

## 第六章 微結構

微結構 (microstructure) 並非是一個感測器、致動器或儀器，而是被定義為一精密元件，如：微鏡片、微噴嘴、微探針和微流道等，需與其他元件配合而具功能性者。下面就各種微結構之製程、特性與應用加以說明。

### 6.1 微鏡片

微鏡片 (microlens) 依成像原理可分為折射式微鏡片 (refractive microlens) 與繞射式微鏡片 (diffractive microlens) 兩種。繞射式微鏡片在重量、體積上均比折射式微鏡片來得小，而且具有高繞射效率、材料的選擇範圍大、特殊的光學特性、設計的自由度高與易配合塑膠射出技術等特點。但折射式微鏡片也有比較容易獲得較大數值孔徑 (numerical aperture, NA)、光學效率較高與對光波長敏感度較低等優點，使得折射式微鏡片與繞射式微鏡片在微光學系統中，同時佔有十分重要的地位。

一般折射式光學元件 (refractive optics element, ROE) 可分為折射率漸進式元件 (gradient-index element, GRIN) 與表面外形元件 (surface profile element)，而繞射式光學元件 (diffractive optics element, DOE) 亦可分為閃爍式繞射光學元件 (blazed DOE) 與量子化繞射光學元件 (quantized DOE) 二大類<sup>(1)</sup>。繞射式光學元件是利用繞射原理來進行功能重建，其元件之精密度大約在  $1\ \mu\text{m}$  左右。而繞射式光學元件通常為單一或雙片式透鏡，在現今超大型積體電路製程技術下，使元件能夠微小化、精密化，並可大量生產來降低成本。在其光電系統的成像元件中，被要求為焦距短、數值孔徑高的微光學元件，使其能運用在光學讀寫頭、條碼閱讀機、雷射印表機、雷射準直透鏡及微小鏡片之成像聚光掃描裝置。因此，更廣泛來說，兩者依其功能的不同，可應用於許多的光學裝置，如 CCD 偵測晶片 (detector chip)、複印機 (copier)<sup>(2)</sup>、光纖連接器 (interconnection)、多工器 (multiplexer)<sup>(3)</sup>、傳真機 (facsimile machine) 等。隨著微製造技術的發展，微鏡片的製作方法也愈來愈多樣化，下面就折射式微鏡片與繞射式微鏡片幾個重要製程加以介紹。

### 6.1.1 折射式微鏡片之製作

光阻熱熔法 (photoresist refractive optics by melting, PROM) 為利用半導體微影 (lithography) 技術，將圓柱光阻製作在基材 (substrate) 上，如圖 6.1(a) 及圖 6.1(b) 所示，再送入烤箱或置於熱板 (hot plate) 上，以超過光阻之玻璃溫度 (約 120–200 °C，溫度視光阻材料而定) 加熱，由於光阻材料內分子增加了動能，以及受到表面張力之作用，使得光阻表面能量趨近於最小，因而形成近似球面的形狀 (圖 6.1(c))。如果要增加微鏡片的穩定性，可利用反應離子蝕刻 (reactive ion etching, RIE) 的方法，將原形狀轉移至基材上 (圖 6.1(d))。

一般所使用的熱熔成形方法，具有技術簡單、成本低廉、對材料和設備要求不高、設計參數穩定且易於掌握等優勢。但在熱熔過程中因光阻與基材間表面張力的影響所呈現的臨界角 (critical angle) 現象，使面形範圍大大受到限制。如圖 6.2 所示，將厚度 3 mm 玻璃基材以 200 °C 的高溫加熱 30 分鐘烤乾，再以旋轉塗佈機在基材表面塗上一層厚度 1  $\mu\text{m}$  之 Shipley AZ 1518 薄基層 (base layer)。此層經過 160 °C 的溫度加熱 30 分鐘使內部結構被聚合化 (polymerized)，形成抗 UV 曝光層後，再塗上一層厚度 11  $\mu\text{m}$  之 Shipley AZ 4620A 正光阻層。再將試片放入烤箱以 90 °C 的溫度烤 30 分鐘，經 UV 燈曝光、顯影，最後圓柱光阻於 160 °C 的加熱板上以 6 分鐘熱熔完成直徑 150  $\mu\text{m}$ –400  $\mu\text{m}$  和數值孔徑 0.1–0.3 之微

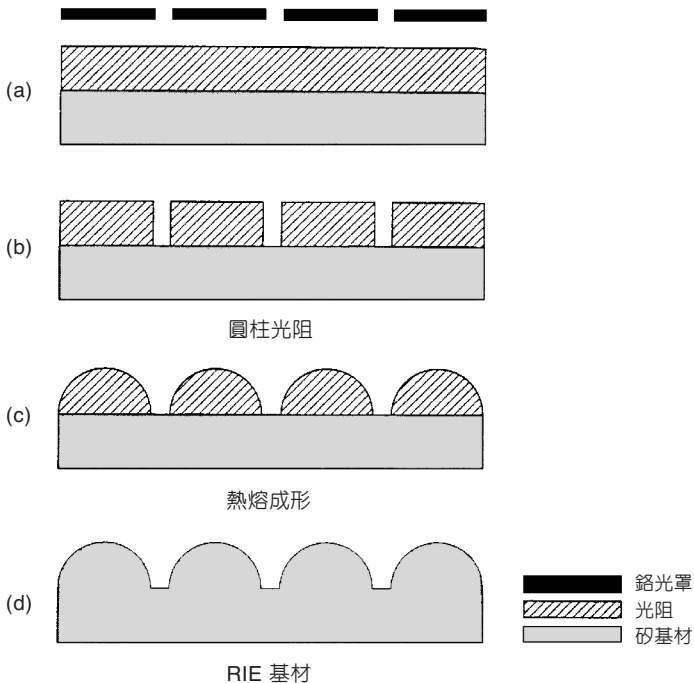


圖 6.1

折射式微鏡片使用光阻熱熔法 (PROM) 技術與乾式蝕刻示意圖<sup>(4)</sup>。

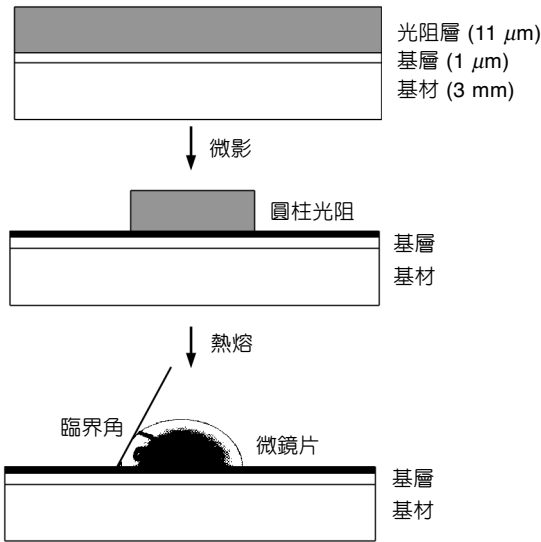


圖 6.2 微鏡片陣列製造步驟<sup>(5)</sup>。

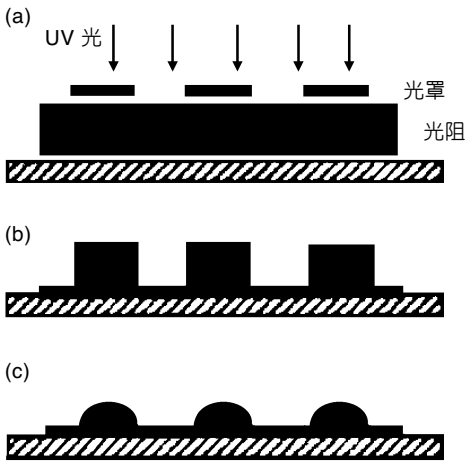


圖 6.3 階梯光刻熱熔法示意圖<sup>(6)</sup>。

鏡片陣列。所以如果在基材和光阻間塗上一層薄基層，在熱熔過程中，可得到比原來未加薄基層之基材有較低的臨界角與數值孔徑之微鏡片<sup>(5)</sup>。

而利用階梯光刻熱熔法 (step heat-forming photoresist method)，如圖 6.3 所示，在基底上塗抹一定厚度之光阻，然後在紫外光下進行光刻，藉由控制紫外光曝光時間使基底仍然殘留一層未能完全曝光 (曝光不足) 的光阻，使其熱熔時能有效地減少臨界角效應對大孔徑微鏡片面形品質的影響，亦可擴展熱熔型微鏡片陣列數值孔徑範圍<sup>(6)</sup>。

有文獻指出，微鏡片陣列製程可結合 IC 製造技術和利用已商業化的 IC 製程材料來完成，並可在 IC 晶圓上整體地大量製造出品質良好的微鏡片陣列。其製作步驟為在石英基材上均勻塗上一層厚度 200 Å 的鋁金屬薄膜，並成形出直徑 15 μm 的孔 (圖6.4(a))，再以

Shipley 1400-27 光阻均勻塗佈在原直徑  $15\ \mu\text{m}$  的孔中心上方，並曝光、顯影出直徑  $30\ \mu\text{m}$  之圓柱光阻臺座 (pedestal)，施以深 UV 硬化過程，使圓柱光阻臺座在溫度超過  $180\ ^\circ\text{C}$  時外形穩定，不會溶解 (圖 6.4(b))。然後以 Shipley TF-20 光阻在圓柱光阻臺座中心上方，經曝光、顯影出直徑  $25\ \mu\text{m}$ 、厚度  $12\ \mu\text{m}$  之圓柱光阻 (圖 6.4(c))，再將試片置入烤箱以  $140\ ^\circ\text{C}$  加熱 15 分鐘，因熱熔而形成微鏡片陣列 (圖 6.4(d))<sup>(7)</sup>，此製程所獲得的微鏡片陣列微結構如圖 6.5 所示。

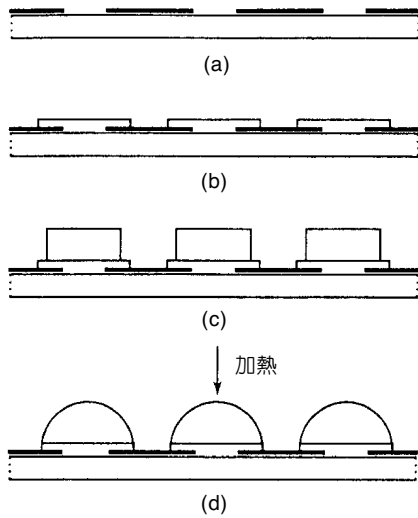


圖 6.4

微鏡片生產步驟：(a) 在石英基材上均勻塗上一層的鋁金屬薄膜，並成形出直徑  $15\ \mu\text{m}$  的孔，(b) 在原直徑  $15\ \mu\text{m}$  的孔上方形成直徑  $30\ \mu\text{m}$  之圓柱光阻臺座，(c) 在圓柱光阻臺座上方顯影出直徑  $25\ \mu\text{m}$ 、高  $12\ \mu\text{m}$  之圓柱光阻，(d) 以  $140\ ^\circ\text{C}$  加熱 15 分鐘，因熱熔而形成微鏡片<sup>(7)</sup>。

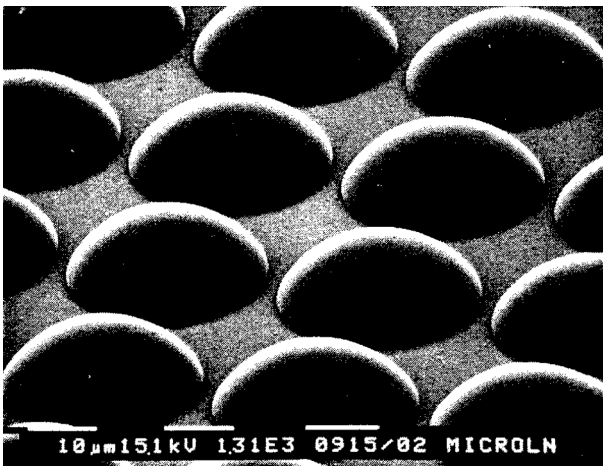


圖 6.5

微鏡片陣列部分 SEM 照片<sup>(7)</sup>。

另外，由麻省理工學院林肯實驗室所設計建造的極座標氦鐳雷射寫出機 (He-Cd laser writer)，將波長  $442\ \text{nm}$  之氦鐳雷射對準與聚焦在以真空吸附於旋轉主軸上且表面塗有一層光阻的基材上，以空氣軸承 (air-bearing) 驅動滑軌來移動聚焦光學裝置與控制雷射束 (laser

beam) 在基材上徑向位置，由電腦控制雷射束在基材橫斷面上的強度與位置。氮鎘雷射寫出機的機械與光學元件則放置在防震桌上，且坐落在溫度與溼度控制的室內，圖 6.6 顯示以此方法製造微鏡片陣列之程序。首先在氧化矽基材塗上一層 AZ 4903 的光阻以 90 °C 溫度烘烤 (圖 6.6(a))，使用波長為 442 nm 之雷射寫出機曝光，並以 AZ 421 顯影產生出粗糙的球形面 (圖 6.6(b))，接著置入烤箱，以超過光阻玻璃溫度之高溫熱熔成圓滑外形 (圖 6.6(c))。要得到光阻初步外形需要控制雷射束的強度，其大小與光阻之間有基本的特性對照曲線，如圖 6.7 為 AZ 4903 光阻以波長 442 nm 之雷射寫出機曝光，並在 AZ 421 顯影 1 分鐘所擬合出的圓滑對照曲線。為了確定微鏡片表面形狀，以探針測廓儀 (stylus profilometer) 分別在雷射寫出機所預成形 (preshaping) 的微鏡片表面進行量測 (圖 6.8(a)) 與熱熔後 (圖 6.8(b)) 的表面所量的軌跡，得知此法可得高品質之微鏡片<sup>(8)</sup>。

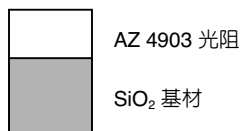
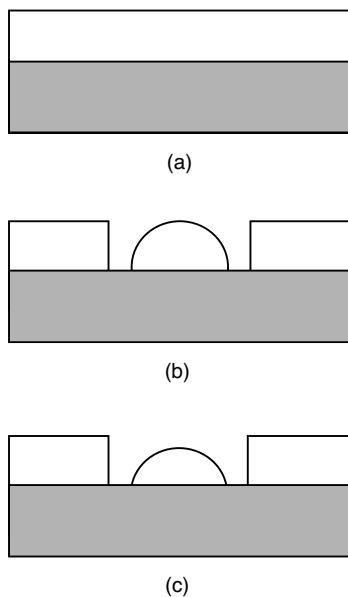


圖 6.6 PROM 微鏡片陣列之製造程序：(a) 基材和光阻，(b) 以雷射寫出機曝光和顯影之基材，(c) 熱熔後之基材<sup>(8)</sup>。

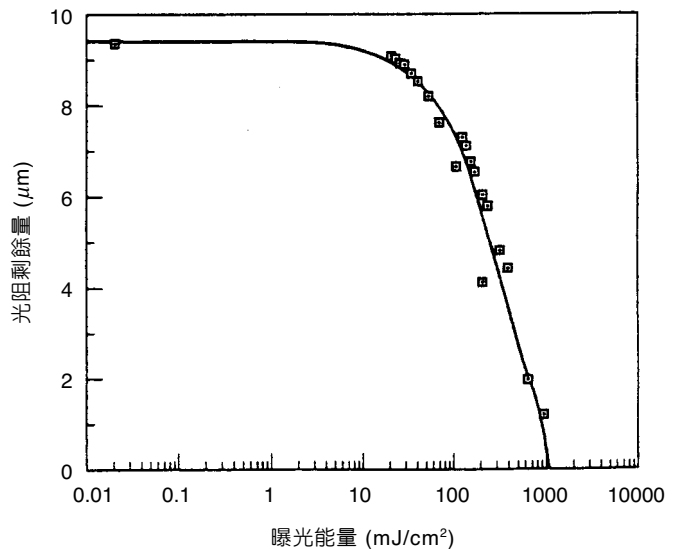


圖 6.7 AZ 4903 正光阻在波長 442 nm 之對照曲線<sup>(8)</sup>。

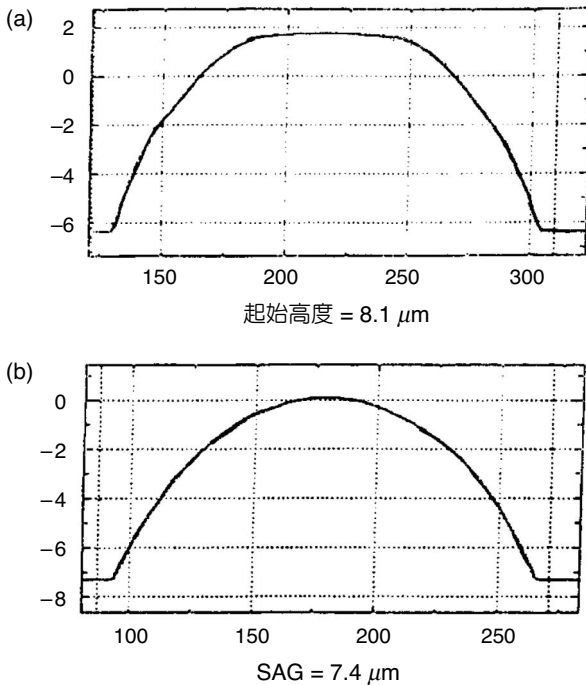


圖 6.8

雷射寫出機所預成形的微鏡片：(a) 熱熔之前，(b) 熱熔之後探針測廓儀軌跡<sup>(8)</sup>。

文獻中曾提及另一種新製程，其微鏡片可藉由一種紫外光固化 (UV curing) 材料自身的表面張力和附著力形成，並由 UV 短時間曝光來加以硬化。因製程非常簡單，可輕易地應用在各種光學裝置與微鏡片系統。首先先製作圓形基座，其目的有三個：(1) 防止液體材料散開和定義微鏡片位置、(2) 定義微鏡片的半徑及 (3) 決定基材與微鏡片間之高度距離。有幾個方法可製作圓形基座，如基材蝕刻 (圖 6.9(a)) 或光阻圖形轉移 (圖 6.9(b))，所產生出來的圓形基座厚度約  $2 \mu\text{m}$ ，可防止做下一個製程時液體材料噴出產生溢流現象。接著成形微鏡片：以微噴嘴 (micro-injector) 或推拔光纖 (tapered optical fiber)，將紫外光固化材料 (NOA77，黏度： $5500 \text{ cps}$ ，折射率： $1.51$ ) 滴入圓形基座上，因為自身的表面張力和附著力使微鏡片成形。微噴嘴被用來製造直徑幾百微米的較大微鏡片，而推拔光纖則使用在尺寸為幾十微米的較小微鏡片製程中。以監視系統觀察微鏡片的形狀，並隨時控制液體材料噴出量，當使用推拔光纖時，由推拔光纖管尖端尺寸來決定液體材料噴出量。之後，所滴出之微鏡片由 UV 短時間曝光 ( $10 \text{ W}$ ， $2 \text{ 秒}$ ) 來加以硬化，在此時間微鏡片體積會縮小  $4\%$ ，但在  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  的高溫中沒有發現變形現象。如圖 6.10 所示，以此法在 InP 基材上所製造出來的微鏡片 SEM 相片，從圖中可觀察出微鏡片表面非常圓滑且具有良好的球狀面形，微鏡片的表面以 AFM 量測後，表面粗糙度也在  $20 \text{ \AA}$  範圍內<sup>(9)</sup>。

