

微系統類 LIGA 製程光刻技術

微系統類 LIGA 製程在微結構的厚度、深寬比、精度方面雖不如 X-ray LIGA 製程，但在生產成本、耗時性、製程彈性方面卻遠優於 X-ray LIGA 技術。在 MEMS 應用領域次微米精度與極大深寬比並非絕對必要的前提下，類 LIGA 製程仍有其發展空間。本文將針對類 LIGA 製程光刻技術作通盤性的介紹，內容涵括標準 X-ray LIGA 製程、類 LIGA 製程的厚膜光阻 UV 微影技術、準分子雷射微細加工及感應耦合電漿離子蝕刻技術。

楊啟榮、強玲英、郭文凱、林郁欣、林暉雄、張哲瑋、趙俊傑

一、前言

隨著科技的進步，產品不斷往輕薄短小發展，促使製造技術朝向精密化、細微化、及高密度化演進，因而衍生出次世代產業需求之「微機電系統

楊啟榮先生為國立中山大學機械工程博士，原任職於國科會精密儀器發展中心，現任國立台灣師範大學工業教育學系助理教授。

強玲英女士為中華大學電機工程碩士，原任職於國科會精密儀器發展中心助理工程師。

郭文凱先生為國立交通大學電子工程博士，現任國科會精密儀器發展中心副工程師。

林郁欣先生為國立交通大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

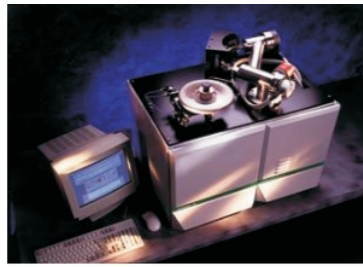
林暉雄先生為國立交通大學光電工程研究所碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理工程師。

張哲瑋先生為國立台灣大學應用力學博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。

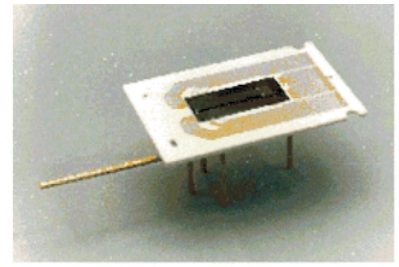
趙俊傑先生為國立台灣師範大學工業教育學系碩士班研究生。

(micro-electro-mechanical system, MEMS)」技術。此技術整合光、機、電、控制、化學等多重科技，將微感測器 (μ -sensor)、微致動器 (μ -actuator) 及微處理器 (μ -processor) 等元件模組化於單一晶片 (chip) 上，提高微機電系統的應用性與附加價值。圖 1 即表示先進的質譜儀，仍可藉由 MEMS 技術再微小化形成質譜儀晶片，如此不僅可節省空間與資源，並增加儀器使用的便利性⁽¹⁻²⁾。輕如毫髮的微型機電系統雖體積小小，卻大大好用，未來在光電影像、生化醫療、資訊儲存與精密機械等應用領域將扮演重要角色，預估公元 2002 年可創造出全世界四百億美金的產值⁽³⁾，因此 MEMS 技術已被科技界公認為二十一世紀高科技產業的重要技術指標。

MEMS 領域的微製造技術包括：整合蝕刻技術及薄膜技術的矽基微細加工、微光刻電鑄模造 (in German: Lithographie, Galvanoformung, Abformung, LIGA; in English: Lithography, Electroforming, Molding) 技術，以及微機械加工技術等三類技術。微元件應用除了強調特有的結構性能 (如光學性質、導電性、導熱性) 外，為了支援



質譜儀
70 Kg, 30000 cm³, 1200 W
Europa Scientific, UK



微質譜儀晶片
0.2 Kg, 3 cm³, 0.5 W
DARPA, USA

圖 1.
微機電系統技術實現產品超「輕薄短小」。

結構強度或增加元件的電、磁致動特性，結構體必須朝著高深寬比 (high aspect ratio) 且複雜的 3D 形狀發展，致使微系統 LIGA 製程技術日益受到重視。標準的 LIGA 製程使用波長 0.2 - 0.6 nm 的同步輻射 X 光進行深光刻術，由於同步輻射 X 光具有波長短、繞射現象小、功率大及穿透力強等優點，使得 X-ray LIGA 製程所製作的結構深度、精度、表面粗糙度，乃至深寬比，皆可達到過去微機械加工所無法達到的境界⁽⁴⁾。然而同步輻射光源為一龐大且昂貴的設備，且 X 光光罩的製作成本與時間的耗費過高，因此在微元件應用上次微米精度並非絕對必要的前提下，尋求替代性光源來進行類 LIGA (LIGA-like) 製程已成為研究趨勢。

類 LIGA 製程是以不同於同步輻射 X 光的光源進行光刻術，主要的替代性光刻法有紫外光微影⁽⁵⁻⁷⁾、準分子雷射微加工 (excimer laser micromachining)⁽⁸⁻¹⁰⁾ 及反應性離子蝕刻 (reactive ion etching, RIE)⁽¹¹⁻¹³⁾ 等。這些替代性光源的成本雖遠低於同步輻射光源，但是精密度也由 X 光深刻術的次微米精度降至微米

左右，同時光刻深度及深寬比也相對降低，表 1 即為 LIGA 製程與類 LIGA 製程比較。這些類 LIGA 製程的光源設備所佔的空間小，價格亦較便宜，但在光源設備的改良與新型光阻材料的開發下⁽⁷⁾，亦可獲得令人滿意的加工品質，故仍具有競爭優勢。

二、標準 LIGA 製程技術

LIGA 技術起源於德國 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) 的 Institute for Microstructure Technology (IMT)，它是結合了積體電路的光刻術、電化學的電鍍鑄模技術及高分子材料的熱壓 (hot embossing) 成型或射出成型 (injection molding) 大量翻造技術。LIGA 製程如圖 2 所示，首先在基板上鋪上一層相當厚度的高分子光阻材料，此光阻材料的選擇端視所使用的光源而定。當使用同步輻射 X 光時，最佳的光阻材料是 poly-methylmethacrylate (PMMA)。X 光經由特殊設計與製作的光罩 (mask) 照射在 PMMA 上，將照射過 X 光的光阻顯影 (developing) 後，即可得到由光罩圖案轉移 (pattern transfer) 的光阻模板。第二步驟是利用電鍍技術，將金屬電鑄在此光阻模板內，然後以蝕刻的方式將光阻去除，則可得到所需的金屬微結構。第三步驟則是以金屬微結構作為模仁 (mold insert)，經由熱印壓模或射出成型等技術量產塑膠微結構，或者由這些塑膠微結構再經第二次電鍍而量產金屬微結構⁽¹⁵⁾。此製程結合了光刻術、電鍍鑄模技術，以及高分子微成型的大量翻造技術，可應用於微致動器、微熱交換器、微幫浦、微感測器及微光學系統等元件開發。

表 1. LIGA 製程與類 LIGA 製程的比較。

LIGA 製程	類 LIGA 製程
同步輻射 X 光	低成本替代性光源
<ul style="list-style-type: none"> 加工深度數 mm、次微米級精度、深寬比 > 100 同步輻射光源為一龐大且昂貴的設備 X 光光罩製作複雜且成本高 	<ul style="list-style-type: none"> 加工深度 ≤ 1 mm、微米級精度、深寬比 ≤ 50 紫外光 - 厚膜光阻微影製程 準分子雷射 反應性離子蝕刻

