

微光機電系統致動器

Introduction of Optical MEMS Actuators

洪世運、劉醇鎧、李正國、黃瑞星、林敏雄

Shih-Yun Hung, Chun-Kai Liu, Chengkuo Lee, Ruey-Shing Huang, Min-Shyong Lin

在微系統世界的可動元件中，微致動器是一不可或缺的元素，微機電領域已有許多製程技術開發完成提供致動器使用，這些方法包含矽微面型加工和矽微體型加工，所使用的驅動機制主要包含有靜電、熱電、壓電和磁力等，用以產生一力量和位移量，基於微光機電系統應用面的快速成長，新的致動器需要獨一無二的特性。在本文中，將回顧目前常見的驅動機制及微光機電系統的應用。

Microactuators are critical elements in all microsystems which require components that are not stationary. Numerous technologies have been developed in the field of MEMS to provide actuation. These devices are both surface and bulk micromachined and employ a variety of actuations including electrostatics, thermal expansion, piezoelectric and magnetism to generate forces and displacements. With the rapid growth of micro-opto-electrical-mechanical system applications new actuators are required with unique characteristics. In this paper a review of common actuation technologies is presented. In addition to actuation methods, the ways of these actuators being applied to Microsystems will be illustrated.

一、前言

在過去幾年內，隨著網際網路和其他新興的通訊技術與服務所伴隨而來之頻寬需求，必須應用新的技術來構建通訊網路，以免資料量將會難以處理。光通訊從 1980 年代早期的點對點連接，至今已發展到錯綜複雜的光纖網路，關於光通訊過去的發展回顧可參考文獻 1。隨著微機電技術之演進，許多新的微機電式的光通訊元件將提供高品質且低成本的選擇，並因此有機會讓光通訊的應用深入家庭。再者於消費電子產品方面如顯示器，生物醫療方面如檢驗分析用生物晶片等，皆有許多運用微機

電技術的實例。

微光機電系統 (micro-opto-electro-mechanical-systems, MOEMS，又稱 optical MEMS) 起源於 1960 年代積體電路之材料與製程之研究，應用微影、薄膜沉積、蝕刻等方法來製作微米尺寸的元件，是指一種包含光、機械、電子、材料、物理、生物、醫學、化工等多領域的整合科學。K. E. Petersen 於 1982 年發表一篇「矽加工材料」論文，為第一篇闡述微機電技術於光方面應用的論文⁽²⁾。

由圖 1 所示之微機電技術演進的年曆圖可知，早在 60 年代即有壓阻式微壓力感測器，直到 80 年代中期才開始有微致動器的相關研發，如微馬達、

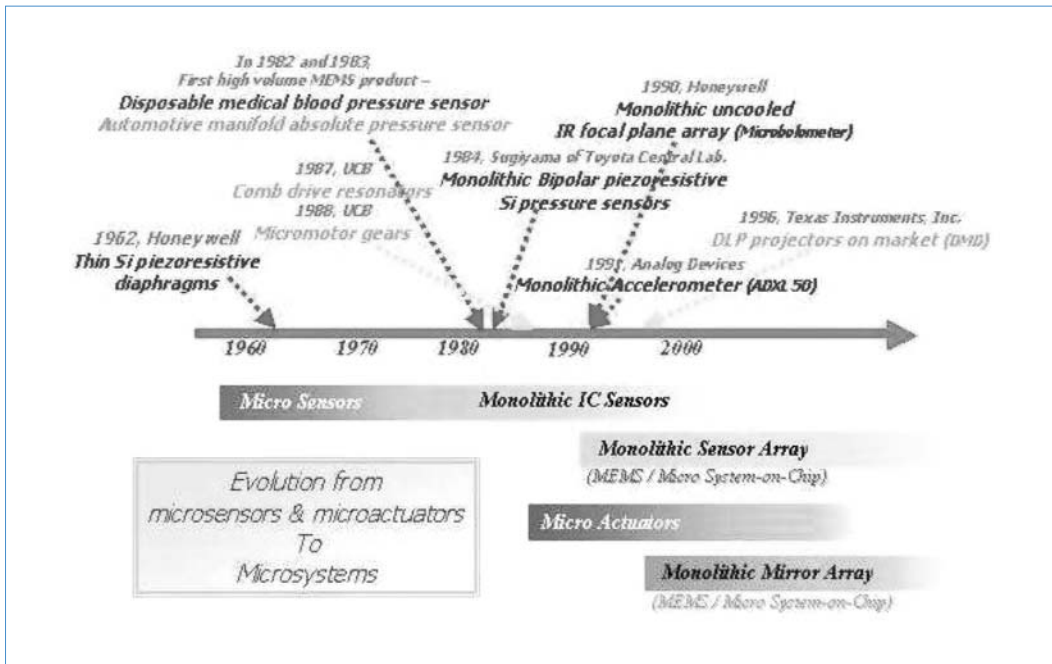


圖 1. 微機電技術演進年曆圖。

微梳狀共振子、微閥門及微噴嘴等。接著 90 年代起由於面型微加工技術 (surface micromachining) 的蓬勃發展，許多複雜的微光學元件及微光機電元件皆被發明及驗證成功⁽³⁾。另外於顯示器 (projection display) 與光通訊用立體光切換開關 (3D optical switch) 等應用上，又需要數百顆至數百萬顆的微鏡面陣列元件，所以相關之市場應用需求導引著微致動器的技術研發由單一元件或單元朝向陣列元件邁進。再者，以面型微加工技術所發展之微致動器往往受制於其深寬比有限的關係，使得在位移量及出力大小方面的表現也受到影響，因此以體型微加工技術或結面型與體型的複合製程技術來研發與製作微致動器已成為目前重要的研究方向。未來相信除了有更多樣化的微致動器的設計及應用產生外，整個微光機電系統的發展趨勢則是結構更立體化與複雜化。針對此一趨勢，本文將對微致動器的發展近況作一介紹。

二、微致動器的驅動方法

首先致動器 (actuator) 可定義為受了電能、熱能、化學能、機械能等能量而發生對應運動的元件，而運動的形態可以是形變、彎曲、回轉、直線

移動等。過去於巨觀世界中的致動器大部分是以電磁、油壓或空氣壓等方式來做驅動機構的設計。而在微致動器 (microactuator) 的實用上，由於尺寸縮小至微米等級，所伴隨尺寸效應 (scaling effect) 而形成的新現象亦使科學家必須正視於微觀世界中諸如發熱、散熱、摩擦力、靜電力等的影響之課題。

一般機械式微致動器的驅動方法大多以電能來轉換成機械能或位移量，在 MEMS 領域中有許多種機制來驅動致動器，以下將簡單回顧。

1. 靜電式致動器

MEMS 元件的驅動機制至今大概以靜電式最為普及，這類元件的操作方式以相反極性的兩物體相吸力量為基礎。其優點為靜電致動器 (electrostatic actuator) 容易微小化，因為靜電力僅與所加的電壓、極板距離及面積有關，而與極板的厚度無關。一般而言極板距離愈近、面積愈大，則所產生之靜電力愈大。在靜電式驅動的致動器中，又以梳狀致動器 (comb-drive actuator) 最為常見，其原理為利用大量交叉排列的梳狀電極 (comb finger electrode) 做為電容的平行板，當加一偏壓於可動與固定的梳狀電極間時，將可產生一靜電吸引力，進而產生位移。關於梳狀致動器的原理請參考文獻 4。

