东南大学微电子中心, 南京 210096)

**摘要:** 建立了多晶硅热执行器阵列的宏模型。利用热传导原理分析了执行器的电热特性, 根据结构力学原理给出了执行器阵列的偏转及驱动力。用多晶硅表面微机械加工技术制备了阵列并进行了测试。执行器偏转的测量与实验吻合较好。该宏模型可以用于分析、优化和设计热执行器阵列。

**关键词:** 多晶硅; 热执行器; 阵列; 宏模型

**EEACC:** 2575; 8460

**中图分类号:** TN304. 1<sup>+</sup> 2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-4177(2000)09-0904-10

## Macromodel for Polysilicon Thermal Actuator Array<sup>\*</sup>

HUANG Qing-an, ZHANG Bin, KUANG Yi-ning and QIN Ming

(Microelectronics Center, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Received 16 July 1999, revised manuscript received 2 March 2000

**Abstract:** An analytical model is developed for a laterally-driven polysilicon thermal flexure actuator array. An electrothermal analysis has been first performed based on conduction heat transfer. Deflection and actuating force for the actuator array are then presented by elastic analysis of structures. A surface-micromachined polysilicon thermal flexure array has been fabricated and tested. Experimental results for the deflection are in good agreement with theoretical predication except high input power. The macromodel may therefore serve as an efficient tool in the analysis and optimization of new designs as well as the operation of such an actuator array, leading to the possibility of a significant improvement in performance.

\* 教育部优秀年轻教师基金资助项目(编号 605) [Project Supported by Excellent Youth Teacher Foundation of Ministry of Education Under No. 605].

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事微电子技术教学和 MEMS 研究。

章彬 男, 1972 年出生, 博士生, 主要从事无线通讯 MEMS 器件研制。

匡一宁 男, 1974 年出生, 硕士生, 主要从事 MEMS CAD 研究。

秦明 男, 1967 年出生, 博士, 主要从事 MEMS 研究。

1999-07-16 收到, 2000-03-02 定稿

**Key words:** polysilicon; thermal actuator; array; macromodel

**EEACC:** 2575; 8460

**Article ID:** 0253-4177(2000)09-0904-10

## 1 引言

对于元件定位、检测和组装等应用领域,要求执行器能够提供高的驱动力或位移。通过串联或并联方式将执行器连接成阵列是行之有效的方式之一<sup>[1-4]</sup>。微执行器常见的驱动方式有静电、磁和热驱动。根据应用的要求,可选择合适的驱动方式。热驱动微执行器工作频率低,但其电压容易与IC的工作电压兼容,已得到一定的应用。常见的热驱动微执行器结构是利用双层材料的热膨胀系数的差别(即Bimorph效应)<sup>[5]</sup>。这种结构提供的偏转通常是垂直于衬底方向。类似于Bimorph结构,Guckel等人提出了横向驱动的热执行器<sup>[6]</sup>。对单个热执行器的结构和工艺参数已进行了较广泛的研究<sup>[6-9]</sup>。由于阵列结构有较多的连接点,分析其性能甚为复杂,因此阵列结构的分析还未见报道。本文的目的就是建立这种执行器阵列工作的宏模型。该模型反映了执行器阵列的结构尺寸和材料参数,可用于执行器阵列的设计和优化。文中首先通过热传导原理分析了执行器阵列的电热特性,然后用结构力学的方法分析了阵列的偏转和驱动力。用多晶硅表面微机械加工技术制备了阵列,并进行了测试。测量出的偏转和宏模型进行了比较。除在高的输入功率下,宏模型和实验吻合较好。最后对阵列的设计和宏模型的局限性进行了讨论。

## 2 理论模型

如图1(a)所示,执行器两个电极固定,当电流通过执行器时,在较窄的臂中有较高的电流密度,因此窄臂(常称为热臂)的温度比宽臂(常称为冷臂)高。最终结果是热臂比冷臂膨胀量大。由于自由端连接在一起,所以热膨胀使执行器自由端向冷臂方向作弧向运动。用多晶硅表面微机械加工技术可容易制备该种执行器,并通过调节多晶硅的电阻率使执行器工作在IC电流/电压范围<sup>[4]</sup>。阵列的结构示于图1(b),它用一个柔顺的叉架将两个执行器连接。这种结构不仅使两个执行器的驱动力叠加,而且把两个执行器的弧向运动转换成叉架的直线运动。由于结构的对称性,仅对结构的半边进行分析,但考虑了两个执行器之间的相互作用。

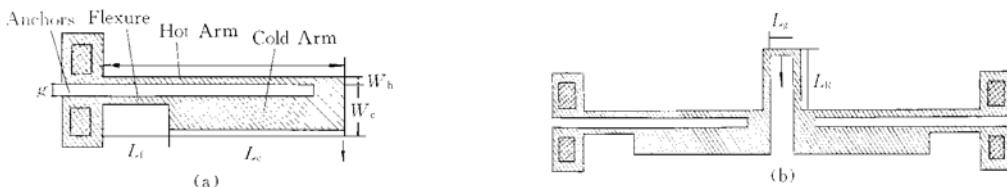


图1 (a)横向驱动多晶硅热执行器的顶视图;(b)阵列的一个单元顶视图。

FIG. 1 (a) Top View of Laterally-Driven Polysilicon Thermal Actuator;  
(b) Top View of Actuator cell