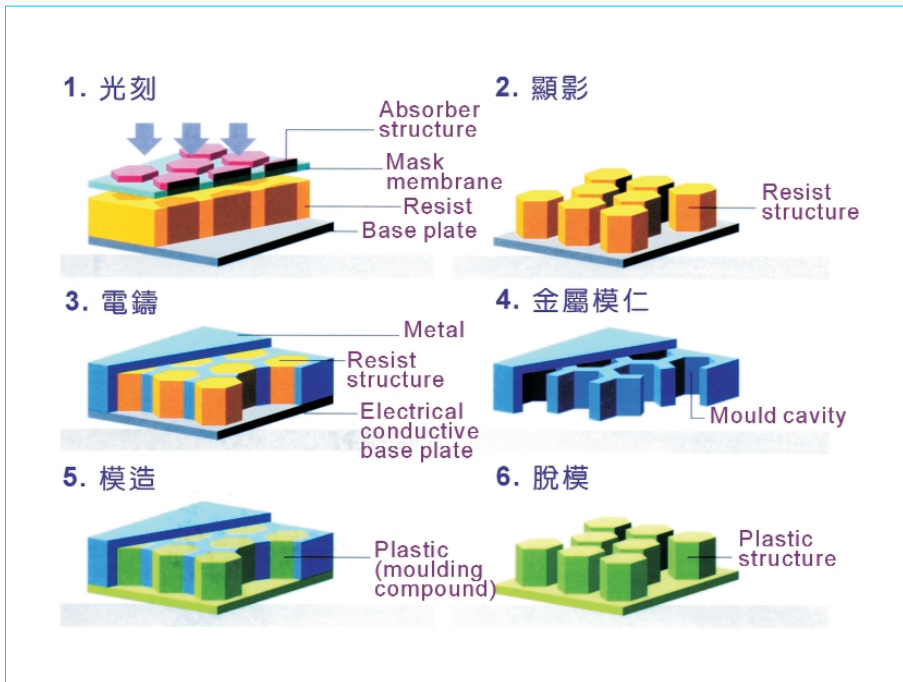


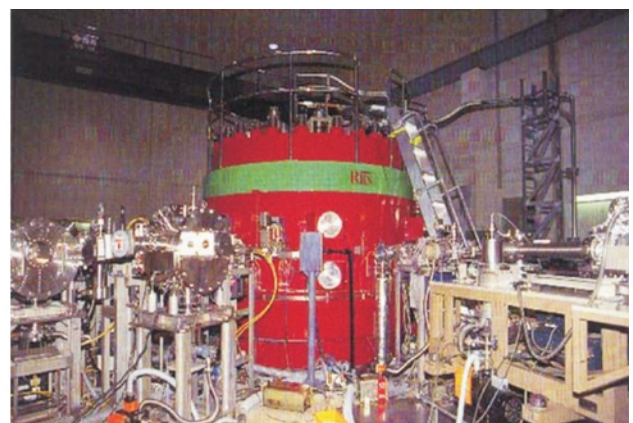
圖 2. LIGA 製程技術示意圖⁽¹⁴⁾。

X-ray LIGA 製程之所以無法普及的原因，在於同步輻射光源取得不易。圖 3(a) 為美國 APS 同步輻射中心，其同步輻射環可用來進行 X-ray LIGA 製程的研發，然而由於建置成本高，故世界上類似的同步輻射環僅約 30 座。另外，使用如圖 3(b) 之波長 1.3 nm 的超導小型同步輻射，配合高敏感度光阻，亦可進行 X-ray LIGA 製程的開發，而使用超導小型同步輻射環開發 LIGA 製程的國家屬日本最為盛行。此外，X 光光罩的製作程序複

雜，且成本與時間的耗費過高，亦是發展 X-ray LIGA 製程技術的阻力。圖 4 為 FZK/ IMT 之 X 光光刻用光罩製作程序，首先製作出中間光罩 (intermediate mask)，然後再利用中間光罩來製作真正的 X 光光罩 (working mask)。中間光罩的作法是晶圓上濺鍍 (sputtering) 一層約 $2\ \mu\text{m}$ 的鈦 (Ti) 金屬，然後以背部蝕刻方式獲得鈦金屬層。接著利用旋轉塗佈方式上一層 $3\ \mu\text{m}$ 薄膜光阻，再以電子束 (E-beam) 在光阻層直寫出圖案。顯影後以電鑄技術



(a)



(b)

圖 3. (a) 美國 APS 同步輻射中心；(b) 日本立命館大學超導小型同步輻射環。

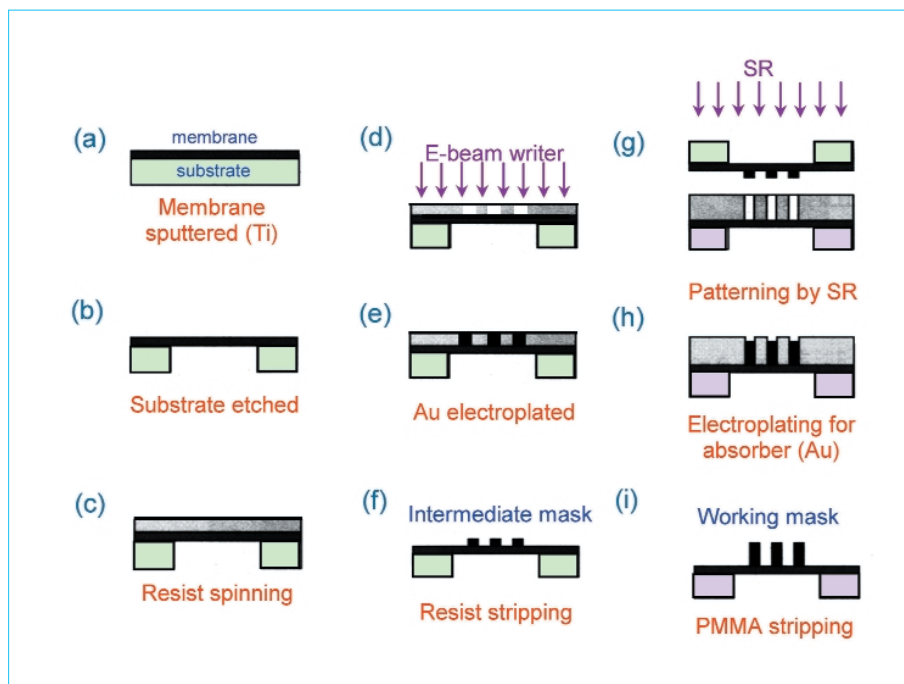


圖 4. FZK/IMT 之 X 光光刻用光罩製作程序⁽¹⁶⁾。

將金 (Au) 沈積至光阻模板中作為光吸收層 (absorber)，最後將高分子部份除去便得到中間光罩。當中間光罩完成後，便以其進行第二次的曝光。此時的製程幾乎與製作中間光罩時相同，只有曝光源變成軟 X 光 (soft X-ray)，光阻厚度變為約 20 μm (厚度依照光束線的強度而定)，所以最終的光罩為 2 μm 的鈦膜上承載著厚度至少 15 μm 的金吸收層。整個光罩的製作程序甚為複雜，且必須確保 2 μm 的鈦膜不會因承載金吸收層，而產生變形或薄膜破裂的現象，這也是 X 光光罩製作最困難的地方。

三、類 LIGA 製程技術

類 LIGA 製程在光源設備的改良與新型光阻材料的開發下，仍可獲得令人滿意的加工品質，故在 MEMS 的研發領域頗受重視。圖 5 為建置於國科會精密儀器發展中心 (PIDC) 的類 LIGA 製程光刻設備，包括 SUSS MA6 紫外光微影系統、Exitech 7000 型 KrF 準分子雷射加工系統、及 STS Multiplex ICP 感應耦合電漿蝕刻系統。以下各節將針對類 LIGA 製程技術作深入的說明，包括 UV-LIGA、laser-LIGA 及感應耦合電漿離子蝕刻