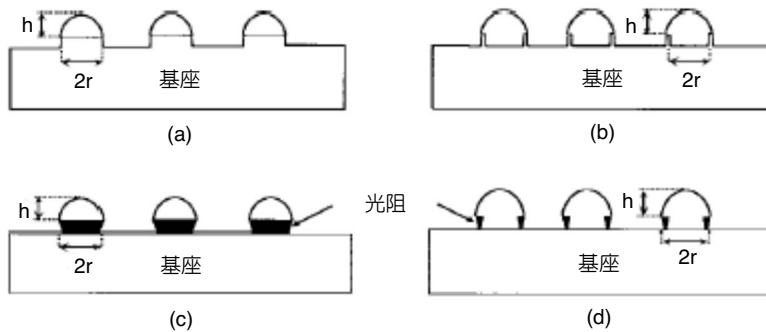


圖 6.9

微鏡片基座，(a) 以基材蝕刻成形之圓形基座，(b) 以基材蝕刻之甜甜圈形狀 (doughnut shape)，(c) 以光阻成形之圓形基座，(d) 以光阻成形之甜甜圈形狀<sup>(9)</sup>。

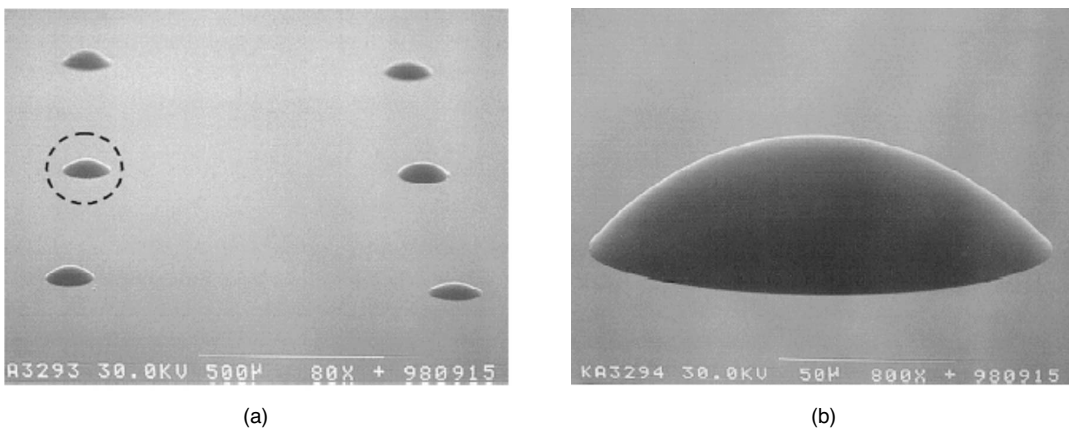


圖 6.10 (a) 微鏡片陣列和 (b) 微鏡片陣列放大之 SEM 圖片 (鏡片高度 =  $40\ \mu\text{m}$ ，基座直徑 =  $70\ \mu\text{m}$ ，鏡片直徑 =  $81\ \mu\text{m}$ )<sup>(9)</sup>。

### 6.1.2 繞射式微鏡片之製作

繞射式微透鏡之製作方式有 RIE 半導體製程法、雷射微影光刻法 (laser beam lithography)、雷射直寫微加工法、電子束微影光刻法 (electron-beam lithography) 與灰階光罩製程法等。

在眾多的加工方法中，使用薄膜沉積技術來製作繞射式微透鏡之製程，其方法為在石英玻璃基材上塗上一層 AZ 4210 光阻層，以標準的光學微影方法將圖案 (圖 6.11) 轉移至光阻上 (圖 6.12(a))，之後再將其移入蒸發室 (evaporation chamber) 內，讓表面沉積一層 SiO (圖 6.12(b))，為了使外形達到所想要的要求，薄膜沉積的過程與時間都要經過適當的控制。會選擇氧化矽 (monoxide) 來當薄膜沉積材料，是因為它相當容易控制，且穩定性極高。在沉積製程後，試片被放入丙酮 (acetone) 浸泡些許時間來移除光阻。值得注意的一點是，光阻層的厚度必須比沉積材料層還要厚，在此情況下丙酮會溶解，並帶走側邊與從沉積材料層下面滲出的光阻 (圖 6.12(c))，而留下一層氧化矽結構層 (圖 6.12(d))，經過幾次重複過程後，能夠產生多層外形元件 (圖 6.13)<sup>(10)</sup>。

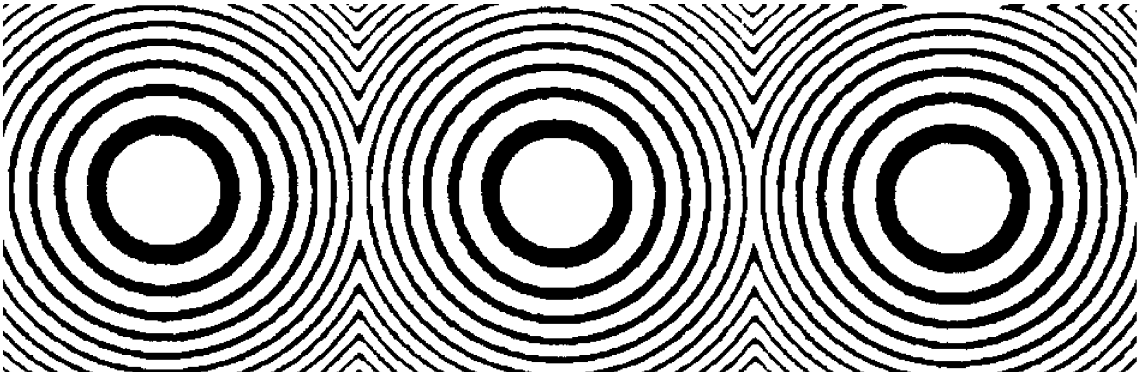


圖 6.11 製造鏡片陣列之部分光罩圖案<sup>(10)</sup>。

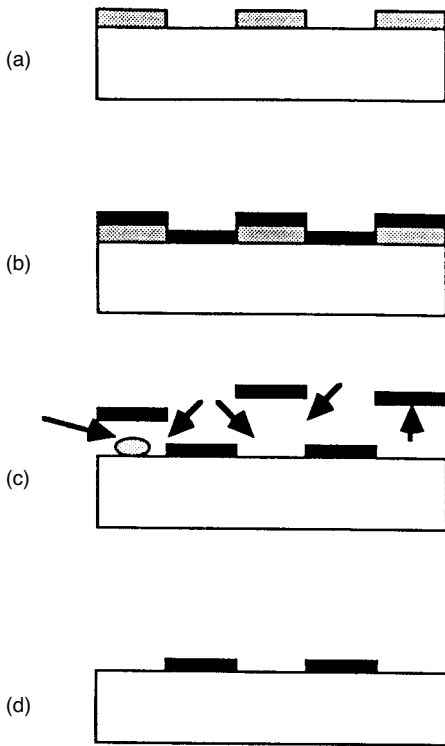


圖 6.12 使用薄膜沉積產生外形格柵 (phase grating) 之製程步驟：(a) 光阻圖樣，(b) 薄膜沉積，(c) 升起 (lift-off)，(d) 最終外形結構<sup>(10)</sup>。

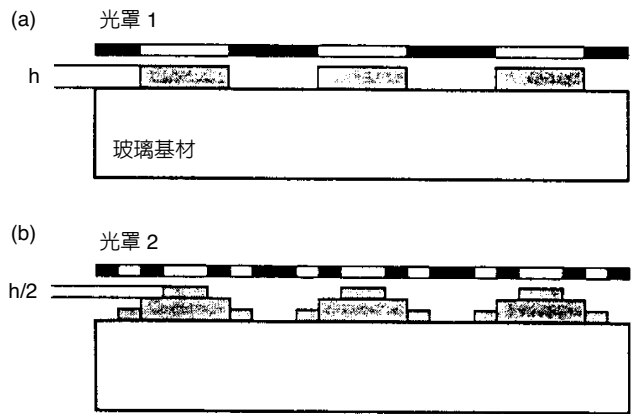


圖 6.13 具有四層外形元件的兩道光罩製造步驟<sup>(10)</sup>。



微光學元件中的二元化光學微鏡片 (binary optic microlens) 為廣泛地以繞射式光學技術為基礎，導入先進次微米製造設備和微米製程技術，並整合具有潛力的超大型積體電路 (very large scale integration, VLSI) 微電路裝置，由於極小的尺寸與嚴厲的製程控制為整合的主要二大考量，許多研究者在過去十年來皆專注在此技術。因此二元化光學微鏡片陣列典型的製造方法是以多次曝光 (multi-mask-level) 將圖形轉移至光阻，並以反應離子蝕刻法 (RIE) 來形成多階段 (multistep phase) 外形，此外形近似 Kinoform 表面如圖 6.14 顯示三次曝光 (three-mask-level) 典型的微鏡片陣列製造方法<sup>(11)</sup>。

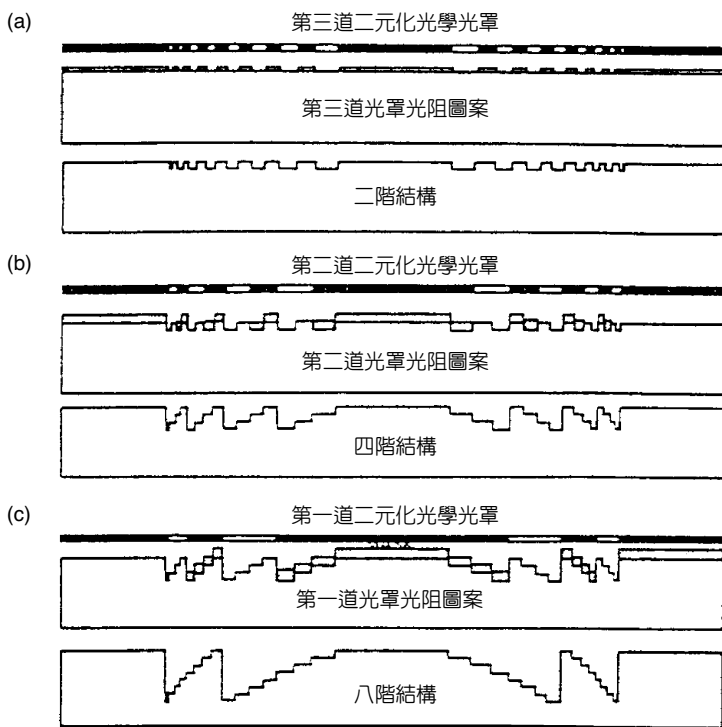


圖 6.14 八階 (eight-phase level) 二元化光學微鏡片製程外觀圖：(a) 第三、(b) 第二和 (c) 第一道之二元化光學光罩<sup>(11)</sup>。

另外，利用雷射直寫在光阻上 (direct laser writing in photoresist) 之微加工方法製造連續輪廓 (continuous-relief) 的平面式微光學元件製作程序，係如圖 6.15 所示先以光學理論設計並計算出表面輪廓外形後，找出曝光資料，計算出光阻曝光強度，接著以雷射直寫系統中的氬鐳雷射束對表面塗有光阻的基材進行曝光，同時控制曝光強度，將圖形轉移至光阻，經顯影即完成原型製作。顯影後之微結構由幾個因素來決定：包括光阻層的表面粗糙度、聚焦雷射點的外形特徵、曝光劑量 (exposure dose) 的精確度與光柵掃描 (raster scan) 之定位精度等。目前，大部分平面式微光學元件所塗的光阻層達到約  $5 \mu\text{m}$  的厚度，光阻通常使用 Shipley AZ 1400-37 或最近 Shipley 的產品 Microposit S1828 旋轉塗佈在玻璃基材上，轉速

3000 rpm 歷時 1 分鐘產生出  $3.3 \mu\text{m}$  的薄膜厚度，如用低轉速與較短的時間可得到較厚的厚度。光阻塗佈後送入烤箱以  $100^\circ\text{C}$  溫度烘烤 1 小時和加熱板  $100^\circ\text{C}$  溫度加熱 1 分鐘之後，放入 Shipley Microposit AZ 303 和去離子水以 1:7 或 1:10 稀釋的溶液，來進行顯影。所得的原型再透過電鑄來製作模具，於熱壓成形或射出成形機上大量複製微鏡片陣列，使產品成本降低，達到商業化的目的。圖 6.16 顯示平面式微光學元件的分類與不同的加工方法。

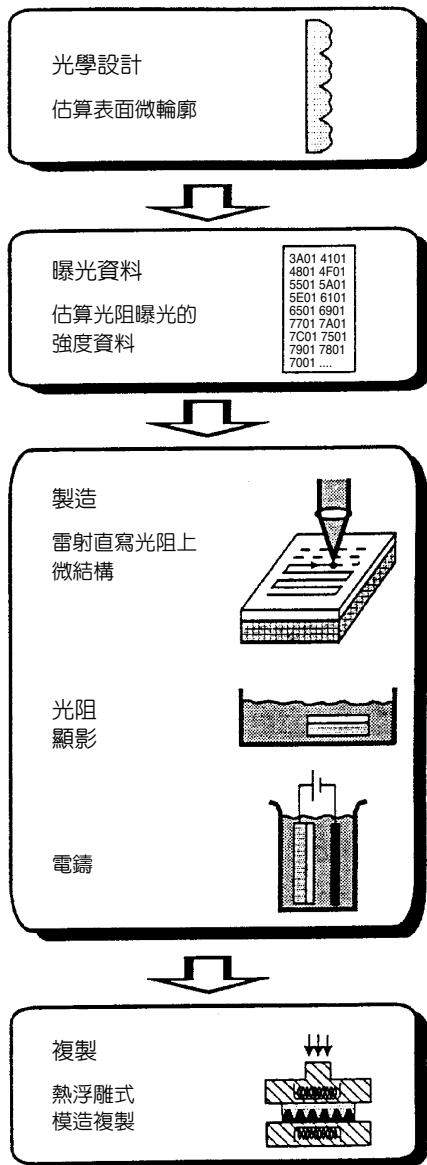


圖 6.15 連續輪廓微光學元件之製作程序<sup>(12)</sup>。

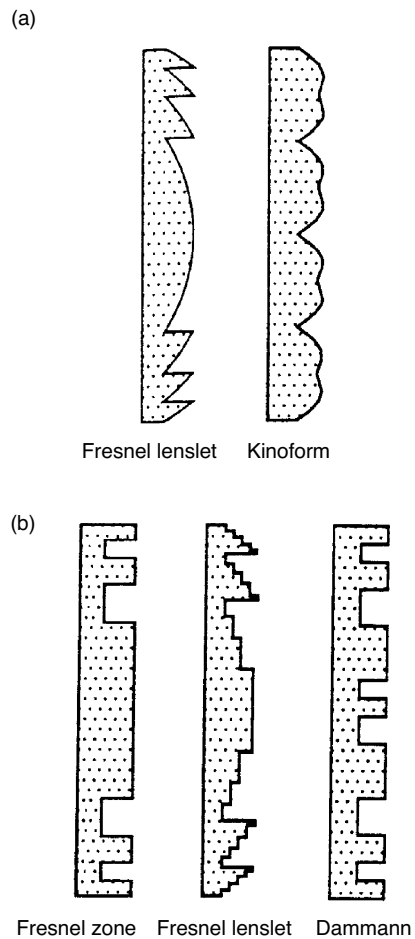


圖 6.16 平面式微光學元件：(a) 以雷射直寫在光阻上為製程之連續輪廓微光學元件範例，(b) 以二元化半導體光罩微影為製程之二元化光學元件<sup>(12)</sup>。

平面式微光學元件如 Fresnel 鏡片，設計與製造最重要的參數為側邊最小實際分割尺寸 (lateral size of the smallest realizable segment)，結合最大輪廓高度，能夠有效地設定達到鏡片最大的數值孔徑。在目前雷射直寫系統中，氬鐳雷射束很容易達到低於  $0.5 \mu\text{m}$  直徑的聚焦點，其在光阻上所產生的線寬，能夠完成單線 (single lines) 曝光與顯影至基材上。無論如何，最有效的限制並非聚焦點尺寸大小，而是掃描線準直度，也就是說即使聚焦點尺寸小於  $1 \mu\text{m}$ ，也不會對連續輪廓微結構帶來任何改善。對於高孔徑的 Fresnel 鏡片，如數值孔徑接近 0.5，需要小心地設計與最佳化。圖 6.17 為以原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 量測相位匹配的 (phase-matched) Fresnel 元件 (PMFE) 之表面形狀影像圖，其為直徑 5 mm 和焦距長度 10 mm ( $\text{NA} = 0.24$ ) 之的平面式微鏡片，被複製到以聚碳酸酯 (polycarbonate) 為材料的薄膜上。此微鏡片被設計使用在波長為 633 nm 之場合，且量出其波長效率為 70%。如圖 6.18 顯示焦距長度  $250 \mu\text{m}$ 、鏡片尺寸大小為  $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$  之 PMFE 陣列 SEM 影像圖<sup>(12)</sup>。

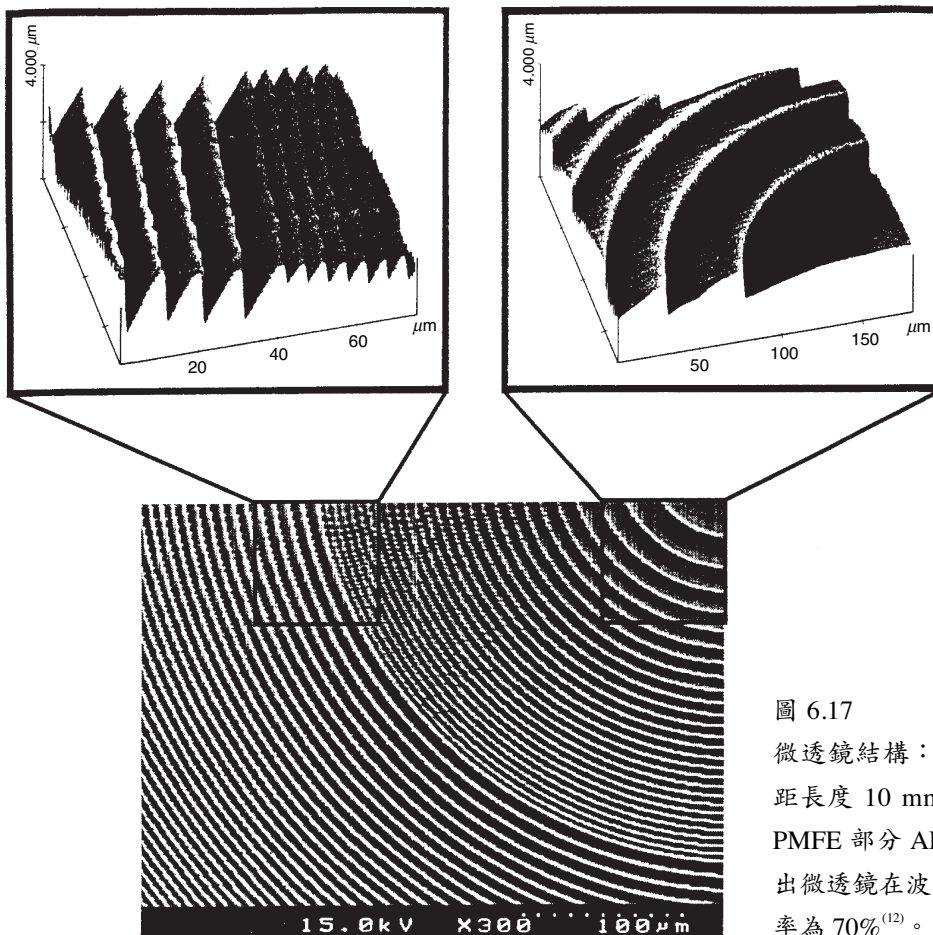


圖 6.17  
微透鏡結構：直徑 5 mm 和焦距長度 10 mm ( $\text{NA} = 0.24$ ) 之 PMFE 部分 AFM 影像圖。已量出微透鏡在波長 633 nm 時，效率為 70%<sup>(12)</sup>。