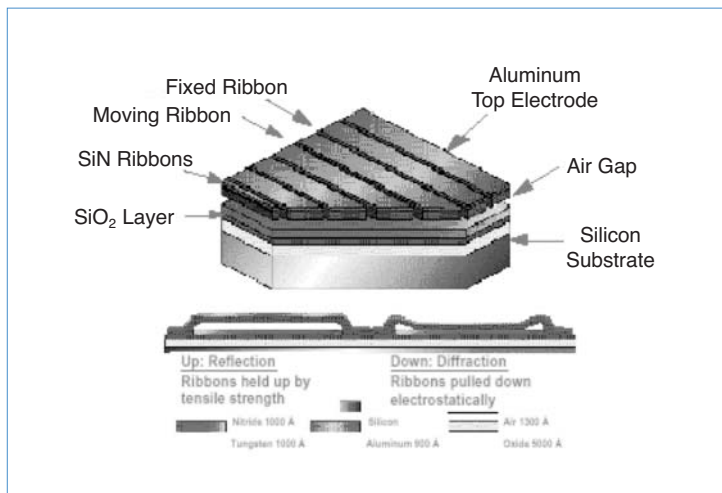


圖 2. 微光柵架構示意圖。

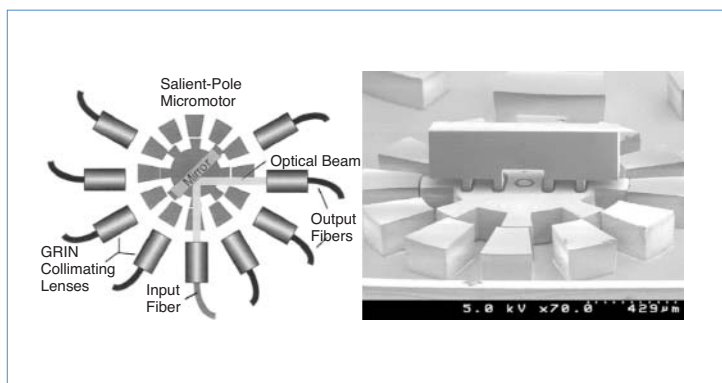


圖 3. 1×8 的光開關之示意圖與 SEM 圖。

應用於光方面之靜電致動器可以下列二例來做一說明。首先是如圖 2 所示之光柵 (grating) 架構，它是由一些固定及可動的懸浮電極板 (ribbon) 所組成，當偏壓加在懸臂電極與基板電極時會產生靜電力使懸臂受力向下彎曲，當偏壓移除時懸臂即可恢復原狀，此機制即可用作光波長的調幅器 (modulator)，可應用於光顯示器、光衰減器及光開關等，詳細資料可參考文獻 5。

圖 3 所示為以類 LIGA 及微電鑄製程所做的微馬達來旋轉光反射鏡面做為 1×8 的光開關之剖面圖⁽⁶⁾，使用靜電力從適當相位驅動定子 (stator) 來旋轉懸浮的轉子 (rotary)，此微馬達是由八個定子磁極和一個三相驅動系統所組成，光訊號可藉由調整不同的鏡面位置來控制所要傳送之輸出端的去向

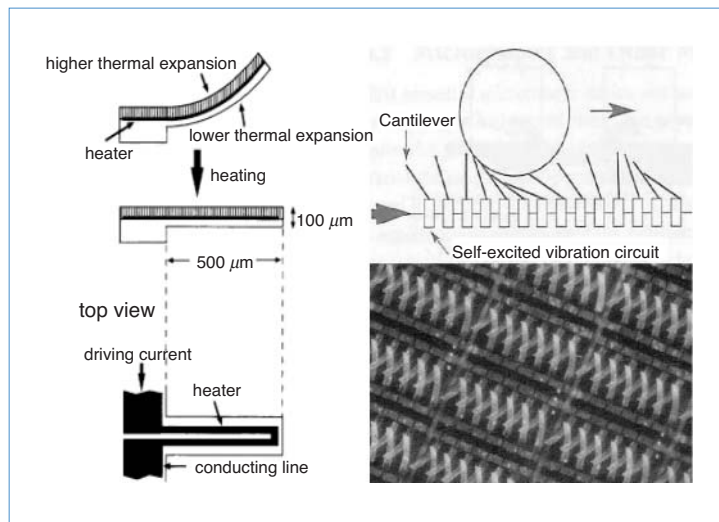


圖 4. 熱電式出平面致動器之結構示意圖 (左)，多組致動器所組成之微小搬運系統 (右上) 及其 SEM 圖 (右下)。

(或頻道)，故可切換至任意輸出端。最早之微機電式靜電微馬達之研究可參考文獻 7。尚有許多其他靜電式驅動的致動器，如利用面型微加工技術所製作之抓爬式致動器 (scratch drive actuator, SDA) 也可得到大距離的直線位移量⁽⁸⁾。

基本上，靜電微致動器有幾個優點：因其消耗的功率很低，通常運用矽基材料來做為致動器的結構材料，所以容易與 IC 製程整合，此外，梳狀致動器在供給的電壓平方與位移量之間具有線性關係。而缺點為：在大多數的實驗中，靜電致動器的效能通常都低於理論值，且所產生的力量相對的較小，這通常由增加電壓來補償，至於梳狀式靜電致動器方面則需以增加梳狀電極數目來解決，然而過大的驅動電壓會有吸引微粒物質並因此造成短路的問題。

2. 熱電式致動器

最早的熱電式致動器 (thermal actuator)⁽⁹⁾ 是由雙層材料所形成的懸臂樑結構，其運作的原理是基於溫度變化 (加熱或冷卻) 時，材料間因熱膨脹係數 (coefficient of thermal expansion, CTE) 的差異所對應產生體積之改變，因此造成懸臂樑形變或彎曲，此熱電致動器如圖 4 之左圖所示⁽¹⁰⁾。當交流電

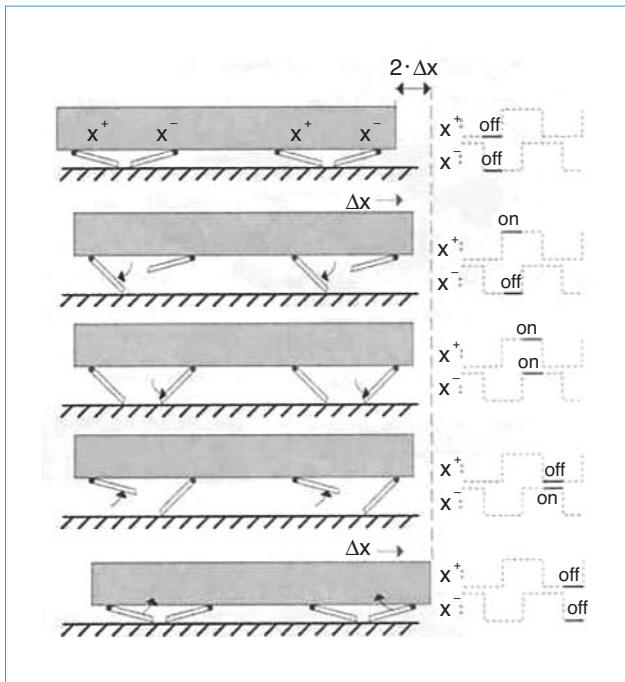


圖 5. 應用熱電式出平面致動器之自走式微小機器人之動作流程。

訊號加於此致動器上的電阻型加熱器時，此熱電致動器可產生往復式位移或運動。另外此相對位移為結構會向上彎曲所造成，所以此種致動器又稱為出平面式 (out-of-plane) 微致動器。其最早期的應用如