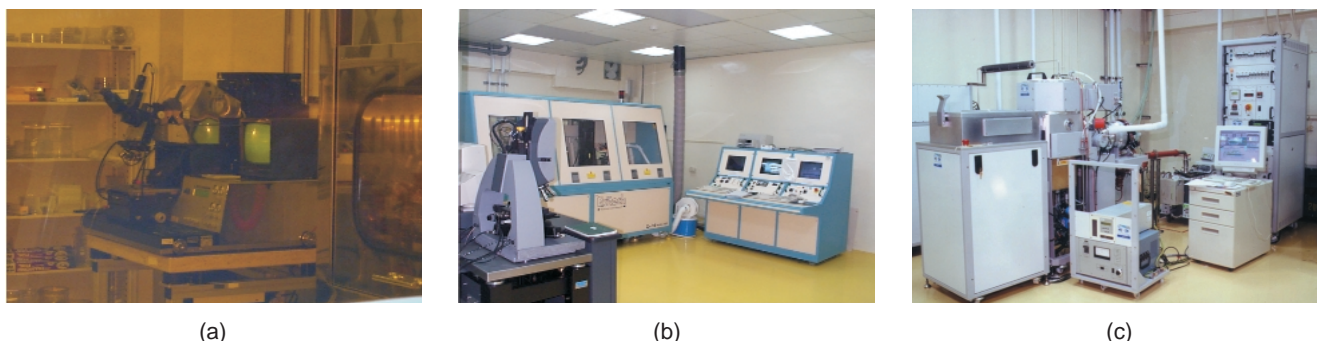
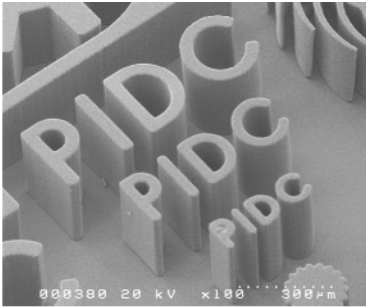
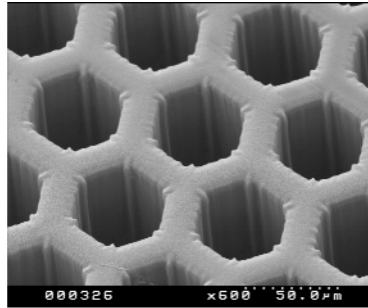


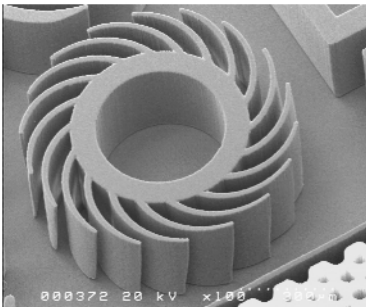
圖 5. 類 LIGA 製程光刻源：(a) 紫外光微影系統 (UV-LIGA)；(b) 準分子雷射加工系統 (laser-LIGA)；(c) 感應耦合電漿蝕刻系統 (ICP RIE-LIGA)。



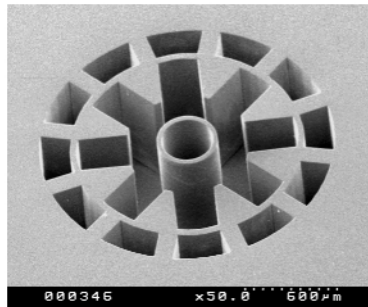
(a) PIDC 微結構



(b) 蜂巢狀微結構



(c) 微渦輪葉片



(d) 微馬達模

圖 6. 微影製程製作之 SU-8 光阻微結構。

(inductively coupled plasma - reactive ion etching, ICP-RIE) LIGA 製程技術，並針對其應用領域提出說明。

1. UV-LIGA 製程技術

標準微影製程配合厚膜光阻技術，可實現低成本的 LIGA 製程，故又稱為窮人的 LIGA (poor-man LIGA) 技術。它與 IC 製程相容的特性，使其在封裝、微電子及微機電等應用領域備受重視。一般常使用的厚膜光阻有 SU-8、JSR430N、JSR611P 及 AZ4620 等種類。SU-8 光阻有兩種重要的特性，使其適合於厚膜製程的應用。首先是它具有低分子量，即分子鏈長度較短。分子鏈較短的結構易被溶劑滲入並加以分解，故 SU-8 高分子可均勻地分散在溶液中，並形成高固含量 (濃度) 的混合物 (72 - 85 wt%)；其次是在近 UV 光譜中，SU-8 光阻有極低的光吸收性 (亦即有極佳的光穿透性)。這種極佳的光穿透性，可讓整個厚度的光阻得到均勻曝光劑量。這將有助於獲得結構的垂直側壁，且易於精準控制厚度方向的尺寸。SU-8 光阻微影製程參數控制之良窳，影響加工品質甚巨，故必須針對研發主題的製程需求往復試驗，以求製程參數的最佳化

(5)。圖 6 顯示以微影製程製作的 SU-8 微結構，結構側壁幾乎呈垂直，其中圖 6(c) 的微渦輪葉片結構厚度約 220 μm ，葉片端部寬度約 15 μm ，亦即產生約 15 的深寬比。但是根據光罩的形狀尺寸，渦輪葉片的端部寬度應為 5 μm ，亦即出現 10 μm 以上的誤差。雖然 SU-8 光阻結構的加工品質還算令人滿意，但在結構細微精度方面則有其限制。SU-8 光阻經過三十分鐘 @200 $^{\circ}\text{C}$ 的烘烤固化 (curing) 程序，結構體即有不錯的機械強度可作為微小傳動元件。此外，經過烘烤固化的光阻可承受如硝酸、氫氧化鈉、氫氟酸、氯化鐵及氟化銨等大部分溶劑、金屬及酸鹼液的侵蝕，然而光阻的去除性不佳，故非必要，並不進行烘烤固化步驟。

MEMS 的應用領域中，很多情況需要可自由移動的微結構，如微感測器的懸浮結構、可控制流量進出的微閥門及各型微致動器的移動或轉動結構等。在 LIGA 製程中加入犧牲層 (sacrificial layer) 技術即可製作可動微結構，擴大 LIGA 製程技術的應用範圍。雖然常用的犧牲層材料以鈦、鋁、銅、鉻等金屬為主，但金屬犧牲層有如下之缺點：金屬沈積成本高且耗時，數 μm 厚度的薄膜沈積品質差；金屬薄膜一般是以強酸去除，易產生製

