

感應耦合電漿反應性離子蝕刻於石英玻璃加工的技術與應用

Micro Fabrication on Quartz Glass by Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching and Its Application

湯喻翔、黃茂榕、林郁欣、蕭銘華

Yu-Hsiang Tang, Mao-Jung Huang, Yu-Hsin Lin, Ming-Hua Shiao

本研究主要探討石英玻璃之蝕刻特性，使用感應耦合電漿離子蝕刻 (inductively coupled plasma-reactive ion etching, ICP-RIE) 系統，以八氟環丁烷 (C_4F_8) 與氦氣 (He) 混和氣體作為反應氣體，對石英玻璃進行表面圖形結構的蝕刻，並比較不同蝕刻遮罩材料 (正光阻 (AZ 4620)、負光阻 (KMPR 1050) 及金屬 (aluminum)) 對石英玻璃蝕刻之表面輪廓形貌，尋找最佳蝕刻條件及微光學元件應用。實驗結果可分為三部分。第一發現以負光阻作為蝕刻遮罩時之表面形貌，可得到約 89 度之側壁垂直度，證明使用負光阻定義結構具有最佳側壁垂直度；以金屬鋁作為蝕刻遮罩，可得到較佳之底部粗糙度約 4.9 nm。第二為石英玻璃深蝕刻製程探討，以 KMPR 負光阻作為蝕刻遮罩，最佳的蝕刻參數是上電極功率為 1500 W、下電極功率為 120 W、腔體壓力為 10 mTorr、 C_4F_8 流量為 12 sccm 及 He 流量為 84 sccm 的條件，所以我們可得到蝕刻後之深度為 44.6 μm 、側壁垂直度為 89°、蝕刻速率約為 0.249 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、蝕刻選擇比 > 1:2 及蝕刻底部粗糙度約為 12.9 nm。第三係為了達成石英玻璃高蝕刻速率 (323 nm/min)、低表面粗糙度 (4.9 nm) 及垂直側壁形貌 (90°) 等條件，然而低腔體壓力、高氣體流量、高 ICP 功率與高 RF 功率是參數調整之關鍵，期望此研究能提供石英玻璃蝕刻製程技術所需之參考依據。

A deep reactive ion etching (DRIE) process of quartz glass with an anisotropic trench structure is presented in this work, using common lithography processes. In this paper, three types of masking systems, positive photoresist (AZ 4620), negative photoresist (KMPR 1050), metal (aluminum) have been studied and the suitability of particular mask type for deep etching of glass with nearly vertical wall profiles. Additionally, the process uses inductively coupled plasma generated by mixed C_4F_8 /He gases. Optimization of etch rate ($\sim 0.249 \mu\text{m}/\text{min}$), etched depth ($\sim 45 \mu\text{m}$), side wall angle ($\sim 89^\circ$), and mirror surface (roughness, $\sim 4.9 \text{ nm}$) were achieved at the conditions of ICP power (1500 W), RF power (120 W), process pressure (10 mTorr), C_4F_8 (12 sccm), He (84 sccm). Consequently, our etching method using a KMPR hard-mask and C_4F_8 /He plasma enables the fabrication of very deep trench and vertical profile in quartz glass.

一、前言

近年來，在玻璃材料表面製作微結構，被廣泛應用於微機電 (micro electro mechanical systems, MEMS)、光電以及生醫 (micro-electro-mechanical-analysis-system, μ -TAS) 方面，具有相當大的潛力⁽¹⁾。目前較常使用於微系統製程之玻璃基板包括二氧化矽 (silica)、硅硼酸玻璃 (borosilicate glass)、派熱克斯玻璃 (Corning Pyrex 7740 glass) 與石英玻璃 (quartz glass)，其具有優異光學穿透性、低電阻率與生物相容性佳之特色⁽²⁾。本研究將使用石英玻璃作為基板材料，其具有壓電性、絕緣性、透光性、高硬度與高熱穩定性等特性，是一種極具發展微元件潛力之材料⁽³⁾。