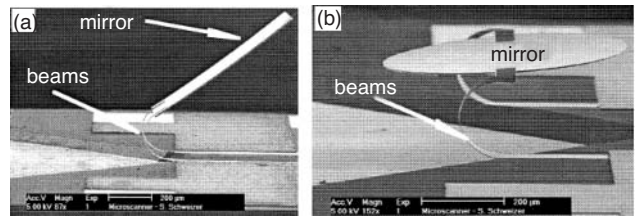


圖 6. 以出平面熱電致動器製作之掃描式微鏡面。

圖 4 之右圖所示，微致動器陣列元件可用於搬運微小的物品，圖 5 所示為運用熱電式出平面致動器所作之自走式微小機器人與其動作機制⁽¹¹⁾。

若將前述出平面熱電致動器運用於驅動微鏡面來完成一軸掃描之動作時，如圖 6 所示⁽¹²⁾，其懸臂樑是由二氧化矽和電鍍金屬層所組成，此雙層材料結構經由溼蝕刻釋放後會因殘留應力關係而產生自然翹曲之懸臂結構。以 300 μm 長之懸臂為例，其向後彎曲的角度會達 135 度；當鏡子面積從 300 × 500 到 800 × 800 μm² 之間變化時，共振頻率會依相對的質量大小從 600 變化至 100 Hz，且掃描之角度可大於 90 度，而功率消耗僅約數毫瓦 (mW)。

另外，利用微結構在 Z 軸上的階梯狀設計亦可使單一材料所製作的懸臂結構於交流電訊號通過時產生往復式的出平面位移，如圖 7 所示⁽¹³⁾。而其

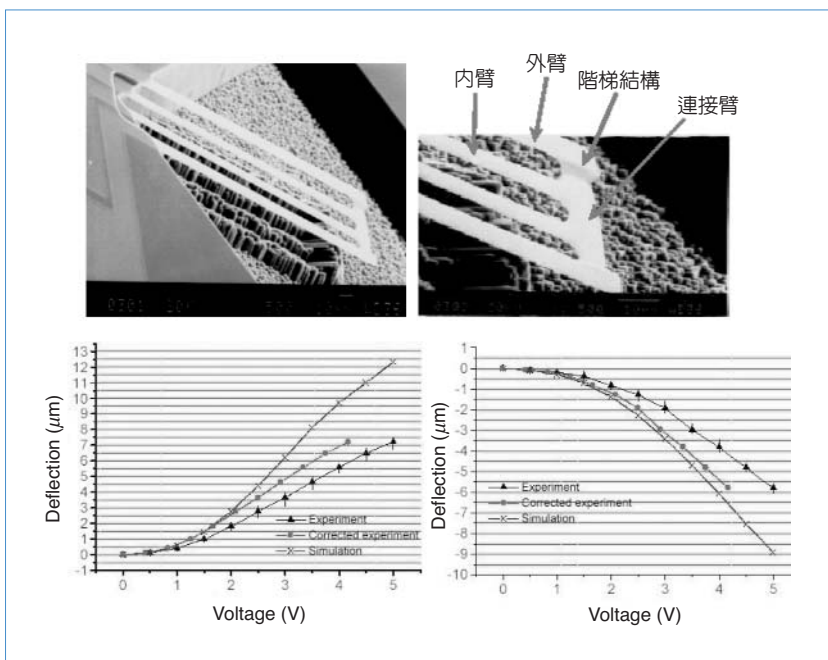


圖 7. 單一材料所製作之熱電式致動器。

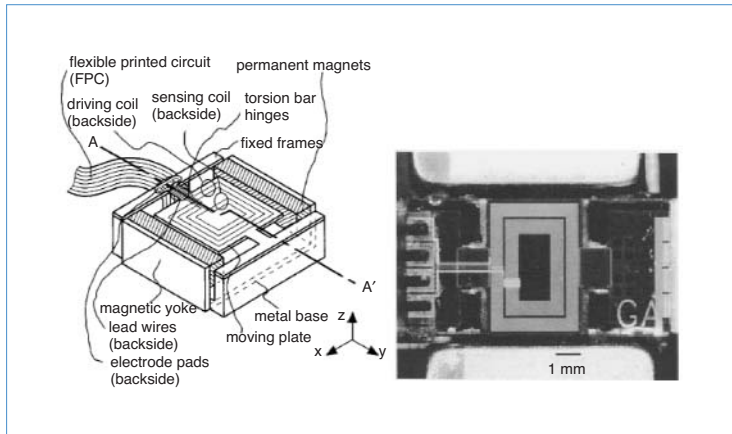


圖 8. 以電磁線圈驅動之微鏡面示意圖與 SEM 圖。

階梯設計更使此致動器可隨著正負電極加於外側或內側懸臂樑而向上或向下位移，可同時擁有向上或向下彎曲的能力。其在加 5 V 時可產生向上位移 7.5 μm 或產生 6 μm 的向下位移，在頻率接近 40 kHz 時會有大的位移量輸出，使此熱電致動器可應用於共振模態下。另外在驅動電壓為 2.5 V_{pp} 之共振模態下做疲勞測試，可以達 10⁹ 週期仍不會有老化現象。

另一種常見的微熱致動器是粗細樑結構之平面位移式致動器 (in-plane actuator)，當電流流經粗細樑結構之兩端時，於較細的懸臂因阻抗會比粗懸臂高許多，所以消耗的功率會較大，進而產生較高的溫度，導致伸長量大於粗懸臂側而使結構向粗懸臂端產生偏移。

此外也有使用氣體的熱脹冷縮或液氣轉換等體積變化所產生的致動方式，稱之為熱氣動式致動器。基本上在特定的操作範圍內，熱電式致動器具

有大的輸出力量和與輸入電壓形成良好線性關係之優點，缺點為部分的設計之消耗功率較高，且反應速度較慢等。

3. 電磁式致動器

電磁式致動器 (magnetic actuator) 顧名思義即是以電場變化所產生的磁力變化來改變結構之形變量或位移量，一般而言，相較於靜電致動器，此類致動器是以較低之電壓來驅動。它可分為兩大類型：一種為應用電磁線圈式，另一為應用磁性材料的設計。

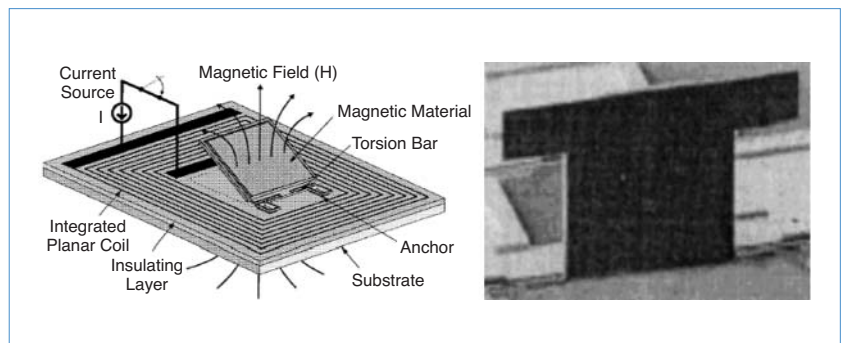
最早應用電磁線圈的設計來驅動微鏡面的研究是日本東北大學的江刺教授⁽¹⁴⁾，如圖 8 所示為日本 Olympus 所研發之光掃描器⁽¹⁵⁾，當電流通過線圈時，對應扭轉懸臂軸之轉矩 (torque) 為：

$$T = iBl_1l_2n$$

其中 i 為電流大小， B 為磁場密度， l_1 為磁鐵鄰近線圈的長度， l_2 為線圈至扭轉懸臂軸之距離， n 為線圈數目。相對於外加磁場方向，電流方向將會決定此力矩方向，並因此產生微鏡面的旋轉角度改變。

