

微系統製程技術發展

Development of Micro System Fabrication Technology

林郁欣、胡一君、周曉宇

Yu-Hsin Lin, Yi-Chiuen Hu, Hsiao-Yu Chou

國科會精密儀器發展中心所發展之微系統製程技術，包含紫外光光阻微影技術、準分子雷射加工製程技術、感應耦合電漿離子蝕刻製程技術、精密電鑄製程技術及精密熱印壓模技術等。近年來結合電子束曝光微影系統與聚焦離子束系統，已跨入奈米相關製程技術研發，並已建立相關奈米製程技術能量，為國內擁有系統化微米及奈米製程的技術單位。

The micro system fabrication technology including UV lithography, excimer laser machining, inductively coupled plasma (ICP) reactive ion etching, electroforming and hot embossing have been developing in Precision Instrument Development Center (PIDC). Recently, nano fabrication technologies have systematically developing in e-beam lithography and focus ion beam. PIDC has developed the capability of nano/micro fabrication technologies in Taiwan.

一、前言

國科會精密儀器發展中心(以下簡稱精儀中心)從民國八十六年開始，規劃執行微系統技術研發計畫，一開始主要是以「類 LIGA (LIGA-like) 製程 (UV-LIGA、laser-LIGA、ICP-LIGA) 技術」為主軸，開發微系統相關應用技術，發展至今，研究室名稱曾由精密量測控制研究室改名為微系統技術研究室，至目前之奈米技術研究室，多年來致力於建立系統化之核心製程技術能量，使得精儀中心成為國內具備高品質、穩定且最完整之製程技術單位。並且秉持著技術卓越、服務卓越之精神，除了進行本身研究計畫，建立高品質的製程技術，更提供學校、研究單位及產業界各項創新研究之服務，不僅

符合國際研究發展的潮流，更在推動國內研究發展盡一份心力。

精儀中心之奈米技術製程實驗室如圖 1 所示，內含紫外光微影系統、準分子雷射加工系統、感應耦合電漿離子蝕刻系統、精密熱印壓模系統，以及精密電鑄系統等，並於民國九十一年建立電子束曝光微影系統及九十二年建立聚焦離子束系統，結合已建置完成之各項微米級製程技術，使本研究室跨入奈米研究的領域，實現微米及奈米之高深寬比結構的製造，並走在技術發展的前端。

除製程設備外，精儀中心更擁有各項檢測設備，如原子力顯微鏡、近場光學顯微鏡、磁力顯微鏡、電子顯微鏡、非接觸式表面輪廓量測儀及微光學元件效率檢測系統，使本研究室具備從製程到檢測完整的微系統設備及技術。

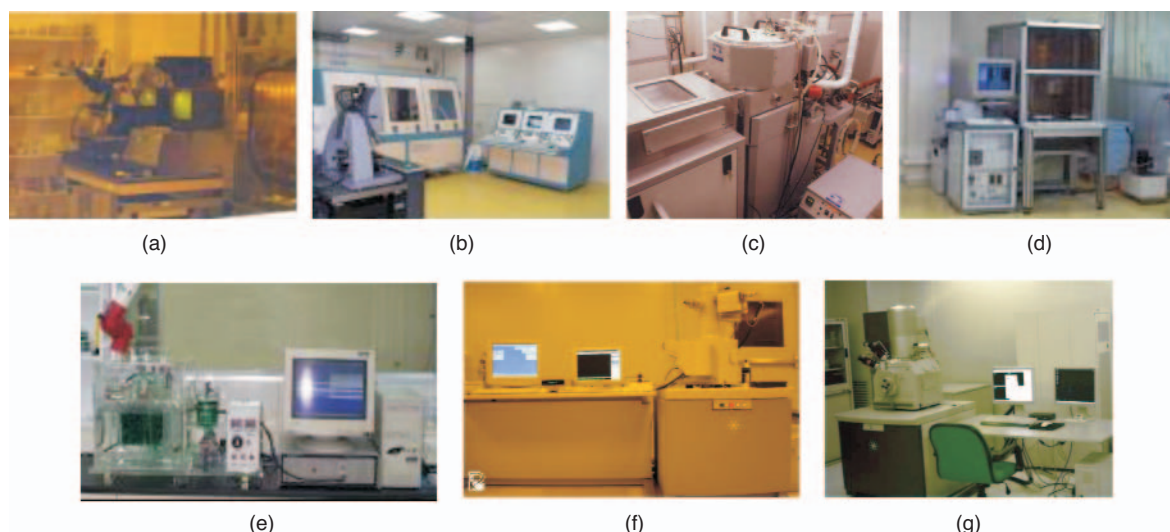


圖 1. 奈米技術製程實驗室之各項製程系統，(a) SUSS MA6 紫外光微影系統，(b) Exitech 7000 型 KrF 準分子雷射加工系統，(c) STS Multiplex 感應耦合電漿離子蝕刻系統，(d) HEX 熱印壓模機系統，(e) 精密電鑄系統，(f) Raith 50 電子束曝光微影系統，(g) Nova 200 聚焦離子束系統。

二、微系統製程技術

微機電系統 (MEMS) 領域的製程技術包括：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 (LIGA) 技術及微機械加工技術等三類技術^(1,2)。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。

標準之 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成形 (hot embossing) 或射出成形 (injection molding) 大量翻造技術。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⁽³⁾。然而同步輻射光源為一龐大且昂貴的設備，且 X-ray 光罩的製作成本與時間的耗費過高，因此，尋求替代性光源來進行類 LIGA 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⁽⁴⁻⁶⁾、準分子雷射微加工 (excimer laser micromachining)⁽⁷⁻⁹⁾ 及反應性離子蝕刻 (reactive ion etching)⁽¹⁰⁻¹²⁾ 等。這些替代性光源的成本遠低於同步輻射光源，雖然這些替代性光刻之精密度、深度及深寬比也相對降低，但這些類 LIGA 製程的光源設備所佔的空間小，價格亦較便宜，同時在光源設備的改良與新型光阻材料的開發下，亦可獲得令人滿意的加工品質，另外在不同材料加工之選擇，如反應離子蝕刻可加工矽、二氧化矽等材料，使得類 LIGA 製程技術具有其競爭優勢。

精儀中心具有完備之類 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 感應耦合電漿蝕刻系統。以下將針對上述三類光刻製程技術作介紹，並對其應用領域提出說明。另外，也將介紹電鑄與壓模製程，結合成為完備的類 LIGA 製程^(13,14)，以實現量產化之需求。