### 2.1 电热分析

由于梁的长度远比宽度或厚度尺寸大,故一般多晶硅梁的电热分析都采用一维近似<sup>[10,11]</sup>。在表面微机械加工执行器结构中, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 和 $\text{SiO}_2$ 用作电和热的绝缘层,因此,必须考虑通过这两层的热传导。图1(b)中执行器阵列的梁可分成四个部分——热臂、冷臂、弯曲臂和叉架臂。描述这四段梁的热传导方程形式相同,只是几何尺寸和边界条件不同。

多晶硅电阻率  $\rho$  通常与温度有关, 本文假定电阻率有线性温度系数  $\xi$ , 即

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \xi(T - T_s)] \quad (1)$$

式中  $T$  是梁的工作温度;  $T_s$  是衬底温度. 如果仅考虑多晶硅梁向电极的热传导以及向衬底的热传导, 容易得到热导方程<sup>[11]</sup>

$$k_p \frac{d^2T}{dx^2} + J^2 \rho = \frac{S}{h} \frac{T - T_s}{R_T} \quad (2)$$

式中  $k_p$  是多晶硅的热导率;  $J$  是电流密度;  $S$  是梁向衬底热传导的形状因子;  $h$  是梁的厚度;  $R_T$  是梁和衬底之间的热阻. 热阻、形状因子和电流密度分别由下式给出<sup>[11]</sup>:

$$R_T = \frac{t_v}{k_v} + \frac{t_n}{k_n} + \frac{t_o}{k_o} \quad (3)$$

$$S = \frac{h}{w} \left[ \frac{2t_v}{h} + 1 \right] + 1 \quad (4)$$

$$J = \frac{I}{wh} \quad (5)$$

式中  $w$  是梁的宽度;  $I$  是电流;  $t_v, t_n, t_o$  分别是空气层的厚度、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  的厚度、 $\text{SiO}_2$  的厚度;  $k_v, k_n, k_o$  分别是空气层的热导率、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  的热导率、 $\text{SiO}_2$  的热导率. 将方程(1)代入方程(2), 并通过参数变换得到

$$\frac{d^2\Theta(x)}{dx^2} - m^2\Theta(x) = 0 \quad (6)$$

式中

$$\Theta(x) = T(x) - T_\theta$$

$$T_\theta = T_s + \frac{J^2 \rho_0}{k_p m^2}$$

$$m^2 = \frac{S}{k_p h R_T} - \frac{J^2 \rho_0 \xi}{k_p} \quad (7)$$

解方程(6)并将解分别应用到热臂、冷臂、弯曲臂和叉架, 可以得到这四部分梁的温度分布为:

$$T_h(x) = T_H + c_1 e^{m_h x} + c_2 e^{-m_h x} \quad (7a)$$

$$T_c(x) = T_C + c_3 e^{m_c x} + c_4 e^{-m_c x} \quad (7b)$$

$$T_f(x) = T_F + c_5 e^{m_f x} + c_6 e^{-m_f x} \quad (7c)$$

$$T_j(x) = T_J + c_7 e^{m_j x} + c_8 e^{-m_j x} \quad (7d)$$

式中  $c_j (j=1 \text{ 到 } 8)$  是待定常数;  $T_H, T_C$  与  $T_\theta$  形式完全相同, 只是用  $w_h$  和  $w_c$  代替  $w$ ;  $m_h$  和  $m_c$  与  $m$  形式完全相同, 只是用  $w_h$  和  $w_c$  代替  $m$  中的  $w$ ;  $w_h, w_c$  分别是热臂和冷臂的宽度, 由于弯曲臂的宽度与热臂的宽度相同, 故  $T_F = T_H, m_f = m_h; T_J$  与  $T_\theta, m_j$  与  $m$  形式相同, 只是用  $J=0$  和  $w_h$  代替  $T_\theta$  和  $m$  式中的  $J$  和  $w$ . 叉架臂的宽度假定等于热臂的宽度.

如果假定电极的温度等于衬底的温度, 利用连接点处温度连续, 热传导变化率连续, 就可得到求解  $c_j (j=1 \text{ 到 } 8)$  的方程:

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = T_s - T_H \\ c_1 e^{m_h L} + c_2 e^{-m_h L} - c_3 e^{m_c(L+g)} - c_4 e^{-m_c(L+g)} = T_C - T_H \\ c_1 e^{m_h L} + c_2 e^{-m_h L} - c_7 e^{m_j L} - c_8 e^{-m_j L} = T_J - T_H \\ c_1 e^{m_h L} - c_2 e^{-m_h L} + c_3 \frac{m_c w_c}{m_h w_h} e^{m_c(L+g)} - c_4 \frac{m_c w_c}{m_h w_h} e^{-m_c(L+g)} - c_7 \frac{m_i}{m_h} e^{m_j L} + c_8 \frac{m_i}{m_h} e^{-m_j L} = 0 \\ c_7 e^{m_j(L+L_R+L_g/2)} - c_8 e^{-m_j(L+L_R+L_g/2)} = 0 \\ c_3 e^{m_c L_f} + c_4 e^{-m_c L_f} - c_5 e^{m_f L_f} - c_6 e^{-m_f L_f} = T_H - T_C \\ c_3 \frac{m_c w_c}{m_h w_h} e^{m_f L_f} - c_4 \frac{m_c w_c}{m_h w_h} e^{-m_f L_f} - c_5 e^{m_f L_f} + c_6 e^{-m_f L_f} = 0 \\ c_5 + c_6 = T_s - T_H \end{cases} \quad (8)$$