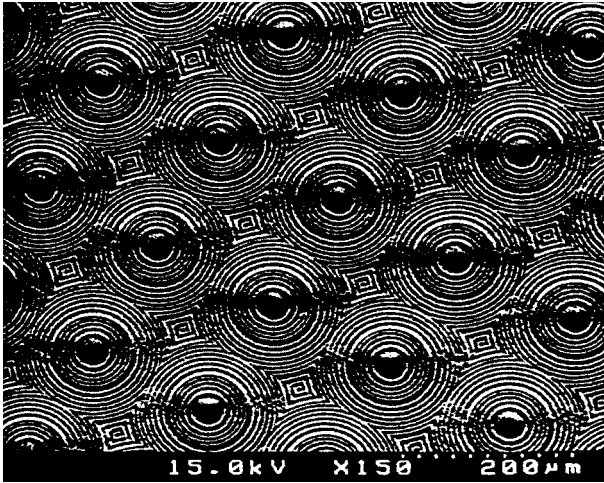


圖 6.18

PMFE ( $150 \times 150 \mu\text{m}$  尺寸大小，焦距長度  $250 \mu\text{m}$ ) 陣列之 SEM 相片<sup>(12)</sup>。

使用灰階光罩製程法使表面呈起伏狀之繞射式光學元件有更簡單精確的製程 (圖 6.19)。利用灰階光罩光密度 (optical density, OD) 值、蝕刻深度與光阻曝光之間參數關係，能在半導體製程中一次完成多階表面形狀之圖案。由於光罩數目增加，使光罩對準時產生的位移誤差也相對地增加，而且使用光罩的數目愈多，製程的手續也愈繁複，同時也提高了不良率和製作成本。因此可藉由灰階光罩製程法，只需一次曝光就可達到相同目的之優勢，來降低製作成本，減少失敗率<sup>(13)</sup>。

目前，不論是折射式微鏡片或繞射式微鏡片，其表面形狀主要之複製方法有二種：一種是將微鏡片的表面形狀拷貝成模具，再採用鑄塑方式來進行生產複製之工作，如 LIGA 製程中，將微鏡片原型透過電鑄造模後，熱壓或射出成形來複製生產<sup>(14)</sup>。另一種複製方法是將微鏡片的表面形狀轉移至基材上，以達到複製產品的目的，通常以離子蝕刻為代表，大部分應用在紅外線元件的製作。反應離子蝕刻法 (reactive ion etching, RIE) 具有高穩定度、高精度、蝕刻面積大、可長時間連續工作、進行微鏡片陣列的表面形狀轉移時蝕刻速度快和選擇性好等優點。傳統蝕刻技術是以光阻或金屬薄層為掩膜對基底材料進行蝕刻，要求掩膜的蝕刻速率低，以保證將掩膜圖形完全轉移至基底材料上，而微鏡片陣列的表面形狀轉移要求光阻與基底材料具有相同或接近的蝕刻速率，使微鏡片的球面面形無失真地轉移至基材上。文獻中找出滿足光阻材料 AZ 4620 與基底材料矽 1:1 蝕刻速率之 RIE 蝕刻參數 (束流密度  $1 \text{ A/cm}^2$ 、離子能量  $500 \text{ eV}$ 、總氣體流量  $3.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、氧氣流量  $0.42 \text{ cm}^3/\text{min}$ )，經由實驗結果得出，實際光阻與基底材料的蝕刻速率比為 1:1.03，基本上完成微鏡片面形的 1:1 複製，且較無側向蝕刻。因此，對於光阻與基底材料蝕刻狀況差異較大時，要獲得 1:1 的蝕刻速率，關鍵在於恰當地選擇好反應氣體及其流量。用這套加工方法所獲得之微鏡片陣列，不只光學特性良好，而且具有很好陣列均勻性<sup>(15)</sup>。

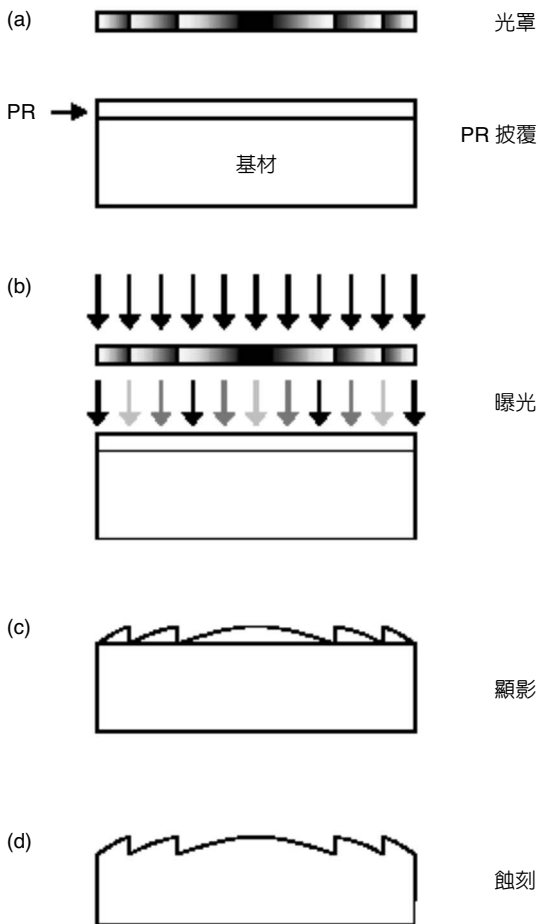


圖 6.19  
灰階光罩製程示意圖<sup>(13)</sup>。

### 6.1.3 微鏡片的其他製程

反射、折射是我們所熟悉的簡易光學特性，應用其特性的相關產品亦多得不勝枚舉。然而隨著科技的進步，市場上產品微小化的時代需求，也凸顯出某些在技術層面上的困難點。微鏡片的問世，正好為微小化的折射光學帶來了一線曙光。

有關於微鏡片的製造方式，目前有非接觸式的浮雕鑄造法<sup>(16)</sup>、光阻迴流法<sup>(17)</sup>、雷射出成形法<sup>(18)</sup>、熱壓法 (hot embossing)<sup>(19)</sup>、LIGA 製造法<sup>(20,21)</sup>。其中以 LIGA 製造法與熱壓法最具精確度與量產價值。以下就此兩種微鏡片的製造方法作簡易之說明。

#### (1) 熱壓法

##### ① 以聚焦離子束 (focused ion beam, FIB) 造模

圖 6.20(a) 是從模子上方往下看的示意圖，越靠近內圈所使用的離子劑量越高，因此在經過 FIB 後會造成模子的深淺不一。圖 6.20(b) 即為其外形。一般以鎳、低應變鋼與矽為造模的材料。

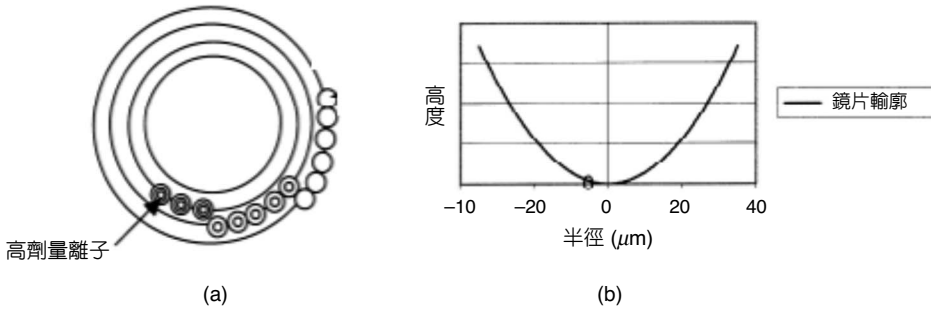


圖 6.20  
以 FIB 造模：  
(a) 從模子上方往下看的示意圖，(b) 為其外形<sup>(19)</sup>。

② 熱壓

將多分子塑膠材料置於模子與鎳平板中間，加熱至 148 °C，並施予微力 20 分鐘後，冷卻到 26 °C，即完成微鏡片的製造程序。圖 6.21 為以熱壓法在 9 mm 厚的矽上所製造出來的微鏡片陣列。

圖 6.22 為每平方公分具有 400 個微鏡片的聚甲基丙烯酸酯 (polymethylmethacry, PMMA) 微鏡片陣列。

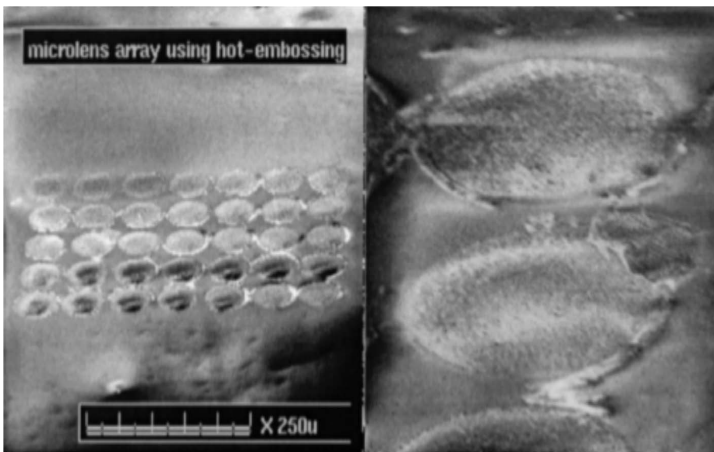


圖 6.21  
以熱浮彫法所製造的微鏡片陣列<sup>(19)</sup>。

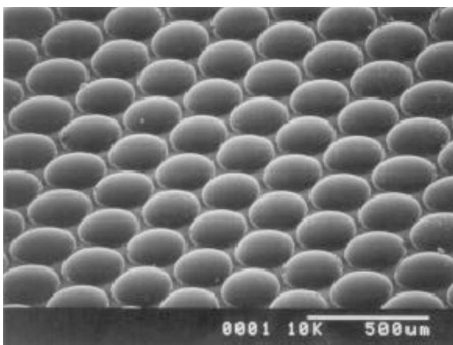


圖 6.22  
每平方公分具有 400 個微鏡片的聚甲基丙烯酸酯微鏡片陣列<sup>(21)</sup>。

(2) LIGA 製造法

微結構製造上應用 LIGA 技術的地方很多。LIGA 所以被廣為運用是因為其製造出的微結構具有次微米以上的精確度、可用於製造複雜微結構以及多樣化等優點。當然，在微鏡片的製造上，LIGA 也不會缺席。

以 LIGA 製造微鏡片所選用的材料一般都是 PMMA，其製造過程有 X 光曝光與熱處理兩程序。

圖 6.23(a) 為第一步驟以 X 光進行曝光。在 PMMA 基材上鋪設 X 光光罩 (mask)，進行曝光。因為光罩的關係，使得在 PMMA 基材上於曝光後分為受 X 光曝光區域與沒受 X 光曝光區域。受 X 光曝光區域的 PMMA 會改變其物理特性，與沒受 X 光曝光區域的 PMMA 有所不同。後續的熱處理程序就是運用這樣的特性來完成微鏡片的成型。如圖 6.23(b) 所示，即為 PMMA 於烤箱中直接加熱冷卻後成型的微鏡片簡圖。

圖 6.24 即說明其差異，未曝光的 PMMA 加熱冷卻過程會延著 A-F-H-G-I 線變化，而曝光的 PMMA 則會延著 A-B-D-C-E 線變化<sup>(20)</sup>。

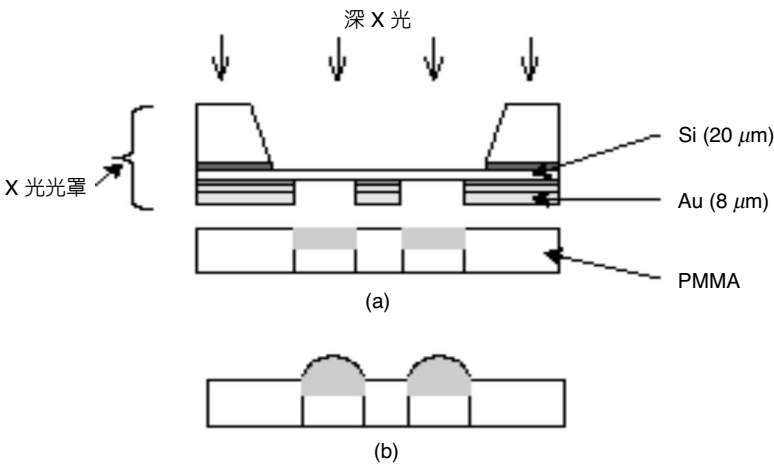


圖 6.23

(a) 為第一步驟以 X 光進行曝光，(b) 為 PMMA 於烤箱中直接加熱冷卻後成形的微鏡片簡圖。

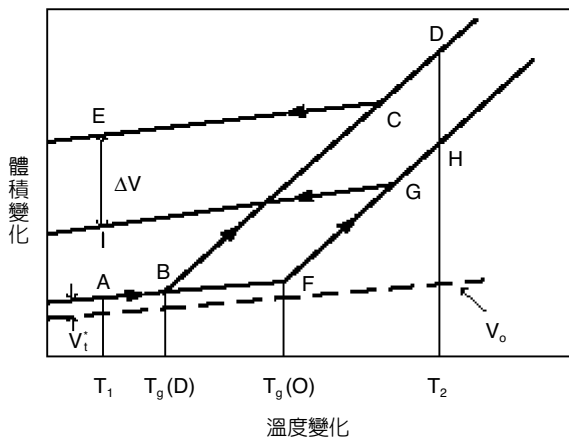


圖 6.24

未曝光的 PMMA 與曝光的 PMMA 其差異說明示意圖<sup>(20)</sup>。

圖 6.25 為所製造出的微鏡片或微鏡片陣列。以 LIGA 製造出的微鏡片直徑為  $30\ \mu\text{m}$ — $1500\ \mu\text{m}$ 。直徑大小決定於熱處理的溫度、時間與冷卻速度。(a) 為直徑  $100\ \mu\text{m}$  的微鏡片陣列，(b) 為  $500\ \mu\text{m}$  的微鏡片，(c) 為  $300\ \mu\text{m}$  的微鏡片，(d) 為含有氣泡的  $700\ \mu\text{m}$  微鏡片。圖中氣泡生成的原因可能是因為 PMMA 的低玻璃轉換溫度所造成，也就是說因為加熱過程中 PMMA 沸騰所導致。

以 LIGA 製造微鏡片的優點為製造方法簡易。只要將光罩改變，甚至連矩形或星形等形狀皆可以此 LIGA 製程製造出來，並非只侷限於半球形狀。所製造的微鏡片或其陣列有很好的表面粗糙度 ( $< 1\ \text{nm}$ )。

產品上運用微鏡片的場合很廣泛，例如生物科技、高速攝影、光與光纖的訊號聯結、光學掃描器、光學感測器、影像顯示器、雷射印表機等。相信讀者如果詳加留意即可發現生活中利用微鏡片的產品將會日益增加。

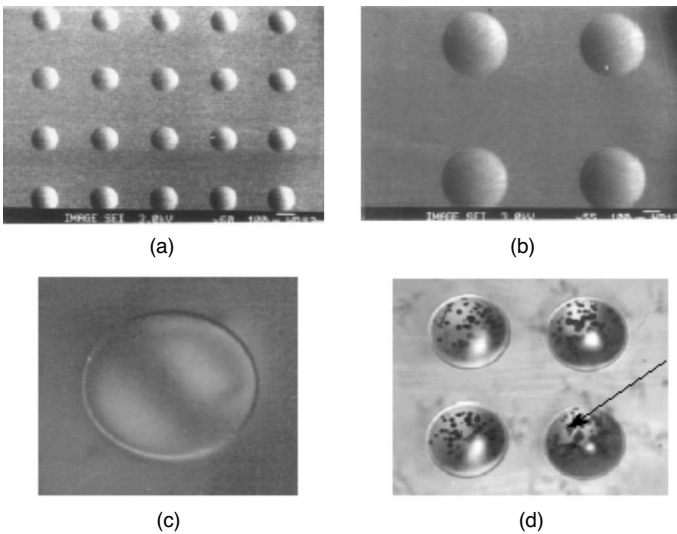


圖 6.25

以 LIGA 所製造出的微鏡片或微鏡片陣列<sup>(20)</sup>。

## 6.2 微噴嘴

機電控制元件於微機電工程領域及產業自動化工程之應用中極具重要性，而微噴嘴的製作方式也因其用途上的差異而有所不同，一般來說較常見的微噴嘴製作方式有準分子雷射加工、微機電製程、感應耦合電漿 (ICP) 深蝕刻技術、線放電加工法 (wire electro-discharge machining, WEDM) 等。而在本章節當中除了列舉微噴嘴的一些特殊用途之外，也介紹一些常見的製程方式與製作過程，希望以微噴嘴為主軸，達到對其他相關產品的開發與研究。



### 6.2.1 印表機噴墨頭

微噴嘴 (micro-nozzle) 的一項重要用途是在於噴墨式印表機的噴墨頭上。隨著電腦的普及，印表機的行情也跟著水漲船高。一般印表機可分成撞擊式與非撞擊式兩大類，撞擊式以點矩陣印表機最為普遍，但是由於使用時產生震動、噪音以及速度慢、列印品質較差等缺點，因此，現在已經被非撞擊式的所取代。非撞擊式的印表機又以雷射印表機與噴墨印表機最常見，目前，印表機的市場主要被雷射印表機與噴墨印表機佔據著，這兩種印表機中以雷射印表機所列印的品質最好，但其缺點是價位過高，相較之下，噴墨印表機價格上就佔有較大的優勢，它能以較為經濟的方式達到高品質的彩色列印，這點不是雷射印表機所能及的。同時，噴墨印表機還有不受列印面積限制以及低耗電量的優點，因此是未來市場的主流之一。而噴墨印表機中噴墨頭為關鍵技術之一，它是由一些微小噴嘴所組成，圖 6.26 為噴墨式印表機之噴嘴片圖示，圖 6.27 為其單一噴嘴的放大圖示，其尺寸約為 30  $\mu\text{m}$ ，透過壓電致動器，能將一電壓脈衝經由致動器將電信號轉成機械能，拍打並壓縮墨水艙的墨水，將墨水經由微噴嘴噴出。

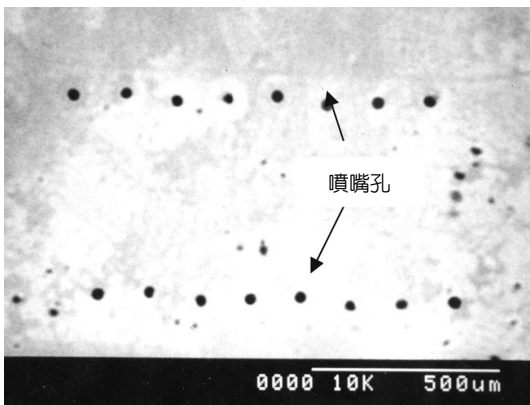


圖 6.26 噴墨式印表機之噴嘴。

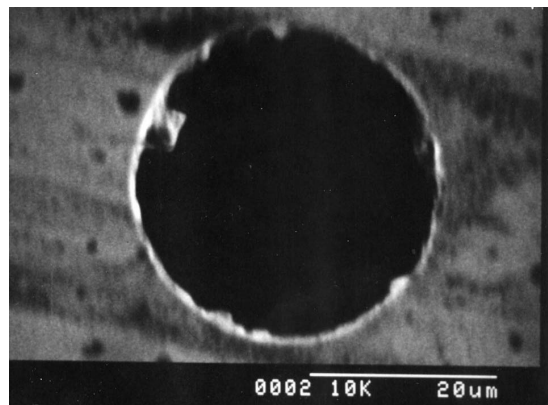


圖 6.27 噴墨式印表機之噴嘴之放大圖示。

微噴嘴的品質好壞影響到墨汁噴出量的多寡，例如，墨汁噴出的受力情形對其運動和幾何形狀的變化受噴墨頭的影響，另外，噴嘴的內部構造也對墨汁的流動情形有影響，可見微噴嘴對列印品質扮演了關鍵的角色。

### 6.2.2 紡口

台灣的天然資源缺乏，紡織工業卻為國家賺進大量的外匯，主要因素是因為多年來人造纖維工業的支持。由於人造纖維工業供給紡織工業價廉物美且高品質的纖維原料，使得

紡織工業持續的穩定發展。再加上台灣在石化工業上的進步，所生產的乙二醇、丙烯酸以及對苯二甲酸等產品，都是纖維工業的重要原料，才能在人造纖維工業上發展成世界第三大的製造國，據估計年產值約高達 1000 億元的新台幣。