1. 紫外光光阻製程技術

在所有製程步驟中，微影製程幾乎已成為最初亦是最關鍵的步驟之一。在半導體製程上，廣義的

微影定義為：以光子束經由光罩對基材上的阻劑照射，使阻劑產生極性變化、主鏈斷鏈、主鏈交聯 (cross-linking) 等化學作用，經顯影後將光罩之圖形轉移至基材上。一般的微影製程步驟包含：晶片清洗、去水烘烤、塗佈 HMDS (增加光阻附著性) 並烘烤、塗佈光阻、軟烤 (去除光阻劑中之多餘溶劑)、曝光、曝後烤 (加速反應或去除駐波效應)、顯影及硬烤 (增加光阻的抗蝕刻能力)。

精儀中心所使用的為 SUSS MA6 紫外光微影系統，其波長為 365 nm 至 405 nm 之波段，其中所建立之相關的 UV 微影製程技術主要包含：

- (1) 薄膜光阻 (正型光阻如 AZ6112 (如圖 2(a)) 及 AZ1500, 負型光阻如 SU-8 2001), 膜厚度從小於 1 μm 至數微米左右, 其角色為定義小線寬之圖形, 作為抗蝕刻之阻擋層。
- (2) 中間厚度光阻 (正型光阻如 AZ4620 (如圖 2(b)), 負型光阻如 SU-8 2025), 膜厚度幾微米至數十微米, 有鑑於製作高深寬比結構之需求, 需要較厚之蝕刻阻擋層, 如作離子蝕刻之蝕刻遮罩 (etching mask), 或作為中間厚度之電鑄製程母模。
- (3) 厚膜光阻 (負型光阻如 SU-8 50 (如圖 2(c))、SU-8 100 及 JSR430N), 膜厚度數十微米至數百微米, 作為電鑄製程之母模, 其本身亦可應用於微結構、微透鏡及微流道等。

2. 準分子雷射製程技術

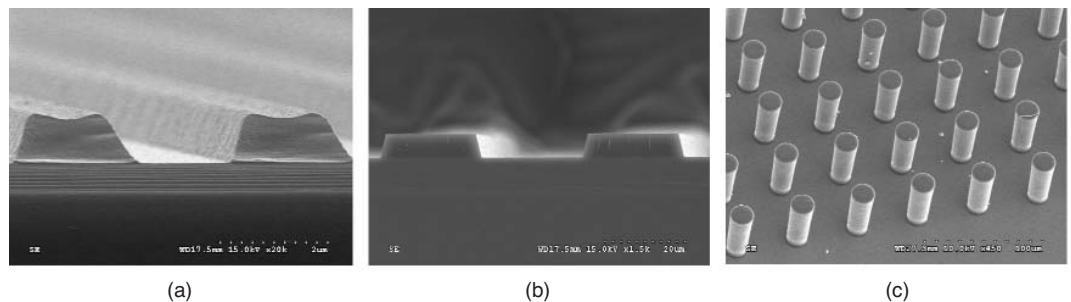
準分子雷射是由惰性氣體與化學性質較活潑的鹵素相混合後, 再經放電所激發之高功率深紫外光。普遍應用於雷射 LIGA 製程的光源為 ArF (193 nm) 與 KrF (248 nm) 雷射, 其中 ArF 雷射適合加工

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 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。

準分子雷射光分解挖除 (photoablation) 加工機制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的方式排出, 而達到加工的目的。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, 而獲得最佳的加工品質。

精儀中心所建置為 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、能量密度及透鏡的數值孔徑 (NA) 的設定, 可控制雷射照射工件表面的劑量與入射角度, 使得特殊的 3D 微結構得以實現⁽¹⁵⁾。

圖 2. 各種黃光光阻製程, (a) Z6112 溝槽圖形, (b) AZ4620 溝槽圖形, (c) SU-8 50 圓柱陣列結構。



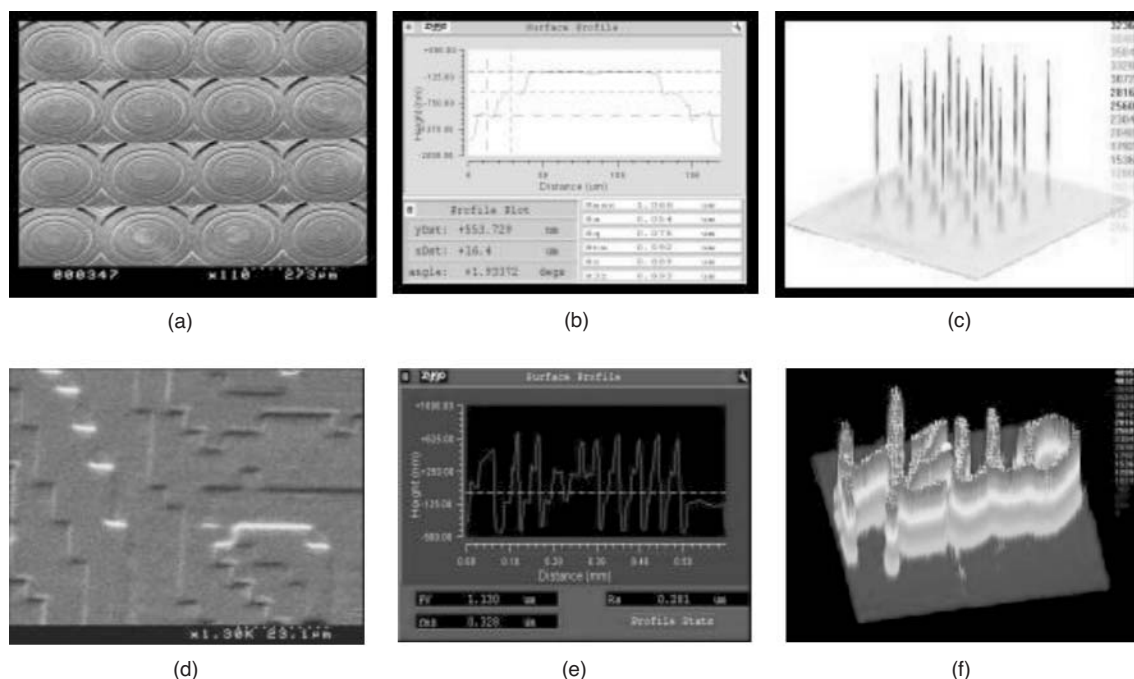


圖 3. 準分子雷射微光學繞射元件製作技術，(a) 十六階繞射式微透鏡陣列，(b) 表面形態檢測，(c) 焦平面光強度檢測，(d) 四階數位式全像片，(e) 全像片表面形態檢測，(f) 全像片影像輸出檢測。