式中  $L$ 、 $L_c$ 、 $L_f$  和  $L_R$  分别是热臂的长度、冷臂的长度、弯曲臂的长度和叉架的长度;  $g$  是热臂和冷臂之间的间距;  $L_g$  是叉架的间隙。一旦  $c_j$  ( $j=1$  到 8) 求出, 就可得到多晶硅的电阻:

$$R = \int_0^{2L+g} dR(T) = \frac{L\rho_0}{w_h h} [1 + \xi(T_h - T_s)] + \frac{(L_c + g)\rho_0}{w_c h} [1 + \xi(T_c - T_s)] + \frac{L_f\rho_0}{w_c h} [1 + \xi(T_f - T_s)] \quad (9)$$

式中  $T_h$ 、 $T_c$  和  $T_f$  分别表示热臂、冷臂和弯曲臂的平均温度。用  $T_R$  和  $T_g$  分别表示叉架臂及其间隙段的平均温度, 则各臂的平均温度表示为:

$$T_h = T_H + \frac{c_1}{m_h L} (e^{m_h L} - 1) - \frac{c_2}{m_h L} (e^{-m_h L} - 1) \quad (10)$$

$$T_c = T_C + \frac{c_3}{m_c (L_c + g)} (e^{m_c (L+g)} - e^{m_c L_f}) - \frac{c_4}{m_c (L_c + g)} (e^{-m_c (L+g)} - e^{-m_c L_f}) \quad (11)$$

$$T_f = T_F + \frac{c_5}{m_h L_f} (e^{m_h L_f} - 1) - \frac{c_6}{m_h L_f} (e^{-m_h L_f} - 1) \quad (12)$$

$$T_R = T_J + \frac{c_7}{m_j L_R} (e^{m_j (L+L_R)} - e^{m_j L}) - \frac{c_8}{m_j L_R} (e^{-m_j (L+L_R)} - e^{-m_j L}) \quad (13)$$

$$T_g = T_J + \frac{2c_7}{m_j L_g} (e^{m_j (L+L_R+L_g/2)} - e^{m_j (L+L_R)}) - \frac{2c_8}{m_j L_g} (e^{-m_j (L+L_R+L_g/2)} - e^{-m_j (L+L_R)}) \quad (14)$$

为计算阵列的偏转, 需知道每一段臂的膨胀量。根据线性膨胀假设, 可求出热臂、冷臂、弯曲臂、热臂与冷臂之间的间隙段、叉架臂及其间隙段的膨胀为:

$$\Delta L_h = \alpha L (T_h - T_s) \quad (15)$$

$$\Delta L_c = \alpha L_c (T_c - T_s) \quad (16)$$

$$\Delta L_f = \alpha L_f (T_f - T_s) \quad (17)$$

$$\Delta g = \alpha g (T_g - T_s) \quad (18)$$

$$\Delta L_R = \alpha L_R (T_R - T_s) \quad (19)$$

$$\Delta L_g = \alpha (L_g/2) (T_g - T_s) \quad (20)$$

式中  $\alpha$  是多晶硅热膨胀系数。

对于给定的工艺参数(如  $\rho_0$  和  $\xi$ )、几何尺寸和驱动电流, 由方程(7)—(8)可计算出执行器的温度分布。图 2 给出了温度分布, 所用参数在图中给出。其它物理常数列在表 1。从该图看出, 热臂的大部分区段之温度远比冷臂温度高。分析同样表明, 向衬底的热传导强烈地影响执行器的温度。

表 1 多晶硅的有关物理常数

Table 1 Physical Constant for Polysilicon

单位符号	参数值
杨氏模量, $E$	$150 \times 10^9 \text{ Pa}$
多晶硅热膨胀系数, $\alpha$	$2.7 \times 10^{-6}/\text{°C}$
多晶硅热导率, $k_p$	$30 (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C})$
空气热导率, $k_v$	$0.026 (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C})$
$\text{Si}_3\text{N}_4$ 热导率 $k_n$	$2.25 (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C})$
$\text{SiO}_2$ 热导率 $k_o$	$1.4 (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C})$
衬底温度, $T_s$	$20 \text{ °C}$

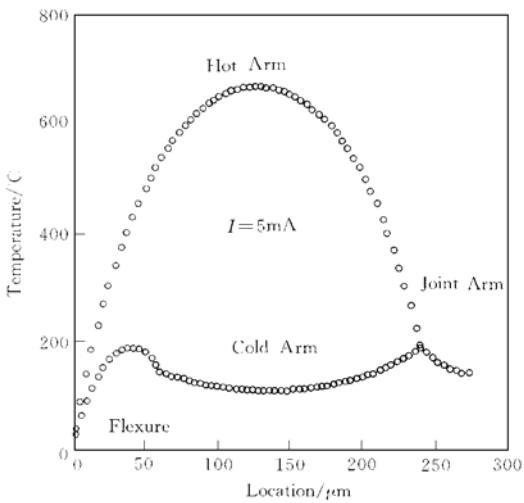


图 2 多晶硅的温度分布

其中  $\rho_0 = 1.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\xi = 1.3 \times 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$ ,  $L = 240 \mu\text{m}$ ,  $L_c = 180 \mu\text{m}$ ,  $L_R = 60 \mu\text{m}$ ,  $L_g = 10 \mu\text{m}$ ,  $g = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $w_h = 3 \mu\text{m}$ ,  $w_c = 12 \mu\text{m}$ ,  $I = 5 \text{ mA}$ 。