紡織工業為民生之必需工業，在我國的眾多工業當中，紡織業是少數具有強大國際競爭力的工業，對國家工業發展扮演了極重要的角色。過去一般都是以天然的纖維為主，在人口持續的成長之下，天然纖維有限，因此，我們對人造纖維的需求逐年增加。以 1994 年來說，台灣地區的人造纖維產量就高達 245 公噸，是世界上人造纖維的第二大產地，其中聚酯纖維的產量更是高居世界首位。纖維產量如此高，主要是建立在於上游原料充足以及進口自動化機械的基礎上，在其他國家的激烈競爭下，台灣在人造纖維的技術方面仍然必須不斷的求新與求變，並提高產品的品質，才能繼續保持領先的地位，並在未來強烈的國際競爭壓力下，繼續維持高成長與高獲利。

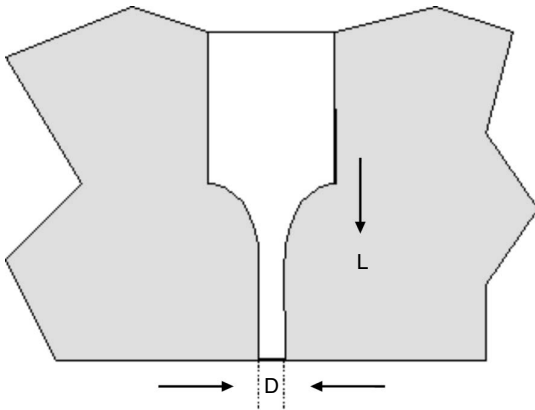
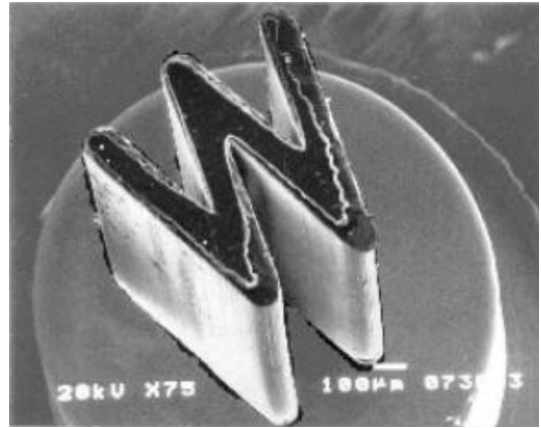
在整個人造纖維的製造過程中，紡口是最關鍵的零件技術，現在精密的紡口大多數是由國外進口，若能提升國內超細纖維紡口的製程技術，再加上台灣纖維上游充裕的聚酯原料，預期將可大大提升人造纖維的附加價值。超細纖維是指每根絲纖密度在 0.5 丹尼 (丹尼是指纖維重量與長度之比，1 丹尼是 1 克的材料拉伸 9000 m 長的細絲) 以下者，具有外觀蓬鬆、自然、防風、防水、透氣、覆蓋性與柔軟性佳的特性，為高價位的人造纖維。

目前，0.5 丹尼的超細纖維可經由紡口直接擠出，再經過固化捲取拉伸而成形。0.1 丹尼以下的細絲則使用複合紡絲法，擠出成形後再行開絲工作。

一般紡口 (spinneret) 的生產技術主要是在放電加工與 X 光深刻模造 (LIGA)。放電加工的孔徑會受深寬比的限制且電極會耗損，只能個別加工，最細的實用孔徑約為 0.2 mm，適合於 0.5 丹尼的抽絲。而 X 光的深刻鑄造其深寬比可大於 100，精密度在 0.1  $\mu\text{m}$  以上，但因為光源不易取得，維修費用高等因素，因此增加了不確定的因素。而使用紫外線光源結合具有高深寬比的厚膜光阻，是近來微機械加工所衍生的另一種方法，它所使用的光源和 LIGA 不同，但卻具有電鑄、模造的特性，故稱為 UV-LIGA。使用此種方法所製造的紡口，具備有高深寬比、高均勻性，以及良好的表面粗糙度等優點。再加上電鑄合金的硬度高，可將紡口的微噴嘴的局部硬度提升，以增加對纖維中二氧化鈦的耐磨性，提高紡口的品質與壽命。

### (1) 紡口的製造技術

在纖維的製造中，紡口決定了纖維的好壞，是關鍵的零件之一。所謂的紡口就是用來抽絲的高精度微小模具，越是精密的模具其價位越高，紡口就是利用耐酸、耐鹼以及耐摩擦的金屬所作成的 (如鉑、鈹合金、不鏽鋼等)，上面具有微小孔洞，而孔洞形狀則視各種不同的纖維而定，圖 6.28 所示為微加工之紡口的微結構斷面圖，而圖 6.29 則是以射出成形複製之 W 形紡口微結構。現今的紡口製造方法有：

圖 6.28 微加工製造之紡口微結構斷面圖<sup>(31)</sup>。圖 6.29 以射出成形複製之 W 形紡口微結構<sup>(31)</sup>。

- ① 微放電加工製造：加工成形的材料範圍廣泛，其精密度也比傳統的加工方式來的好，但是其深寬比受到限制，且電極會耗損且有擴孔的現象，只能夠個別加工。
- ② 光深刻模造術製造：具有高深寬比、粗糙度小的優點，但是其光源取得不易、維修費用高昂以及價格不便宜。其製造於後文詳細介紹，這裡將微放電加工和 X 光深刻技術加工其圓孔特性如表 6.1 所作比較。

表 6.1 微放電加工和 X 光深刻技術加工比較。

	微放電加工	X 光深刻術
精密度	1 $\mu\text{m}$	0.1 $\mu\text{m}$
深寬比	< 10	100
粗糙度	0.2 $\mu\text{m}$	0.03 $\mu\text{m}$
厚度	受深寬比限制	2 mm
生產方式	個別加工	批次生產

傳統的紡口為避免在抽絲過程中阻塞，其線寬設計常大於 100  $\mu\text{m}$ 。因此對紡口的製造而言，提高紡口深度將比減小孔洞大小更為重要。理論上紡口結構的深寬比必須大於 6，如此一來在抽絲的過程中才能使高分子流體在抽絲噴口內達到完全發展 (fully developed)。現行以微放電加工技術製造之紡口，其深寬比僅能達到 3，但若以 X 光深刻術製造紡口，其深寬比可高達 20 以上。除此之外，利用光刻法所製造之紡口更具有均勻性佳、噴口內面粗糙度小等特性，還可以製出微放電技術所難以加工的非圓形斷面，此一重要特性可以用來製造如人造皮革、中空、人造蟬絲等功能性之人造纖維，並利用射出成形及電鑄技術進行

紡口的批量複製，其製造成本將比現行製造方法低。由這些優點看來，利用 X 光深刻術製造紡織纖維紡口，將可能成為未來紡口製造的主流技術。以 X 光深刻術製造超細纖維紡口，將對 0.5 丹尼超細纖維的製程發生巨大衝擊。直接抽絲將提供更快速以及更好的均勻性以取代傳統方法。再者，利用 X 光深刻術可以輕易的製造出不同斷面形狀的噴口，用以製造各種高產值的功能性纖維，其應用更可擴展至工業、醫療等領域。

## (2) 高性能纖維之製造及運用

人造纖維具有一些天然纖維所沒有的特性，尤其是具有強度、尺寸安定性、持久耐用性和能夠抗化學藥品之優點，但是考慮到人們的穿著舒適，人造纖維仍有許多不及天然纖維之處。幸運的是，人造纖維具有可塑性，可改善其性質和附加性，這一點就成為其發展的重點之一。纖維的根數和其橫斷面決定於紡口微噴嘴的小孔數目和形狀，在紡織業上通常為圓形可獲得最大的強度，同時可得到最好的強度和纖維緻密性。可是，橫切面的改變卻可製造出不同的觸感和視覺效果。如中空的纖維能減輕重量、三角形的橫切面可增加紡織物的光澤，或是三葉形纖維可提高其覆蓋性等等。

關於超細纖維紡口的應用與生產製造技術上，目前仍然存在著許多的困難之處有待解決。在熔融紡絲的過程中變數很多，如抽絲的溫度、紡口的孔徑、冷卻方式、冷卻溫度及捲取速度等，然而為了使纖維達到較高的總延伸倍率，以增加纖維的物性和成形效果，抽絲紡口的微噴嘴處必須擁有高深寬比。隨著抽絲纖維孔徑的縮小，相對的也提高了抽絲的溫度和抽絲的壓力，所以紡口的厚度也必須增加，以避免熱應力變形，不致因紡絲過程中的速度差異而影響絲織品的品質。更重要的是，高深寬比的紡口可以讓高分子模流流經紡口時依然保持流體運動，使得各項流動性質物理量如梯度壓力、幾何形狀等不會因巨大壓力而損失，有助於維持紡口的壽命，減少紡絲過程中不必要的損失。

## 6.2.3 加工方式

### 6.2.3.1 準分子雷射加工

自從 1970 年代高功率二氧化碳雷射發展成功以來，雷射已經被廣泛地應用在汽車、國防、航空、精密工業的零件加工、醫療、量測上，雷射具有高平行、高強度、同調性、單一頻率、使材料在瞬間獲得大量熱能的優點，使用在切割、鑽孔、銲接、表面硬化等加工上，具有良好的加工效果。近年來機械業朝高速化、精密化、微細化的方向前進，非傳統加工成為機械工程領域研究主流，許多在過去難以切削加工的硬脆材質或是要求甚高的精密加工，在今天都能以雷射來達成加工目的，包括今日流行的半導體工業，在切割及微細銲接上都能達成其要求。在過去，已有許多的作者將雷射加工列為非傳統加工書籍範圍裡必備的章節，下面針對雷射加工的原理及特性加以介紹。

### (1) 雷射光的特性

雷射光具有以下主要特性：高單色性、同調性、發散性及高強度。

#### ① 高單色性

雷射光的輸出波雖然不是真正的單色性，但雷射具有比其他光源都高出甚多的狹窄帶寬，此一特性對於用來進行測量或度量衡的應用是非常重要的，因為高度的單色性會減少可見的干涉條紋而提高精確度。

#### ② 同調性

同調性與雷射束波形的相位關係有關，波形若具有相同的頻率、相位、大小、方向時稱為同調性。一般光線的光源放射是任意、雜亂的，雷射光波是規律的、可預期的和相同的，此一特性對於像是雷射攝影的應用是非常重要的，因為可以藉由記錄兩個干涉光束的相位關係來儲存物體的波峰。

#### ③ 發散性

雷射產生的光束非常平行，高方向性使得雷射光束能夠聚集，以高效率的方式傳遞到局部面積上，即使經過很長距離的傳送，能量也不會有太大的損失。發散度是由於傳送距離過長而使雷射束直徑增大，藉以測定雷射光束實際直徑的測量方法，通常在產品上都會標註雷射光束發散角的角度。

#### ④ 高強度

被平行化的雷射光束，能夠聚集在一個微小的點上，低發散角度及小直徑點徑可以產生非常高的能量集中。

### (2) 雷射加工的基本原理

雷射加工是利用雷射光的高強度、高同調性的特徵，以聚焦鏡將之聚集成功率密度達  $10^3 - 10^9 \text{ W/cm}^2$  的光點，在工件表面產生局部的加熱熔化，甚至是氣化加熱效應，達到加工目的。當材料表面受到紅外光區的雷射光照射時，光子可以在  $10^{-12}$  秒內將能量傳遞給電子，電子又在  $10^{-9}$  秒內將能量轉換為晶格熱，光能轉換為熱能的時間非常短，雷射光束的功率密度相當高，在單位時間、單位面積內，提供極高的光能使材料表面瞬間獲得大量熱能，這就是利用雷射進行加工的基本原理。

材料表面所獲得的熱能因為時間非常短暫，不及擴散至加工件的內部，幾乎全部集中在表面薄層，工件本體仍可以維持在室溫狀態，但加工件表面溫度可以升高到千度以上，甚至使工件表面熔化、氣化，溫升速度可達每秒  $10^8 - 10^{10}$  度，具有溫升迅速、熱影響區小的特性，對於某些只需要加工工件表層又不希望影響原有材料性質的情況，雷射是非常好的加工方法<sup>(16)</sup>。

### (3) 加工所需熱量分析

要分析雷射加工所需要的熱量，應按照下列過程進行：① 先計算所欲移除材料的體積。② 根據材料的物理性質，計算從室溫加熱到熔點、熔點加熱到沸點、沸點再加熱到氣化總共所需的熱量總和。③ 依照雷射脈衝計算所需的能量應為多少。

一般常見的雷射有以下四類：

#### ① 氣體雷射

常見的有二氧化碳雷射及準分子雷射 (excimer laser)。二氧化碳雷射是較早被使用的氣體雷射，在材料加工、醫療使用、軍事武器、環境量測上有廣泛的應用，依照使用的功率範圍可分為低功率 (小於 200 W)、中功率 (200—1600 W)、高功率 (大於 1600 W 以上) 等三種。準分子雷射又稱深紫外線雷射，近來常被眼科醫生使用來作開刀工具，目前工業界也使用在晶圓表面清洗、有機高分子材料的剝離上，效果很好<sup>(17)</sup>。

#### ② 固體雷射

最常見的是 Nd-YAG 雷射，Nd-YAG 雷射是固體雷射中的主流，使用在許多加工上的應用，也常見於醫療用途，圖 6.30 為台灣雷技公司所生產的 Nd-YAG 雷射醫療用機。

#### ③ 半導體雷射

半導體雷射具有發出的光可用光纖傳輸的優點，加工上可以應用在像是外科手術用針的局部退火鑽孔、局部淬火或銲接上<sup>(19)</sup>。

#### ④ 染料雷射，較少使用在加工上。



圖 6.30  
醫療用 Nd-YAG 雷射機<sup>(24)</sup>。

#### (4) 雷射鑽孔加工的原理

當材料表面受到高功率密度雷射光束照射後，會產生氣體與液體混合的「熔池」，氣體壓力達到某種程度時，氣體本身連同液體向熔池外噴射，形成一小孔。液體－氣體的比例隨功率密度的提高而減小，當功率密度更高時，轉變成「固體－氣體」混合的型態，如圖 6.31 所示<sup>(20)</sup>。

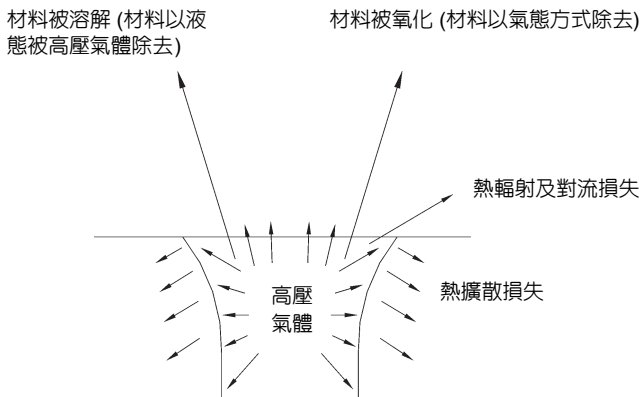


圖 6.31  
雷射鑽孔原理。

#### (5) 雷射鑽孔與傳統鑽孔比較

鑽孔是雷射加工最早的應用之一，發展至今幾乎所有材質都能鑽孔，如塑膠、紙、橡膠、陶瓷、複合材料、鑽石及高硬度合金等。它是以高功率密度的光束將材料直接氣化，形成所需要的孔，與傳統機械式鑽孔比較，具有無毛邊、加工速率快、可鑽硬脆材料、可在不規則表面上鑽孔的優點，缺點則是孔容易形成推拔狀、孔深受限制及成本高。一般而言，二氧化碳雷射及 Nd-YAG 雷射均能使用在鑽孔上，Nd-YAG 雷射波長較短，可用於較微細的加工。

#### (6) 雷射鑽孔的應用

許多在過去傳統加工所無法進行的鑽孔，如硬脆材料－陶瓷，如圖 6.32 直接接觸式的傳統機械鑽孔容易在鑽孔時產生材料龜裂現象，雷射鑽孔因為是非接觸式，可以獲得良好的效果。印表機所使的墨水夾前端的噴嘴，因為噴嘴孔非常細微，使用雷射加工能獲得良好效果，如圖 6.33 與圖 6.34 所示。

#### 6.2.3.2 LIGA 的製造程序

LIGA之技術領域可分為兩方面：(1) 微影 (lithography) 與 (2) 電氣沉積 (electro deposition)、電鑄 (electroforming)、電鍍 (electroplating)。

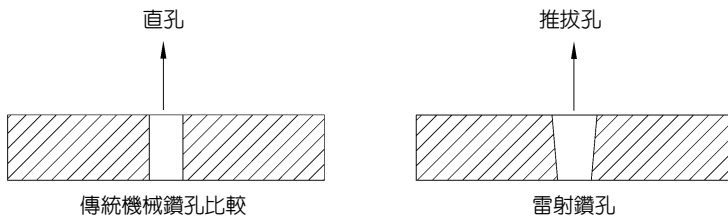


圖 6.32  
傳統鑽孔與雷射鑽孔比較。

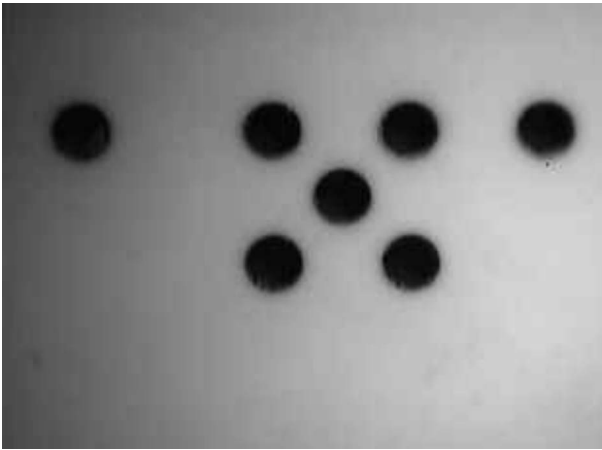


圖 6.33  
在陶瓷上鑽 0.3 mm 的孔<sup>(27)</sup>。

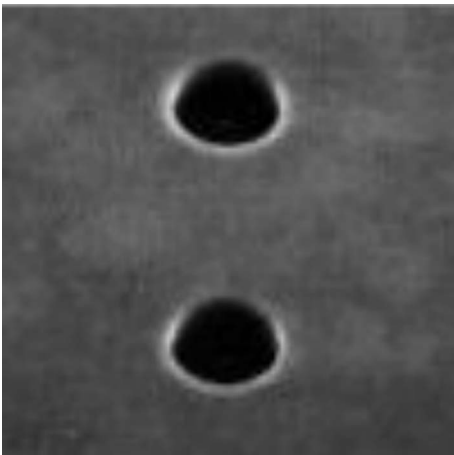


圖 6.34  
使用雷射鑽孔的噴墨嘴<sup>(28)</sup>。

### (1) 微影技術

微影之定義，就是將光罩 (photo mask) 上之圖案 (pattern) 轉移至光阻 (photo-resist) 上面，由於光阻材料之正負性質不同，經顯影 (develop) 後，光阻圖案會和原圖案完全相同或呈互補。