利用光罩圖樣的設計，配合工件與光罩平台的相對運動，以獲得工件表面定點不同的雷射照射劑量，即可輕易達到多階、斜面或任意形狀的渠道加工。以十六階微透鏡陣列的製作為例，運用與 X-Y-Z 三維高精度定位平台配合特殊的光罩設計，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。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) 如圖 3 所示，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鑄方式形成金屬模仁，再利用熱壓成形或射出成形方式達到批量生產的目的。

其他常見準分子雷射加工之應用有繞射光學元件、微透鏡及生醫微流道等。

3. 感應耦合電漿離子蝕刻製程技術

電漿離子蝕刻製程技術是目前矽蝕刻製程中，能獲得最佳垂直度且最高深寬比之製程技術，尤其在製作各項高深寬比之單晶矽 (single crystal silicon, SCS) 微結構上，更是扮演舉足輕重的角色。一般而言，矽蝕刻技術分為濕式蝕刻與乾式蝕刻。傳統溼式矽蝕刻技術受限於矽晶格方向與側向蝕刻之故，故無法得到高深寬比的微結構。近年來，屬於乾式蝕刻之反應性離子蝕刻製程技術，已被開發應用於微機電元件、光電元件、積體電路及封裝等，輕易地實現高深寬比矽微結構的製作，對單晶矽蝕刻技術帶來莫大的衝擊。

乾式蝕刻主要是利用離子電漿來進行蝕刻，通常將蝕刻氣體游離產生電漿，利用電漿中高能電子分解氣體，來獲得所需之蝕刻物質，此種蝕刻包含物理性轟擊及化學性蝕刻雙重作用，具有較佳的非等向性蝕刻。離子蝕刻更可利用其等向性蝕刻之控制，來進行結構釋放 (release)，以製作可動的浮板、懸臂樑等微結構，增加微機電元件應用的彈性。

傳統的反應離子蝕刻製程，蝕刻速率慢 ($< 1 \mu\text{m}/\text{min}$) 以及深寬比小 ($< 10:1$)。因此，如電子磁旋共振電漿 (electron cyclotron resonance, ECR) 或感應耦合電漿離子蝕刻 (inductive coupled plasma, ICP) 等具有高電漿密度低氣體壓力 (high density low pressure, HDLP) 之蝕刻技術即被開發應用。

精儀中心所建置之離子蝕刻為感應耦合電漿離子蝕刻系統，其基本規格如下：上電極線圈為頻率 13.56 MHz 的射頻電源，下電極也為頻率 13.56 MHz 的射頻電源。晶片冷卻方式為背面氦氣冷卻 (backside helium cooling)。晶片固定方式為機械式挾持式，可通入之氣體有 O_2 、Ar、 SF_6 、 C_4F_8 、 CF_4 、 XeF_2 等。感應耦合電漿離子蝕刻中的蝕刻機制為「Advanced Silicon Etch (ASE)」，是由 Larmer and Schilp⁽¹⁶⁾ 所提出，並利用 Bosch 的交替蝕刻與高分子鈍化 (alternating etch and polymerization) 專利技術，以側壁鈍化方法來進行深蝕刻。蝕刻機制原理首先在矽壁沉積鈍化高分子，之後進行矽底部的高分子與矽之蝕刻，保護與蝕刻步驟交替反

覆，必須選擇適當的反應氣體比例，維持鈍化沉積與蝕刻步驟的平衡。此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、高非等向性、高蝕刻深度及高深寬比的矽蝕刻結果⁽¹⁷⁾。

感應耦合電漿離子蝕刻能得到高深寬比且垂直之矽微結構，如圖 4(a) 所示為線寬 $2 \mu\text{m}$ 、蝕刻深度 $60 \mu\text{m}$ 、深寬比達 30 之溝槽結構。另因感應耦合電漿離子蝕刻之蝕刻機制為 Bosch 的交替蝕刻方式，雖蝕刻後結構垂直度獲得提高，但相對的，此種蝕刻機制會在蝕刻側壁產生橫紋的現象，導致側壁之粗糙度變差，限制了此項製程之應用，若能獲得鏡面等級之蝕刻側壁，則感應耦合電漿離子蝕刻除可製作高深寬比的微結構外，更可應用在光學的設計上，如常見的光開關、光通訊及微鏡面等。

一般標準製程參數所獲的側壁粗糙度均方根值 (RMS) 約為 20–30 nm 左右，側壁橫紋之 PV 值約 200–300 nm 左右，在側壁粗糙度上不太符合光學等級的應用，一般都加上後段製程改善側壁粗糙度，但經蝕刻製程參數調整亦能獲得較平坦的側壁