FIG. 2 Temperature Profile for Polysilicon Beam

由于空气的热导率很小, 故空气层的厚度控制了执行器向衬底的热传导。实验已经表明, 在多晶硅下衬底中腐蚀出的深槽可明显降低执行器向衬底的热传导, 因而可提高热臂的温度, 最终引起较大的偏转<sup>[12]</sup>。在较高的输入功率下, 热臂的热辐射变得重要<sup>[9]</sup>。本文中没有考虑热辐射, 主要是因为执行器正常工作时所加功率不大, 还没有引起较强的热辐射; 同时若加驱动功率过大, 可能引起多晶硅结构及电阻的不可逆变化。

## 2.2 偏转分析

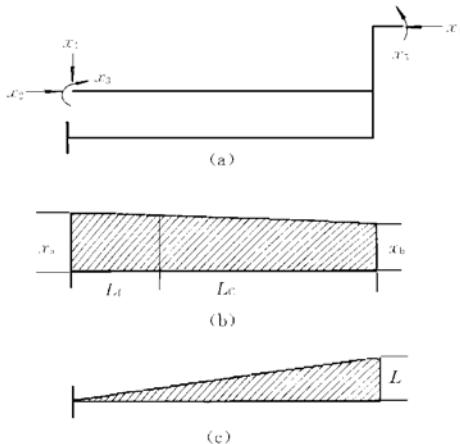


图 3 (a) 阵列的平面刚架表示, 有 5 个未知力;  
(b) 热膨胀引起的冷臂弯矩图;  
(c) 单位力引起的冷臂弯矩图。

FIG. 3 (a) Plane Rigid Figure for Array with 5 Unknown Forces; (b) Bending Moment Diagram for Cold Arm Due to Thermal Expansion; (c) Bending Moment Diagram for Cold Arm Due to Unit Force

根据结构分析, 可求出

$$[\Delta t]^T = [\Delta g \quad \Delta L_h - \Delta L_e - \Delta L_f \quad 0 \quad \Delta L_g + \Delta L_e + \Delta L_f \quad 0] \quad (23)$$

式中  $[\Delta T]^T$  表示  $[\Delta T]$  的转置矩阵。柔顺系数可由 5 个单位未知力引起的弯矩图分别相乘得到,

$$f_{11} = \frac{L^3}{3EI_h} + \frac{gL^2}{EI_e} + \frac{L^3}{3EI_f} + \frac{L^3}{3EI_e} - \frac{L^3}{3EI_e} \quad (24a)$$

$$f_{12} = f_{21} = -\frac{g^2L}{2EI_e} - \frac{L^2g}{2EI_f} - \frac{g^2L}{2EI_e} + \frac{L^2g}{2EI_e} \quad (24b)$$

$$f_{13} = f_{31} = -\frac{L^2}{2EI_h} - \frac{Lg}{EI_e} - \frac{L^2}{2EI_f} - \frac{L^2}{2EI_e} + \frac{L^2}{2EI_e} \quad (24c)$$

$$f_{14} = f_{41} = \frac{(g + 2L_R)gL}{2EI_e} + \frac{(g + L_R)L_f^2}{2EI_f} + \frac{(g + L_R)L_e^2}{2EI_e} - \frac{(g + L_R)L_f^2}{2EI_e} \quad (24d)$$

$$f_{15} = f_{51} = \frac{Lg}{EI_e} + \frac{L_f^2}{2EI_f} + \frac{L^2}{2EI_e} - \frac{L_f^2}{2EI_e} \quad (24e)$$

$$f_{22} = \frac{g^3}{3EI_e} + \frac{g^2L_f}{EI_f} + \frac{g^2L_e}{EI_e} \quad (24f)$$

$$f_{23} = f_{32} = \frac{g^2}{2EI_e} + \frac{gL_f}{EI_f} + \frac{gL_e}{EI_e} \quad (24g)$$

$$f_{24} = f_{42} = -\frac{2(g + L_R)g^2 + L_Rg^2}{6EI_e} - \frac{(g + L_R)L_e g}{EI_e} - \frac{(g + L_R)L_f g}{EI_f} \quad (24h)$$

图 1(b)给出的执行器阵列结构非常类似于结构力学中四端固定的平面刚架<sup>[13]</sup>。该结构是一个静态不确定结构, 不确定度等于 5。由于阵列的对称性, 叉架中点处的剪切力不存在。本文采用结构力学的方法分析阵列结构的弯矩。5 个未知力  $X_1, X_2, X_3, X_4$  和  $X_5$  引起的弯矩如图 3(a)所示。其中,  $X_1, X_2$  和  $X_3$  分别表示与电极连接处臂所受的水平力、垂直力和力偶,  $X_4$  和  $X_5$  分别表示叉架中心所受的垂直力和力偶。用虚功原理求结构在温度影响下引起的偏转。