在石英玻璃上發展微奈米機電系統技術，最大瓶頸在於加工困難度與非導電性所導致之電荷累積效應。傳統的加工方式包括微鑽孔 (drilling)、微研磨 (powder blasting)、雷射 (laser ablation) 及微放電加工 (electrical discharge machining) 等技術，隨著微元件結構日益縮小化 (scaling down)，製程上對更微小線寬的控制、非等向性 (anisotropy) 及選擇比 (selectivity) 等要求日異嚴格，使得傳統機械加工方式並不易在玻璃表面上製作微奈米圖形結構。在奈米工程 (nanoengineering) 和微機電系統中，於石英晶片上製造垂直性溝槽 (trench) 結構是不可或缺的關鍵技術。一般常使用的製作方法有化學性濕蝕刻⁽⁴⁾ (chemical wet etching) 和乾蝕刻 (dry etching) 技術⁽⁵⁾。其中化學性濕蝕刻技術是利用氫氟酸溶液 (HF) 在玻璃晶片不同晶格方向之蝕刻速率差異，而化學性蝕刻優點具有非常高的蝕刻選擇比，即被蝕刻與遮罩材料之蝕刻率比率，使蝕刻遮罩不易被移除。但其缺點為底切 (undercut) 及等向性 (isotropic) 蝕刻之特性，即各個方向之蝕刻率是相同的，使得結構的形狀會大受限制。在蝕刻技術中，通常所設計的微機電元件需要垂直之結構，濕式蝕刻並不容易得到準直的結構。目前有愈來愈多元件朝高深寬比結構發展，而利用乾式蝕刻技術則在這方面有極佳效果。乾式蝕刻還有其他的好處，如：蝕刻率控制佳、蝕刻尺寸精密及側壁垂直度佳等好處，以達到非等向性及高蝕刻率之蝕刻結果。

一般而言，玻璃乾式蝕刻原理為結合物理性與化學性蝕刻優點，以達到移除固體材料目的，同時形成具高蝕刻速率及方向性之蝕刻效果⁽⁶⁾。所謂的物理性蝕刻即是離子轟擊，高能離子經偏壓吸引，加速撞擊在被蝕刻材料的表面，導致蝕刻物被挖除的現象，此反應完全為物理性的碰撞，並無化學反應。化學性蝕刻則是具腐蝕性之自由基與被蝕刻材料反應，鍵結而氯化之反應，而單就化學性蝕刻為等向性蝕刻，即被蝕刻物向下與側向的蝕刻速率相等，亦造成結構底切的缺點。

反應離子蝕刻玻璃的研究在先前文獻中已被廣泛研究，使用的各種化學物質包括 C_4F_8 ⁽⁷⁾、 CHF_3 ⁽⁸⁾、 SF_6 ⁽⁹⁾、 SF_6/Ar 、 CF_4/O_2 及 C_4F_8/He ⁽¹⁰⁾ 等混合氣體。現在最常採用的高密度電漿源，包括感應耦合電漿源 (inductively coupled plasma, ICP)、電子迴旋共振式離子電漿源 (electron cyclotron resonance, ECR) 及電容式耦合電漿源 (capacitively coupled plasma, CCP) 等系統⁽¹¹⁾。現今在玻璃乾蝕刻之主要挑戰是需要產生高能量離子以破壞矽-氧 (Si-O) 鍵結，其餘困難包括低蝕刻率、低蝕刻選擇比及不易製造高寬比結構等問題。本研究使用之石英玻璃蝕刻機台為感應耦合電漿離子蝕刻 (ICP-RIE) 系統，主要是利用電漿來進行蝕刻，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，故能獲得最佳垂直度且高深寬比之製程技術。

目前石英玻璃蝕刻製程技術在微機電領域皆有許多學者進行研究。大部分文獻顯示是以 ICP-RIE 系統為主，使用金屬層作為蝕刻遮罩以得到蝕刻深度大之流道結構。2000 年 Horiike 等人⁽¹²⁾ 使用 C_4F_8/Ar 及 C_4F_8/SF_6 氣體作為蝕刻電漿成分，選擇厚度 $3\ \mu m$ 金屬鉻 (Cr) 作為蝕刻遮罩，實驗結果得到寬度 $20\ \mu m$ 及深度 $50\ \mu m$ 之石英毛細電泳結構。2003 年 Ceriotti 等人⁽¹³⁾ 使用厚度 $4\ \mu m$ 金屬鎳 (Ni) 作為蝕刻遮罩，選擇 C_4F_8 氣體作為蝕刻電漿成分，量測結果顯示寬度 $50\ \mu m$ 及深度 $50\ \mu m$ 之石英流道結構。

基於上述參考文獻，得知傳統製程方式皆使用金屬作為蝕刻遮罩，以得到深蝕刻石英結構。為了改善製程複雜及耗時之缺點，因此本研究將比較不

同蝕刻遮罩材料對石英玻璃蝕刻結構之表面輪廓形貌影響，以八氟環丁烷 (C_4F_8) 與氦氣 (He) 混和氣體作為反應氣體，探討石英玻璃之蝕刻特性，並了解蝕刻參數 (氣體流量、氣體成分、製程壓力、電漿功率) 對表面形貌、蝕刻率、選擇比、側壁垂直度與底部粗糙度等影響，並且尋找最佳蝕刻條件。我們計畫建立詳盡之製程能力，並提供使用者更明確的製程規格，將其整理為明確的圖表，以利清楚了解石英玻璃蝕刻製程技術程度與可提供之製程能力。