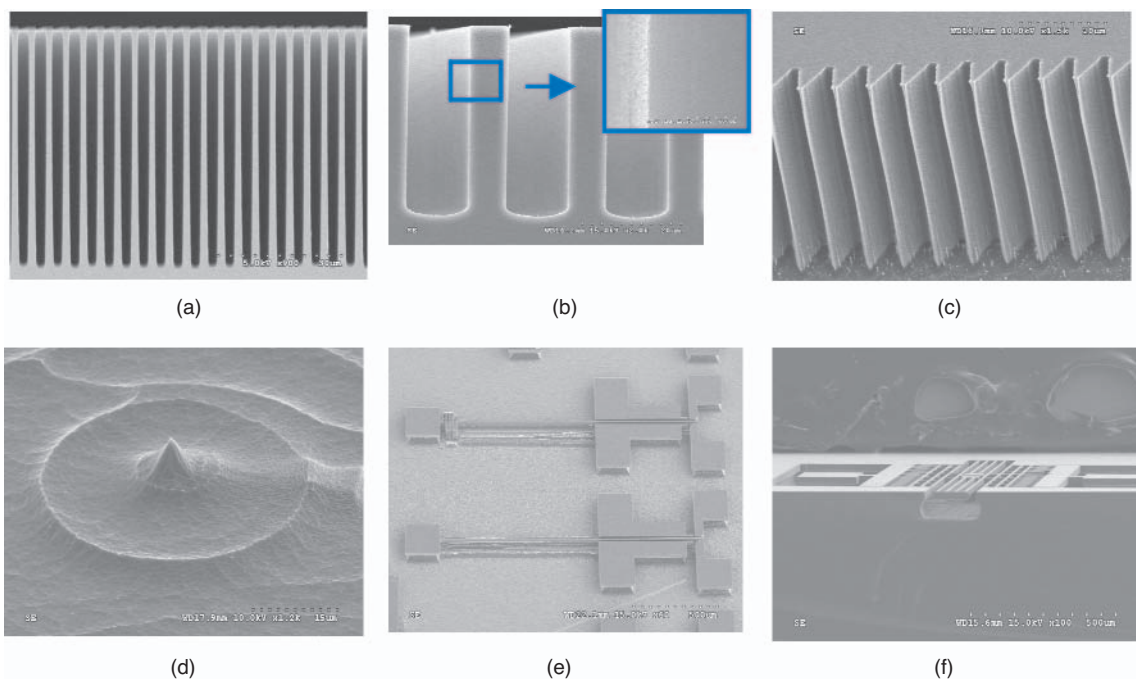


圖 4. 感應耦合電漿離子蝕刻之矽微結構，(a) 線寬 $2 \mu\text{m}$ ，蝕刻深度 $60 \mu\text{m}$ ，深寬比達 30 之溝槽結構，(b) 鏡面蝕刻製程技術，線寬 $10 \mu\text{m}$ 溝槽結構，蝕刻深度為 $40 \mu\text{m}$ ，垂直度為 $89 \pm 1^\circ$ ，側壁粗糙度均方根值約 10 nm，(c) 凹面型微光柵分光元件，(d) 等向性蝕刻之針尖微結構，(e) 單晶矽結構微繼電器，(f) 微梳狀致動器。

微結構⁽¹⁸⁻²⁰⁾。側壁鏡面蝕刻製程技術如圖 4(b) 所示，為線寬 10 μm 溝槽結構，利用 ASE 蝕刻機制，蝕刻深度為 40 μm ，垂直度為 $89 \pm 1^\circ\text{C}$ ，原子力探針量測其側壁粗糙度均方根值約 10 nm 左右，側壁橫紋已被消除，即可應用在光學設計上，並且不同於一般光學結構設計，因製程限制只能作垂直入射之設計，若能獲得平坦且高深寬比的側壁，使得光可由側向入射，使光源如光纖之定位結構與光學結構同時製作，避免對準的問題。

圖 4(c) 所示為應用鏡面蝕刻製程技術，所製作出之紅外波段凹面型微光柵分光元件⁽²¹⁾，該設計之頻寬 (FWHM) 約為 0.181 nm，頻道間距小於 0.39 nm。另外側壁鏡面蝕刻技術的另一項好處則應用在類 LIGA 製程技術後段壓模之脫模部分，一般在蝕刻完後產生之側壁橫紋，會導致壓模之材料被緊緊的抓住而無法脫模的問題，而平坦的側壁則可大大地減低無法脫膜的情形⁽²²⁾。感應耦合電漿離子蝕刻除了非等向性蝕刻的特性外，也可提供等向性的蝕刻，可應用於懸浮結構的製作，由於為乾式蝕刻，懸浮之結構無濕蝕刻結構被黏著於基板之問題，同時也可應用於製作針尖 (tip) 的結構，如圖 4(d) 所示。

進一步的，精儀中心利用稱為 Dry SCREAM 的製程技術，製作出之各種單晶矽懸浮可動式微結構，如微繼電器 (micro relay) (圖 4(e))、微梳狀致動器 (micro comb-drive) (圖 4(f)) 及微電容器 (micro capacitor) 等，此製程技術完全利用調整感應耦合電漿離子之蝕刻參數製作完成⁽²⁰⁾。蝕刻製程參數中，如氣體流量、反應蝕刻的時間、週期、製程腔體的壓力及上下電極的大小，都是影響本製作的重要因素。一般所熟知用來製作單晶矽可動式懸浮結構的 SCREAM 製程技術，是用二氧化矽來當作懸浮時結構的保護層，而此製程則是用感應耦合電漿離子蝕刻本身所提供的高分子聚合物 $(\text{C}_x\text{F}_y)_n$ 保護層來取代二氧化矽，如此一來，製作懸浮可動的微結構，就可以完全只需 ICP 蝕刻技術而製作出來。使用單光罩將遮罩圖案製作於矽基板上，經過 ICP 蝕刻過程後，即可完成懸浮微結構，更可利用多道的遮罩，利用不同遮罩材料的選擇搭配，如光阻、二氧化矽、氮化矽及金屬等，以獲得不同厚度

的微結構。所有製程步驟均在 ICP 乾蝕刻製程機台中製作，製程簡化且無濕蝕刻黏著的問題，使得此製程技術更為可靠。

4. 精密電鑄製程技術

電鑄技術在傳統的機械加工⁽²³⁻²⁶⁾，早就被廣泛應用在日常生活各項產品上，隨著科技的發展與微機電技術結合，更開拓了電鑄技術應用的範疇。從量產的角度而言，LIGA 製程本質上即可視為一種製造超精密模具的方法，利用電鑄對母模複製性極佳，使得微結構得以批量翻造大量生產。

電鑄成品之精確度完全取決於母模之設計精度，只要模具設計得當，其複製精度可達到次微米級，此時可將之定義為所謂的精密電鑄技術。然而，由於電鑄層較厚，故易產生內應力、變形，以及表面暨內部針孔等問題，必須將電鑄操作參數如鑄液成份、pH 值、溫度、添加劑及雜質等，在電鑄程序中控制管理。

電鑄技術的基本分類有金屬電鑄 (如 Ni、Cu、Au、Ag、Pt 等)、合金電鑄 (如 Ni-Fe、Ni-Co、Ni-Mn、Ni-W 等) 及複合電鑄 (如 Ni-SiC、Ni-Al₂O₃、Ni-diamond 等)。理論上，任何可以電鑄的金屬或合金，皆能作為電鑄金屬模具的材質，但在應用上，標準的電鑄材料是鎳，因鎳具有容易電鑄及抗腐蝕性佳的特性，但其質軟，硬度僅約 250 Hv，故主要是應用於製造較無磨耗問題之塑膠結構成形模仁，或加速度計與過濾網等微結構。若需要製作強韌、耐衝擊與耐磨耗之刀具／模具，則必須開發低應力、高硬度 (550 Hv)、高強度之合金電鑄或複合電鑄技術。