根据方法, 5 个未知力可由下面的一组方程求出<sup>[13]</sup>,

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} & f_{45} \\ f_{51} & f_{52} & f_{53} & f_{54} & f_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \\ \Delta t_4 \\ \Delta t_5 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中  $f_{ij}$  表示柔顺系数;  $\Delta t_j$  ( $j=1$  到 5) 表示两个受力点处由于温度变化引起的各方向的位移。上述方程可重写为

$$[f][X] = [\Delta t] \quad (22)$$

$$f_{25} = f_{52} = -\frac{g^2}{2EI_c} - \frac{gL_f}{EI_f} - \frac{gL_c}{EI_c} \quad (24i)$$

$$f_{33} = \frac{L}{EI_b} + \frac{g}{EI_c} + \frac{L_f}{EI_f} + \frac{L_c}{EI_c} \quad (24j)$$

$$f_{34} = f_{43} = -\frac{(g + L_R)g + gL_R}{2EI_c} - \frac{(g + L_R)L_f}{EI_f} - \frac{(g + L_R)L_c}{EI_c} \quad (24k)$$

$$f_{35} = f_{53} = -\frac{g}{EI_c} - \frac{L_f}{EI_f} - \frac{L_c}{EI_c} \quad (24l)$$

$$f_{44} = \frac{L_R^3}{3EI_R} + \frac{g(L_R^2 + (g + L_R)^2 + L_R(g + L_R))}{3EI_c} + \frac{L_f(g + L_R)^2}{EI_f} + \frac{L_c(g + L_R)^2}{EI_c} \quad (24m)$$

$$f_{45} = f_{54} = \frac{L_R^2}{2EI_R} + \frac{(g + L_R)g + L_Rg}{2EI_c} + \frac{(g + L_R)L_f}{EI_f} + \frac{(g + L_R)L_c}{EI_c} \quad (24n)$$

$$f_{55} = \frac{L_g}{2EI_R} + \frac{L_R}{EI_c} + \frac{g}{EI_c} + \frac{L_f}{EI_f} + \frac{L_c}{EI_c} \quad (24o)$$

式中  $E$  是多晶硅的杨氏模量;  $I_b$ 、 $I_f$  和  $I_R (= hw^3/12)$  分别表示热臂、冷臂和叉架臂的惯性矩;  $I_c (= hw_c^3/12)$  表示冷臂的惯性矩;  $EI_b$  和  $EI_c$  分别表示热臂和冷臂的柔顺刚度. 通过方程(21) 可求出 5 个未知力. 令  $[f]^{-1}$  表示  $[f]$  的逆矩阵, 则  $[f]^{-1}$  可表示为

$$[f]^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & q_{25} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} & q_{35} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} & q_{45} \\ q_{51} & q_{52} & q_{53} & q_{54} & q_{55} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$[X] = [f]^{-1}[\Delta t] \quad (26)$$

即

$$X_i = \sum_{j=1}^5 q_{ij} \Delta t_j \quad (i = 1 \text{ to } 5) \quad (27)$$

一旦得到 5 个未知力, 由热膨胀引起的冷臂的弯矩, 可表示于图 3(b) 中. 为了得到执行器的偏转, 用一单位虚力施加于叉架的中心, 则由虚力引起的冷臂弯矩, 可表示在图 3(c). 根据虚功法<sup>[13]</sup>, 叉架中心的偏转可表示为

$$u = \int \frac{\bar{M}M}{EI} ds = \frac{L_c^2}{6EI_c}(2X_c + X_b) + \frac{L_f}{6EI_f}[2(X_c L_c + X_a L) + X_a L_c + X_c L] \quad (28)$$

式中

$$X_a = X_3 + X_2 g - X_4(g + L_R) - X_5 \quad (29a)$$

$$X_b = X_3 + X_2 g - X_4(g + L_R) - X_5 - X_1 L \quad (29b)$$

$$X_c = X_3 + X_2 g - X_4(g + L_R) - X_5 - X_1 L + X_1 L_c \quad (29c)$$

式中  $M$  是由于热膨胀引起的冷臂弯矩;  $\bar{M}$  表示单位虚力引起的冷臂的弯矩. 在方程(28) 中, 忽略了叉架间隙段本身的较小变化. 对于给定的驱动电流、工艺参数、几何尺寸, 根据(15) — (20) 式可求出执行器阵列每一段的热膨胀; 根据方程(26) 可求出 5 个未知力; 根据方程(28) 可求出执行器的偏转.

### 2.3 执行力分析

当无外加电流时, 执行器将会保持在静止状态. 如果这时在叉架的中心施加一力  $F$ , 则在  $F$  作用下, 阵列同样会发生偏转. 如果假定力  $F$  引起的偏转等于在外加电流下阵列的偏转, 则  $F$  就是在该电流驱动下阵列的驱动力, 只是  $F$  与阵列的驱动力方向相反.