第二種為如圖 9 所示⁽¹⁶⁾，於平板上沉積如 Ni、Fe 等磁性材料的薄膜，當此薄膜已有磁力與外加磁力 (可由永久磁鐵或電磁鐵來產生) 及結構之彈性力等力達到力平衡時，會使微結構產生出平面的形變，但此種機制往往無法使鏡面立起並形成 90 度之夾角。故美國 JDS Uniphase 公司的光開關產品 (如圖 9 右所示) 是先利用磁力將鏡面舉起至

圖 9. 於微鏡面平板背面沉積磁性材料之驅動方式。



接近垂直後，再加上靜電力作用於鏡面底部與基板間使其達到正 90 度之相對關係。

至於磁變致動器則是利用外部磁場的交流變化所造成磁變材料於磁場方向上有大的體積改變量。自 1960 年代起，由美國所研發的稀土類磁性材料(如 Td-Dy-Fe、TbFe、CoFe 等的巨磁變合金，giant magnetostrictive alloys, GMA)，其薄膜化技術之成熟，使得相關材料所製作之微致動器亦漸漸商業化。

如圖 10 之微振鏡之支撐臂上即鍍有巨磁變合金薄膜的致動器⁽¹⁷⁾，當磁場改變時所對應之體積變化會使鏡面向上或向下移動，換言之，此設計可針對不同應用作靜態與動態之鏡面控制。

4. 壓電式致動器

壓電材料可以轉換機械能為電能，當施加一力量於壓電材料時，會使壓電材料產生一形變量，並使晶體表面的正負電極間形成一電位差，即稱為壓電效應，反之，若以交流電訊號來驅動壓電致動器，使之產生對應的振動或往復式的運動時，則是利用所謂的逆壓電效應。壓電式致動器 (piezoelectric actuator) 的特性為在毫微米級的精密運動和高的反應速度，且效率也很好，可將近乎一半的電能轉換成機械能，對於本身附近的電性零件不會有如靜電致動器一般產生其他影響、也不會吸引粉塵。

由於壓電陶瓷材料的薄膜在鍍膜與蝕刻技術上面臨相當的挑戰，並非一般半導體廠所熟知的製程，所以在最早之壓電驅動的二維掃描振鏡，如圖

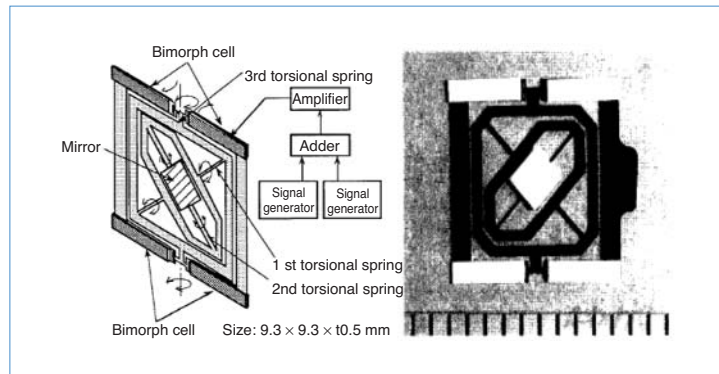


圖 11. 以壓電陶瓷塊材貼附於金屬薄片上所製作的二維掃描振鏡。

11 所示⁽¹⁸⁾，是以壓電陶瓷塊材貼附於金屬薄片上所製作的成果。而最早以矽微加工製程結合 PZT 壓電陶瓷薄膜所製做的壓電驅動之微掃描振鏡可參考圖 12 所示^(19,20)。

基本上，壓電式致動器除了有製程整合上的挑戰外，其擁有驅動電壓低、力量輸出大、位移量較大等優點。再者往復式的壓電效應特色使壓電材料除了可用於致動外，亦可做為力量或位移量的感測器。筆者曾製作應用於原子力顯微鏡的壓電式感測探針，此種探針本身即可同時自我勵振 (self-oscillating) 於週期振動的狀態，外加 DC 偏壓可使探針作靜態位移的微調，其本身電容改變量輸出作為力或位移變化量的感測訊號，圖 13 為此種探針及應用此探針所取得的金薄膜表面影像⁽²¹⁻²³⁾。類似機制亦可應用於掃描式近場光學顯微 (SNOM) 的探針控制。

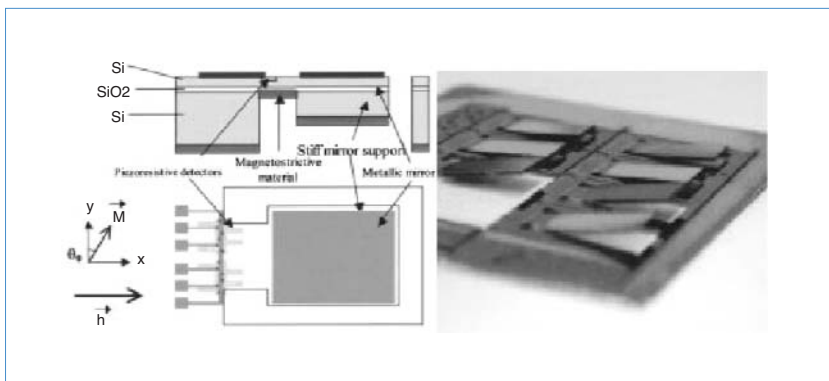


圖 10. 鍍有巨磁變合金薄膜之微振鏡示意圖與 SEM 圖。

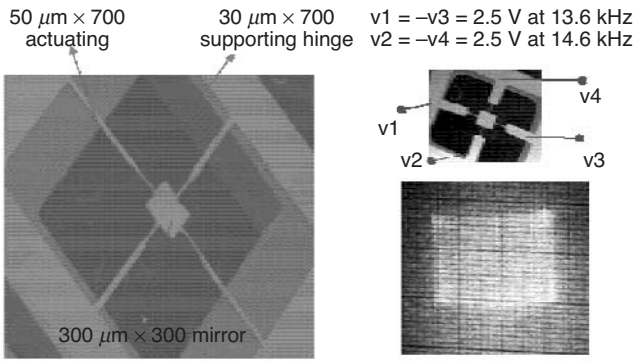


圖 12. 結合 PZT 壓電陶瓷薄膜所製作之微掃描振鏡。

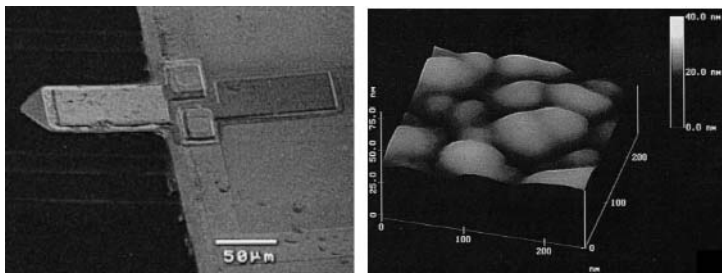


圖 13. 壓電式的原子力顯微鏡感測探針及其所取得之金薄膜表面影像。

5. 形狀記憶合金

自 1965 年美國海軍研究所發現 Ni-Ti 合金之形狀記憶效果，Ni-Ti 及 Cu-Zn-Al 等形狀記憶合金 (shape memory alloy, SMA) 已廣泛用於工業上，其原理如圖 14 所示，基本上於室溫或低溫中將元件變形加工後，再予以熱處理即可回復原形。此效應可用於產生位移與力，所以近幾年使用形狀記憶合金的微機電致動器已漸受注意，其特徵為體積小、位移量大和複雜性低。表 1 所示為目前微機電系統常見的驅動機制與對應之應用。