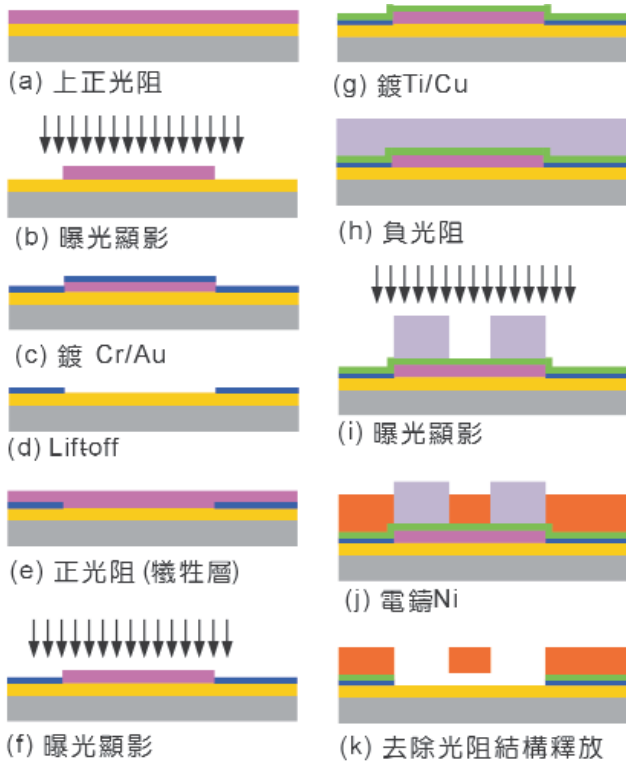


圖 7. 犧牲層厚膜光阻製程技術。

程材料相容性問題； 無法直接定義金屬薄膜圖案，必須增加微影步驟。因此使用光阻犧牲層技術，除了製程容易與成本低外，亦可避免上述金屬

犧牲層的缺點。

圖 7 表示犧牲層厚膜光阻製程示意圖，整個製程僅需三道光罩即可完成微致動器的開發。製程說明如下： 基板潔淨與去水分前處理； 第一道微影定義元件電路圖案； 鍍 50 \AA Cr / 2000 \AA Au，並以浮離 (lift-off) 方式得到金屬電路； 塗佈約 $3 - 5 \mu\text{m}$ 之 AZ1500 正光阻，進行第二道微影定義犧牲層圖案； 鍍 50 \AA Ti / 2000 \AA Cu 作為電鑄起始層 (seed layer)； 塗佈約 $70 \mu\text{m}$ 之 JSR 430 N 負光阻，進行第三道微影定義元件結構圖案； 電鑄鎳約 $65 \mu\text{m}$ ； 去除負光阻厚膜、電鑄起始層及犧牲層，完成結構釋放 (release)。利用上述製程，已完成圖 8 所示之靜電式微繼電器與微致動器。這兩種微元件的厚度約 $65 \mu\text{m}$ ，光阻犧牲層的厚度為 $3 \mu\text{m}$ ，經過實際驅動測試的結果，線性致動器的運動距離約 $25 \mu\text{m}$ ，但驅動電壓超過 100 V 。這是因為正負極間距達 $20 \mu\text{m}$ ，且結構厚度僅 $65 \mu\text{m}$ 。未來進行製程改良，增大結構厚度與減小正負極間，應可有效減小驅動電壓。

2. Laser-LIGA 製程技術

準分子雷射是由惰性氣體與化學性質較活潑的鹵素相混合後，再經放電所激發之高功率深紫外

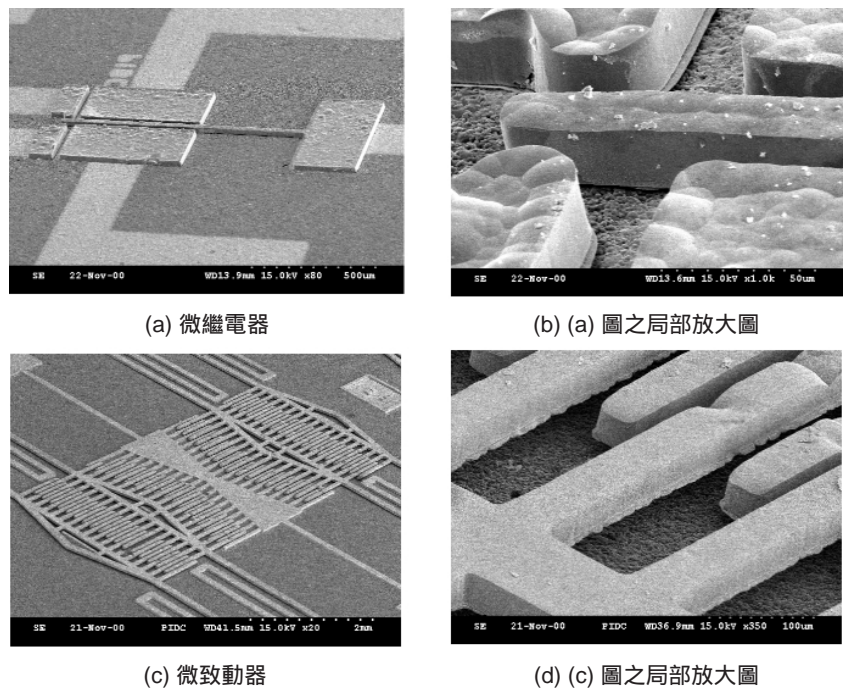
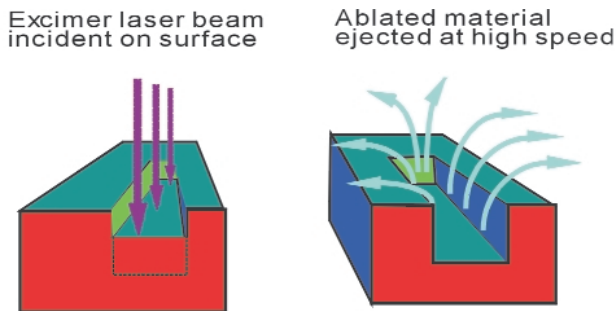


圖 8. 厚膜光阻與犧牲層技術於微元件的開發應用。



(a)

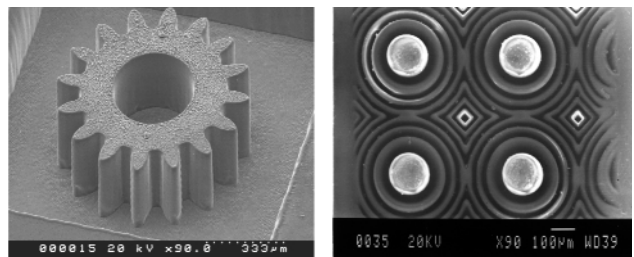


(b)

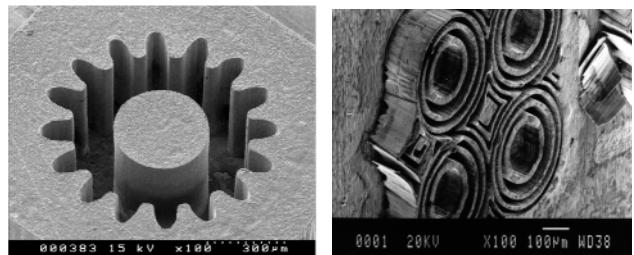
圖 9. (a) 準分子雷射光分解挖除加工機制示意圖；
(b) 雷射照射區產生之材料快速噴發現象⁽¹⁷⁾。

光。普遍應用於雷射 LIGA 製程的光源為 ArF (193 nm) 與 KrF (248 nm) 雷射，其中 ArF 雷射適合加工 PMMA 與玻璃，KrF 適合加工聚亞醯胺 (polyimide) 與聚碳酸酯 (polycarbonate)。因為準分子雷射屬於脈衝式 (pulsed) 雷射，脈波時間約 20 ns、輸出脈波能量 10 - 1000 mJ、最高脈波重複率 (repetition rate) 200 Hz，故可獲得百瓦級的平均功率。在如此高功率的能量下，準分子雷射適合加工金屬、陶瓷、玻璃及高分子等材料。

圖 9 表示準分子雷射光分解挖除 (photoablation) 加工機制示意圖，即工件材料吸收短波長的準分子雷射後，將材料內的鍵結直接打斷而破壞，雷射照射區域的材料經斷鍵後會產生壓力急速上升，並強迫材料以微小爆炸 (mini-explosion) 的方式排出，而達到加工的目的⁽⁸⁾。準分子雷射脈波的瞬間能量密度達數 MW/cm^2 ，照射區的加工材料吸收能量後，深度 100 - 500 nm 的薄層材料以高速噴