在力  $F$  作用下, 计算阵列的偏转可采用与热膨胀引起的偏转计算的方法, 用  $Y_j$  ( $j = 1$  到 5) 表示由于力  $F$  引起的结构的 5 个未知力, 则有

$$[f][Y] = [\Delta p] \quad (30)$$

式中

$$[Y]^T = [Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ Y_4 \ Y_5] \quad (31)$$

$$[\Delta p]^T = [\Delta p_1 \ \Delta p_2 \ \Delta p_3 \ \Delta p_4 \ \Delta p_5] \quad (32)$$

式中  $\Delta P_j (j=1 \text{ 到 } 5)$  表示力  $F$  引起的两个选择点在各个方向的位移。根据力法，可求出这些位移为

$$\Delta p_j = -\frac{F}{2} \Delta F_j \quad (j=1 \text{ to } 5) \quad (33)$$

式中

$$\Delta F_1 = -\frac{L_f^2}{6EI_f}(L + 2L_c) - \frac{L_c^2}{6EI_c}(L + 2L_f) \quad (34a)$$

$$\Delta F_2 = \frac{L_f g}{2EI_f}(L + L_c) + \frac{L_c g}{2EI_c} \quad (34b)$$

$$\Delta F_3 = \frac{L_f}{2EI_f}(L + L_c) + \frac{L_c^2}{2EI_c} \quad (34c)$$

$$\Delta F_4 = -\frac{L_f}{2EI_f}(g + L_R)(L + L_c) - \frac{L_c^2}{2EI_c}(g + L_R) \quad (34d)$$

$$\Delta F_5 = -\frac{L_f}{2EI_f}(L + L_c) - \frac{L_c^2}{2EI_c} \quad (34e)$$

从方程(30)，得到

$$[Y] = [f]^{-1}[\Delta p] \quad (35)$$

结合方程(25)、(33)和(34)，得到

$$Y_i = -\frac{F}{2}Z_i \quad (i=1 \text{ to } 5) \quad (36)$$

式中

$$Z_i = \sum_{j=1}^5 q_{ij} \Delta F_j \quad (i=1 \text{ to } 5) \quad (37)$$

类似于方程(28)的推导，执行器的偏转可表示为 5 个未知力  $Y_i (i=1 \text{ 到 } 5)$  的函数，从而反求出执行力为

$$F = -\frac{u}{\frac{L_c^2}{3EI_c}(2Z_c + Z_b) + \frac{L_f}{3EI_f}[2(Z_c L_c + Z_a L) + Z_a L_c + Z_c L]} \quad (38)$$

式中  $Z_a$ 、 $Z_b$  和  $Z_c$  与  $X_a$ 、 $X_b$  和  $X_c$  形式相同，但  $Z_i$  分别用  $Z_i (i=1 \text{ 到 } 5)$  代替。

对于给定的输入电流、几何尺寸和工艺参数，计算的次序为：(1) 计算温度分布；(2) 计算热膨胀；(3) 计算偏转；(4) 计算驱动力。

### 3 实验和讨论

用多晶硅表面微机械加工方法制备了多晶硅热执行器阵列。实验中设计了不同尺寸的结构。用 LPCVD 方法分别淀积了  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、PSG 和多晶硅，然后制作欧姆接触。其中重掺杂多晶硅是在淀积时掺入磷烷制备而成的，掺杂浓度  $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。整个结构制备后，放入缓冲的 HF 中，除去 PSG 牺牲层。然后用去离子水冲洗，并放入异丙醇内浸泡约 10min，之后烘干。本项工艺过程可有效清除多晶硅臂与衬底的粘连。图 4(a) 给出了单个执行器的 SEM 照片，执行器边上的单个多晶硅电阻条用于测试有关多晶硅参数。图 4(b) 给出了两个阵列的 SEM 照片。图中冷臂内的凹槽是避免冷臂与衬底的粘连。图 5 给出了单个多晶硅条的  $I-V$  曲线，其中固体实线表示理论计算结果，通过最小二乘法拟合，可得到多晶硅的电阻率  $\rho_0 = 1.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ，温度系数  $\xi = 1.3 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。图 6 给出了单个执行器和阵列的实验和理论  $I-V$  曲线。除在较高电流下，理论与实验符合较好。较高电流下的偏离可能是由于热辐射引起的。同时，多晶硅热导率和热膨胀系数与温度有关，本文中假定为常数也会引起一定的误差。

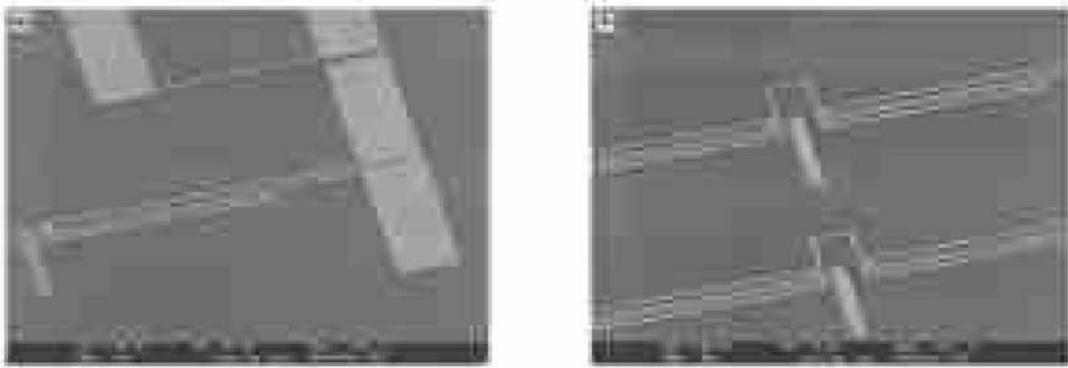


图4 (a) 单个执行器和多晶硅条的SEM照片;(b) 阵列的SEM照片.