表 1. 微機電元件及其驅動原理。

驅動原理	MEMS 代表性的元件
靜電式	微馬達、微鏡面、微掃描器、微繼電器
電磁式	微繼電器、微幫浦、微閥門
壓電式	微幫浦、微閥門、硬碟伺服系統
熱機械式	微閥門、微夾子
熱氣動式	微幫浦、微閥門、噴墨頭
形狀記憶式	微閥門、光纖開關

三、微致動器之應用狀況

先前討論了多種應用於微機電領域的驅動方式，每種驅動技術有其特殊的設計與優缺點。傳統靜電式致動器依電壓平方關係提供線性位移量，但需要高電壓，且其相對輸出力量也較為小；一般熱致動器會產生較大的輸出力量，需要高功率，且其反應速率較慢。接著將針對目前技術發展之新趨勢介紹幾種新的應用。

1. 線性位移平台 (Linear Moving Actuator)

在許多實務應用上需要能提供一維 (one dimension) 精確位移與靜態定位的致動器。圖 15 所示為一利用一導向滑塊 (guiding slider) 和兩組與滑塊前進方向呈 45 度的撞擊塊所組成之可線性移動的光學鏡面^(24,25)，由這些撞擊塊所產生撞擊力的分量會推動滑塊前進，此撞擊塊可由靜電式梳狀致動器或熱電式致動器來驅動。另外，反向配製的對稱滑塊亦可使滑塊前進或後退，故此光學鏡可做為光纖通訊之光開關用途。圖 14 所示之撞擊塊是由 6 組反向熱致動器來推動，當加上頻率為 10.5 kHz 的交流方波訊號 (12 V) 時，滑塊的移動速率可達 10.2 mm/s，其每一步的位移距離約為 1 μm。

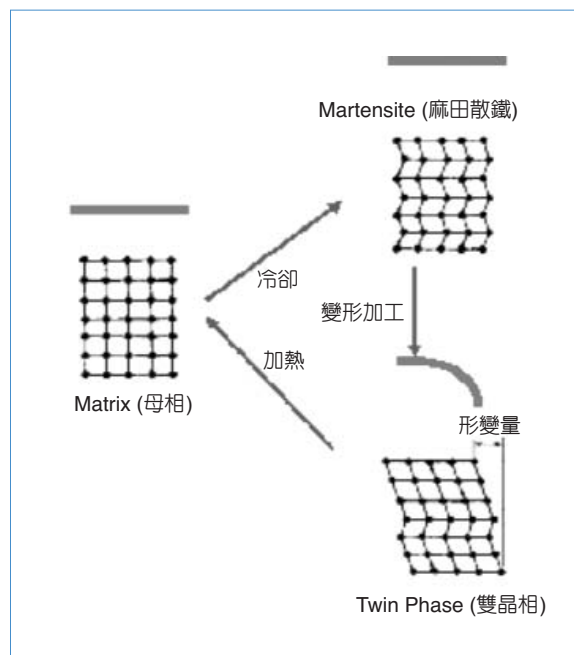


圖 14. 形狀記憶合金之動作原理。

2. 二維微定位平台

除了一維的致動外，目前在二維及三維的精密定位需求也日益增加，對於這種應用，需要使用 XY 微米級定位平台 (XY table)。此裝置包含兩個支撐平台的梳狀致動器，做為水平方向位移用途。目前已有不少產品應用了此微致動器，如硬碟的二級式 (two-stage) 讀寫讀、AFM (atomic force microscope) 資料儲存裝置和二維光纖切換開關，將分別介紹於下。

(1) 二級式硬碟讀寫頭

近來硬碟單位面積的儲存密度以每年 60% 的速度迅速成長，要製造出新一代大容量硬碟的關鍵因素是磁錄密度 (areal density)，要增加磁錄密度主要受限於伺服機頻寬 (servo bandwidth) 的影響，伺服機的頻寬是由致動器的反應速度來控制。解決的手法為將擁有高頻寬的二階致動器設置在懸掛臂和讀寫頭之間的滑塊 (slider) 上，如圖 16 所示⁽²⁶⁾，以微機電技術所製造的二階微致動器正好可以符合此要求，因其具高頻寬、低驅動電壓及擁有次微米等級的定位精度。文獻上所示之結果為：此靜電致動

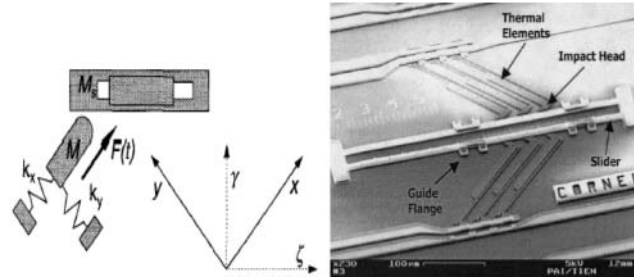
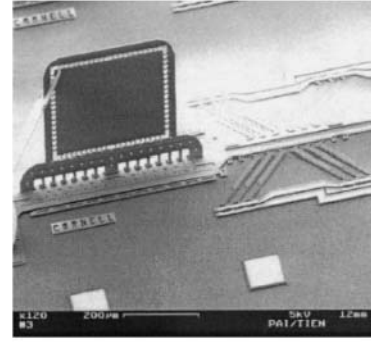


圖 15. 熱電式線性位移平台之 SEM 圖。

器有低移動質量，約 $40 \mu\text{g}$ ，加上 60 V 的直流電壓可產生 $0.5 \mu\text{m}$ 的位移量，且其共振頻率為 16 kHz 。