微影製程可說是半導體製程之關鍵製程，其主要有以下步驟：

1. 表面清洗：表面清洗是去除晶片表面氧化物、雜質、油質及水分子。
2. 塗底 (priming)：塗底是在晶片表面塗上一層 HMDS (hexamethyldisilazane) 化合物，以增加光阻與表面的附著力。
3. 光阻覆蓋：光阻是一種感光材料，由感光劑、樹脂及溶劑所混合而成。而光阻應具備以下特性，諸如高光源吸收率、高解析度、高光感度、抗蝕劑性、高附著性、低黏滯係數以及高對比等。
4. 軟烤 (soft bake)：將晶片上之光阻層溶劑從光阻底驅除，使光阻由原來之液態軟烤成固態之薄膜，使光阻層對晶片表面之附著力加強。
5. 曝光：光蝕刻微影技術是用已製成圖案之光罩或光阻，選擇性的保護工件表面後，以各種光源蝕刻除去未被光罩或光阻覆蓋的部份，而得到欲加工之幾何形狀。
6. 顯影：曝光後，為使圖案顯現，必須移去不必要之光阻。負光阻顯影液會將未曝光之部份以溶劑洗去，已曝光部份則因分子聚合而留下圖形，對正光阻而言，曝光部份將被洗去，而留下未曝光部份圖形。與負光阻相反，目前正光阻之顯影液以不含金屬離子且稀釋過 (2.38%) 的 TMAH (tetramethylammonium hydroxide) 為主。
7. 硬烤 (hard bake)：在光阻顯影成像後，最後仍會經過一道烘烤，其目的在移去剩餘之溶劑及水氣，使光阻內未溶解之感光化合物和樹脂間之結合更緊密，以增加光阻對熱之穩定性及底層物質之附著力，在將來之蝕刻或離子植入製程中，能確實發揮保護圖形之功能。

## (2) 深刻技術

### ① 光蝕刻 (photolithography)

台灣의 同步輻射 (SRRC) 電子束能量為 1.3 GeV 到 1.5 GeV，特徵波長為 0.89 nm 到 0.54 nm，屬於低能量之同步輻射光。若使用 PMMA，在恰當時間內曝光深度約為 300  $\mu\text{m}$ 。針對上述缺點，SRRC 發展共形光罩 (conformal mask) 及多次曝光技術，可將曝光深度推到 1 mm 之上。

X 光深刻術的橫向精度由光罩及曝光參數決定，一般而言可達 0.1  $\mu\text{m}$ 。深寬比和孔徑大小有關，大約多在 50 到 100 之間。深刻壁的粗糙度受 PMMA 分子量及二次電子放射之影響，約可達平均約 30 nm 面粗糙度。

### ② 紫外光深刻

此法使用 G-line 的紫外光源，光罩製作簡單，曝光時間在十分鐘左右，微結構深度約 100  $\mu\text{m}$  左右，採深寬比小於 10，橫向精度受底切 (undercut) 之影響，僅達 2 到 3  $\mu\text{m}$  (Fraunhofer ISIT 1994 年報)。進一步的改善曝光系統，也許能改善底切現象，這個工作由柏林的弗勞夫研究所及蘇新公司共同研發中。

紫外線深刻術使用赫斯公司 (Hoechst) AZ 4000 系列正型厚膜光阻曝光，除了製造深刻模之外也可用於直接生產微系統元件。除此之外，美國的喬治亞技術學院也發展以 polyimide 為光阻的紫外線深刻法。

### ③ 雷射深刻

準分子雷射 (excimer laser) 的多種波長都在紫外線的範圍，剛好可以擊斷多數分子結構的鏈結，造成強烈而且局部的能量吸收。受高能量雷射照射的部分，分子鏈撕裂而飛濺出，有如切削一般。這種雷射切削技術就稱為雷射光刨法 (laser ablation)。

雷射深刻製模的彈性很大，深度和橫向精度可以和 X 光深刻相較。一般而言，深寬比大於 100，深度數百微米，而精度均為微米之內，但是面粗糙度及準直較 X 光深刻差。

### ④ 反應離子束蝕刻

以反應離子蝕刻在矽晶片上製造深刻結構來取代 X 光深刻的工作，反應離子蝕刻目前所達深度為 500  $\mu\text{m}$ ，橫向精度 1  $\mu\text{m}$ ，深寬比 15。必須小心控制蝕刻過程，才能製造 90 度的垂直壁面，蝕刻速度為 2  $\mu\text{m}$ 。

## (3) 電鑄技術

電鑄步驟的示意圖如圖 6.35 所示。一般而言，經光刻後所形成的光阻模版為三層式結構，最底部為非導電的矽晶圓、玻璃、陶瓷或塑膠等基材，其次是作為電鑄起始層的導電金屬，最上層為光刻後的光阻結構。

圖 6.36 為電鑄系統架構與陰陽極作用示意圖，其中光阻模版在電鑄槽中作為陰極，而欲電鑄的純金屬材料盛於鈦籃 (titanium basket) 中作為陽極。包裹鈦籃之陽極袋最好用內面起毛之棉布或塑膠纖維布，過濾陽極金屬溶解時的不純物。在電鑄過程中，接上外部直流電源使兩極產生電壓，此時陽極金屬會溶解於鑄液中，形成金屬離子並放出電子，陰極則獲得電子使金屬離子還原並沉積於模板中。因導電起始層僅有數千埃 ( $\text{\AA}$ )，故在開始沉積時宜先以低電流密度為之，等鑄層加厚再加大電流密度，否則沉積層會呈現燒焦狀態。電鑄前待鑄件必須經過適當之處理，以確保良好之電鑄品質。一般電鑄前處理步驟為：水洗、脫脂、水洗、酸洗活化、水洗、浸漬離型劑、水洗。此外，為除去顯影後電鑄起始層表面殘存的光阻，待鑄件可進行氧電漿表面潔淨處理。

純水沖洗目的在於去除待鑄件之微粒雜質，並清除各前處理程序之殘留藥劑，以避免污染鑄液。另外，具高深寬比的光阻模版將使陷入圖案的空氣難以排除，致使電鑄層產生缺陷。為了排除圖案內的空氣，使電鑄液能與電鑄起始層緊密的接觸，可將待鑄件在放入鑄液前，先浸入純水中並進行短暫的超音波處理。脫脂與酸洗活化的目的，分別是去除附著於電鑄起始層表面的油脂類污染物與氧化層，以保持鑄液之潔淨及金屬沉積層能密著於電鑄起始層。浸漬離型劑 (重鉻酸鉀) 的目的則是為了電鑄完成之後，電鑄層能與模版順利

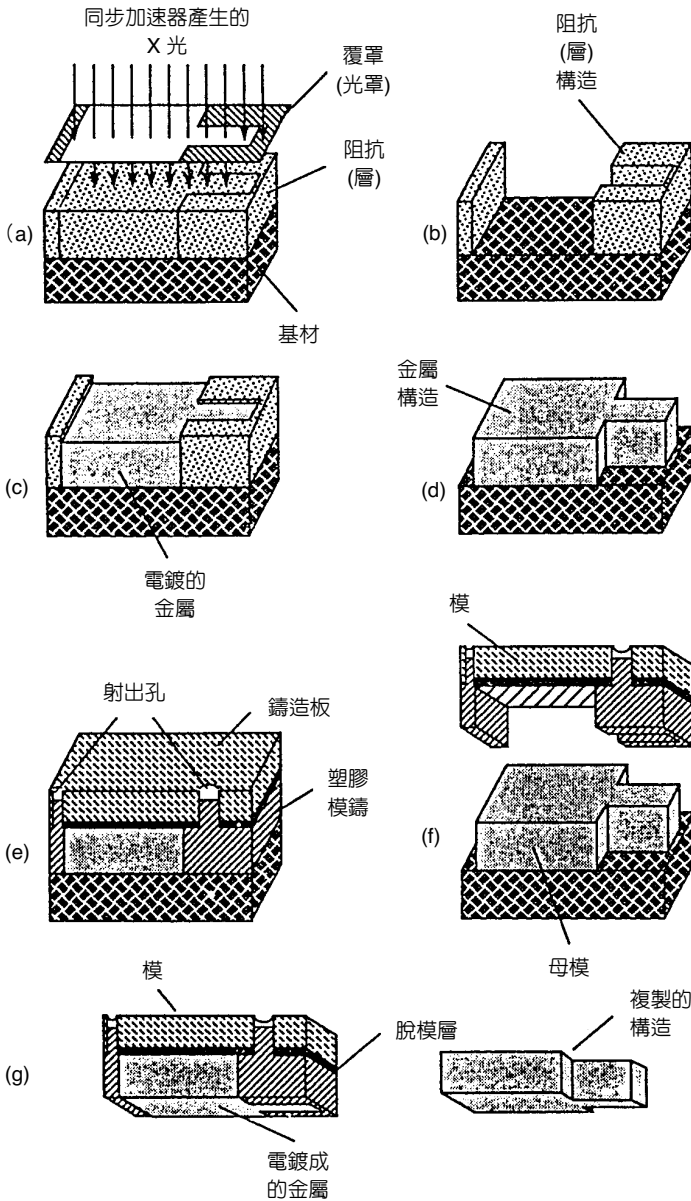


圖 6.35 電鑄過程示意圖<sup>(29)</sup>。

分離所施行的步驟。前處理完成之待鑄件應立即置於電鑄槽中，以免因與空氣接觸而產生氧化作用，並且需要在最短時間內啟動電流進行電鑄，否則會發生陰極金屬溶解的現象。

待鑄件經過前處理後露出活化的金屬起始層，電鑄金屬即由此起始層開始成長，最後形成與光阻形態互補 (complementary) 的金屬結構。當電鑄進行中應儘量避免拿出鑄件觀察，以免鑄層氧化致使後續沉積不易，或容易產生界面剝離現象。若必須在電鑄進行中觀察鑄層，則鑄件拿出鑄液面後，在鑄層表面鑄液尚未乾燥前即必須將鑄件重新置入鑄液

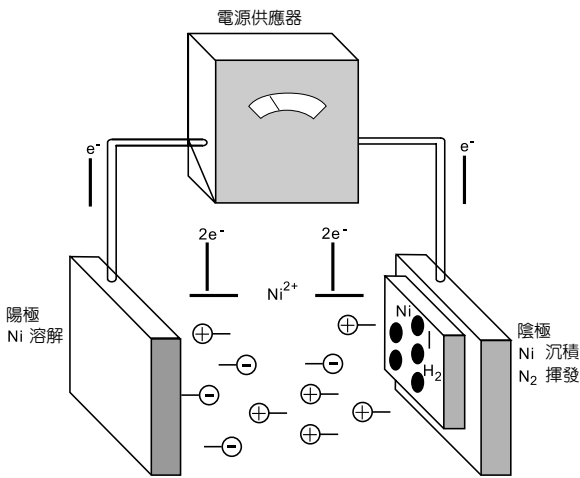


圖 6.36  
電鑄系統架構<sup>(29)</sup>。

中。電鑄完成後，鑄件須進行純水沖洗並加以乾燥，以避免鑄件表面產生斑點、鏽及變色。此外，為了使電鑄後的結構高度均一或表面平滑，必須在去除光阻前經過研磨拋光，以適應結構的應用或後續的膠模造成形，最後將工件浸在化學溶液中去除光阻，完成電鑄結構。

### 6.2.3.3 微放電加工

#### (1) 微孔加工

提到微放電加工免不了就提到微孔加工。微孔加工在工業上應用廣泛，如噴墨印表機之噴嘴、顯示器電子鎗小孔、高速電腦之微連接器及通訊裝置之元件。但是，利用傳統之微孔鑽床來加工時受限於最小鑽頭直徑不能小於  $50\ \mu\text{m}$ ，故僅可加工孔徑在此範圍以上之小孔。此外，雷射加工法及電子束加工法雖亦可用來加工微小孔，惟雷射加工法會有形狀及孔壁面粗度大的問題，而電子束加工法則效率低。若能改用線放電加工的方式來加工，除可製作出直徑  $10\ \mu\text{m}$  之微孔、表面粗度在  $0.1\ \mu\text{m}$  外，並能改進孔徑精度。但線放電加工僅能針對導電性材料，為其最大限制。線放電加工的原理與傳統放電加工方法相同，但放電能量僅為其數十或數百分之一。現今線放電加工技術中，日本開發出之超微細放電加工機具最小孔徑可達  $5\ \mu\text{m}$ 、製造精度可達  $\pm 1\ \mu\text{m}$ ，而表面粗度達  $0.1\ \mu\text{m}$  之水準。

#### (2) 三次元線放電加工

三次元線放電加工的發展與應用上，可用於微小模具與零組件的製造，例如雙層微齒輪的模具；其特點是可在導電材料上加工出三次元立體形狀，而製造出微小衝模和衝頭。在傳統放電加工的過程中，電極的耗損是不可避免的，加工時電極移動路徑需適當規劃，

使電極的磨耗趨於均勻。在微放電加工中，因為電極尺寸小，電極磨耗不但影響尺寸精度，且會造成形狀的變化，電極磨耗顯得較為嚴重，因此需將電極磨耗即時補償，才能使加工形狀與精度符合高精度的要求。圖 6.37 為碳化鎢電極的 SEM 圖。

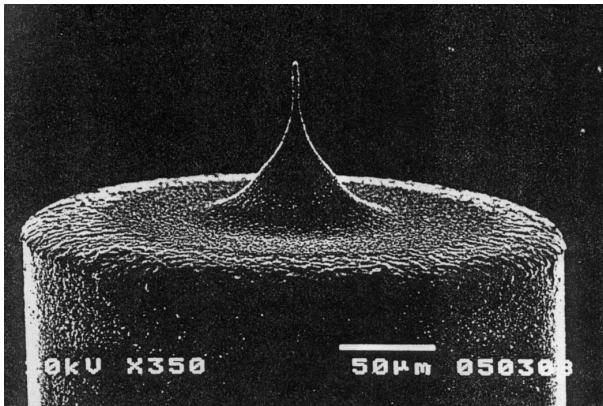


圖 6.37  
碳化鎢電極 SEM 圖。

### (3) 電極製作

在加工技術方面，電極斷面的形狀也和加工形狀有關，例如欲獲得尖銳稜角的加工形狀，就可採用斷面形狀為方形的電極加工。當電極截面形狀為方形時，尖角和前端的磨損特別嚴重，所以設計特別的加工路徑使電極能夠均勻的磨損，就可使電極在軸向均勻磨損，而不會在側向(徑向)磨損，而改變電極形狀。另外，經由一層一層的進行加工，以微量的加工深度，就可以在微方孔加工中，使電極均勻磨耗，而獲得垂直平整側壁的微方孔。其製程是以微放電研磨法加工出方形截面的電極，並將底端修整平坦，加工時將電極以平均順序所規劃的路徑移動，就可獲得具有垂直平整側壁的微方孔。

### (4) 微小噴嘴的製作

依圖 6.38 所示，使用微放電、電解及電鑄的複合加工法，可以加工出內外不同形狀的微小噴嘴，其加工步驟如下：

- (a) 以線放電修整法 (wire electrodischarge grinding, WEDG) 放電加工微小電極，此時可以控制噴嘴內徑的形狀，但其表面粗度較大。
- (b) 以 WEDG 電解法拋光微小電極表面，可以將表面粗度減小到  $0.1 \mu\text{m}$  以下。
- (c) 電鍍加工，將微小電極移入電鍍槽進行電鍍。
- (d) 以 WEDG 放電法加工電鍍層，將電鍍層不規則形狀的外形修整為所需要的尺寸。
- (e) 進行微小電極和電鍍層的剝離，即可完成微小噴嘴的加工製造，如圖 6.39 與圖 6.40 所示。

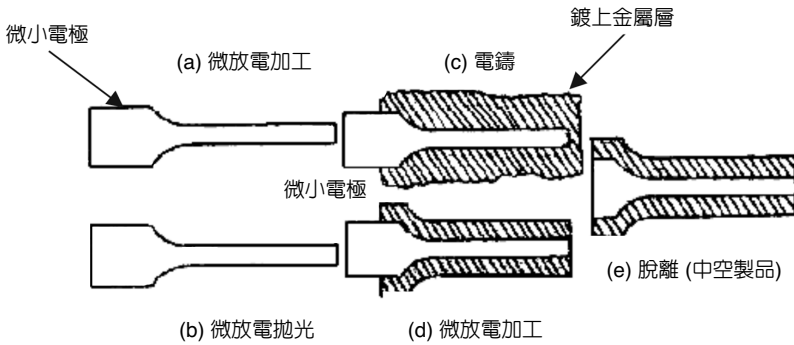
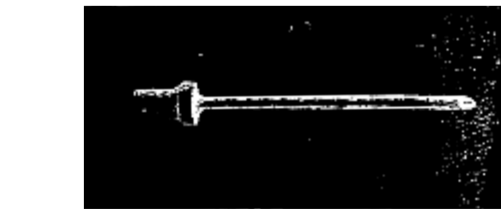
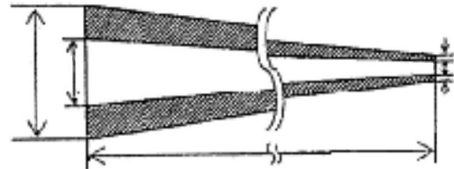
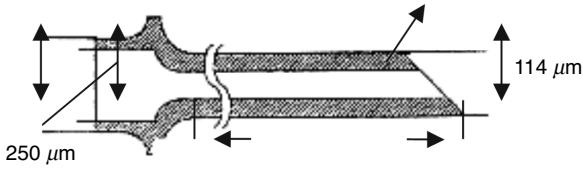
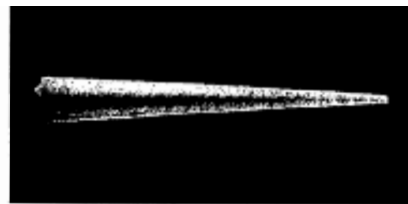


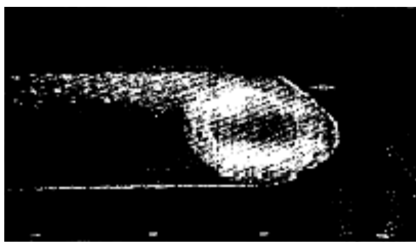
圖 6.38 微小噴嘴加工製程<sup>(30)</sup>。



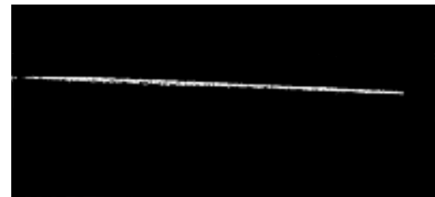
(a) 1000 μm



(a) 1000 μm



(b) 1000 μm



(b) 1000 μm

圖 6.40 微噴嘴加工例<sup>(30)</sup>。

圖 6.39 微針頭加工例<sup>(30)</sup>。

### 6.2.4 微噴嘴應用

另外，利用微噴嘴製成的微火箭推進器可應用在先進的太空技術中，因為它能減少發射火箭的成本與飛行次數，並能增加任務的可靠度。此外微火箭發射器上的各式微零件都具有良好的靈活性與實用性，大大的提升其實用性<sup>(32)</sup>。

圖 6.41 為微火箭噴射器之噴嘴，利用矽晶片經蝕刻後形成微蒸氣室和縮孔，上方用玻璃密封，液體由下方進入經由加熱器形成蒸氣再由噴嘴噴出造成推進力，因為矽是良好導體，可使加熱達到最好的效果。

另有對稱型微火箭噴射器，如圖 6.42 所示，此種設計藉由兩邊加熱器更能有效率地增加能量。

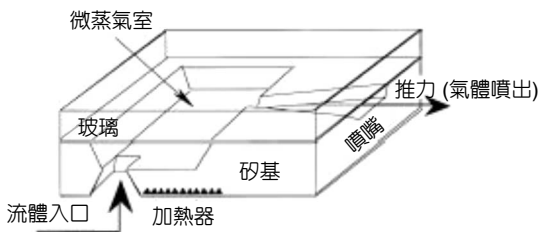


圖 6.41  
側邊噴嘴之微火箭推進器<sup>(32)</sup>。

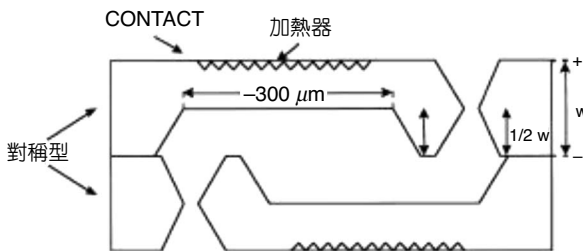


圖 6.42  
對稱型火箭噴射器 (噴嘴在上方)<sup>(32)</sup>。

微噴嘴的應用除了微火箭推進器外，還包括了「太空傘」。所謂太空傘就是一種能在太空展開，直徑在幾米和幾十米、厚度在幾微米和幾十微米之間的傘狀物體。目前這種太空傘的原形已經出現了，如俄羅斯早在幾年前就試驗過一種供地面夜間照明所用的「太陽傘」，它如月亮般可反射陽光，展開直徑可達 20 m 左右；此外它還可應用在軍事用途上，如導彈突防等，只需在基礎上稍作修改即可。太空傘平時放置在轉盤式傘包內，當傘包進入太空時則啟動微噴嘴起旋，並以相應的離心力將太空傘展開<sup>(33)</sup>。