(a) PMMA 準分子雷射微加工



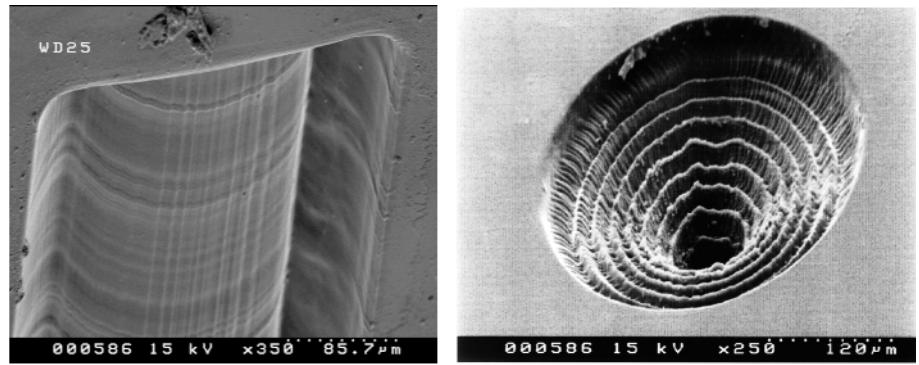
(b) 鎳金屬電鑄翻製

圖 10. LIGA 製程之金屬微結構製作技術。

出，每一個脈衝僅移去固定深度的薄層，故計算雷射脈波的次數即可精密地控制加工深度。因每個雷射脈波的持續時間僅 20 ns，工件受到熱傳導影響的時間很短，而且熱量被移除的材料帶走，使得加工後的結構未受熱損害 (thermal damage)，而獲得最佳的加工品質。

Exitech 7000 型 KrF 準分子雷射加工系統有兩種光刻方式，一種是聚焦直寫，另一種為光罩投影，光罩材質可為金屬或石英鍍鉻片，兩種加工方式可依實際需要相互組合使用。此外，在雷射光的傳輸路徑中，使用雙陣列式之光束均勻器，可將雷射光束均勻地照射在光罩表面 ($\pm 5\%$ RMS)，以獲得良好的加工表面品質及側壁垂直度。藉由 CNC 系統控制工件與光罩平台的相對運動，並配合雷射重複率 (repetition)、能量密度 (fluence) 及透鏡的數值孔徑 (numerical aperture, NA) 的設定，可控制雷射照射工件表面的劑量 (dose) 與入射角度，使得特殊的 3D 微結構得以實現。圖 10(a) 表示準分子雷射以光罩投影方式加工有金屬底層的 PMMA 基板，形成之微齒輪與 Fresnel zone 微結構，加工完成的 PMMA 漸開線齒輪有極佳的側壁垂直度。圖 10(a) 的 PMMA 結構再經鎳電鑄變成如圖 10(b) 之金屬結構，其中鎳電鑄之 Fresnel zone 結構，結構

圖 11.
準分子雷射於特殊微結構製作的應用。



深度約為 $250\ \mu\text{m}$ 、最小線寬 $10\ \mu\text{m}$ ，故具有 25 的深寬比。鍍電鑄的條件為胺基磺酸鎳 $420\ \text{g/L}$ 、硼酸 $40\ \text{g/L}$ 、溼潤劑 $0.5\ \text{g/L}$ 、液溫 $40\ ^\circ\text{C}$ 、pH 值 3.7、電流密度 $1\ \text{A/dm}^2$ ，鍍液經過 $5\ \mu\text{m}$ 及 $0.1\ \mu\text{m}$ 濾筒兩階段循環過濾，過濾速率約 $1.5\ \text{L/min}$ 。為了使電鑄結構達到所需的品質，除了控制鑄液的 pH、溫度、鎳金屬鹽濃度，及選擇適當的電流密度外，亦須控制緩衝鑄液 pH 變化的硼酸濃度，及添加應力消除劑 (stress reducer)，以降低鑄層內應力。另外，為增進電鑄液與光阻結構間的親和性，促使電鑄液能進入深窄孔道，溼潤劑 (wetting agent) 的添加亦不可避免。

圖 11 表示以準分子雷射加工而成之微曲面結構與漏斗型微噴孔，其加工原理是利用 CNC 控制造成不同的工件運動形態，以獲得工件表面定點不同的雷射照射劑量。此外，利用光罩圖樣的設計，配合工件與光罩平台的相對運動，亦可獲得有趣的微結構，譬如圖 12(a) 顯示光罩拖拉 (mask dragging) 加工的技巧，這個技巧其實也就是固定光罩而移動工件平台的加工方式，故亦稱為移動工件 (moving workpiece) 加工。圖 12(a) 中顯示在固定 T 形光罩與移動工件的加工過程中，T 形的中間部份因接受較翼臂多的雷射劑量，故導致兩層的溝槽產生。利用此特殊技巧配合光罩的設計與 UV 曝光劑量的控制，即可輕易達到多階、斜面或任意形狀的渠道加工。圖 12(b) 顯示的潛埋式微渠道，其製程說明如下：SU-8 光阻旋塗於 Si 晶圓上，並經軟烤、UV 曝光、曝光後烘烤等步驟，使光阻充分交聯固化，此時光阻厚度約 $250\ \mu\text{m}$ ；以光罩拖曳方式加工開放式微渠道約 5 公分長、渠道寬度

$100\ \mu\text{m}$ ，加工條件為能量密度 $4.34\ \text{J/cm}^2$ 、照射頻率 $60\ \text{Hz}$ 、工件平台進給速率 $5\ \text{mm/min}$ ；SU-8 光阻再一次旋塗於 Si 晶圓上，並經軟烤、UV 曝光、曝光後烘烤及超音波顯影等步驟。此時的重點是必須控制曝光劑量，約為第一步驟曝光劑量的十分之一，達成光阻表面淺層交聯固化即可。另外，為防止顯影液無法進入潛埋渠道內造成顯影不完全，故在渠道的前後與中段開孔，配合超音波震盪使顯影液容易滲入渠道中。

傳統二元化 2^M 階微光學繞射元件的製作方式，係利用標準 RIE 半導體製程技術，即經過 M 道光罩對準微影與 RIE 蝕刻而成，因此有耗時長、成本高及良率低等缺點。運用準分子雷射刻除技術，數秒鐘內即可完成微光學繞射元件陣列，運用 X-Y-Z 三維高精度定位平台配合特殊的光罩設計，並可在數分鐘內完成多階繞射元件之製作。圖 13 為單一光罩三個子罩重疊曝光加工八階微結構示意圖。相同的加工方式可應用於十六階微透鏡陣