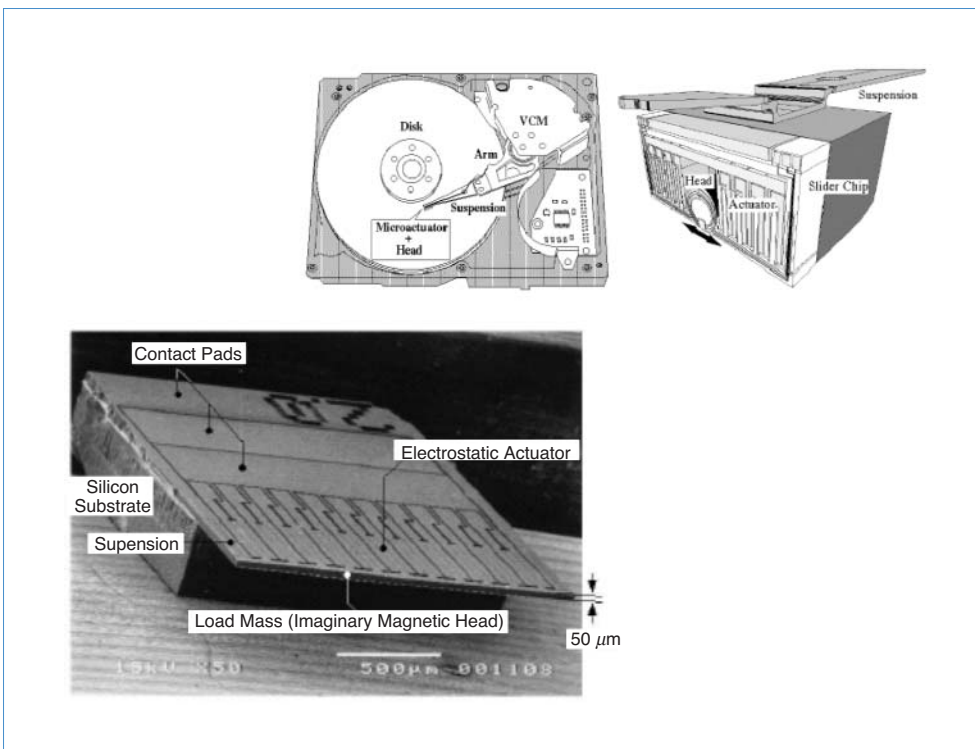


圖 16. 微機電技術所製造之二階微致動器示意圖與 SEM 圖。

(2) 二維光切換之掃描器

機械式光開關實現光交互連接 (optical crossconnect, OXC) 之所以引人注目，是因為其有低插入損失及小的訊號干擾，傳統 OXC 包含可滑動的稜鏡或使用電磁或壓電效應來驅使光纖產生偏斜，由於其體積過大佔用龐大空間，以至於使用微機電技術的光開關漸成主流產品。如圖 17 所示為使用 XY 定位平台技術來實現微光纖陣列開關的概念⁽²⁷⁾，輸入端之二維光纖陣列放置於光線操縱元件的左邊，這使光纖之光線可以平行或自由操控於空間中，掃描光線會經由二組透鏡投射在另一組微光線操縱元件上，之後再使光線進入輸出端的光纖陣列中。此元件設計為 $N \times N$ 的陣列，且光可從每一輸入光纖耦合至任何一輸出的光纖，不會浪費任何一通道。

在文獻中提到目前已可以在 1 cm^2 的裝置上實現 49 輸入 \times 49 輸出的光纖切換，所使用的製程是

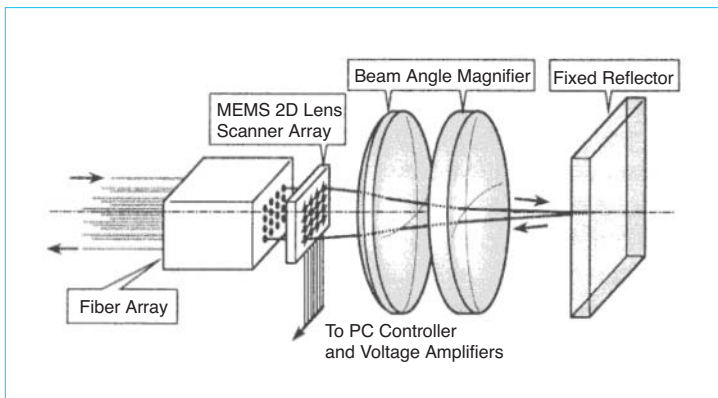


圖 17. 微光纖陣列開關示意圖。

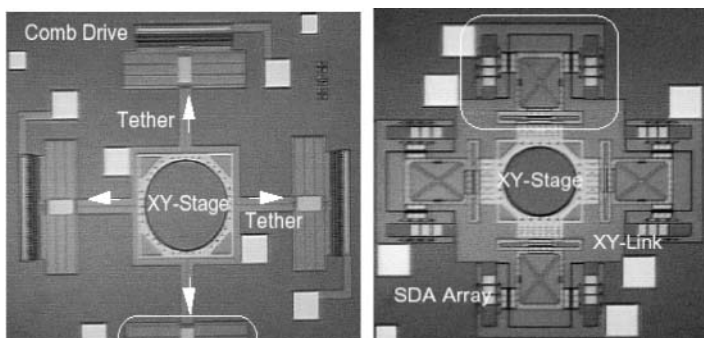


圖 18. 微光纖陣列開關之 SEM 圖。

委託美國 Cronos Integrated Microsystems 公司的多人共用製程 (multi-user MEMS processes, MUMPs) 代工，共使用三層多晶矽 (polysilicon) 做為架構與兩層磷矽玻璃 (phosphosilicate glass, PSG) 做為犧牲層，如圖 18 所示為所實現的兩種 XY 定位平台⁽²⁸⁾，而此種架構也可應用於掃描式鏡面之開關用途上。

3. 三維微定位平台 (XYZ Table)

(1) 掃描探針式資料儲存裝置

目前掃描式探針技術製作之可攜帶式低成本資料儲存應用之關鍵元件為一可 XYZ 方向位移的微定位平台，且其位移掃描範圍需達 $100 \mu\text{m}$ 之多。現以電磁式驅動之微掃描器可達這些要求，如圖 19 所示⁽²⁹⁾，包含一由彈簧支撐之可動式的平台和放置在永久磁鐵上之平面線圈，其耗費 2.7 mW 的功率即可使位移量高達 $50 \mu\text{m}$ ，最後裝置的體積約為 $15 \times 15 \times 1.6 \text{ mm}^3$ ；若再配合平行操作以表面微加工所製造的 AFM 探針陣列，將可使資料儲存的密度達到 1 Tb/in^2 ，至目前已可實現 32×32 (1024 根) 的二維探針與上述的微定位平台整合，此結果可將磁錄密度提高至 $100-200 \text{ Gb/in}^2$ ，這使資料儲存密度又更進一步增加。

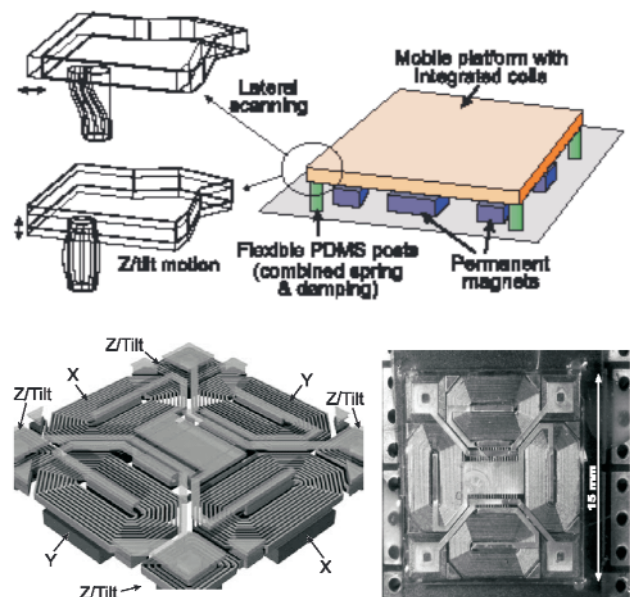


圖 19. 可動式的微平台之示意圖與 SEM 圖。

(2) 內裝式光纖微對準器

封裝在光電元件所佔用的經費高於整體的 40—50%，所以研發高密度及低成本的光電封裝技術是必需的。在光纖對準方面，現行的自動化系統僅對特定的元件封裝，因而易使成本太高；至於被動式的對準技術目前是利用矽微平台來達成，再加上擴張式二極體雷射及光波導也可以有效的增加單元件模式對準的容忍度，雖然這已有重大的進展，但仍未完全解決單元件模式模組對準及接合的問題。