除此之外，微噴嘴還可應用在快速成型法 (rapid prototyping)<sup>(34)</sup> 及微小液滴分配器<sup>(35)</sup> 上。此種快速成形法是利用微噴嘴射出熔融的金屬液，透過數值控制射出時間，經過空氣的冷卻形成半熔化狀態的微小顆粒，然後堆疊冷卻成型。如圖 6.43 所示。

利用此種成形法可堆疊出小體積的成品 (圖 6.44)，而成品的大小和粗糙度 (圖 6.45) 取決於噴頭縮口的大小，噴頭縮口越小射出的金屬顆粒越小 (圖 6.46)，所堆疊出來的成品也就越精細。

微小液滴分配器 (圖 6.47) 係利用圖 6.48 之方法製作而成，此分配器可分離出兆分之一升 (約為 0.001 nL) 的微小液滴 (圖 6.49)，可應用在液體取樣。

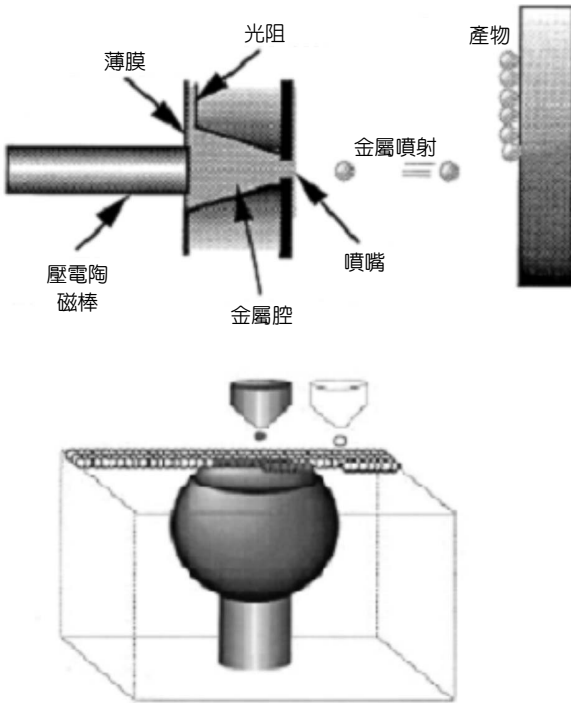


圖 6.43 快速成型法工作原理示意圖<sup>(34)</sup>。

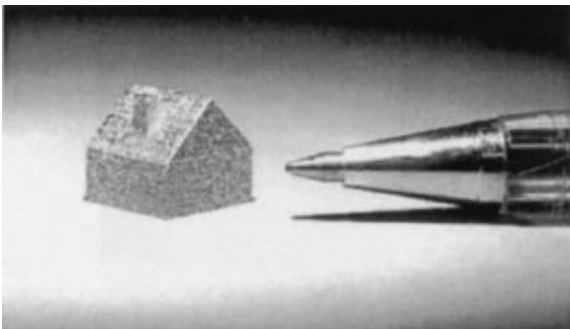


圖 6.44 利用此法所堆疊出的小體積成品<sup>(34)</sup>。

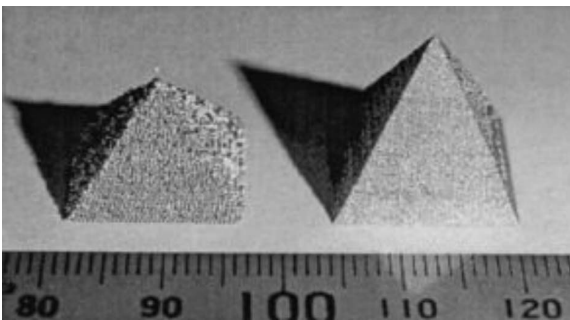


圖 6.45 不同大小的噴口堆疊出的成品<sup>(34)</sup>。

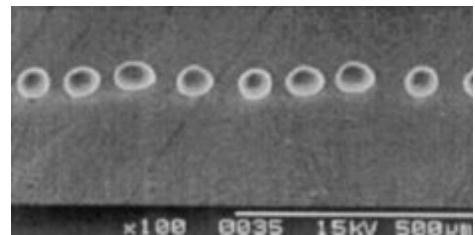
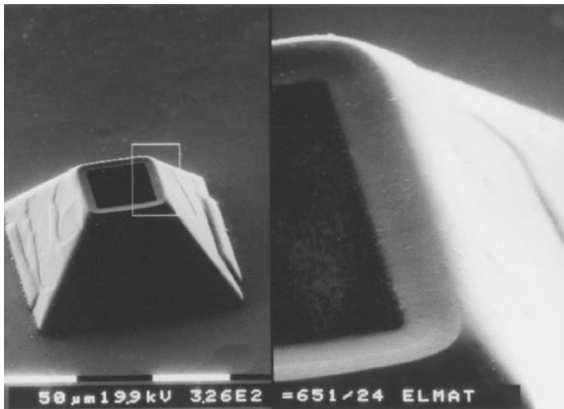
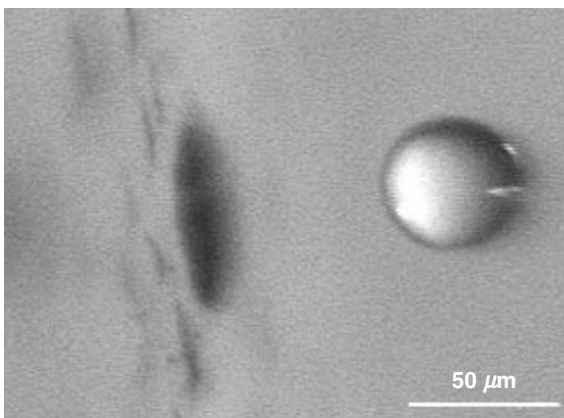
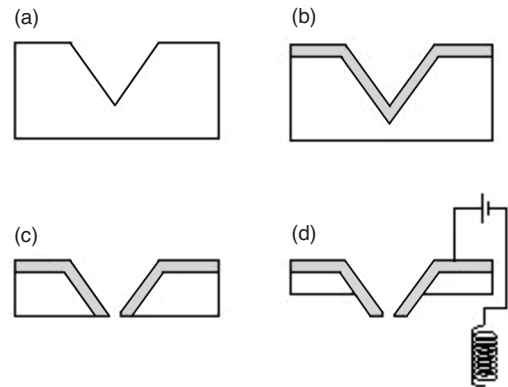


圖 6.46 直徑 50  $\mu\text{m}$  的噴嘴所射出的顆粒<sup>(34)</sup>。



圖 6.47 液滴分配器<sup>(35)</sup>。圖 6.49 0.001 nL 的微小液滴<sup>(35)</sup>。圖 6.48 (a) 在基層上利用非等向性蝕刻一錐形凹槽，(b) 在表面形成一層結構層，(c) 反向蝕刻，蝕刻深度視所需噴嘴縮口大小而定，越深縮口越大，(d) 利用  $p-n$  電化學停止蝕刻去除基層留下結構層<sup>(35)</sup>。

## 6.3 微探針

微探針是配合最佳化設計與半導體製程製作。微探針的剛性極小 ( $0.1-10 \text{ N/m}$ )，可利用原子力、電力、磁力等極微弱之物理與化學特性，達到原子或奈米 (nm) 等級之檢測解析度與加工線寬。

### 6.3.1 微探針之種類

一般來說，目前常用探針之種類有：掃描穿隧顯微術微探針 (microprobe of scanning tunneling microscopy)、原子力顯微術微探針 (microprobe of atomic force microscopy)、掃描

近場顯微術微探針 (microprobe of scanning near-field optical microscopy)、磁力顯微術微探針 (microprobe of magnetic force microscopy)。

### 6.3.2 微探針之製造方式

在微探針製造方法方面，因各種不同應用而有不同方法。下列將簡略敘述四種探針之製造方式。

#### (1) 掃描穿隧顯微術微探針

一般是用 0.5 mm 的鎢絲，以電化學的方法在 KOH 或 NaOH 溶液中腐蝕；或將 0.25 mm 的鉑銱合金 (PtIr) 絲拉剪而成，針尖的直徑大都在幾百 Å 的範圍。

#### (2) 原子力顯微術微探針

利用將角錐形的尖端蝕刻形成單晶矽之微製造 (micro fabricated) 技術，然後用手工操作接在以蝕刻玻璃基體產生的懸臂上，最後以蝕刻來除去矽和包覆折射率高的黃金薄膜。最近 IBM 發展出以單晶矽蝕刻出的探針，具有非常銳利的尖端半徑 (一般有 5–10 nm) 和優良的高寬比。

#### (3) 掃描近場顯微術微探針

目前一般常見的掃描式近場光學顯微儀所用的近場光學之光纖探針，是由 Eric Betzig 在 1992 年左右所發展出的熔拉方法製作出來的，其方法為將裸光纖以二氧化碳雷射聚焦加熱熔拉，而形成具奈米尺度之尖銳探針，再以迴旋熱蒸鍍的方式，覆鍍上一層金屬 (通常是鋁) 薄膜。

#### (4) 磁力顯微術微探針

透過電化學蝕刻鐵磁電線，或者透過塗佈有磁薄層的非磁性探針而作成。

### 6.3.3 應用範圍

目前應用範圍為：量測、微結構加工與生物醫學應用。

#### (1) 量測

##### ① 掃描穿隧顯微術 (STM)<sup>(36,37)</sup>

掃描穿隧顯微術起源於 1980 年代初期，為 G. Binnig 及 H. Rohrer 所發明之新技術。利用它能解析出晶體表面的原子結構及電子分布情形以進行量測，如圖 6.50 所示。

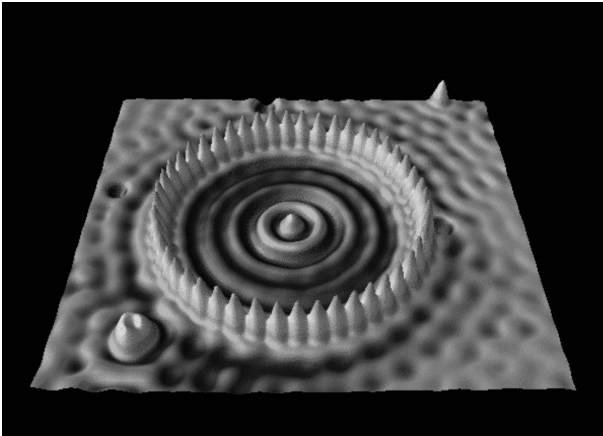


圖 6.50  
為在 STM 下直接觀察銅 (111) 之局部表面  
影像<sup>(38)</sup>。

### ② 原子力顯微術 (AFM)<sup>(39,40)</sup>

原子力顯微術由發明人 G. Binnig、美國史丹福大學 Quate 教授及 IBM 的 Gerber 率先發展。目前已有最佳之原子解析度檢測能力，協助學術界研究薄膜特性，如鍍膜粗糙度量測等，可參見圖 6.51。

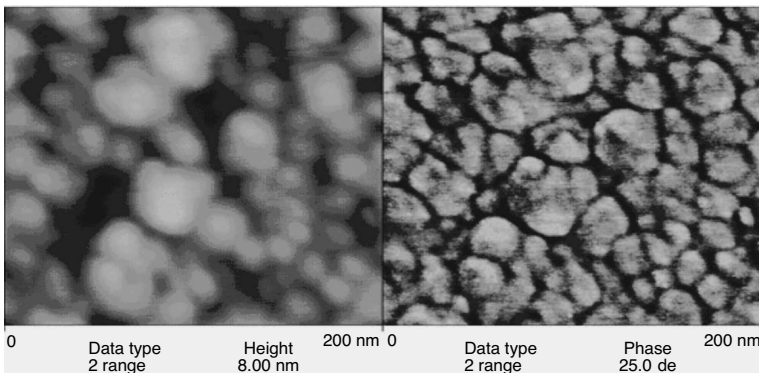


圖 6.51  
為矽晶片上所鍍之鎢薄膜原  
子力影像，掃描區域為 200  
nm × 200 nm<sup>(41)</sup>。

### ③ 磁力顯微術 (MFM)<sup>(42)</sup>

磁力顯微鏡是在 1986 年由 Binnig、Quate 與 Gerber 所發明的掃描式作用顯微鏡演變而來。最早的磁力顯微鏡影像是由 Matin 和 Wickzamasinghe 所得到的。目前已有 50 nm 解析度表面磁性檢測能力，協助學術界研究高密度磁記錄薄膜表面磁區分布，如圖 6.52 所示。

### ④ 掃描近場顯微術 (SNOM)<sup>(43)</sup>

掃描近場顯微術由英國的 Syngge 及美國的 O'Keefe 分別在 1928 及 1956 年所提出，係在遠小於一個波長的距離內 (即近場中) 進行光學量測，如圖 6.53 所示。

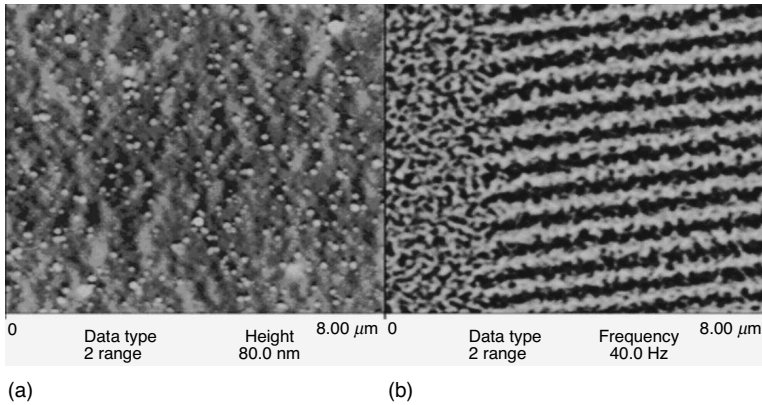


圖 6.52  
數位錄影帶上磁性薄膜影像，掃描區域為  $8 \times 8 \mu\text{m}$ ，  
(a) 為薄膜表面結構，(b) 為  
磁力影像<sup>(41)</sup>。

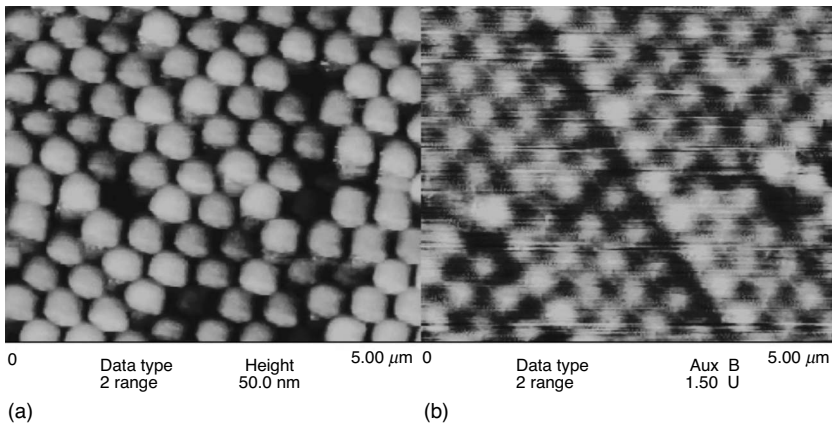


圖 6.53  
(a) 直徑 500 nm 聚苯乙烯顆粒球之表面結構形狀，及 (b) 掃描近場光學影像，掃描區域為  $5 \times 5 \mu\text{m}$ <sup>(41)</sup>。

## (2) 微結構加工

掃描探針顯微加工的原理可參見圖 6.54 所示<sup>(44)</sup>。

## (3) 生物醫學應用

對生物研究而言，了解 DNA 結構是一個主要的課題，1953 年 DNA 雙螺旋結構的發現，使人們得以了解 DNA 如何轉錄成 mRNA，再轉譯成蛋白質。此發現不只使人了解遺傳訊息如何在這當中傳送，並且也將生物研究推展到分子生物的領域，即了解分子尺度的生物現象。為了解個別分子的功能，許多解析分子結構的工具被發展出來；最先是 X 光繞射方法 (DNA 結構即由此方法解出)，而後有核磁共振儀 (NMR)，再加上近年來的電子顯微鏡 (SEM、TEM)，相對於以上的量測方法，掃描探針顯微鏡 (SPM) 則提供了一個較好的方式。以原子力顯微鏡而言，其橫向解析度可至 1 nm 左右，而且它可以在水中進行生物樣品掃描，因此是一個用來量測平面上分子分布的好方法，可減少對生物樣品之破壞，如圖 6.55 所示。

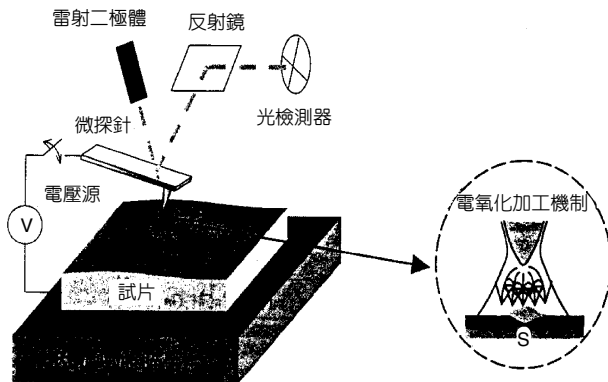


圖 6.54

掃描式探針顯微加工技術原理<sup>(44)</sup>。

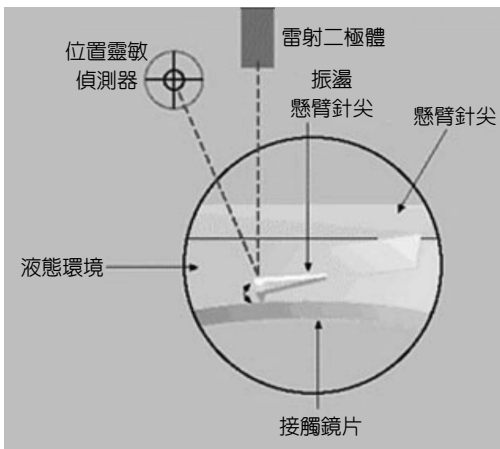


圖 6.55

原子力顯微鏡在水中進行生物樣品掃描，量測平面上分子的分布<sup>(45)</sup>。

另外在 DNA 修整與結構驗證方面，國內已有研究利用微機電製程技術研製三維斜口電鑄陣列微針頭<sup>(46)</sup>，可輕易穿刺進皮膚內進行輸送藥物及檢測功能。

## 6.4 微流道

在科技發展神速的現今資訊化社會中，產品不斷往輕薄短小發展，產品的內部晶片也相隨之微小化，一些相關的微小化技術也隨之開發出來。其中 IC 晶片的廣泛應用，不但使得半導體產業迅速發展，同時也躍升為我國經濟的主流。然而在講究高密度與低線寬的電子元件設計前提之下，高密度電子元件所產生之熱，將會是限制元件性能提升的一大主因。再加上市面上許多電子產品越來越注重攜帶方便，所以東西也變得輕薄短小，就像是筆記型電腦的開發，除了儘量的縮小元件以外同時也大幅減少了內部的空間，造成了熱源集中與散熱不易，因此所伴生之散熱問題日形嚴重；而新微冷卻技術的開發就是為了解決當前日益嚴重之熱效應問題。

