

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 微型熱致動器動態行為研究(II)

### Dynamic Behavior of Micro Thermal Actuators (II)

計畫編號：NSC 90-2212-E002-192

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：周元昉 國立台灣大學機械工程學系

#### 1. 中文摘要

微機電系統因表面積與體積之比值遠大於一般機械系統，致使熱致動器的頻率響應已具實用價值。然而因輸入電流與位移為非線性關係，以致在動態致動行為上少有深入的研究。本計畫的目的在確實掌握輸入電流與變形之間的動態關係。在探討輸入熱能與輸出位移之間具線性的動態關係上，利用特徵函數展開以求解系統的位移場與溫度場。因為利用熱電阻效應的熱致動器輸入電流與產生的熱能具非線性關係，所以輸入電流與所引致的變形亦為非線性關係。因此將控制電流的供給與提供適當的熱沉，以達成控制熱致動器行為的目標。本研究製作一微型多層複合懸臂樑，使用 ploy-SiGe 熱電薄膜提供主動式熱沉，達成主動控制的目的。藉此微型樑執行兩項實驗，一為觀察熱耦合彈性變形效應與尺度因素的相關性，另一則為動態熱致動行為的控制。由上述控制多層懸臂樑的運動行為來檢驗所發展方法的適用性。

關鍵詞：熱致動器，熱耦合效應，電流，熱沉，控制

#### Abstract

The surface to volume ratio for MEMS devices is much larger than conventional mechanical systems. It makes the frequency response of thermal actuation practical. Since the relation between input current and output displacement is not linear, less effort has been paid on the study of dynamic behavior. The objective of this project is to handle the dynamic relation between input current and output displacement. The system is linear for

heat source input and displacement output. Therefore, method of eigenfunction expansion is adopted to find the displacement field and temperature field. For thermal actuators using heat resistor effect, the relation between input current and output heat is nonlinear. It makes the relation between input current and output displacement is also nonlinear. To control current supply and provide proper heat sinks can achieve active control purpose. A micro composite cantilever beam is fabricated in this project. The thermal-electric effect of ploy-SiGe thin film provides active heat sink. Two experiments will be carried out on these beams. One experiment will study the correlation between thermal coupling effect and scale factor. Another experiment is conducted to study the control of thermal actuation and to verify the developed method.

Keywords: Thermal actuator, Thermal coupling effect, Current, Heat sink, Control.

#### 2. 前言

熱致動方式是目前已知各種驅動微致動器的方式之一。在一般電路的操作電壓下，熱致動方式具有較其他驅動方式輸出較大驅動力以及變形量的特點，由於構造簡單，製程也較某些驅動方式相對容易。在作動方向上對於不同的用途經由不同的結構設計，可產生垂直或平行於晶片平面方向位移的熱致動器[1]。一種常用的方式是由兩種材料組成複合結構[2]，其加熱後因為熱膨脹係數的不同產生垂直方向的作動。另一種方式則控制單一材料結構[3]上不同部分的發熱量，使得

結構在平面方向產生位移。微型熱致動器的熱源主要是利用熱電阻效應產生，因輸入電流與產生的熱能具非線性的關係，所以輸入電流與產生的變形亦為非線性關係，因此熱致動器的控制相對較為困難。為了能主動控制熱致動器的行為，使用可控制的熱沈應是可行的手段之一，而採用固體的熱電效應是本研究的主要方法。

固體的熱電效應可分為三種[4]：Seebeck 效應、Peltier 效應、以及 Thomson 效應，此三種效應並具有相互關係的存在。Seebeck 效應為相異均質導體彼此接合面存在溫度梯度時，會產生電子感應電動勢。若導體間為通路，則定義從相異導體間通過低溫接合面的電流為正向。Peltier 效應為前述效應的反向，當相異均質導體其接合面通過電流時，則兩接合面之間會產生溫度梯度，造成不同接合面產生吸熱與放熱的現象。若電流流向為 Seebeck 正向電流，則在高溫接合面產生吸熱現象，低溫接合面產生放熱現象。在接合面上的熱流與電流具比例關係。Thomson 效應為單一均質導體中同時存在電流以及溫度梯度，當電子流動方向為溫度梯度正向時，電子將會產生吸熱現象，反之則產生放熱現象。

在控制熱電元件的數學模型已有相關的理論推導[5][6]，其探討範圍主要在塊體尺寸上，且著重於穩態溫度範圍操作，另有少數屬於動態範圍。本研究探討動態範圍的應用以及微小尺寸下的效果。