接著波音 (Boeing) 和 MCNC 研發出整合微機電技術的光纖微對準器，其體積小至可安裝於標準光電密封元件之封裝內 ($4 \times 4 \times 0.5 \text{ mm}^3$)，稱為內裝式微對準器 (in package microaligner, IPMA)。如圖 20 所示⁽³⁰⁾ 為整合表面矽微加工與 LIGA 技術之晶圓級 (wafer level) 製造的元件，在三軸的位移量皆大於 30 微米，且輸出力量足以彎曲光纖以達到封裝內光纖對準的效果。

4. 非對稱式梳狀致動器 (Asymmetric Comdrive)

典型的梳狀致動器均在平面上操作，若將典型之梳狀致動器修改為其中一組的梳狀結構較薄且將其提升到另一組較厚的上緣，如圖 21 所示⁽³¹⁾，即為非對稱式梳狀致動器，若上方較薄的梳狀電極為可動的，下方較厚者為固定的，則在兩組致動器間加一偏壓即會產生轉動。

若將此技術配合使用 SOI (silicon on insulator) 晶圓，可做出結構如圖 22 之掃描式鏡面⁽³²⁾，此元件具有許多優點，如典型的梳狀致動器在鏡面大小與鏡面驅動力不可二者皆得，必須要有所取捨，而使用垂直式梳狀致動器則不會有此問題，且其操作在類比 (analog) 模式下仍具線性操作關係，不會使掃描出的圖形產生失真 (distortion) 的現象。此鏡面所用的製程主要包含使用感應式耦合電漿蝕刻 (ICP/RIE) 來製作垂直之梳狀電極，再利用共晶接合技術 (eutectic wafer bonding) 將上下二電極結構組合在一起，在文獻上使用的鏡面大小為 $1200 \mu\text{m} \times 1500 \mu\text{m}$ ，當加上頻率為 60 Hz、振幅為 15 V 之正弦波和 15 V 的直流電壓時，鏡面掃描角度為 6 度，而其共振頻率為 860 Hz。

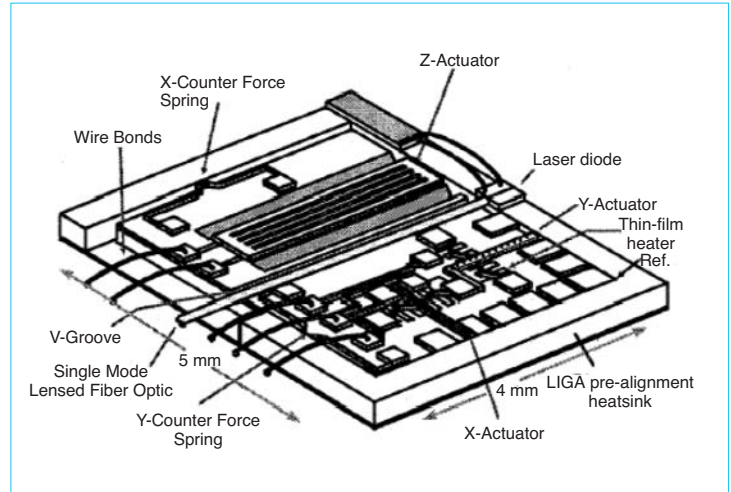


圖 20. 內裝式微對準器之示意圖。

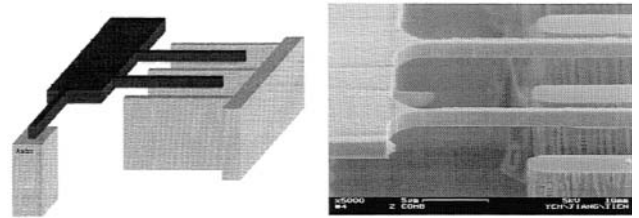


圖 21. 非對稱式梳狀致動器示意圖與 SEM 圖。

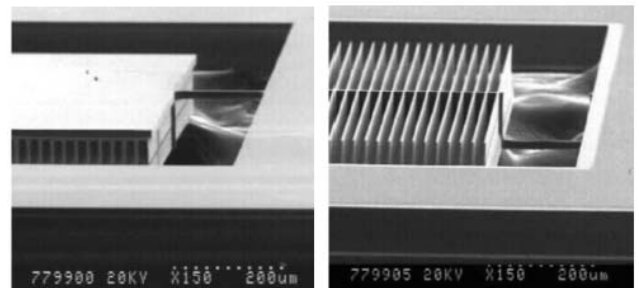
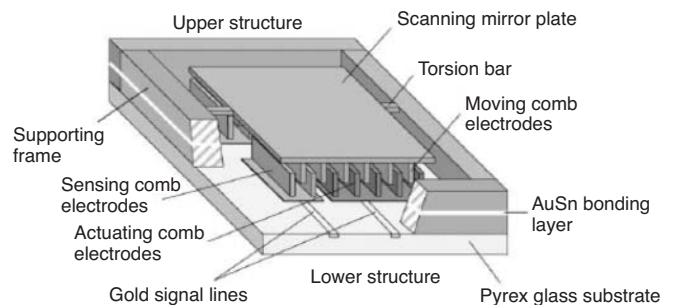


圖 22. 結合共晶接合技術所製作的掃描式鏡面之示意圖與 SEM 圖。

現今不論任何製程研發或元件製作，皆以低成本為優先考量，所以研發低成本的元件已成為趨勢。如圖 23 所示之掃描式振鏡^(33,34)，不同於前面使用單價昂貴的 SOI 晶圓，而是使用磊晶晶圓 (epitaxial silicon wafer)，再配合電化學蝕刻 (electrochemical etching) 釋放鏡面，可精確控制鏡面厚度，並以乾式蝕刻或感應式耦合電漿蝕刻定義出梳狀電極與扭轉臂，驅動後可使鏡面做一維或二維之轉動。圖 24 所示分別為波長 650 nm 之雷射光經過一維與二維掃描式振鏡後之掃描圖形。文獻上的鏡面大小為 $1500\ \mu\text{m} \times 1500\ \mu\text{m}$ ，當加壓 40 V 且於共振頻率 1275 Hz 時，鏡面掃描角度可達 ± 8 度，且掃描出來的圖案之線性度十分良好⁽³³⁾。

四、結論

微機電系統製程技術具有下列優點：(1) 可批次製造，降低成本，且品質均一。(2) 縮小尺寸，提高精度，增快反應速度。(3) 可將機械微結構和電子電路整合。(4) 具自我組裝及定位的能力。而隨著各種新型之微致動器的發展，更多的微機電系統之應用也出現在市場上，因此 MEMS 是目前科技界公認為最具發展潛力的技術與產品，而各類型的微致動器也值得大家全力投入，所伴隨產生之技術將是廿一世紀重要的產業科技之一。