二、二氧化矽蝕刻系統與蝕刻機制

二氧化矽蝕刻系統 (Plasmalab System 100 ICP 380, Oxford Instruments) 如圖 1(a) 所示，建置在本中心之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 5000 W、頻率 13.56 MHz 的 RF

電源，下電極線圈為 300 W、頻率 13.56 MHz 的 RF 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夾板。目前已有之蝕刻氣體包括 He、 O_2 、Ar、 SF_6 、 C_4F_8 與 CHF_3 等。

二氧化矽蝕刻機制如圖 1(b) 所示，利用正離子破壞 Si-O 鍵結，並依據在晶片表面連續沉積 C_xF_y 高分子薄膜後，同時在 C_xF_y 沉積層與二氧化矽間以較重離子進行轟擊，並產生蝕刻反應。本研究採用蝕刻設備為 Oxford ICP 380 系統，此系統之製程氣體以 $c-C_4F_8$ 為主， C_4F_8 氣體的分解可透過感應耦合電漿 (RF) 方式形成高密度的自由基 (如 F、 CF_2 、 CF_3) 及離子 (如 CF^+ 、 CF_2^+ 、 CF_3^+)。當電漿中 F 自由基及 CF_3^+ 離子密度較高時，會增加二氧化矽蝕刻率；相反地，當電漿中 CF^+ 及 CF_2^+ 離子濃度相對 CF_3^+ 離子是增加時，則二氧化矽對矽及光阻之蝕刻選擇比會增加。

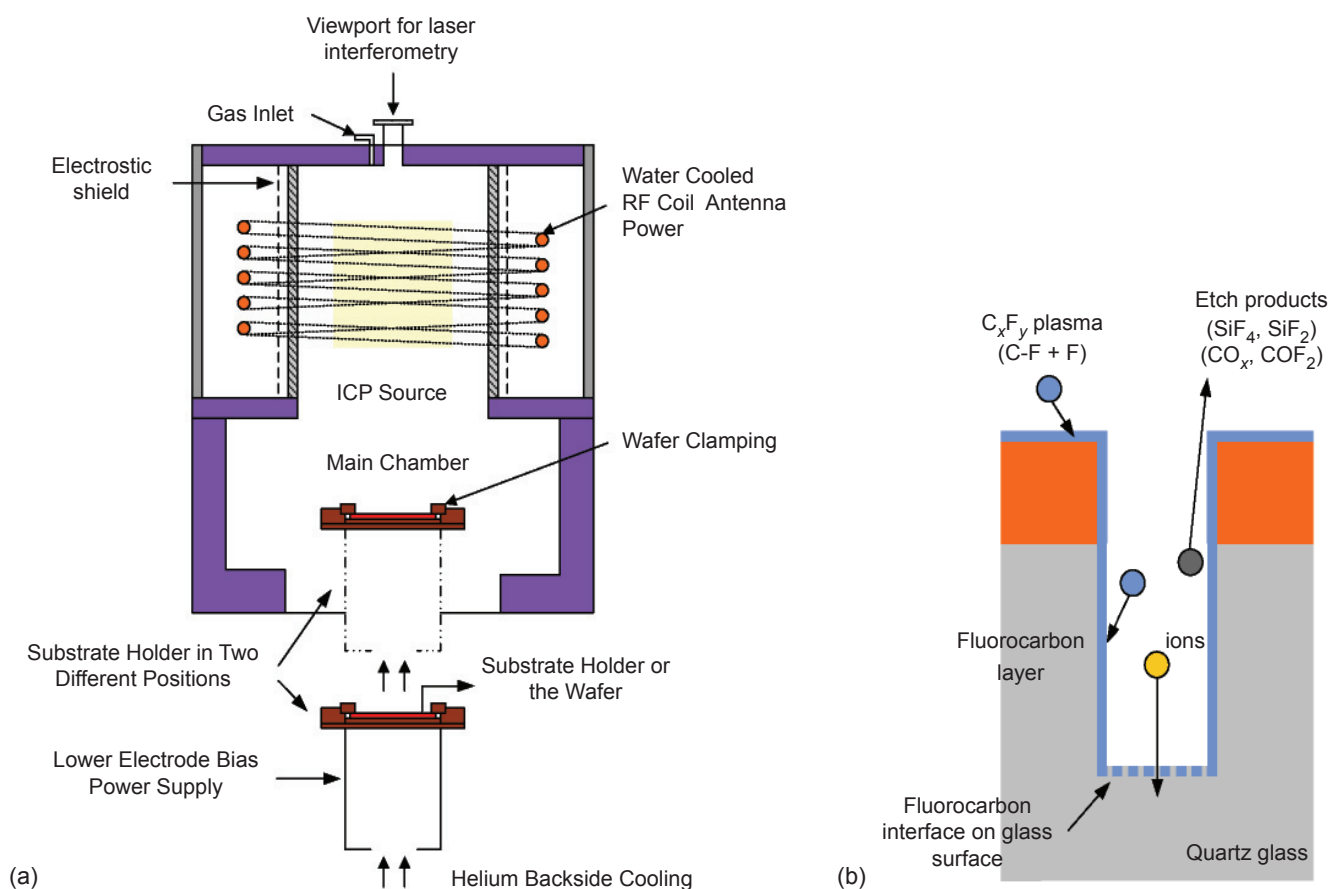
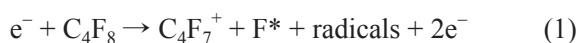