熱電元件由兩個熱電單元組成，電流方向與高低溫接合面的設定則符合熱致冷器的操作設定。整體熱電元件必須滿足各熱電單元內的熱傳能量平衡方程式以及接合面上的溫度場邊界條件。因熱電單元熱傳存在  $I^2(t)$  的非線性項，使得求解上較為困難。當系統在一穩態的操作環境下，給予系統一個微小的動態變化，則將系統產生的響應分別考慮為原來靜態的響應以及微擾後的動態響應予以分析。

本研究的主題包括

- (1) 彈性體熱源與變形間的關係
- (2) 對熱致動器結構熱傳更有效控制的方式
- (3) 熱致動器與主動冷卻單元的整合

等三個部份。在整合設計時考量微尺寸下的整體熱傳效果，使被動熱傳效應對主動熱傳控制的影響減至最低。

### 3. 研究方法

#### 3.1 線性熱耦合彈性理論

當彈性體受到外加微體力  $f_i$  以及熱源  $Q$  的影響，彈性體的行為必須同時滿足力平衡與能量平衡方程式，當以位移場  $u_i$  和溫度場  $T$  表示時，可得聯立方程式如下：

$$(C_{ijkl}u_{k,j})_{,j} - (\beta_{ij}T)_{,j} + f_i = \rho\ddot{u}_i \quad (1)$$

$$k_{ij}T_{,ij} + Q = \rho c_E \dot{T} + \beta_{ij}T_0 \dot{u}_{i,j} \quad (2)$$

在此利用系統所具備的自伴隨特性，先求取系統的特徵函數，利用特徵函數展開法描述欲求取的物理量，如此可將系統轉換為特徵座標上的常微分方程式求解。考慮一未受外加微體力及阻尼作用的彈性體， $\varphi^r(\mathbf{x})$  為第  $r$  個振動模態， $\omega_r$  為相對應的固有頻率， $\{\varphi^r(\mathbf{x})\}$  為  $\mathbf{V}_0$  中的一個完備集合，且具有正交性。另考慮一熱傳系統， $\Theta^m$  為溫度場的特徵函數， $\lambda_m$  為特徵值。若只考慮熱源而不考慮微體力的作用，可解出在頻域座標的位移及溫度響應，並可表示如下：

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_s [q_s(\omega) + \bar{K}_s(\omega)] \varphi^s(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$$T(\mathbf{x}, \omega) = \sum_p [\eta_p(\omega) + \bar{X}_p(\omega)] \Theta^p(\mathbf{x}) \quad (4)$$

其中  $\bar{K}_s(\omega)$  及  $\bar{X}_p(\omega)$  為對應於受週期熱源作用的位移及溫度響應的特解。

#### 3.2 結合主動冷卻元件微型熱致動器的設計

熱電致冷器的組成一般使用 p 型與 n 型結合的塊體半導體材料，不同型態的熱電單元經由電路上串接，並在接面處使用熱導材料，利用產生於接合面的熱電效應，達到散熱的需求。而在微型熱電致動器的設計上，考慮被動熱傳效應的影響，可將電熱單元製造於薄膜結構上[7]，在欲控制區域溫度低於外界的情況下，可降低外界高溫環境產生的熱傳，增加熱電元件的效率。目前已有針對微型薄膜熱電致動器的靜態熱傳分析[8]。在減少熱電元件受被動熱傳效應上，對於結構

上薄膜材料的選擇，考慮與電路製程的相容性，可選擇  $\text{SiO}_2$  或  $\text{Si}_3\text{N}_4$  等高熱阻的特性隔絕被動熱傳 [9]。

常用的熱電薄膜包括 Poly-Si、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 、Poly-SiGe 等幾種較為適合的材料[10]，其中多晶矽具備電路製程的相容性，但  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的致冷效能則較多晶矽為佳，其性能比較如圖一所示。微型主動式熱控制器的結構示如圖二與圖三，其中  $a=3200\text{\AA}$ ， $b=3200\text{\AA}$ ，樑長  $c=500\text{\AA}$ ，熱電單元長度  $d=250\text{\AA}$ 。對於熱電薄膜材料的選擇必須考慮與矽製程的相容性，Poly-SiGe 的熱電特性除了具有與矽製程可配合的優點外，同時導熱係數也較 Poly-Si 小，且其熱電特性與其他材料相較下較不受操作溫度的影響，所以為本製程所採用。

微型熱致動器採用 Au 與 Poly-Si 的雙層複合樑結構(Bimorph)的設計，利用不同材料熱膨脹係數上的差異來驅使結構產生作動。主動式熱控制器主要可分為三個部分：溫度控制區域，熱電單元以及熱沉。控制器的運作方式主是利用熱電單元的熱電效應，可控制熱由溫度控制區域傳送至熱沉。將主動式熱控制器與微型熱致動器整合後，溫度控制區域會與熱致動器結合，熱致動器的溫度即受到熱控制器的主動控制，並同時控制熱致動器的作動。