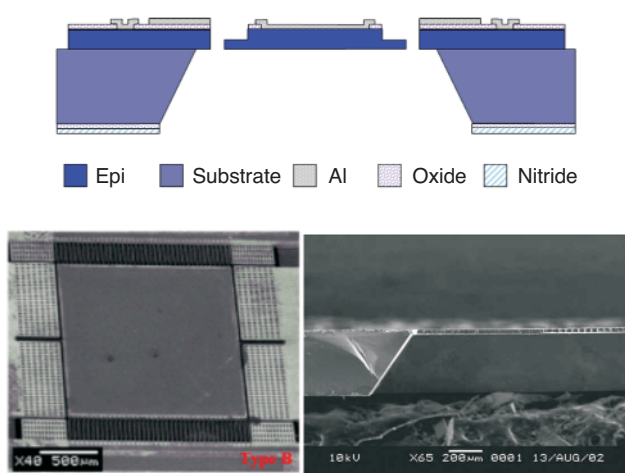


圖 23. 使用磊晶晶圓，結合電化學蝕刻技術所製造之掃描式振鏡之剖面圖與 SEM 圖。

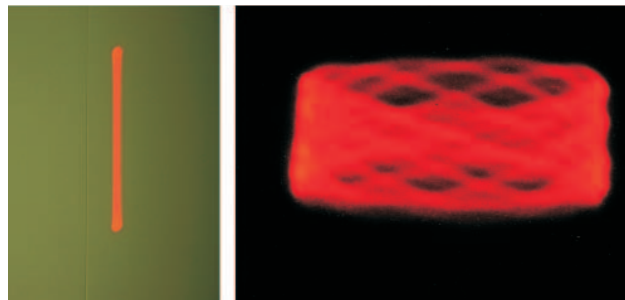


圖 24. 一維與二維掃描式振鏡之掃描圖形。

參考文獻

1. IEEE *J. Selected Topics Quant. Electron.* 6 Millennium Issue, Nov./Dec. (2000).
2. K. Petersen, *IEEE Proc.*, **70**, 420 (1982).
3. M. E. Motamedi, M. C. Wu, and K. S. J. Pister, *Opt. Eng.*, **36**, 1282 (1997).
4. W. Tang, T.-C. Nguyen, M. Judy, and R. Howe, *Sensors and Actuators A*, **21**, 328 (1990).
5. O. Solgaard, F. Sandejas, and D. Bloom, *Optics Letters*, **17**, 688 (1992).
6. A. A. Yasseen, J. N. Mitchell, J. F. Klemic, D. A. Smith, and M. Mehregany, *J. Selected Topics Quant. Electron.*, **5** (1999).
7. L.-S. Fan, Y.-C. Tai, and R. Muller, *Sensors and Actuators A*, **20**, 724 (1989).
8. T. Akiyama and H. Fujita, in *Proc. IEEE Proc. MEMS Workshop*, 310 (1995).
9. W. Riethmuller and W. Benecke, *IEEE Trans. of Electron Devices*, **35**, 758 (1988).
10. M. Ataka, A. Omodaka, N. Takeshima, and H. Fujita, *J. MEMS*, **2**, 146, Dec. (1993).
11. T. Ebefors, J. U. Mattsson, E. Kalvesten, and G. Stemme, *J. Micromech. Microeng.*, **10**, 337 (2000).
12. S. Schweizer, S. Calmes, and M. Laudon, *Sensors and Actuators A*, **76**, 470 (1999).
13. W.-C. Chen, J. Hsieh, and W. Fang, *Proc. of MEMS Workshop*, 693 (2002).
14. N. Asada, H. Matsuki, K. Minami, and M. Esashi, *IEEE Trans. Magn.*, **30** (6), 4547 (1994).
15. H. Miyajima, N. Asaoka, M. Arima, Y. Minamoto, K. Murakami, K. Tokuda, and K. Matsumoto, *J. MEMS*, **10**, 418 (2001).
16. J. W. Judy, and R. S. Muller, *J. MEMS*, **6**, 249 (1997).
17. T. Bourouina, E. Lebrasseur, G. Reyne, A. Debray, H. Fujita, A. Ludwig, E. Quandt, H. Muro, T. Oki, and A. Asaoka, *J. MEMS*, **11**, 355 (2002).
18. Y. Ohtuka, H. Nishikawa, T. Koumura, and T. Hattori, *IEEE Proc. of MEMS Workshop*, 306 (1995).
19. R. Maeda, C. Lee, and A. Schroth, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **444**, 233, MRS, Pittsburgh, (1996).

20. A. Schroth, C. Lee, S. Matsumoto, M. Tanaka, and R. Maeda, *Proc. of MEMS Workshop*, 402 (1998).
21. C. Lee, T. Itoh, R. Maeda, T. Ohashi, and T. Suga, *J. Vac. Sci. & Technol. B*, **15**, 1559 (1997).
22. C. Lee, T. Itoh, and T. Suga, *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **43**, 553 (1996).
23. C. Lee, T. Itoh, R. Maeda, and T. Suga, *Tech. Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting*, 545, USA (1996).
24. M. Pai and N. Tien, *Sensors and Actuators A*, **83**, 237 (2000).
25. M. Pai and N. Tien, *J. MEMS*, **5**, 159 (1996).
26. H. Toshiyoshi, M. Mita, and H. Fujita, **11**, 648 (2002).
27. K. Saruta, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, *IEEE Optical MEMS*, 13 (2002).
28. H. Toshiyoshi, J. G. Su, J. L. Cosse, and M. C. Wu, *Proc. MOEMS 99*, 165 (1999).
29. H. Rothuizen, M. Despont, U. Drechsler, G. Genolet, W. Haberle, M. Lutwyche, R. Stutz, and P. Vettiger, *Proc. of MEMS Workshop*, 582 (2002).
30. J. M. Haake and M. W. Beranek, *IEEE Electronic Component and Technology Conference*, 1446 (1998).
31. N. C. Tien, and D.T. McCormick, *Proc. of SPIE*, 4178, *MOEMS and Miniaturized Systems* (2000).
32. J.-H. Leea, Y.-C. Koa, D.-H. Konga, J.-M. Kima, K. B. Leeb, and D.-Y. Jeon, *Sensors and Actuators A*, **96**, 223 (2002).
33. C. Lee and C. -K. Liu, *Proc. Optical MEMS 2002*, PD. 001, Aug. (2002).
34. C. Lee and C. -K. Liu, *Technical Note*, Oct. 2002, Asia Pacific Microsystems, Inc., URL: <http://www.apmsinc.com>.

洪世運先生為亞太優勢工程師，並在國立中興大學精密工程研究所碩士班進修。

劉醇鎧先生為交通大學光電工程研究所碩士，現任亞太優勢微系統股份有限公司工程師。

李正國先生為日本東京大學精密機械博士，現任亞太優勢微系統股份有限公司副總經理。

黃瑞星先生為澳洲新南威爾斯大學固態電子博士，現任亞太優勢微系統股份有限公司技術長及執行副總，及國立清華大學電機系教授。

林敏雄先生為日本大阪大學電機博士，現任亞太優勢微系統股份有限公司董事長兼總經理。

Shih-Yun Hung is currently an engineer at Asia Pacific Microsystems, Inc., and studying in the Institute of Precision Engineering at National Chung Hsing University.

Chun-Kai Liu received his M.S. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an engineer at Asia Pacific Microsystems, Inc.

Chengkuo Lee received his Ph.D. in precision mechanics from the University of Tokyo, Japan. He is currently a vice president at Asia Pacific Microsystems, Inc.

Ruey-Shing Huang received his Ph.D. from the University of New South Wales, Australia. He is the professor at EE Department of NTHU, and the CTO and executive VP of Asia Pacific Microsystems, Inc.

Min-Shyong Lin received his Ph.D. from Osaka University, Osaka, Japan, He is currently a chairman and CEO of Asia Pacific Microsystems, Inc.