FIG. 4 (a) SEM Picture of Single Actuator and Polysilicon Beam; (b) SEM Picture of Actuator Array

如图6所示,由于叉架的存在,阵列顶端比单个执行器多了散热通路,因此在相同的电压下,执行器阵列的电流比单个执行器高.我们测量了单个执行器和阵列的偏转与外加电压或电流的关系.图7给出了一个结果.从图中看出,在相同的外加电压下,执行器阵列的偏转比单个执行器大.但在相同电流下,二者偏转几乎相同.上述原因在于叉架提供了多余的散热通路.例如在外加5mA电流下,单个执行器中的热臂、冷臂和弯曲臂的平均温度为511、139和146°C,而对阵列则分别为501、126和145°C,而电阻与温度有关.从图7中可以看出,除在较高电流下,理论与实验符合较好.

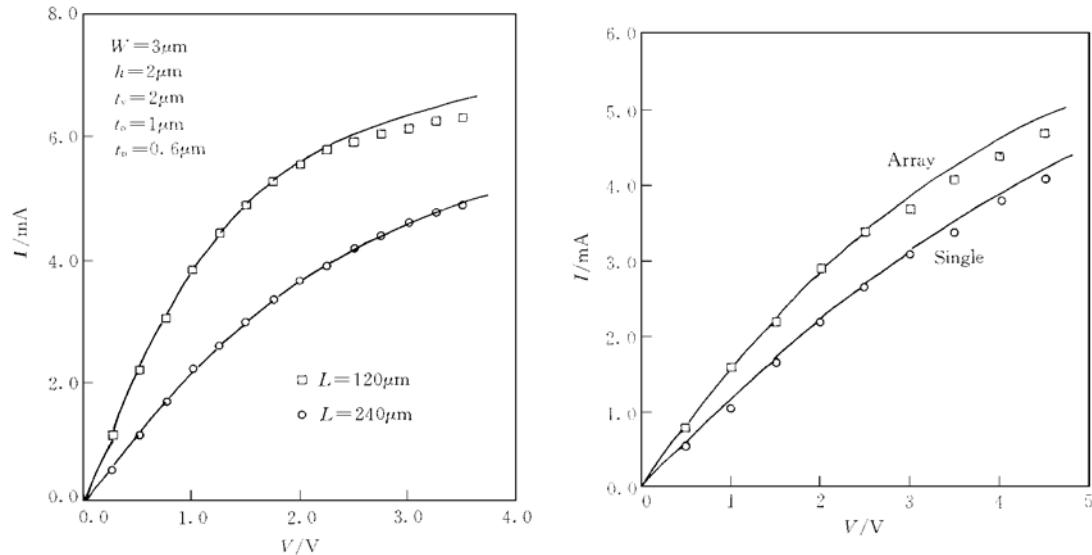


图5 单个多晶硅条的I-V曲线

FIG. 5 I-V Curve for Single Polysilicon Beam

图6 执行器和阵列的I-V曲线

实线表示理论结果, 其中

$$L = 240 \mu\text{m}, L_c = 180 \mu\text{m}, L_R = 60 \mu\text{m},$$

$$L_g = 10 \mu\text{m}, g = 2.5 \mu\text{m}, w_h = 3 \mu\text{m}, w_e = 12 \mu\text{m}.$$

FIG. 6 I-V Curves for Single Actuator and Array

过去对单个执行器的驱动力进行了测量<sup>[14]</sup>,用本文计算驱动力的方法可以较好描述驱动力与外加电流的关系<sup>[15]</sup>.因此,本文用理论方法分析阵列结构的驱动力.图8给出了单个执行器和阵列的驱动力与外

加电流的关系,从图中看出阵列的驱动力近似等于两个执行器驱动力之和。例如,在4mA的输入电流下,单个执行器的驱动力约为 $2.6\mu\text{N}$ ,而阵列则达到了 $5.1\mu\text{N}$ 。通常人们希望阵列能够将单个执行器的力简单相加,因此,优化叉架的结构就显得必要。较短的叉架会使两个执行器热臂膨胀相互抵消,从而使阵列的驱动力减小。较长的叉架虽然使执行器的驱动力相加,但会占据较大的芯片面积,并可能使执行器阵列多余的散热通路过长,影响其正常工作。本文的模型可以用来优化阵列结构。