應用電鑄製程，製作金屬模具的基本原則與步驟如下：(1) 製作合適的電鑄用原型母模，材料的選用如蠟、橡膠、塑膠、石膏或其他金屬皆可；(2) 原型母模必須先進行表面處理，如清洗、脫脂、活化及導電等步驟，再放入專門設計與調配好電鑄溶液之槽體中，和直流電源的陰極導通後，陽極的金屬則溶解沉積於陰極的原型母模上；(3) 待達到所需的金屬厚度，原型母模即可離開電鑄液，經過清洗與乾燥步驟，鑄層即可與原型母模剝離。

(4) 最後進行鑄件檢視與品質測試。

應用上物理與機械性能的需求，使得 LIGA 製程之電鑄金屬或合金種類（甚至合金組成比例）有所差異，其中 Ni、Cu 主要用於製造較無磨耗問題之金屬微結構或塑膠微結構成形模仁；Au 用於製作 X-ray 光罩之吸收層；而 Ni-Co 與 Ni-Mn 合金具高強度與高硬度特性，適合作為耐衝擊或耐磨耗之刀具或模具；21% Fe：79% Ni 之 Permalloy 合金為軟磁材料，具有高導磁係數與高飽和磁束密度，可用以製作電磁式微致動器或微感測器；64% Fe：36% Ni 之 Invar 合金其熱膨脹係數相當低，與 Si 晶片及一些陶瓷材料相近，故可直接以此類材料為基材製造 Invar 合金微結構，因此 Ni-Fe 合金在微機電系統中極具應用價值⁽²⁷⁾。

精儀中心目前所使用的電鑄材料為鎳與銅，此兩種最常使用之材料中，低應力之鎳金屬可用來作為壓印製程之模版進行大量壓膜製造。

5. 熱印壓膜製程技術

熱印壓膜是一種熱鑄材料製作微結構的方法，最常用的是熱塑膠材料，其製程是對熱塑性聚合物 (thermoplastic polymer) 加熱使其軟化後，常以電鑄方法所得之模仁進行壓模，脫模後即在聚合物材料上形成塑膠微結構，此方式可以大量複製微結構以達量產規模。熱印壓模由於操作簡便而且對基材的要求小，故特別適用於微結構與積體電路的整合。

在精準定位系統的輔助下，於真空腔體中將聚合物材料加熱軟化至玻璃轉換溫度以上，聚合物材料在模具及上、下壓力盤三明治式的施力下，即可輕易地完成熱印壓模程序，熱印壓模完成後，系統必須冷卻至玻璃轉換溫度以下才能脫模。值得注意的是，熱印壓模機上、下壓力盤的冷卻迴路之設計，必須使工件的冷卻溫度分布均勻，否則容易造成殘留應力而變形。

精儀中心所建置的為 HEX 01/T-A (JENOPTIK Mikrotechnik)，是一台高精度之熱印壓模機系統。主要功能是以熱壓成形法來製造塑膠微元件，其使用之材料如 PMMA、PC、PI、低玻璃轉換溫度之玻璃，其應用領域包括積體光學、繞射光學與微光學元件等。

在熱壓完畢後，塑膠材料極易黏附於模仁上，在壓印高深寬比微結構時，若無適當的脫模機構，以人為方式促使塑膠結構與模仁分離，因施力不均之故，將造成塑膠微結構不可避免的變形，甚至模仁受到損壞，因此，需有適當的脫模機制，才能成功的脫模，例如脫模角的設計、脫模劑的應用等。

三、奈米製程技術

當人類探索世界的腳步更推進一步時，科技發展亦勢必跟隨著前進。就如同當半導體及微機電產業所帶領的微米探索熱潮，已無法包容科學家們乃至一般大眾的探索企圖，勢必強迫且自發地向下修正至奈米層級，因而有所謂下一代微影技術 (next generation lithography, NGL) 競爭熱潮湧現。參與競爭的技術經由長時間的物競天擇，至今仍能屹立不搖者莫不是箇中高手，如極限紫外光微影技術 (extreme ultraviolet lithography, EUVL)⁽²⁸⁾、全像微影術 (holographic lithography)⁽²⁹⁾、X-ray 光刻技術⁽³⁰⁾、聚焦離子束 (focus ion beam, FIB)⁽³¹⁾ 及電子束微影技術 (electron beam lithography, EBL)⁽³²⁾ 等。

上述之各種奈米等級製程機台的出現，與現有之製程結合，使得奈米及各項相關研究進而廣泛且快速的發展，精儀中心也先後建置完成電子束微影系統及聚焦離子束系統，正式跨入奈米製程技術之研發，目前已初步研發出奈米等級之光阻製程技術與感應耦合電漿離子蝕刻製程技術，並以高分子材料作為灌模壓模，驗證大量翻製之可行性。以下將對精儀中心所建立之奈米製程技術，包含電子束微影製程技術、聚焦離子束製程技術、奈米級電漿離子深矽蝕刻製程技術，以及奈米壓模製程技術作介紹。

1. 電子束微影製程技術

世界上第一部電子束微影系統誕生於西元 1960 年代，發展至今已逾 40 年。傳統的電子束微影系統扮演的是支援積體電路工業的角色，主要的應用市場有三：(1) 光罩之製作，如在玻璃上精確定義鉻金屬或 X-ray 光罩之製作等；(2) 直寫先進

的積體電路原型或製作少量的特殊產品，如砷化鎵積體電路 (GaAs IC) 或波導元件 (waveguide) 等；(3) 輔助積體電路的尺寸限制、量子效應及小尺寸下之物理現象等研究之進行。電子束微影系統的基本架構系統包含電子發射源、電磁／靜電式透鏡、孔徑光闌 (aperture)、電子束遮黑平板 (beam blinder)、精密定位平台及圖形產生器 (pattern generator) 等。