圖 1. 石英玻璃蝕刻之 (a) 系統與 (b) 機制示意圖。

在石英玻璃蝕刻過程中，使用 C_4F_8 做蝕刻氣體，其蝕刻機制化學式描述如下⁽¹⁴⁾：



其中， F^* 是氟氣體原子， SiO_2 是石英玻璃基板中主要成份， F^* 原子之產生是由反應性離子蝕刻中 C_4F_8 氣體所提供 (如化學式 (1) 所示)。石英玻璃蝕刻過程會消耗氟氣體原子，並且與矽原子結合形成易揮發之 SiF_x 氣體 (如化學式 (2) 所示)， SiF_4 的化學沉積現象會加速離子轟擊效果，將導致非等向性之蝕刻效果。在特定條件下， CF_x 自由基會以聚合物薄膜形式沉積於基板表面，但在石英玻璃蝕刻中，釋放出的氧氣會與 CF_x 自由基發生反應，形成易揮發的一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO_2) 和氟光氣 (COF_2) 氣體 (如化學式 (3) 所示)。

三、實驗設計

本研究主要探討石英玻璃之蝕刻特性、製程能力與光學元件應用，預期達到蝕刻後的規格為側壁垂直度可達 $90^\circ \pm 2^\circ$ ，蝕刻率可達 200 nm/min，蝕刻選擇比 (光阻/石英) 可達 1:1.2，底部平整度或粗糙度可達 100 Å，然後進行結構表面量測。如表 1 所示，以三組石英玻璃為測試基板，預先在其

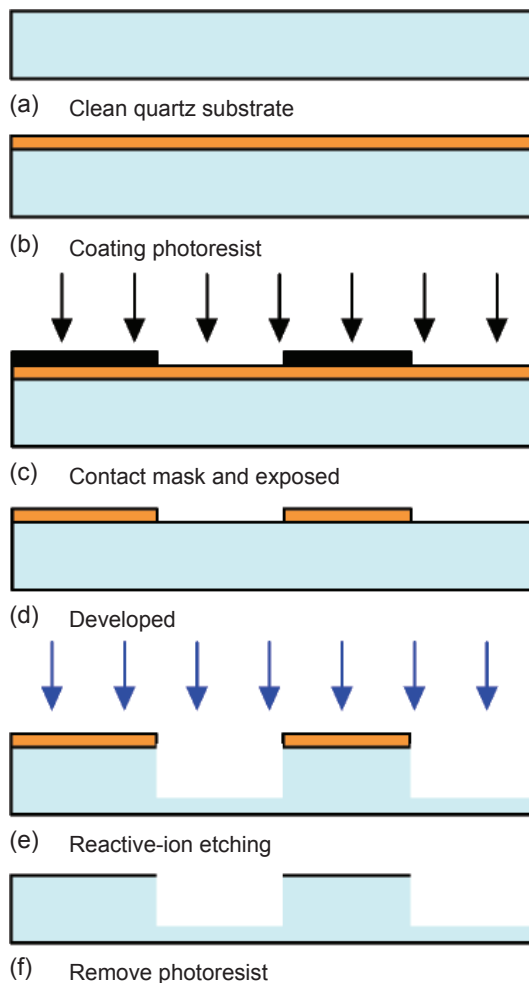


圖 2. 石英玻璃加工製程流程圖：(a) 試片前處理，(b) 厚膜光阻塗布 (KMPR 1050)，(c) 光罩圖案曝光，(d) 圖案化顯影，(e) 感應耦合電漿離子蝕刻，(f) 光阻去除。