其中微流道熱沉 (micro-channel heat sink, MCHS) 便是用來解決熱散問題的技術之一。由於其具有高散熱效率且具微小化體積的優勢，於 80 年代至今已趨成熟的相關研究中已可證實其優點與可行性。

微流道的應用可分為：(1) 微流道熱沉、(2) 微熱管 (micro heat pipe)、(3) 微通道面板 (microchannel plate)、(4) 微型熱交換器 (micro heat exchanger) 及 (5) 利用高分子材料製造的微流道應用。

### 6.4.1 微流道熱沉

以微流道作為新型的熱沉與熱管之構型，時有所聞。咸認為層流流體在微流道熱沉中的熱傳效果優於大尺寸管路中的紊流態，而相變化過程所帶走的熱量更高，足可應付未來高功率電子產品所產生的廢熱。由於近年微機電的技術日趨成熟，故可製造出水力直徑 (hydraulic diameter) 數微米至數百微米之微流道，透過液體強制對流的使用，來試圖解決電子產品之過熱問題。而由於其高散熱量、成本適中、不佔空間等優點，已成為冷卻技術中極具發展性技術之一。更有資料指出，具相變化過程的強制液冷微流道熱沉其熱傳效果更佳，可以配合更低溫度及更小溫差的電子元件之散熱需求。

最早結合微機電系統與微流道熱沉的概念是 Tuckerman & Pease 在 1981 年所提出<sup>(47)</sup>，以理論的分析與實驗測試對於微流道熱沉的熱傳性能加以探討。理論分析假設流體為完全展開的層流，固定幫浦功率 (pumping power) 的情況下，熱通量可由傳統散熱器的  $20 \text{ W/cm}^2$  提升到由強制液冷微型熱交換器的  $1,000 \text{ W/cm}^2$ 。實驗測試方面，利用 (110) 矽晶片為基材，以光微影製程蝕刻出高深寬比 (aspect ratio) 的矩形流道，再利用靜電接合技術封裝成微流道熱沉。實驗結果發現其熱通量可達到  $790 \text{ W/cm}^2$ ，可應用於高密度的超大型積體電路 (VLSI) 上。

微流道熱沉的製程可以使用體型微細加工法 (bulk micromachining)<sup>(48,49)</sup>，其中包含薄膜沉積 (thin film deposition)、光蝕刻微影、濕蝕刻 (wet etching) 及微結構封裝 (packaging) 等技術，製造出許多平行的微溝槽於矽基板 (silicon substrate) 或金屬基板上，如圖 6.56 所示，再接合封裝形成封閉的流道，兩端再以歧管 (manifold) 接合，作為冷卻液體的出入口，圖 6.57 為其示意圖。矽基板的另一面與晶片接合，直接將晶片熱源傳給熱沉，並由液體帶走，減少不必要的熱阻。此外，矽基板的熱傳導係數高於一般基板材質甚多，且其熱膨脹係數與矽晶片相同，可減少因熱應力不均及殘留應力所導致晶片損毀的機率。

微流道的設計有以下理論上的探討：已知通常微流道的水力直徑 (hydraulic diameter,  $D_h$ ) 約僅為一般流道的千分之一左右，在完全展開層流 (laminar fully-developed flow) 以及紐賽數 (Nusselt number,  $Nu = \text{流體熱對流係數} \times \text{水力直徑} / \text{流體熱傳導係數}$ ) 約為常數的假設下，熱對流係數會增加千倍。此外，熱傳表面積亦會隨著流道數目的增加而提高數十倍。在系統微小化後，因熱對流係數驟增及散熱鰭片的接觸面積倍增等緣故，微型流道熱沉單位面積熱傳量將較傳統熱沉高出甚多。

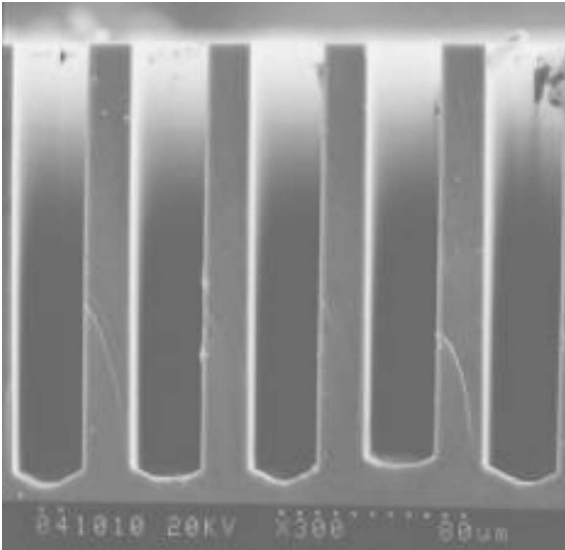


圖 6.56 微流道剖面圖。

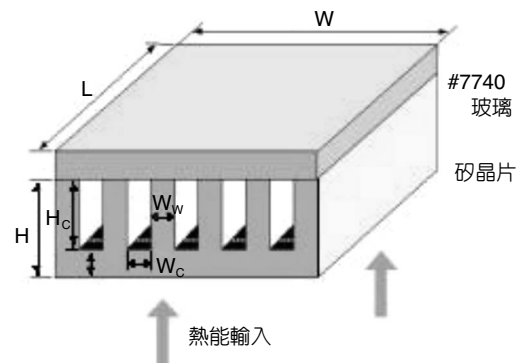


圖 6.57 微流道熱沉示意图。

## 6.4.2 微熱管

由於近幾年電子工業蓬勃發展，電子技術的精進，電子元件產生的熱量，帶來不少的問題。為了解決這些問題，微熱管的技術相繼被提出；而微熱管的概念基於相變化的原理，能高效率地將熱量傳遞，其利用半導體製程的技術，以濕蝕刻或氣相沉積在矽晶片上製作微熱管通道，將微熱管做為積體電路中的一部分，直接有效地排除熱點的產生。

一般來說，整組熱管的長度可分成三個部份：蒸發段 (evaporator section)、絕熱段 (adiabatic section) 以及凝結段 (condenser section)。工作液體在密閉容器中是處於飽和狀態，當熱管運作時，蒸發段的工作流體經管壁吸熱而汽化，此時蒸氣壓會驅動生成之蒸汽，經由絕熱段移向凝結段而釋放潛熱並凝結。冷凝生成之工作液體 (condensate)，會藉由毛細結構與表面張力所產生之毛細壓力而回流至蒸發段，如圖 6.58 所示。當毛細壓力充足時，可將工作液體持續回送至蒸發段，並使以上蒸發－凝結的過程循環不息。

最早的微熱管由 T. P. Cotter 於第五屆國際熱管會議中提出<sup>(50)</sup>，G. P. Peterson 於 (100) 矽晶片上做三角形流道熱管之製造與實驗研究<sup>(51)</sup>，如圖 6.59 所示，於 (110) 矽晶片蝕刻矩形凹槽並配合化學氣相沉積技術 (vapor-deposited) 製作三角形流道微熱管<sup>(52)</sup>，如圖 6.60 所示。

另有不同截面形狀流道之微熱管，如星形與菱形微熱管<sup>(53)</sup> 是由矽晶片配合共晶接合所組成，其剖面圖如圖 6.61 及圖 6.62 所示。

輻射狀微熱管需使用三片光罩，分別為上層氣相流道結構、中間之分隔板與下層之液相流道結構，圖 6.63 與圖 6.64 為接合示意圖與剖面圖<sup>(54)</sup>。

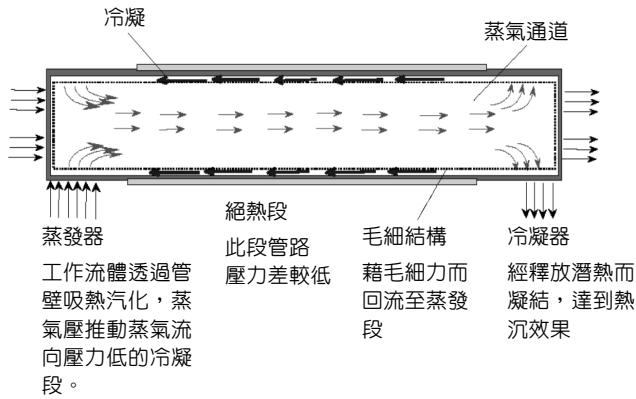


圖 6.58

熱管結構與作動示意圖。

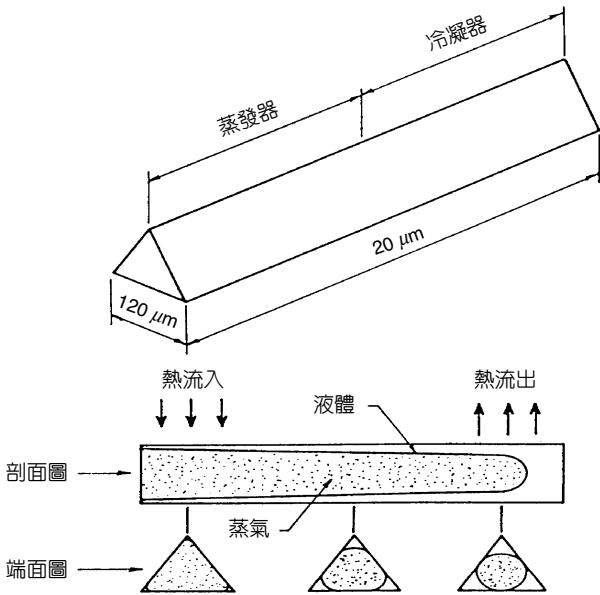
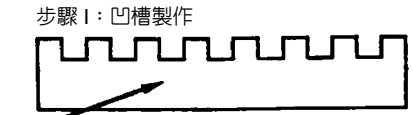


圖 6.59 三角形微流道微熱管<sup>(51)</sup>。



矽晶圓



矽晶圓

金屬層

步驟 III：充填與封裝

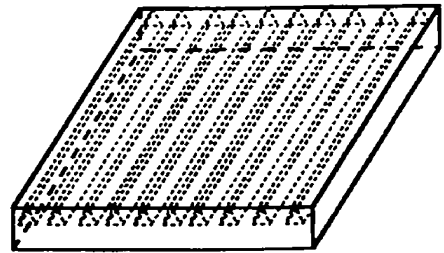


圖 6.60 氣相沉積製程<sup>(52)</sup>。

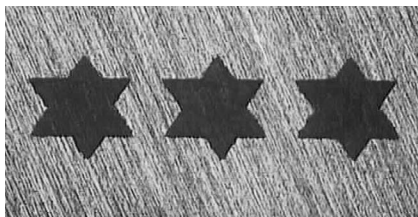


圖 6.61 共晶接合完成之星形流道微熱管剖面圖<sup>(53)</sup>。

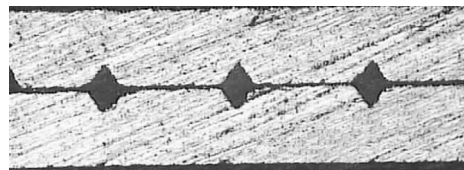
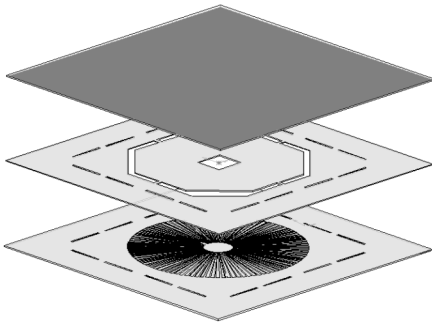
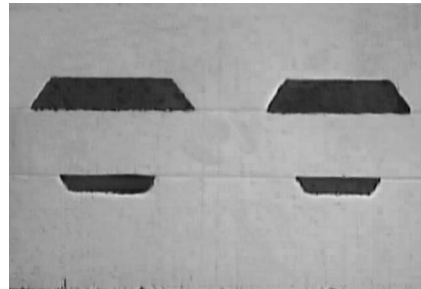


圖 6.62 共晶接合完成之菱形微熱管剖面<sup>(53)</sup>。



圖 6.63 輻射狀微熱管接合示意圖<sup>(54)</sup>。圖 6.64 共晶接合完成之流道剖面圖<sup>(54)</sup>。

### 6.4.3 微通道面板

微通道面板 (microchannel plate, MCP) 技術起源於 1970 年代<sup>(55)</sup>，在經過了三十年的發展後，微通道面板成為一項非常有用的產品。微通道面板被大量且廣泛的應用於許多光電儀器的核心部位，因其高深寬比的微結構特性，在結合真空與高電壓作用下，得以產生訊號增強的效果，並提高影像的解析度。許多微弱的光電訊號經由此項裝置，即能獲得清晰的訊號<sup>(56)</sup>，為具有非常高實用價值的關鍵元件。

微通道面板與電子及光學系統相結合時，可以將二維之近紅外區或是紫外區的訊號轉換成可見的影像；或是作為 X 光、離子或電子等之偵測器，因此微通道面板也應用於電子顯微鏡或是應用於量測材料的化學成分之分析等等；此外微通道面板也可應用於天文、電子束融合 (e-beam fusion) 或甚至核子方面的研究<sup>(57)</sup>。另外微通道面板也被應用於熱處理方面，對於微小的機械或電子元件而言散熱是一件非常重要的事，而微通道面板可大量增加與空氣或冷卻液體的接觸面，使散熱率大為提高，因此可做為一良好的散熱裝置。

微通道面板的構造最主要為一平面板，其中包含了數以百萬計的微通道，微通道與微通道之間互相平行，且每一個微通道的功能是獨立於周圍其他的微通道；微通道之中為高度真空，在通道的兩端必須加一偏壓，使得進入其中的光電子能被加速。微通道面板是一個面板型的電子真空倍增器，包括了數百萬個平行陣列的獨立微小通道，所有的微通道是被熔合成剛性的盤片狀結構，如圖 6.65 所示<sup>(58)</sup>。

每一微通道都是獨立運作而與鄰近的微通道無關，其運作原理的細節可藉由圖 6.66 理解得之，當其置於真空中並於電極間施加高電位差時，每一微通道都變成是獨立且具連續性的雙電極電子倍增器，微通道中的電子可被加速朝向正電極，原先的橫向能會促使電子連續撞擊壁面直到另一個電極，電子的徑向能 (transverse energy) 跟隨加速於通道中，足以從壁面激發出一二次或多次的二次電子，如圖 6.66 所示。

圖 6.67 為 MCP 極高解析度照片，孔徑尺寸僅為  $2\ \mu\text{m}$ <sup>(59)</sup>，而圖 6.68 則是以 LIGA 技術所完成之微通道陣列 (microchannel array) 結構，尺規長度為  $100\ \mu\text{m}$ <sup>(59)</sup>。

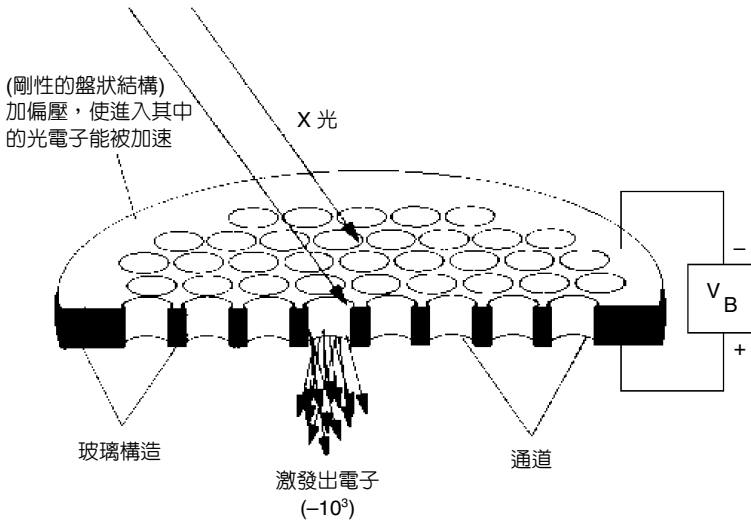


圖 6.65  
微通道面板的基本架構圖。

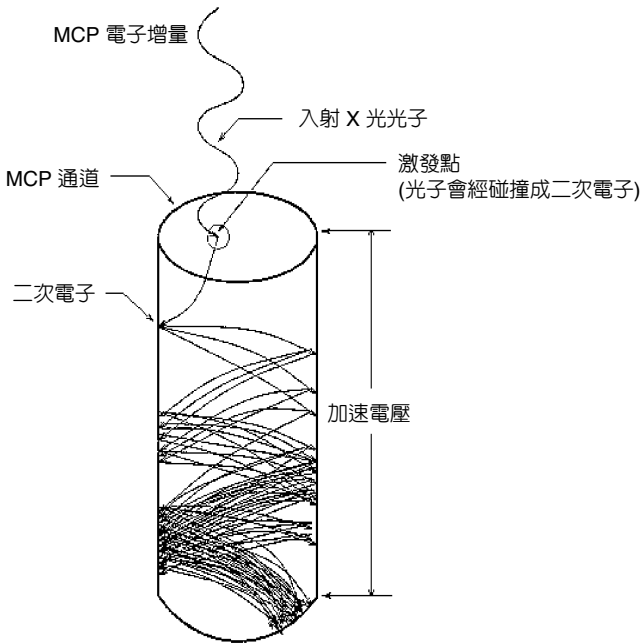


圖 6.66  
單一通道之電子增量工作原理。

### 6.4.4 微型熱交換器

微型熱交換器緣起於解決高速積體電路之散熱問題，現已發展可實際應用於必須在小體積內又有高熱通量之領域上，例如：化工流程熱傳與航太工業等。微型熱交換器之製造首先利用細微鑽石刀製造技術，在金屬薄膜上加工出細微通道，通道截面形狀可作成梯形、矩形或三角形，再以擴散接合薄片成一立體交流式微型熱交換器，體積熱傳率可達 50—300

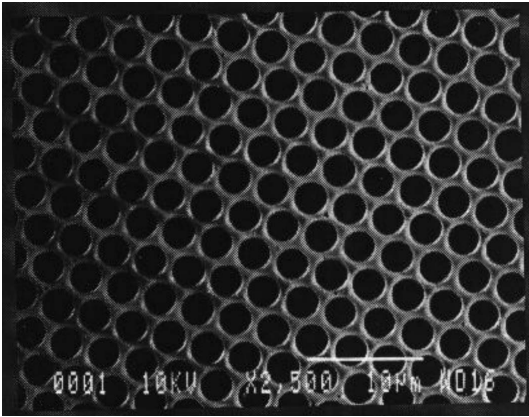


圖 6.67 極高解析度的 MCP，孔徑尺寸僅為  $2\ \mu\text{m}^{(59)}$ 。

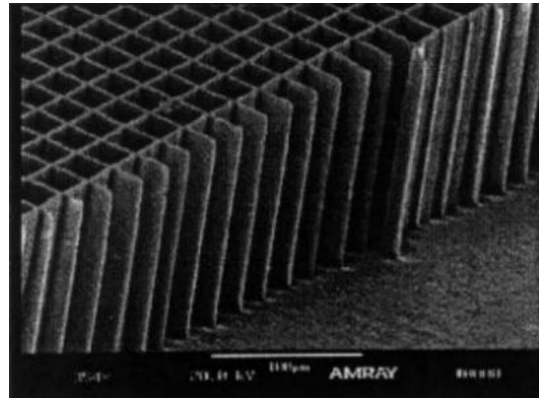


圖 6.68 以 LIGA 技術所完成之微通道陣列結構，尺規長度為  $100\ \mu\text{m}^{(59)}$ 。

$\text{MW/m}^3 \cdot \text{K}$ 。另一種可用來加工細微通道的方法是體型微加工技術 (bulk micromachining)，這是最早且最熟悉的微製造技術，它利用選擇性光罩與基體材料的蝕刻，大部分的技術是以單晶矽作為材料，此乃因矽有極佳的機械特性與成熟的積體電路技術基礎。