電子束微影技術⁽³³⁾的基本製作在阻劑 (resist) 的選擇上，由於 PMMA (poly-methylmethacrylate) 具有高解析度 (high resolution)、高對比 (high contrast) 及低敏感度 (low sensitivity) 等特性，而成為目前最廣泛使用及研究報導之阻劑。PMMA 在低電子劑量 (dose) 下為正型阻劑，其最小解析度約為 10 nm，若暴露在高電子劑量下則會轉變成負型阻劑，此時最小解析度略大於 50 nm。當 PMMA 結構深寬比太大時，在顯影時由於受到液體表面張力的作用而容易產生崩毀現象，因此一般而言可得到最大的深寬比約為 3。在負型阻劑方面，於微機電製程中常用之 SU-8 系列光阻經由適當地調整其配方成分後，亦可成為適用於電子束微影之負型阻劑^(34,35)。在相同條件下，PMMA 所需的劑量大於 SU-8 一個數量級以上，因此 SU-8 適用於大面積圖形的製作，可大幅縮減製程所需要的時間。

精儀中心所建置的 Riath50 電子束微影系統，除對光阻曝光直寫外，與電子束微影相關的主要製程技術包含：(1) 金屬剝離 (lift-off) 製程、(2) 奈米深蝕刻製程、(3) 三維微影製程及 (4) 奈米級壓模製程。圖 5(a)(b) 所示為電子束曝光直寫在 PMMA 上之線與圓洞之奈米圖案。

- (1) 金屬剝離製程為利用阻劑來作為釋放層或犧牲層，先利用電子束微影方式在阻劑上定義出反逆圖案 (inverse pattern)，再鍍上金屬層，最後藉由去除阻劑而間接地剝除多餘的金屬層，並定義出金屬結構。為避免金屬覆蓋於阻劑側壁上，使得阻劑難以去除，一般多採用雙層或三層的方式形成倒 T 狀結構，使得金屬不容易覆蓋於側壁上，以利剝離作業的進行。
- (2) 奈米深蝕刻製程的目的在於如奈米模仁 (template) 的製作，希望能夠製作一具有高深寬比的奈米結構，而應用 PMMA 作為阻劑一般僅能得到深寬比約為 3 的奈米結構，若想進一步提升深寬比至 5 以上，則需搭配奈米深蝕刻製程的開發，以感應耦合電漿離子蝕刻製作高深寬比奈米深蝕刻則為一可行之製程方法，詳細內容將於下一小節作介紹。
- (3) 三維微影製程以電子束微影系統為例，其圖形產生系統可外掛一產生三維圖形的程式，其基

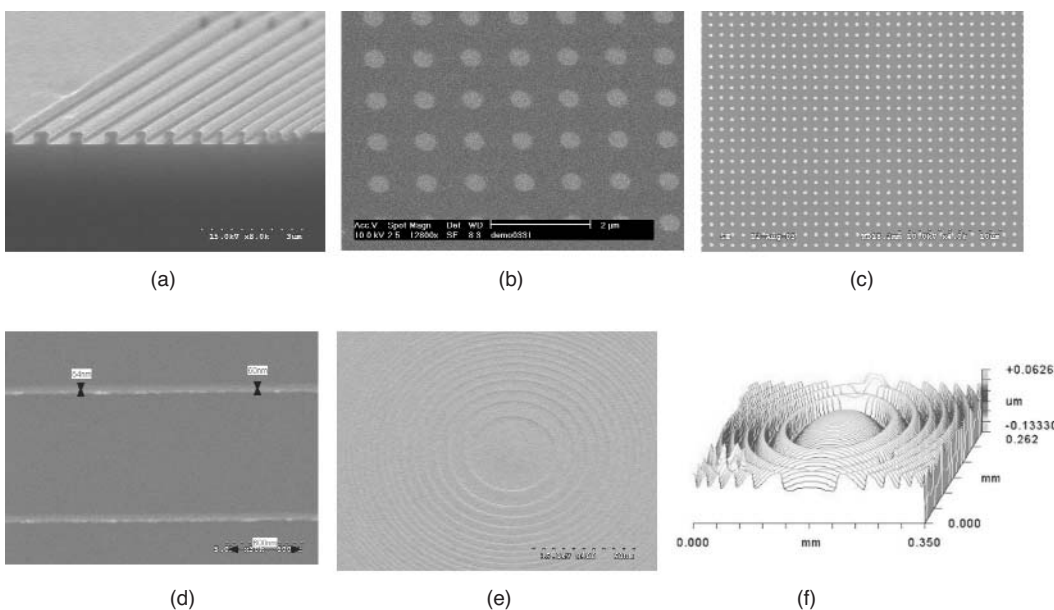
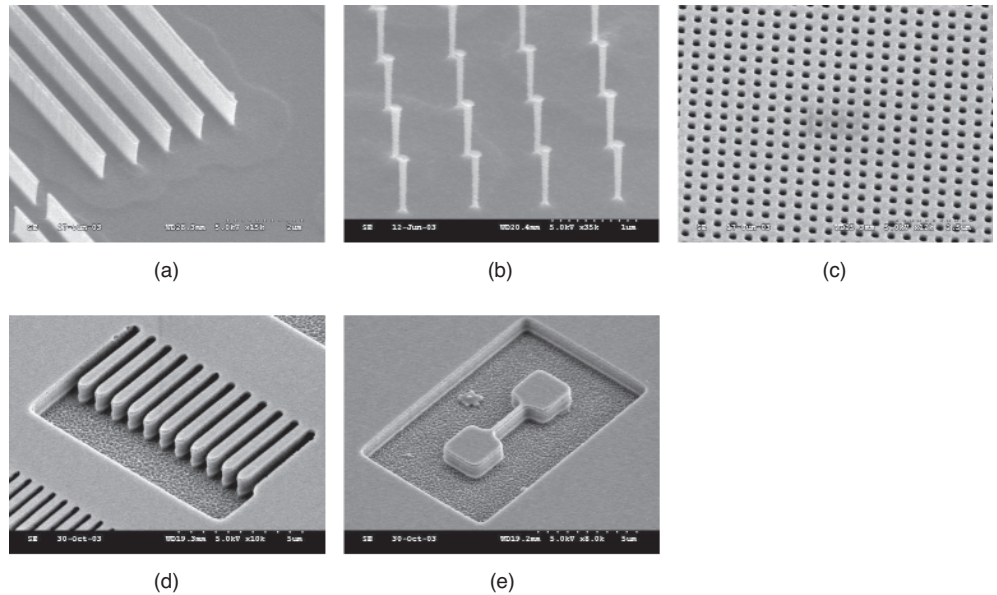


圖 5. 電子束曝光微影之奈米結構，(a) PMMA 奈米線，(b) 直徑 500 nm 之 PMMA 奈米圓洞，(c) 直徑 200 nm 之 SU-8 奈米圓柱圖形，(d) 金屬剝離法得之 60 nm 鉻金屬線，(e) PMMA Fresnel 鏡片結構，(f) Fresnel 鏡片表面形貌檢測。

圖 6.