表 1. 製程能力規格表。

基板材料	石英玻璃	
基板尺寸/厚度	4 吋 / 525 μm	
蝕刻氣體	C_4F_8/He	C_4F_8/O_2
蝕刻遮罩材料	光阻 (AZ-4620/KMPR 1050)	金屬 (Al)
蝕刻遮罩厚度	$\geq 2 \mu\text{m}/50 \mu\text{m}$	$\geq 1000 \text{ \AA}$
蝕刻遮罩側壁角度	$70^\circ \pm 2^\circ/90^\circ \pm 2^\circ$	$75^\circ \pm 2^\circ$
量測工具	電子顯微鏡/表面力學顯微鏡	電子顯微鏡/表面力學顯微鏡
蝕刻率	$\leq 2500 \text{ \AA}/\text{min}$	$\leq 2500 \text{ \AA}/\text{min}$
蝕刻深度	$\geq 3 \mu\text{m}$	$\geq 1.2 \mu\text{m}$
蝕刻均勻性	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$
蝕刻選擇比	$\geq 2:1$	$\geq 40:1$
側壁垂直度	$90^\circ \pm 2^\circ$	$85^\circ \pm 2^\circ$
表面粗糙度	$\leq 100 \text{ \AA} \text{ (rms)}$	

表面分別製作正光阻 (AZ 4620)、負光阻 (KMPR) 及金屬 (Al) 之蝕刻遮罩 (etching mask)，再由蝕刻機台對石英基板進行選擇性乾式蝕刻，藉由調整氣體成分比例、腔體壓力與蝕刻時間等參數，來探討蝕刻後之側壁垂直度、蝕刻速率、蝕刻選擇比，可對日後石英玻璃蝕刻製程應用面提供詳盡之製程規格，並建立完整蝕刻參數與最佳表面形貌。

實驗製程流程如圖 2 所示，本實驗使用之晶片為四吋石英玻璃基板，厚度為 $500\ \mu\text{m}$ ，如圖 2(a) 所示，分別使用 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2 = 4:1$ 的清洗液、丙酮 (acetone) 及異丙醇 (isopropyl alcohol)，各以超音波震盪器震洗 10 min。隨後利用厚膜光阻 (KMPR 1050, Microcosm Inc.) 微影製程，在石英玻璃基板上定義深度 $50\ \mu\text{m}$ 及線寬 $20\ \mu\text{m}$ 之溝槽結構，形成蝕刻遮罩如圖 2(d) 所示。完成蝕刻遮罩後，將定義好的晶片置於感應耦合電漿離子蝕刻機台內，並使用 $\text{C}_4\text{F}_8/\text{He}:12/84\ \text{sccm}$ 二種氣體混合

比例，在定壓力 10 mTorr、ICP 蝕刻功率 1500 W 與 RF 蝕刻功率 120 W 之條件下，將溝槽結構轉移至石英玻璃基板，如圖 2(e) 所示。蝕刻製程結束後，將加熱 $70\ ^\circ\text{C}$ 之 KMPR 1050 專用去除液 (SU-8 remover) 置入超音波震盪器內，震洗 30 分鐘，即可去除厚膜光阻。最後利用白光干涉式表面輪廓儀 (white light interferometer, Zygo NewView 5000)、電子顯微鏡 (SEM, Hitachi S-4300) 及表面力學顯微鏡 (AFM, Digital Instruments Dimension 3100)，觀察蝕刻後之表面形貌與底部粗糙度，並討論相關參數之影響。