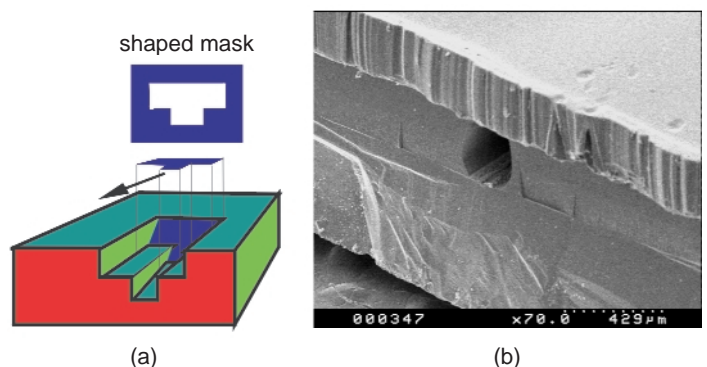


圖 12. (a) 光罩拖曳式雷射成形加工示意圖；(b) 潛埋式微渠道。

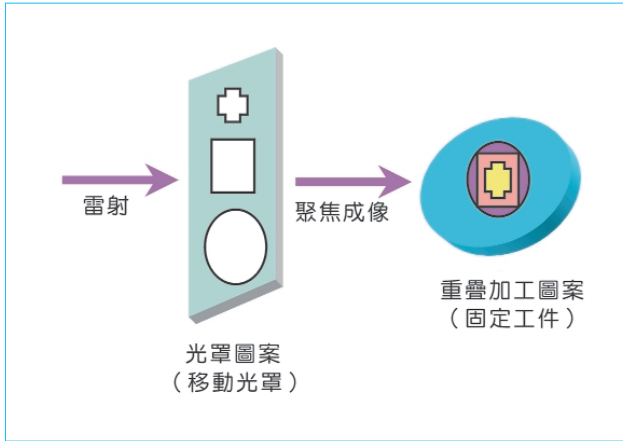


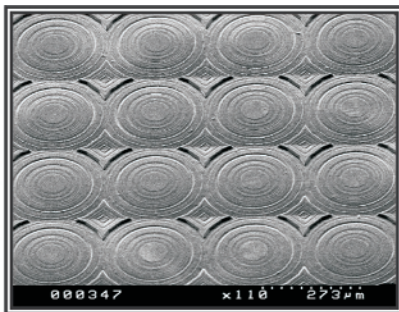
圖 13. 單一光罩重疊曝光加工多階微透鏡陣列示意圖。

列的製作，加工程序是先選擇石英光罩上線寬最粗的子罩圖案，控制準分子雷射能量密度、加工頻率、脈衝次數等參數，加工聚碳酸酯至所需深度，利用精度 $0.1 \mu\text{m}$ 的光罩定位平台選擇次道子罩圖案，並固定加工件使其重疊曝光加工，如此經過四道子罩圖案的重疊光刻，即可獲得十六階微透鏡陣列。圖 14 表示利用準分子雷射加工完成之十六階

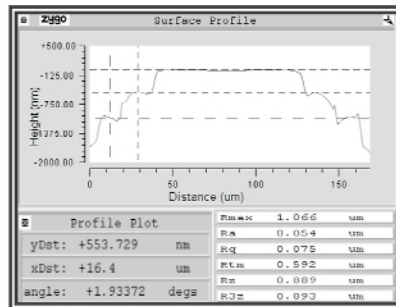
繞射式微透鏡陣列與四階數位式全像片 (computer generated hologram, CGH)，經由表面形態與微光學特性檢測，可驗證其加工品質的優越性。加工完成的微機械結構或微光學元件均可利用電鍍方式形成金屬模仁，再利用熱壓成形或射出成形方式達到批量生產的目的。

3. ICP-RIE LIGA 製程技術

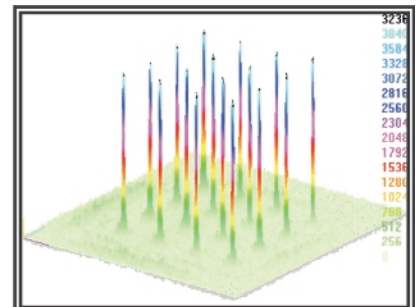
反應性離子蝕刻 (RIE) 技術可突破溼式蝕刻技術與矽晶片方向相關及過大側蝕刻量的缺點，但傳統的 RIE 製程亦受限於低蝕刻速率 ($< 1 \mu\text{m}/\text{min}$)，與無法得到高深寬比 ($< 10:1$) 的問題，使得在 MEMS 製程的應用上受限。新近發展的感應耦合電漿與電子迴旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 式高電漿密度低氣體壓力 (high density low pressure, HDLP) 蝕刻系統，可大幅改善 RIE 在蝕刻速率、側向蝕刻及深寬比等方面的缺點。另外，傳統的矽深蝕刻製程是在低基板溫度 (約 -110°C) 與高氟濃度下進行，雖可獲得微機電系統應用的蝕刻品質，但在此低溫製程下會產生光阻龜裂、晶片



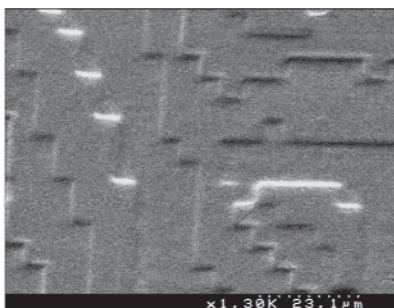
(a) 十六階微透鏡陣列



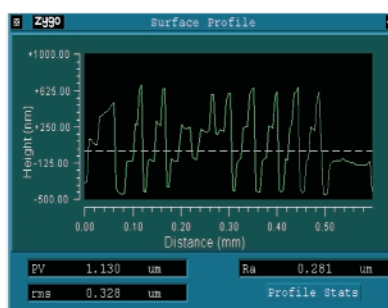
(b) 表面形態檢測



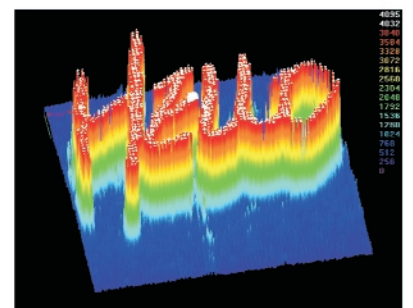
(c) 焦平面光強度檢測



(d) 四階全像片



(e) 表面形態檢測



(f) 影像輸出檢測

圖 14. 準分子雷射微光學繞射元件製作技術。

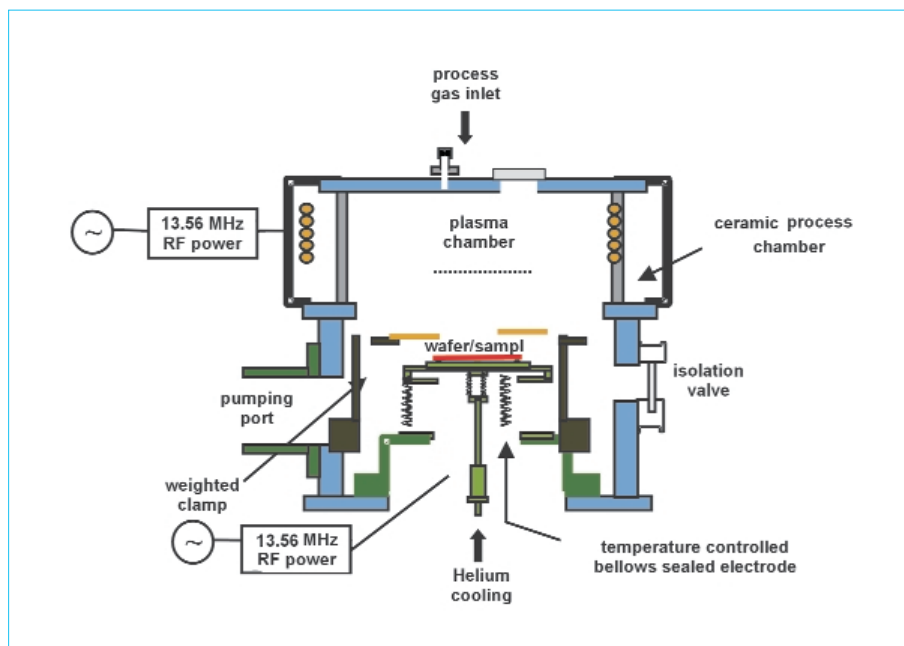


圖 15. STS ICP-RIE系統蝕刻室構造示意圖。

表 2. 典型的 STS ASE 製程能力⁽¹⁹⁾。

項 目	性能規格
蝕刻速率	$\geq 3 \mu\text{m}/\text{min}$
對光阻選擇比	$\geq 75 : 1$
對氧化矽選擇比	$\geq 150 : 1$
非均向性	≥ 0.98
蝕刻深度	10 - 500 μm
深寬比	$\leq 20 : 1$
晶片均勻性	$\leq 4\%$
晶片溫度	$\leq 60^\circ\text{C}$