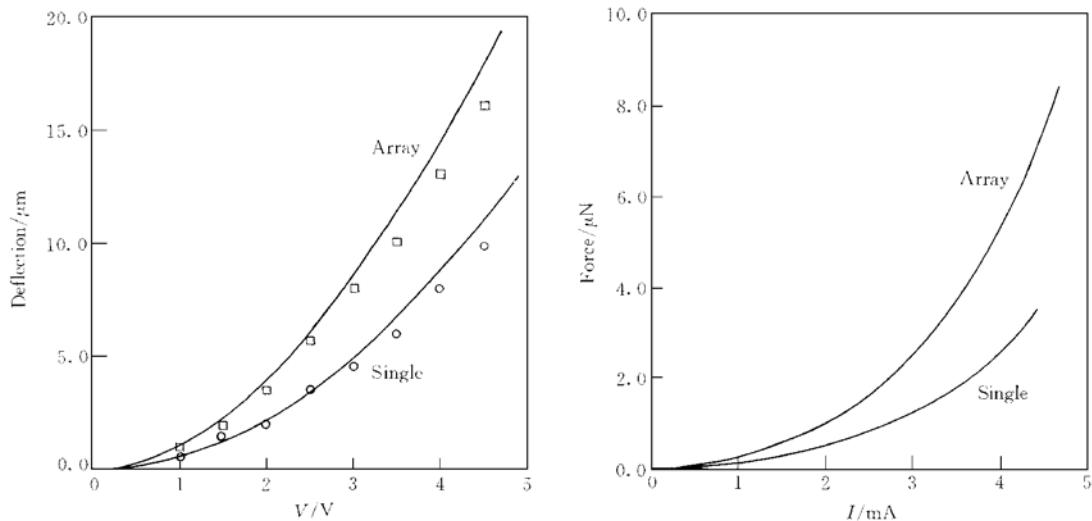


图7 单个执行器和阵列的偏转与外加电压的关系  
实线表示理论计算结果,其中 $\rho_0 = 1.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ , $\xi = 1.3 \times 10^{-3} \text{C}^{-1}$ , $L = 240\mu\text{m}$ , $L_e = 180\mu\text{m}$ , $L_R = 60\mu\text{m}$ ,  
 $L_g = 10\mu\text{m}$ , $g = 2.5\mu\text{m}$ , $w_h = 3\mu\text{m}$ , $w_e = 12\mu\text{m}$ .

FIG. 7 Deflection as Function of Voltage for Single Actuator and Array

#### 4 结论

本文建立了横向驱动多晶硅热执行器阵列工作的宏模型,根据结构力学给出了阵列的偏转,驱动力与外加电流的关系。偏转的测试与理论计算符合较好。因此,本文提出的宏模型可以用来分析、优化和设计这类执行器阵列。

**致谢** 电热分析得到了东南大学热能工程研究所段玉峰教授的帮助;结构力学分析得到了东南大学建筑系戴航教授的帮助。实验及测试在南京电子器件研究所和香港科技大学进行,香港科技大学 IEEM 系李家硕教授和 EEE 系的研究生霍晓参加了部分工作。在此一并表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] T. Furuhata, T. Hirano and H. Fujita, Array-Driven Ultrasonic Microactuators, in Proc. 5th Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators (Transducers89), Montreux, Switzerland, 1989, 1056—1059.
- [2] K. F. Bohringer, B. R. Donald and N. C. MacDonald, Single-Crystal Silicon Actuator Arrays for Micromanipulator Tasks, in Proc. 9th IEEE Micro-Electro-Mechanical System Workshop (MEMS 96), 1996, 7—12.
- [3] C. Liu, T. Tsao, Y.-C. Tai, P. Will and C. M. Ho, A Micromachined Permalloy Magnetic Actuator Array for

- Microrobotics Assembly Systems, in Proc. 8th Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators ( Transducers 95), Stockholm, Sweden, 1995, 328—331.
- [4] J. H. Comtois and V. M. Bright, Sensors and Actuators A, 1997, **58**: 19—25.
  - [5] W. Riethmuller and W. Benecke, IEEE Trans. Electron Devices, 1988, **ED-35**(8): 758—763.
  - [6] H. Guckel, J. Klein, T. Christen, K. Skrobis, M. London and E. G. Lovell, Thermo-Magnetic Metal Flexure Actuators, in Technical Digest IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop, 1992, 73—75.
  - [7] P. Lerch, C. K. Slimane, B. Romanowicz and P. Renaud, J. Micromech. Microeng., 1996, **6**: 134—137.
  - [8] C. S. Pan and W. Hsu, J. Micromech. Microeng., 1997, **7**: 7—13.
  - [9] Q. -A. Huang and N. K. S. Lee, J. Micromech. Microeng., 1999, **9**: 74—71.
  - [10] G. K. Fedder and R. T. Howe, Thermal Assembly of Polysilicon Microstructures, in Proc. IEEE Micro-Electro-Mechanical System Workshop (MEMS 91), 1991, 63—68.
  - [11] L. Lin and M. Chiao, Sensors and Actuators A, 1996, **55**: 35—41.
  - [12] L. A. Field, D. L. Burriesci, P. R. Robrish and R. C. Ruby, Sensors and Actuators A, 1996, **53**: 311—315.
  - [13] J. B. Kennedy and M. K. S. Madugula, Elastic Analysis of Structures, New York: Harper & Row, 1990, Chapters. 7&9.
  - [14] J. R. Reid, V. M. Bright and J. H. Comtois, SPIE, 1996, **2882**: 296—305.
  - [15] Q. -A. Huang and N. K. S. Lee, A Simple Approach to Characterizing the Driving Force of Polysilicon Laterally-Driven Thermal Microactuators, Sensors and Actuators, submitted.