### 3.3 熱致動器的製作

製作微型熱致動器之光罩圖形如圖四所示，其製程如下：

- (1) 雙面拋光 4 吋(100) 矽晶圓，以濕氧長  $2000\text{\AA}$  的  $\text{SiO}_2$ ，再沉積  $1500\text{\AA}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 。
- (2) 沉積  $2000\text{\AA}$  的 Poly-SiGe。
- (3) 蝕刻 Poly-SiGe 定義光罩 1 的圖形。
- (4) 沉積  $500\text{\AA}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 。
- (5) 沉積  $1\ \mu\text{m}$  的 Poly-Si。
- (6) 蝕刻 Poly-Si 定義光罩 2 的圖形。
- (7) 利用光罩 3、4 分別定義出 Poly-SiGe 上 p 型與 n 型雜質所佈植的區域。
- (8) 由光罩 5 定義  $\text{Si}_3\text{N}_4$  上的 Poly-SiGe 接觸孔的區域。

- (9) 由光罩 6 定義出熱控制器熱沉的區域。
- (10) 沉積  $1\ \mu\text{m}$  的 Au。
- (11) 將光罩 7 的圖形定義至金屬層。
- (12) 由光罩 8 將未摻雜的 Poly-SiGe 去除，
- (13) 由光罩 9 定義出正面 Si 的蝕刻區域。
- (14) 由光罩 10 定義出背面 Si 的蝕刻區域。
- (15) 置入 TMAH 中蝕刻。

### 3.4 動態量測系統

致動器的主動式熱控制器係採用可精確控制輸出電壓與電流的電源供應器，驅動微型熱致動器使其作動，並且控制熱電式主動熱沉，熱致動器的動態響應則由雷射振動量測儀量測其速度。整個系統藉由 PC 控制熱致動器的運動。其架構如圖五所示。

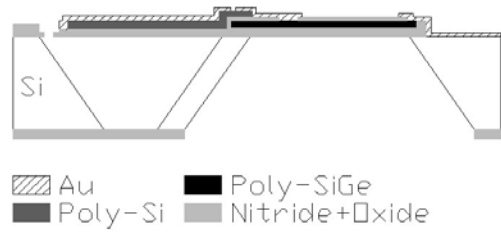
### 4. 結論

目前常用的微型熱致動器需靠自然熱傳回復原狀，因此無法控制使依預設方式運動，若欲達成控制的目的則必須具備主動式的熱沉，而熱電元件正提供可行的解決方案。本研究採取可與矽製程相容的 Poly-SiGe 熱電薄膜為主動式的熱沉，藉由控制通過熱電薄膜電流的大小與流向提供適當的熱沉，達成所需求的熱傳遞，進而精確的控制致動器的溫度，使達成預設的運動方式。可主動控制的熱電元件，因所需求的功率不大且反應快速，對體積微小的微型熱致動器是很理想的控制方式。

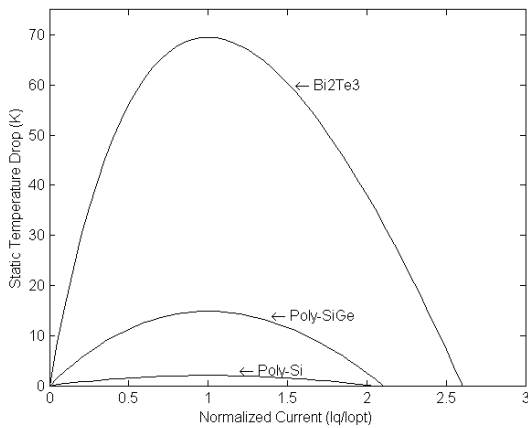
### 參考文獻

- [1] J. M. Noworolski, E. H. Klaassen, J. R. Logan and K. E. Peterson, "Process for In-plane and Out-of-plane Single-crystal-silicon Thermal Microactuators," *Sensors and Actuators A*, 55, pp.65-69, 1996.
- [2] W. Riethmuller and W. Benecke, "Thermally Excited Silicon Microactuators," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. TED-35, NO 6, pp.758-763, 1988.
- [3] J. W. Judy, T. Tamagawa and D. L. Polla, "Surface Micromachined Linear Thermal Microactuator," *Tech Digest, IEEE Int. Electron Devices Meet.*, pp.629-632, N. Y., USA, 1990.
- [4] D. D. Pollock, *Physics of Engineering Materials*, Prentice Hall, N. J., 1990.