各種奈米等級單晶矽結構，(a) 線寬為 56 nm、蝕刻深度為 943 nm 之奈米牆結構，(b) 直徑 70 nm、蝕刻深度為 930 nm 之奈米圓柱結構，(c) 直徑 200 nm 之奈米孔洞，(d) 400 nm 線寬懸臂樑，(e) 線寬小於 400 nm 之橋結構。



本原理為將欲產生之三維結構圖案轉化成一 256 階的灰階圖檔，再藉由此外掛程式將灰階分布轉化成相對的電子劑量分布，經由微影製程後即可得到三維的奈米結構，如圖 5(e)(f) 所示為 PMMA Fresnel 鏡片的製作結果。

- (4) 奈米級壓模技術的開發，則成為電子束微影技術邁入大量生產的重要銜接橋樑，原因為電子束微影技術是採用直寫掃描的方式來定義圖案，因此在產能 (throughput) 的表現上會陷入相對弱勢。透過電子束微影技術所製作之奈米模仁，藉由壓模射出的方式，可加速生產並適當地降低成本。目前國外文獻上所報導之奈米級壓模技術約可分為三大類，分別為軟微影製程 (soft lithography)⁽³⁶⁾、奈米壓模微影製程 (nanoimprint lithography, NIL)⁽³⁷⁾ 及步進快閃壓模微影製程 (step and flash imprint lithography, S-FIL)⁽³⁸⁾。

2. 聚焦離子束製程技術

聚焦離子束系統已廣泛的應用於半導體工業上，如材料的分析鑑定、製程的監控、故障及線路的分析，以及電子線路的修補等。其原理與掃描式電子顯微鏡相似，主要的差別在於聚焦離子束使用離子束作為照射源，而離子比電子具大電量及質量，目前聚焦離子束之離子源以較重的鎵離子 (Ga^+) 為主流。

精儀中心之聚焦離子束系統為 Nova 200 FIB 型，鎵為其離子源，不同於一般聚焦離子束最大的特點有兩項：(1) 其聚焦離子束系統為 dual beam 系統，同時具有電子束與離子束於製程腔體內，製程中能即時監看；(2) 配有氣體輔助系統，提高蝕刻速率、增強蝕刻選擇比及鉑金屬之沉積。聚焦離子束並能輕易地製作出 3D 結構，在產品設計、製造、檢測及修補上，將可大大減少研發時程。

3. 奈米級電漿離子深矽蝕刻製程技術

感應耦合電漿離子蝕刻製程原理如前面所述，其為交替式蝕刻，在蝕刻側壁上產生的橫紋蝕刻深度通常可達 200 nm。若無法有效解決側向蝕刻的問題，則尺寸在幾百奈米以下之結構，幾乎無法在蝕刻製程中倖存，因此必須藉由適當的參數調整降低側向蝕刻。圖 6 為利用電子束微影獲得奈米級蝕刻遮罩，再經感應耦合電漿離子蝕刻出之奈米結構⁽³⁹⁾。圖 6(a) 之奈米牆結構的蝕刻遮罩為鉑，矽線寬為 56 nm，蝕刻深度為 943 nm，圖 6(b) 之圓柱結構的蝕刻遮罩為鉑，矽直徑 70 nm，蝕刻深度為 930 nm，而圖 6(c) 矽圓洞結構的蝕刻遮罩為 PMMA，直徑 200 nm。此外，亦可利用如前所述之 Dry SCREAM 製程技術製造奈米等級單晶矽懸浮結構，例如圖 6(d) 所示之線寬 400 nm 的懸臂樑，以及圖 6(e) 之奈米橋結構。

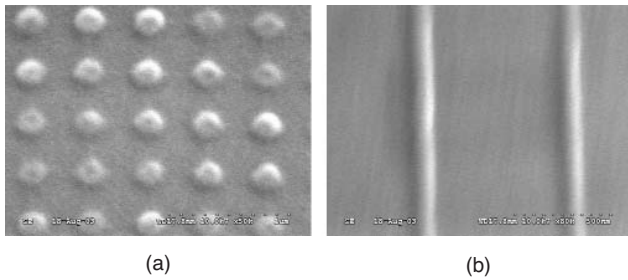


圖 7.(a) 直徑 200 nm 之 PDMS 圓柱結構，(b) 線寬 124 nm 之 PDMS 結構。

4. 奈米壓模製程技術

如前面所述，利用電子束微影技術以及感應耦合電漿離子蝕刻技術製作奈米結構，其缺點為費時且費用昂貴而無法大量生產，而奈米壓模製程即可解決這項問題。將電子束微影技術以及感應耦合電漿離子蝕刻技術製作出的奈米矽結構當作模仁，則可選用便宜之高分子材料與壓模機台進行大量生產的步驟。由於製作出的模仁為單晶矽，在壓模上之缺點為矽在其材料上之脆性，因此，此處所選擇壓模之材料為液狀之高分子材料如 PDMS，則可避免壓模時，矽模仁容易碎裂之問題。PDMS 的優點為便宜、容易製作、透光性高，以及具有生物相容性等，已大量的應用在微流道、生物醫學等。

精儀中心所選用的為 Sylgard 184 PDMS，圖 7 所示為用奈米矽模仁所翻製 PDMS 奈米結構，其中，圖 7(a) 為矽圓洞模仁所翻製 200 nm 直徑之 PDMS 圓柱結構，而圖 7(b) 為矽溝槽模仁翻製線寬 124 nm 之 PDMS 結構⁽³⁹⁾。

四、結語與展望

精儀中心除致力於微系統製程技術研發外，並以多年累積的核心製程技術，不斷的創新，加強與產、學、研各界的合作，達到資源共享與支援國內科技發展的任務；更掌握技術潮流與優勢，適時的跨入奈米製程之研發，期能對國內奈米科技發展有所貢獻。此外，除了提供微元件設計與製程製作等服務，並開放委託研究，以協助研究機構或公民營企業新產品的開發，進而奠定我國高科技產業永續發展的基礎。