冷凝雜質形成黑矽、無法 500 μm 以上晶片穿透蝕刻等缺點，再加上低溫液態氮的使用，增加了設備的複雜性⁽¹⁸⁾。

圖 15 為 STS Multiplex ICP 感應耦合電漿離子蝕刻系統蝕刻室構造示意圖，其上電極線圈為 1000 W、13.56 MHz 的 RF 電源，下電極板為 30/300 W、13.56 MHz 的 RF 電源。晶片固定方式為機械挾持式，晶片背面以氦氣冷卻 (backside helium cooling)。製程氣體從上方的氣體入口輸入，經由電極線圈游離後，由下電極板控制蝕刻非均向性⁽¹⁸⁾。蝕刻罩幕可用光阻或氧化矽，其對光阻

的選擇比大於 75 : 1，而對氧化矽的選擇比大於 150 : 1，蝕刻罩幕的選用視蝕刻的需求而定。若以光阻作為蝕刻罩幕，則以標準微影製程定義蝕刻圖案，若是以氧化矽作為蝕刻罩幕，則矽晶片須經熱氧化爐成長氧化矽層，以微影製程定義蝕刻圖案後，再進行 BOE 蝕刻去除氧化物形成乾蝕刻視窗，配合 Bosch 的 ASE (advanced silicon etch) 專利技術，進行矽深蝕刻製程開發。

STS ASE 蝕刻技術係利用 Bosch 的交替蝕刻與高分子鈍化 (alternating etch and polymerization) 專利⁽¹⁹⁾，並改變不同的側壁鈍化方法來進行矽深蝕刻，表 2 為典型的 STS ASE 製程能力。圖 16 為 ASE 蝕刻機制示意圖，以 CF_4/SF_6 反應氣體為例說明如下：首先在矽壁沈積鈍化高分子： CF_4 被電漿分解成活性機，並進行高分子沈積反應，使壁上形成鈍化膜；矽底部的高分子與矽被蝕刻： SF_6 被電漿分解成 F^- ，先蝕刻鈍化膜接著再蝕刻 Si，此時離子撞擊的角色在移除表面的鈍化膜與維持方向性；步驟交替反覆：必須選擇適當的反應氣體，維持鈍化沈積與蝕刻步驟的平衡。ASE 製程的主要特點在於不需低溫冷卻即可得到高蝕刻速率、高選擇比、高非均向性、高蝕刻深度及高深寬比的矽蝕刻結果⁽¹⁸⁾。

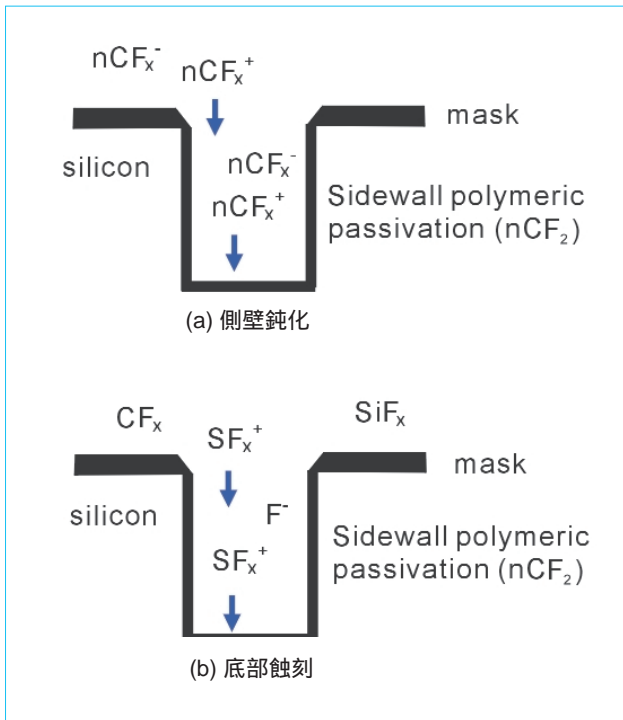
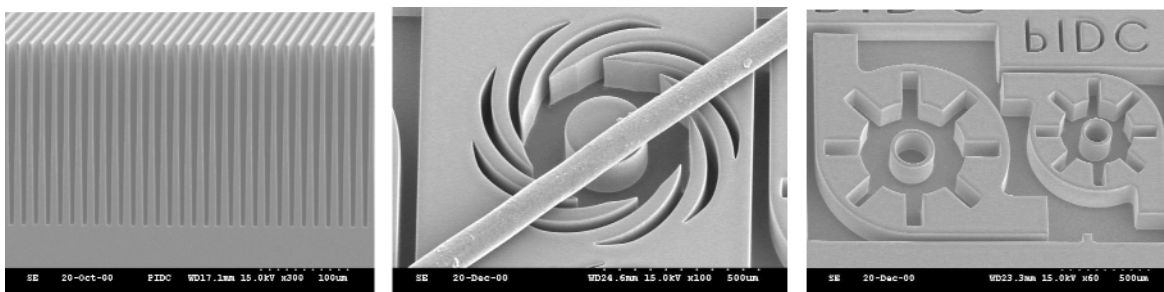


圖 16. STS ASE 製程之交替蝕刻與鈍化反應示意圖。

圖 17 表示以 ASE 製程蝕刻完成之微結構，結構側壁斜度接近垂直，其中圖 17(a) 之深溝槽蝕刻深度為 $210\ \mu\text{m}$ 、溝槽寬度約 $7.5\ \mu\text{m}$ ，即深寬比可達 28。由於 ASE 製程是利用交替蝕刻與鈍化方式進行矽深蝕刻，故選擇適當的氣體以維持鈍化與蝕刻的平衡是非常重要的，如此才能維持良好的非均向蝕刻性。以 ICP RIE 進行矽深蝕刻，參數操作條件（反應氣體組成、氣體壓力及電極電壓）與結構特徵尺寸 (feature size) 設計的不當，容易造成微結構的缺陷。圖 18 即顯示 ICP-RIE 製程常見之結構



(a) 深溝槽

(b) 渦輪轉子 vs. 頭髮

(c) 微渦輪

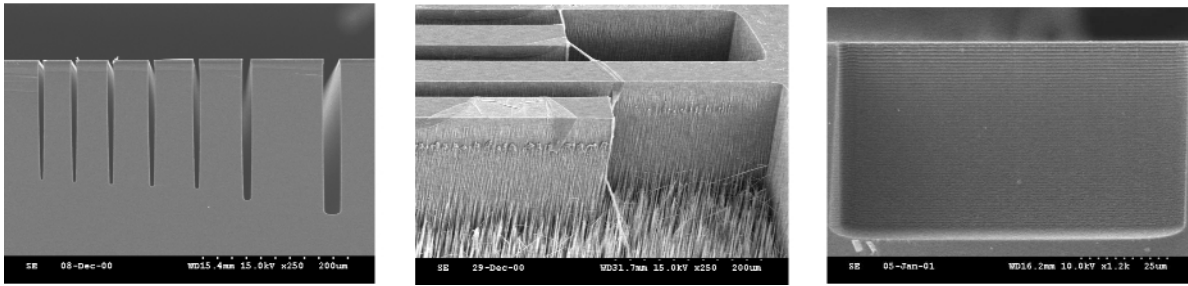
圖 17. ICP-RIE 加工之微結構。

缺陷，如蝕刻深度的差異、蝕刻處底部產生雜草 (grass) 現象及側壁橫紋 (dimple)。蝕刻深度的差異是由於反應離子蝕刻之延遲現象 (RIE lag) 所造成，較高深寬比的溝槽其蝕刻速率較小；雜草現象則是遮罩材料（鈍化膜、光阻或氧化矽等）被蝕刻分解後，又沈積於蝕刻矽的表面形成許多的微小遮罩 (micromask)，再持續蝕刻的結果。這種現象又以因蝕刻面積大、氣體壓力高或抽氣速率不足，蝕刻廢氣無法迅速排出時最容易產生。至於因為鈍化與蝕刻交替作用所產生的側壁橫紋與表面粗糙度，可在蝕刻階段於 SF_6 中加入一些氧氣，形成矽的氟氧化物 SiO_xF_y 鈍化膜來保護離子撞擊而獲得改善⁽²⁰⁾。