四、實驗結果與討論

1. 以正光阻 (AZ 4620) 當作蝕刻遮罩

利用黃光微影技術製作正光阻遮罩後，以白光干涉式表面輪廓儀量測光阻厚度約為 $6.5\ \mu\text{m}$ ，

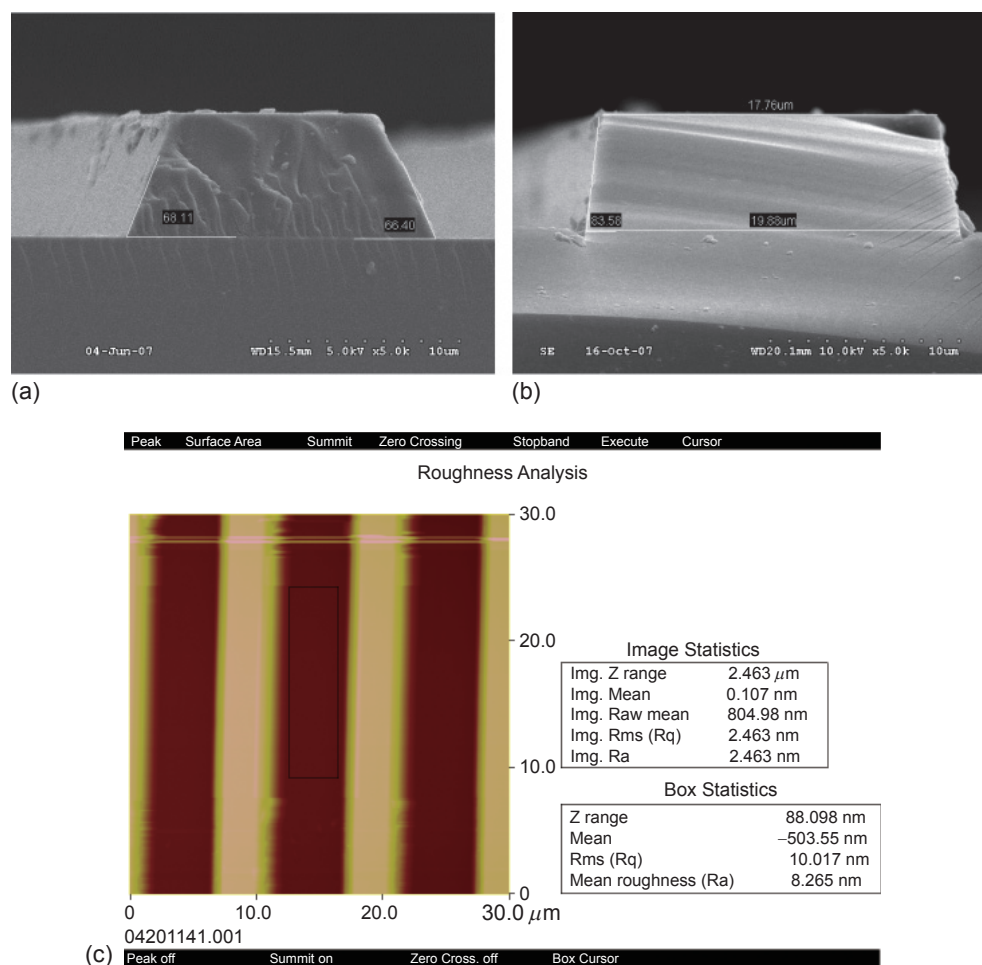
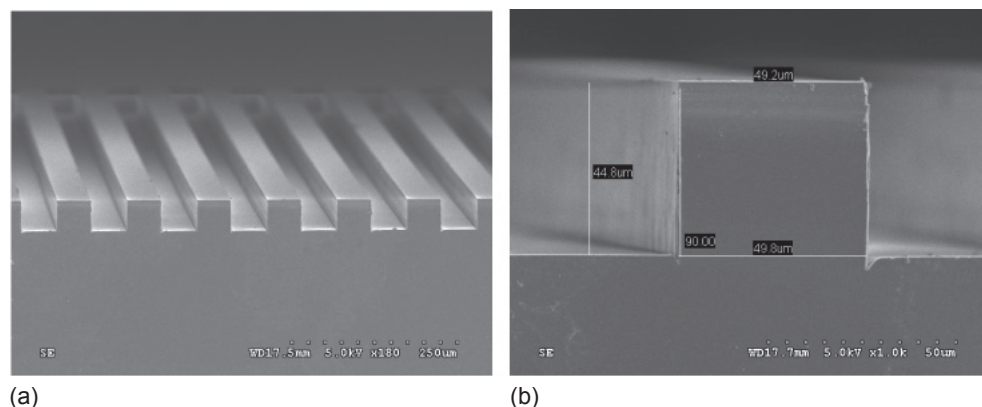


圖 3. 使用正光阻作蝕刻遮罩，以 SEM 與 AFM 觀察蝕刻後之結構表面形貌與粗糙度：(a) AZ 4620 光阻結構之側壁形貌，(b) 石英玻璃蝕刻後之側壁形貌，(c) 石英玻璃蝕刻後底部之表面粗糙度約為 8.4 nm。



(a)

(b)

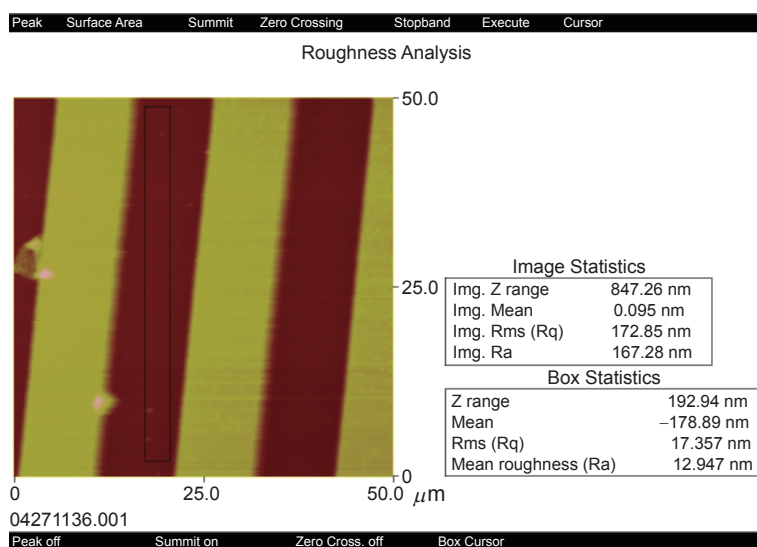


圖 4.