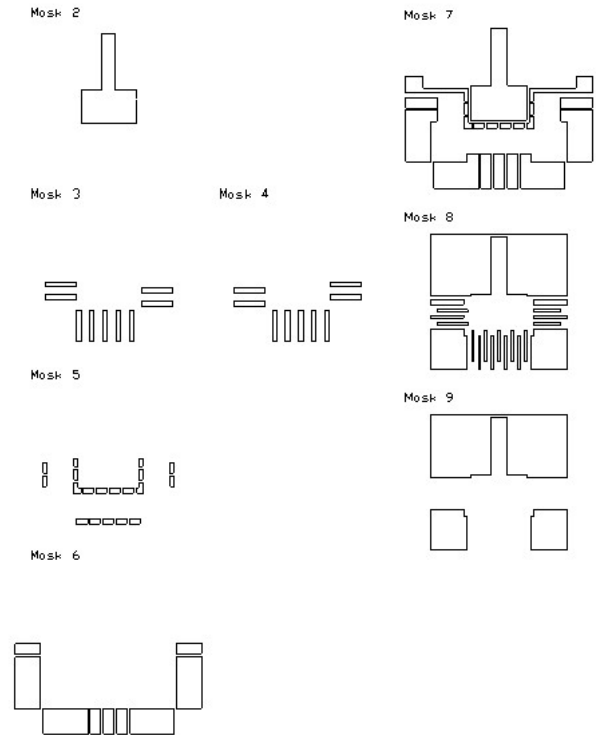
- [5] I. B. Cadoff and E. Miller, *Thermoelectric Materials and Devices*, Reinhold Pub. Corp., N. Y., 1960.
- [6] P. E. Gray, *The Dynamic Behavior of Thermoelectric Devices*, N. Y., John Wiley, 1960.
- [7] D. D. L. Wijngaards, S. H. Kong, M. Bartek and R. F. Wolffenbittle, "Thermal Stabilisation of Integrated Silicon Platforms Using Polysilicon and SiGe Peltier Elements," *Proceedings Transducers '99*, pp. 310-313, Sendai, Japan, June 7-10, 1999,
- [8] F. Völklein, G. Min, D. M. Rowe, "Modelling of a Microelectromechanical Thermoelectric Cooler," *Sensors and Actuators A*, 75, pp. 95-101, 1999.
- [9] S. H. Kong, D. D. L. Wijngaards, M. Bartek and R. F. Wolffenbittle, "Study of Active On-chip Cooling Using Integrated Peltier Elements" *Proceedings Eurosensors XIII*, pp. 319-322, Hague, Netherland, Sept., 12-15, 2000.
- [10] D. D. L. Wijngaards, S. H. Kong, M. Bartek and R. F. Wolffenbittle, "Thermal Stabilisation of Integrated Silicon Platforms Using Polysilicon and SiGe Peltier Elements," *Proceedings Transducers '99*, Sendai, Japan, June 7-10, 1999, pp. 310-313.



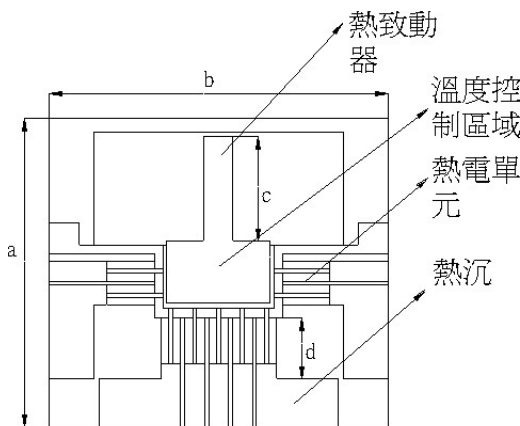
圖三 微型熱致動器側視圖



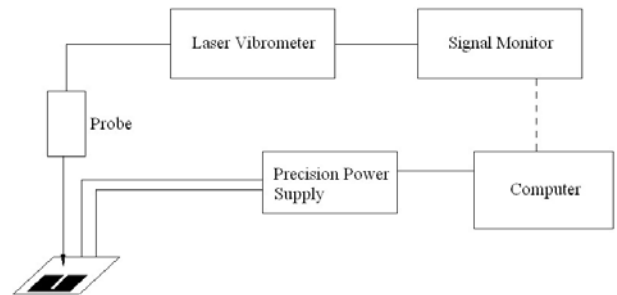
圖一 熱電性能比較



圖四 微型熱致動器光罩圖



圖二 主動控制熱致動器設計圖



圖五 微型熱致動器測試系統