圖 19 表示以 ICP-RIE LIGA 技術製作的微噴嘴，製程首先以標準微影製程定義氧化矽蝕刻幕罩，接著以離子蝕刻方式加工 $275\ \mu\text{m}$ 深度（圖 19(a)），去除氧化矽後再以 AZ4620 光阻為蝕刻幕罩加工 $125\ \mu\text{m}$ 深度（圖 19(b)、19(d)），完成的矽模以電鑄方式沈積 $400\ \mu\text{m}$ 鎳金屬或合金（圖 19(c)），鑄層經過研磨後，再以 KOH 溶液蝕刻矽模進行結構釋放 (release)，獲得金屬微噴嘴（圖 19(e)）⁽¹³⁾。脆性的矽質模仁並不適用於進行後續的高分子壓模或射出成形。因此，將矽模仁以電鑄方式翻製成金屬模仁，將是實現 ICP-RIE LIGA 製程的最佳方式。

四、結語與展望

LIGA 製程已被證明可廣泛應用於微系統元件的製作，並成功的商業化。藉由新材料與新設計概念的引進，LIGA 製程將增加其應用潛力，特別是

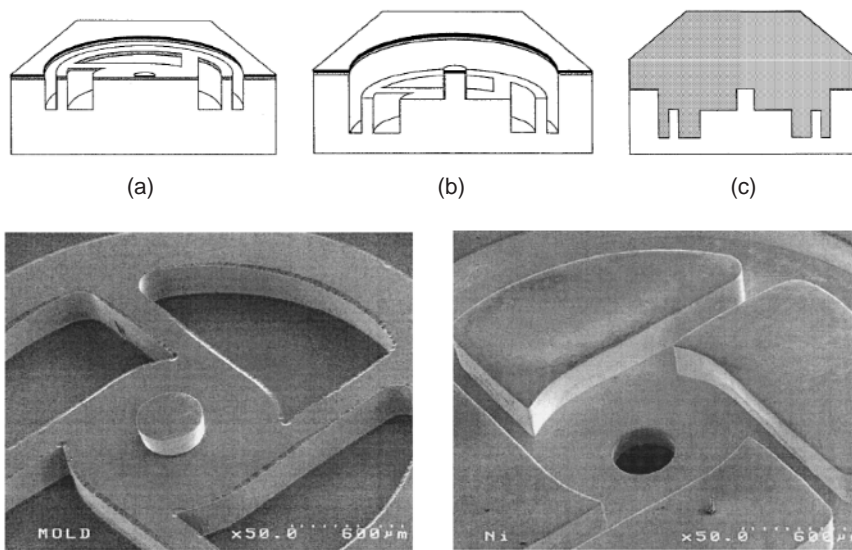


(a) 蝕刻深度的差異

(b) 雜草現象

(c) 側壁橫紋

圖 18. ICP-RIE 製程易形成之結構缺陷。



(a)

(b)

(c)

(d) 矽蝕刻噴嘴模結構

(e) 鍍電鍍翻製噴嘴結構

圖 19.

ICP-RIE LIGA 技術於微噴嘴的製作⁽¹³⁾。

未來整合 LIGA 製程與矽基細微加工的優點，更可促進微系統技術的成熟與應用。類 LIGA 製程雖然在微結構的厚度、深寬比、精度方面不如 X-ray LIGA 製程，但在生產成本、耗時性、製程彈性方面卻遠優於 X-ray LIGA 技術。因此在 MEMS 應用領域次微米精度與極大深寬比並非絕對必要的前提下，類 LIGA 製程仍有其發展空間，且在光刻設備改良、厚膜光阻材料開發、以及製程技術的進步下，類 LIGA 技術的未來發展前景仍令人期待。

誌謝

本文作者楊啟榮先生曾任職於國科會精密儀器發展中心 (PIDC)，現任教於國立台灣師範大學工業教育學系。楊先生在此將表達對 PIDC 各級長

官、同事及奈米技術研究室成員的感謝之意，感謝他們在楊先生服務於 PIDC 四年期間的教導與鼓勵，使其在待人處事與 MEMS 技術研發方面，有成長的機會並終生受用。

參考文獻

1. <http://www.europa-uk.com/>
2. <http://www.darpa.mil/mto/mems/projects/97mems/northrop-33.html>
3. NEXUS, *Market Analysis MST Task Force* (1998).
4. 程曜, X 光深刻術簡介, *科儀新知*, **18** (3), 41 (1996).
5. 楊啟榮, 羅國軒, 黃奇聲, 強玲英, SU-8 厚膜光阻於微系統 UV-LIGA 製程的應用, *科儀新知*, **20** (3), 45 (1999).
6. H. Miyajima and M. Mehregany, *J. Microelectromechanical Systems*, **4** (4), 220 (1995).
7. H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaud, and P. Vettiger, *J. Micromech. Microeng.*, **7**, 121 (1997).

8. E. C. Harvey, P. T. Rumsby, M. C. Gower, and J. L. Remnant, *SPIE*, **2639**, 266 (1995).
9. R. A. Lawes, A. S. Holmes, and F. N. Goodall, *Microsystem Technologies*, **3**, 17 (1996).
10. C. R. Yang, Bruce C. S. Chou, H. Y. Chou, Frank H. H. Lin, W. K. Kuo, Roger K. S. Luo, J. W. Chang, and Z. J. Wei, *SPIE*, **3511**, 342 (1998).
11. J. K. Bhardwaj and H. Ashraf, *SPIE*, **2639**, 224 (1995).
12. N. C. MacDonald, *Microelectronic Engineering*, **32**, 49 (1996).
13. N. Rajan, M. Mehregany, C. A. Zorman, and S. Stefanescu, *J. Microelectromechanical Systems*, **8** (3), 251 (1999).
14. <http://www.imm-mainz.de>
15. 周敏傑, LIGA製程技術發展現況, 機械工業雜誌, 元月, 131 (1996).
16. 中島尚正, 梅田章, LIGA PROCESS, 日刊工業新聞社, (1998).
17. E. Harvey, *Microsystems Technology : Micromachining with Pulsed Lasers*, Short Course Text at Imperial College UK (1997).
18. 鐘震柱, 盧慧娟, 趙天行, 感應耦合電漿的矽非均向蝕刻技術, 第三屆奈米工程暨微系統技術研討會, 3-83 (1999).
19. F. Laermer and A. Schilp, Method of Anisotropically Etching Silicon, *German Patent: DE4241045*.
20. C. K. Chung, H. C. Lu, and T. H. Jaw, *High Aspect Ratio Silicon Trench Fabrication by Inductively Coupled Plasma*, HARMST'99, 22, (1999).