誌謝

本文所介紹之微系統製程技術發展，由筆者所服務之國科會精密儀器發展中心奈米技術研究室研發團隊共同研發，除本篇作者外，另有殷宏林先生、游智勝先生、黃奇聲先生、鄭紹章先生、徐永裕先生與朱念南小姐所努力之成果。另外也要感謝目前任教於國立台灣師範大學工業教育學系之楊啟榮博士，在精儀中心服務期間對精儀中心奈米研究室微系統製程技術發展不遺餘力。

參考文獻

1. M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, New York: CRC Press (1997).
2. 微機電系統技術與應用，初版，新竹：行政院國家科學委員會精密儀器發展中心 (2003).
3. 程曜，*科儀新知*, **18** (3), 41 (1996).
4. H. Miyajima and M. Mehregany, *J. Microelectromechanical Systems*, **4** (4), 220 (1995).
5. H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. LaBianca, P. Renaud, and P. Vettiger, *J. Micromech. Microeng.*, **7**, 121 (1997).
6. 楊啟榮，羅國軒，黃奇聲，強玲英，*科儀新知*, **20** (3), 45 (1999).
7. E. C. Harvey, P. T. Rumsby, M. C. Gower, and J. L. Remnant, *SPIE*, **2639**, 266 (1995).
8. R. A. Lawes, A. S. Holmes, and F. N. Goodall, *Microsystem Technologies*, **3**, 17 (1996).
9. 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).
10. J. K. Bhardwaj and H. Ashraf, *SPIE*, **2639**, 224 (1995).
11. N. C. MacDonald, *Microelectronic Engineering*, **32**, 49 (1996).
12. N. Rajan, M. Mehregany, C. A. Zorman, and S. Stefanescu, *J. Microelectromechanical Systems*, **8** (3), 251 (1999).
13. 楊啟榮，*科儀新知*, **19** (4), 4 (1998).
14. 楊啟榮，強玲英，郭文凱，林郁欣，林暉雄，張哲瑋，趙俊傑，*科儀新知*, **22** (4), 33 (2001).
15. 強玲英，洪端佑，楊啟榮，“準分子雷射微加工 SU-8 光阻之折射式微透鏡陣列製作技術”，第四屆奈米工程暨微系統研討會 (2000).
16. F. Lärmer and A. Schilp, *Method of Anisotropically Etching Silicon*, German Patent DE4241045C1, USA Patents 4855017 and 4784720.
17. I. W. Rangelow, *Surface and Coatings Technology*, **97**, 140 (1997).
18. M. Chablot, *Microsystem Technologies*, **6**, 86 (2000).
19. H. C. Liu, Y. H. Lin, C. S. Chou, Y. Y. Hsu, and W. Hsu, “Sidewall Roughness Control in Advanced Silicon Etch Process”, *SPIE's International Symposium on Microelectronics and MEMS*, Dec. 17-19 (2001).

20. Y.-H. Lin, H.-L. Yin, Y.-Y. Hsu, Y.-C. Hu, H.-Y. Chou, and T.-H. Yang, "SCREAM for Multi-Level Movable Structures by Inductively Coupled Plasma Process", *ASME, IMCE2002-33382* (2002).
21. 林暉雄, 林俊廷, 林宇仁, 傅同龍, 林郁欣, 陸懋宏, *科儀新知*, **24** (3), 58 (2002).
22. 林郁欣, 游智勝, 胡一君, *電子月刊*, **90**, 114 (2003).
23. 陳建仁, 精密電鑄製程之應用介紹, *鑄造科技*, **154**, 4 (2002).
24. A. Maner, S. Harsch, and W. Ehrfeld, *Plating and Surface Finishing*, March, 60 (1988).
25. N. Masuko, T. Osaka, and Y. Ito, *Gordon & Breach, Electrochemical Technology Innovation and New Technologies*, Newark (1996).
26. 楊啟榮, 強玲英, 黃奇聲, *科儀新知*, **22** (1), 15 (2000).
27. 周敏傑, 呂春福, 王紀雯, 何淑鈴, 葉信宏, *機械工業雜誌*, 八月, 150 (1998).
28. H. Kinoshita, *Journal of Photopolymer Science and Technology, Japan: Tech. Assoc. Photopolymers*, **13** (3), 379 (2000).
29. M. Campbell, *Nature*, **404**, 53 (2000).
30. S. Y. Chou, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B4** (1), 253 (1986).
31. S. Reyntjens, *J. Micromech. Microeng.*, **11**, 287 (2001).
32. M. Hatzakis, *J. Electrochem. Soc.*, **116**, 1033 (1969).
33. 殷宏林, 鄭紹章, 林郁欣, 胡一君, 周曉宇, *科儀新知*, **25** (1), 56 (2003).
34. W. H. Wong, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B19** (3), 732 (2001).
35. H.-L. Yin, C.-S. Yu, C.-H. Chen, Y.-C. Hu, and H.-Y. Chou, "Rapidly Fabrication of Nano-Pillar Arrays Using Electron Beam Lithography in SU-8", 第七屆奈米工程暨微系統技術研討會, a10 (2003).
36. Y. Xia, *Angew. Chem. Int.*, **37**, 550 (1998).
37. S. Y. Chou, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B14** (6), 4129 (1996).
38. M. Otto, *Microelectronic Engineering*, **57-58**, 361 (2001).
39. Y.-H. Lin, H.-L. Yin, S.-C. Cheng, Y.-Y. Hsu, Y.-C. Hu, and H.-Y. Chou, "Nano Scale High Aspect Ratio Silicon Molds for PDMS Low Cost and Batch Production", 第七屆奈米工程暨微系統技術研討會, a7 (2003).

-
- 林郁欣先生為國立交通大學機械工程研究所碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
 - 胡一君先生畢業於文化大學物理系，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。
 - 周曉宇先生畢業於國立成功大學物理系，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。
 - Yu-Hsin Lin received his M.S. in mechanical engineering from National Chiao-Tung University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, Nation Science Council.
 - Yi-Chiuen Hu received his B.S. in physics from Cultural University. He is currently an associate researcher at Precision Instrument Development Center, Nation Science Council.
 - Hsiao-Yu Chou received his B.S. in physics from National Cheng Kung University. He is currently an associate researcher at Precision Instrument Development Center, Nation Science Council.