使用負光阻作蝕刻遮罩，以 SEM 與 AFM 觀察蝕刻後之結構表面形貌與粗糙度：(a) 俯視圖，(b) 側視圖（蝕刻側壁垂直度可達 89° ），(c) 石英玻璃蝕刻後底部之表面粗糙度約為 12.9 nm 。

並以電子顯微鏡量測側壁垂直度約為 68° 。蝕刻結果如圖 3 所示，其線寬為 $20 \mu\text{m}$ 之光罩圖形，原為等線寬之圖形，蝕刻後呈現不同之上下線寬，使用電子顯微鏡觀察其側壁垂直度約為 83° ，於是改變不同蝕刻參數（蝕刻氣體流量，製程壓力），以改善側壁垂直度，發現側壁垂直度仍為 $80^\circ - 83^\circ$ 之間，探討可能原因如圖 3(a) 所示，代表 AZ 4620 光阻進行微影製程後之側壁垂直度就不佳（約為 $68^\circ - 75^\circ$ ），即石英玻璃與正光阻之蝕刻選擇比約為 1:1，故導致蝕刻側壁垂直度類似會複製光阻形貌。圖 3(c) 為使用 AFM 量測蝕刻後之底部粗糙度約為 8.4 nm 。

2. 以負光阻 (KMPR 1050) 當作蝕刻遮罩

探討正光阻與負光阻作為蝕刻遮罩時之蝕刻現象，由於以正光阻作為蝕刻遮罩，故蝕刻後結構形貌會完全複製蝕刻遮罩之形狀，導致蝕刻後側壁

垂直度約為 83° 。改善方法為可提高蝕刻選擇比或增加蝕刻遮罩側壁垂直度（以負光阻定義結構），若是提高蝕刻選擇比，實驗後發現效果不佳，對垂直度改善效果不彰。故蝕刻製程改以 KMPR 負光阻作為蝕刻遮罩，光阻層厚度為 $60 \mu\text{m}$ ，蝕刻選擇比約為 1:2，蝕刻遮罩圖案以溝槽結構作為蝕刻圖形，實驗中蝕刻氣體選用 $\text{C}_4\text{F}_8/\text{He}$ ($12/84 \text{ sccm}$)、上電極功率/下電極功率為 ($1500/120 \text{ W}$)、腔體壓力 (10 mTorr) 及蝕刻時間三小時，蝕刻採分段性蝕刻，每蝕刻一小時休息半小時，避免腔體過熱，導致試片表面霧化之現象。實驗結果如圖 4(a) 與 (b) 所示，以負光阻定義溝槽結構，蝕刻後可得到約 89° 之側壁形貌、蝕刻深度約為 $44.6 \mu\text{m}$ 、蝕刻速率約為 $0.249 \mu\text{m}/\text{min}$ 及蝕刻深度誤差可控制在 4% 內。圖 4(c) 為 AFM 量測蝕刻後之底部粗糙度約為 12.947 nm 。