矽質微型熱交換器的設計理念說明如下。利用 (110) 方向矽晶片作非等向性蝕刻加工，產生出高深寬比的微小通道，以及極為緊密的通道排列，來達到提高熱傳面積密度的要求。由於矽具有極佳的熱傳導係數，再加上單晶矽對一般流體，甚至是具腐蝕性的流體，都有良好的抗腐蝕特性，非常適合作為熱交換器的材料。更特殊的一點，其所採用的加工技術與半導體製程是相通的，將來可與微感測器或是微致動器作整合製造，而沒有製程配合上的問題。當微小流道蝕刻完成後，再利用擴散接合技術將多片矽質流道成交互式堆疊接合，即成為一微型熱交換器，如圖 6.69 至圖 6.72 所示。

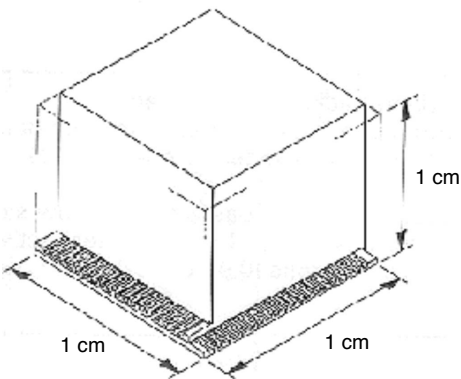


圖 6.69 微型熱交換器示意圖<sup>(60)</sup>。



圖 6.70 微型熱交換器未封裝實體圖<sup>(61)</sup>。

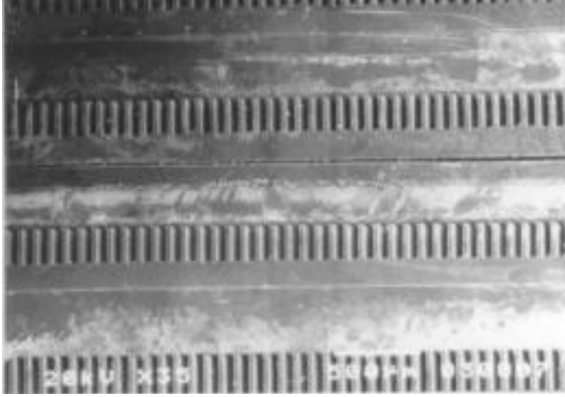


圖 6.71 矽質微型熱交換器之剖面<sup>(61)</sup>。

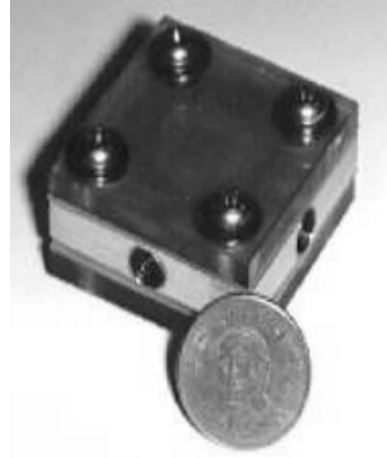


圖 6.72 封裝後之微型熱交換器<sup>(60)</sup>。

### 6.4.5 利用高分子材料製造的微流道應用

利用高分子材料來做微流裝置為一種新方法與低成本的方式。利用一或二步製程來置入熱浮雕式壓力計，而內部微流道可以在薄膜或薄板上做熱交換。密封的迷你流體架構用聚苯乙烯 (PS) 來製造，便於可以立即打開利用。甚至出現可以用聚苯乙烯 (PS) 做成切斷單一裝置之線圈上所使用微流分析晶片來做應用，如圖 6.73 至圖 6.77 所示。

## 6.5 結語

微結構的應用非常的廣泛，不勝枚舉。微結構可說是橫跨各個領域、各個學科，不論是物理、化學、材料、光電、生物、機械等，分布之廣可說是沒有科學的界限，也可說是融合各個領域再創新的視野，微米科技也將漸漸進入我們的生活之中，越來越多。也許將改變我們的生活方式，詮釋另一項物理或非物理力學、運動，世界將因而改變、進化。下面將列舉一科學新知讓大家認識，為微結構應用所展開的一個科學新視野。

### 冷鎢燈泡 (Cool Tungsten Light Bulb)

傳統鎢絲燈泡除了發光之外，還會產生大量無效益的熱能，徒增電力的消耗。隨著節約能源的意識抬頭，美國能源部所屬的 Sandia 國家實驗室 (Sandia National Laboratory, SNL)<sup>(63)</sup> 2002 年五月一日發表<sup>(64)</sup> 一種內部具有結晶狀的微小鎢晶格 (tungsten lattice)，於次日被刊登於 Nature (自然) 雜誌<sup>(65)</sup>，這種細小的鎢晶格已經被證實能將多餘浪費掉的紅外線能量 (即所謂的熱能) 轉變成紫外光或可見光的頻率。

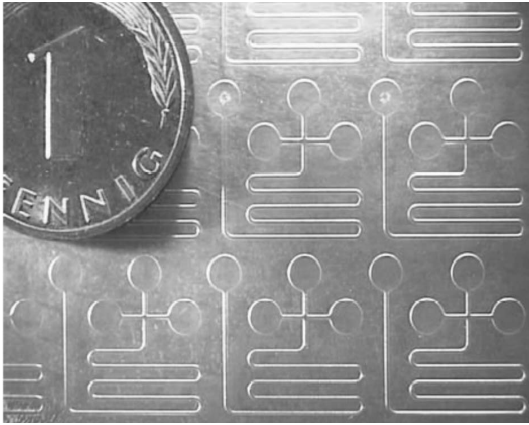


圖 6.73

在聚苯乙烯 (PS) 上所做出的微流道，利用毛細管電泳 (capillary electrophoresis) 質流分離方式使流體流動 (硬幣直徑為 16 mm)<sup>(62)</sup>。

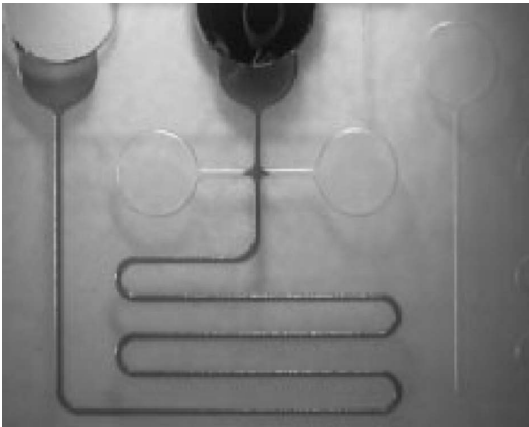


圖 6.74 流動的液體正在微流道中<sup>(62)</sup>。

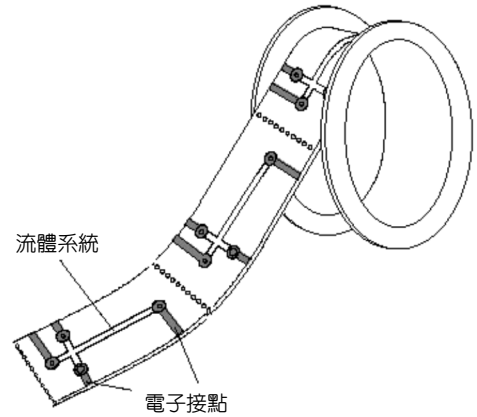
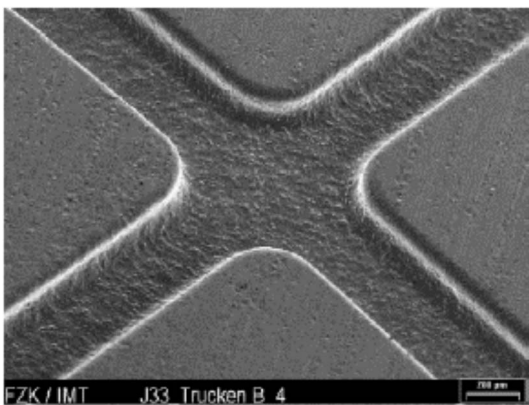
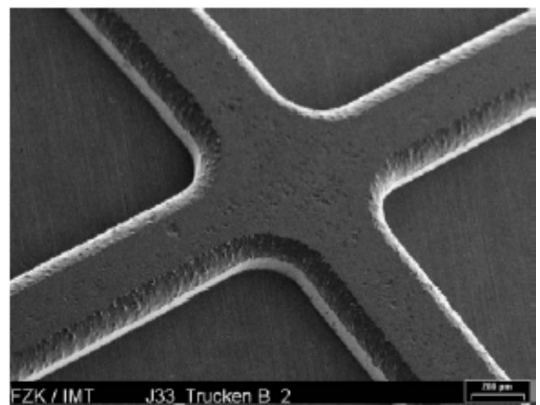


圖 6.75 在線圈 (coil) 上的微流裝置<sup>(62)</sup>。



(a)



(b)

圖 6.76 聚苯乙烯上所做出的微流道，寬度為 (a) 250 μm 與 (b) 300 μm<sup>(62)</sup>。

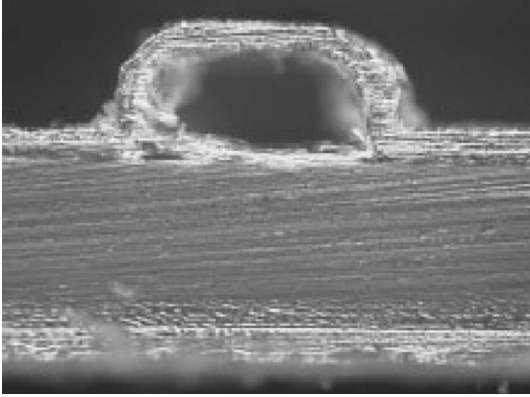


圖 6.77

聚苯乙烯上所做出的微流道橫截面 (with inner dimension of  $250 \times 125 \mu\text{m}^2$ )<sup>(62)</sup>。

光子晶體的用途，最普遍的想法就是以在特定頻率傳遞光束，以及彎曲路徑時不損及任何能量為基礎。該結構物最常以矽為製造原料，是由形成人造晶體之井然有序的距離與角度相互跨接的細棒所組成。細棒的間距僅允許特定的波長通過，且能藉由人造晶體中製造晶格缺陷來改變方向。所以意味著光子晶體亦有光通訊上的潛力。

鎢光子晶格裝置是由 Sandia 國家實驗室 Shawn Lin 及 Jim Fleming 所研發的，是由 MEMS 的延伸技術所製造。是利用化學氣相沉積法 (chemical vapor deposition, CVD) 所製造具有聚合矽結構般的鎢晶格 (這種金屬能應付相當高的溫度，且在可見光譜範圍內具有寬的光子頻帶間隙)，這項裝置的發展將會大大的消弭無效率照明所導致的超額發電容量、住戶額外電費支出，以及隨著增加發電量帶來環境破壞等問題。

所謂最佳的熱光伏 (thermal photovoltaic, TPV) 作用能力是來自一種特殊的熱產生器所產生的能量，而此熱產生器能夠將能量發散之波長轉換成理想頻率。而鎢光子晶格的轉換效用極高，也許能開啟對熱光伏應用效能的可能性。

如圖 6.78 所示的鎢光子晶格，根據模型估算顯示，使用鎢晶格作為於理想頻率的發光體，TPV 的轉換效能可達到 51%，而黑體 (可完全吸收任何投射在其上之熱或光輻射) 發光體是 12.6%。

Lin 和 Fleming 的亦深入研究電從光子晶格引導光的能力，以及阻止其他頻率通過的能力上，實驗結果顯示  $8-20 \mu\text{m}$  寬的光子頻帶間隙，構想上適合壓制黑體輻射的紅外線寬波段，且能將熱激發的能量轉變成可見光譜。這意味著未來可能會有將熱轉換成光的冷鎢燈泡。

## 參考文獻

1. Stefan Sinzinger, *Microoptics*, Germany: Wiley-VCH (1999).
2. G. P. Smith, *Materials & Design*, **10**, 54 (1989).
3. S. Mihailov and S. Lazare, *Appli. Opt.*, **32**, 6211 (1993).

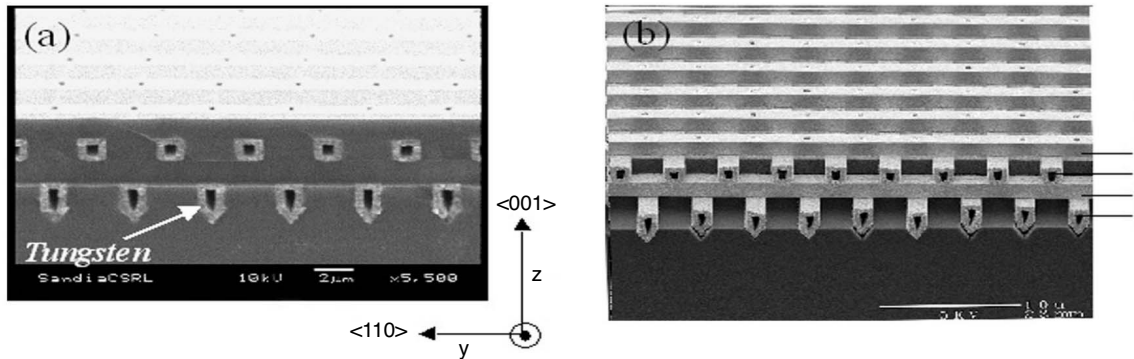


圖 6.78 鎢光子晶格的 SEM 影像<sup>(64)</sup>。

4. M. B. Stern and T. R. Jay, *Opt. Eng.*, **33**, 3547 (1994).
5. S. Haselbeck *et al.*, *Opt. Eng.*, **32**, 1322 (1993).
6. X. Qiao, *Acta Optica Sinica*, **18**, 1128 (1997).
7. S. Mihailov and S. Lazare, *Appli. Opt.*, **32**, 6211 (1993).
8. T. R. Jay and M. B. Stern, *Opt. Eng.*, **33**, 3552 (1994)
9. Eun-Hyun Park, *et al.*, *IEEE Photo. Techn. Lett.*, **11**, 439 (1999).
10. J. Jahns and S. J. Walker, *Appli. Opt.*, **29**, 931(1990).
11. M. E. Motamedi, *Opt. Eng.*, **33**, 3505 (1994).
12. M. T. Gale *et al.*, *Opt. Eng.*, **33**, 3556 (1994)
13. 簡伶鈺, 繞射式元件之製程及特性分析, 國立中央大學物理研究所碩士論文, 10 (2001).
14. K. H. Brenner *et al.*, *Appli. Opt.*, **32**, 6464 (1993).
15. X. Qiao, *Acta Optica Sinica*, **18**, 1523 (1997).
16. J. Schulze, W. Ehrfeld, H. Muller, and A. Picard, *Proc. of SPIE*, **3289**, 22 (1998).
17. C. R. King, L. Y. Lin, and M. C. Wu, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8**, 1349 (1996).
18. D. L. McaFarlane, V. Narayan, J. A. Tatum, W. R. Cox, T. Chen, and D. J. Hayes, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **6** (9), 1112 (1994).
19. N. S. Ong, Y. H. Koh, and Y. Q. Fu, *Microelectronic Engineering*, **60**, 365 (2002).
20. S. K. Lee, K. C. Lee, and S. S. Lee, *J. Micromech. Microeng*, **12**, 334 (2002).
21. H. Yang, C. T. Pan, and M. C. Chou, *J. Micromech. Microeng*, **11**, 94 (2001).
22. 編輯部, 雷射加工的原理及其在工業上的應用, 機械工業雜誌, **167**, 97 (1997)。
23. 馬廣仁, 機械工業雜誌, **197**, 129 (1999).
24. 雷技公司網頁, <http://www.lasermxmed.com.tw>
25. 杜可明, 光訊, **69**, 1 (1997).
26. 張瑞慶譯, 非傳統加工, 高立圖書, 161 (1995)。
27. 明泰科訊, <http://www.wollemi.com.tw>.

28. 雷傑公司, <http://www.kjet.com.tw>.
29. 楊啟榮, 強玲英, 黃奇聲, *科儀新知*, **21** (6), 15 (2000).
30. 楊景棠, *機械工業雜誌*, **6**, 193 (1997).
31. 楊啟榮, *科儀新知*, **19** (4), 4 (1998).
32. E. V. Mukerjee, A. P. Wallace, K. Y. Yan, D. W. Howard, R. L. Smith, and S. D. Collins, *Sensors and Actuators*, **83**, 231 (2000).
33. 中國網軍事, <http://big5.china.com/gate/big5/military.china.com>.
34. K. Yamaguchi, K. Sakai, T. Yamanaka, and T. Hirayama, *Precision Engineering*, **24** (1), 2 (2000).
35. T. Laurell, L. Wallman and J. Nilsson, *J. Micromech Microeng*, **9**, 369 (1999).
36. 黃英碩, *科儀新知*, **18** (3), 4 (1996).
37. 黃英碩, 張嘉升, *科儀新知*, **21** (5), 24 (2000).
38. <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/>.
39. 簡世森, 果尚志, *科儀新知*, **21** (5), 45 (2000).
40. 曾文聖, 林良平, *科儀新知*, **19** (6), 4 (1998).
41. 國家精儀中心奈米實驗室網頁, <http://www.pidc.gov.tw/>
42. 蔡林秀, 吳德和, *科儀新知*, **21** (5), 56 (2000).
43. 蔡定平, *科儀新知*, **21** (5), 17 (2000).
44. 周敏傑, 潘正堂, 林坤龍, *機械工業雜誌*, 148 (2002/8).
45. <http://www.ssttpro.com.tw/> 半導體科技網站.
46. 林雋, 三維斜口電鑄陣列微型針頭之研製, 國立清華大學工程與系統科學系, (2002)
47. D. B. Tuckerman, and R. F. W. Pease, *IEEE Electronic Device Letters*, EDL-2 (5), No. 4, 126 (1981).
48. K. E. Petersen, *Proceedings of the IEEE*, **70** (5), 420 (1982).
49. D. B. Tuckerman, *Heat-Transfer Microstructures for Integrated Circuits*, Ph.D. Thesis, Department of Electrical Engineering, Stanford University, Also Report UCRL 53515, Lawrence Livermore National Lab (1984).
50. T. P. Cotter, *Principles and Prospects for Micro Heat Pipe*, Proc. 5th Int. Heat Pipe Conf., Tsukuba, Japan, 328 (1984).
51. G. P. Peterson, A. B. Duncan, and M. H. Weichold, *Journal of Heat Transfer*, **115**, 751 (1993).
52. A. K. Mallik, G. P. Peterson, and M. H. Weichold, *Microelectromechanical Systems*, **4** (3), 119 (1995).
53. S. W. Kang and D. Huang, *J. of Micromechanics and Microengineering*, **12** (5), 525 (2002).
54. S. W. Kang, S. H. Tsai, and H. C. Chen, *Applied Thermal Engineering*, **22**, (2002).
55. D. Wasington, V. Duchenois, R. Polaert and R. M. Beasley, *Acta Electronica*, **14** (2), 201 (1971).
56. J. L. Wiza, *Nuclear Instrument and Method*, **182**, 587 (1979).
57. <http://hea-www.harvard.edu/HRC/Mmcp/mcp/html>
58. G. W. Tasker, S. T. Bentley, S. M. Shank, R. J. Soave, and A. M. Then, *SPIE*, **2640**, 58 (1995).
59. E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Haggmann, A. Maner, and D. Muenchmeyer, *Microelectronic Engineering*, **4**, 35 (1986).



60. C. R. Friedrich and S. W. Kang, *Precision Engineering*, **16** (1), 56 (1994).
61. 康尚文, 張廣祥, 中國機械工程師學會第十三屆全國學術研討會論文集 (設計), Nov., 137 (1996).
62. R Truckenmüller, Z Rummler, T. Schaller and W. K. Schomburg, *Journal of Micromechanics and Micro Engineering*, **12**, 375 (2002).
63. Sandia 國家實驗室, <http://lighting.sandia.gov>, Sandia Media Relation Contact: Neal Singer, [nsinger@sandia.gov](mailto:nsinger@sandia.gov), (505) 845-7078.
64. <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2002/tungsten.htm>
65. <http://www.nature.com/>.