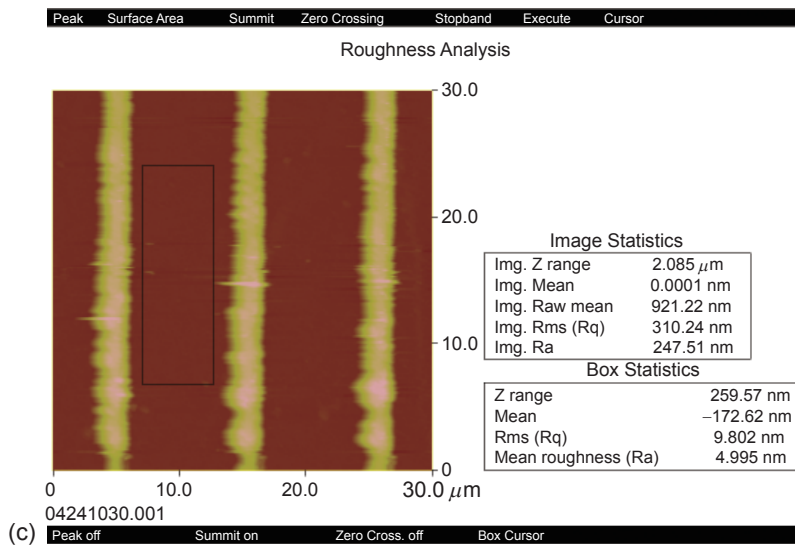
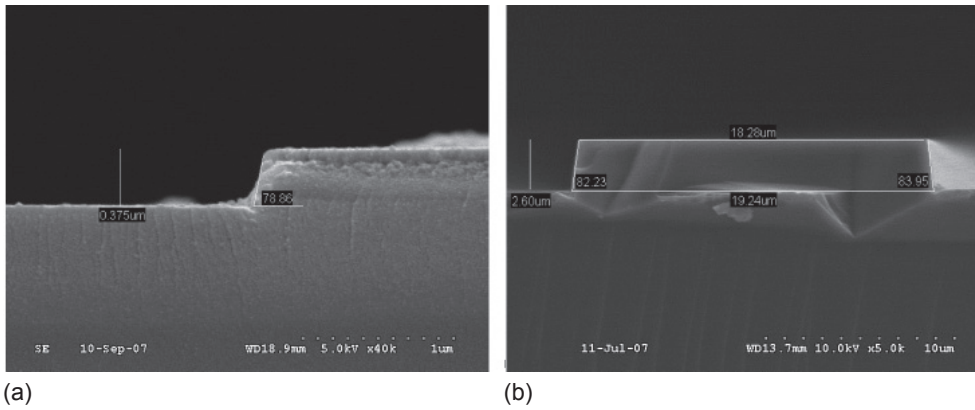


圖 5. 使用金屬鋁作蝕刻遮罩，以 SEM 與 AFM 觀察蝕刻後之結構表面形貌與粗糙度：(a) 金屬鋁結構之側壁形貌，(b) 石英玻璃蝕刻後之側壁形貌，(c) 石英玻璃蝕刻後底部之表面粗糙度約為 4.9 nm。

3. 以金屬鋁當作蝕刻遮罩

使用舉離 (lift-off) 製程製作金屬鋁遮罩後，以白光干涉式表面輪廓儀量測金屬鋁薄膜厚度約為 350 nm，並以電子顯微鏡量測側壁垂直度約為 78°。蝕刻結果如圖 5 所示，所蝕刻之線寬為 20 μm 之等線寬光罩圖形，蝕刻後量測結構上下線寬呈現不同寬度，上下寬度距離差約 1 μm，由 SEM 觀察其側壁垂直度約為 84°。未來可嘗試改變不同蝕刻參數，如降低腔體壓力及製程溫度，以改善

側壁垂直度。此外，由於製程壓力的改變或蝕刻功率的增減，都會影響蝕刻率的變動與蝕刻選擇比的差異，所以如何調整蝕刻參數之間的關係，對改善蝕刻後之表面輪廓是非常重要的。圖 5(c) 為使用 AFM 量測蝕刻後之底部粗糙度約為 4.9 nm。

4. 改變 C₄F₈/He 氣體流量對蝕刻深度與蝕刻速率之曲線關係

圖 6(a) 為 C₄F₈ 氣體流量對蝕刻深度與蝕刻速

表 2. 製程能力規格表。

Etching Mask	C ₄ F ₈ /He/O ₂ flows (sccm)	RF power (W)	ICP power (W)	Pressure (mTorr)	Etching rate (μm/min)	Side wall (°)	Ra (nm)
AZ 4620	24/70/-	150	1500	10	0.228	83	8.4
KMPR	12/84/-	120	1500	10	0.249	89	12.9
Al	40/-/15	80	1800	10	0.237	84	4.9

率之關係圖，蝕刻參數選定上電極功率 1500 W、下電極功率 120 W、腔體壓力 10 mTorr、He 流量為 84 sccm 與蝕刻時間 30 分鐘，由圖 6(a) 可知隨著 C_4F_8 氣體流量由 5 調升至 30 sccm 時，所對應的蝕刻深度由 5.9 增加至 9.7 μm 、蝕刻速率由 177 增加至 323 nm/min 。圖 6(b) 為 He 氣體流量對蝕刻深度與蝕刻速率之關係圖，蝕刻參數選定上電極功率 1500 W、下電極功率 120 W、腔體壓力 10 mTorr、 C_4F_8 流量為 12 sccm 與蝕刻時間 30 分鐘，由圖 6(b) 可知隨著 He 氣體流量由 20 調升至 100 sccm 時，所對應的蝕刻深度由 6.7 增加至 8.6 mm，蝕刻速率由 223 增加至 287 nm/min 。

5. 改變腔體壓力對蝕刻深度與蝕刻速率之曲線關係

圖 6(c) 為腔體壓力對蝕刻深度與蝕刻速率之關係圖，蝕刻參數選定以上電極功率 1500 W、下電極功率 120 W、 C_4F_8/He 流量為 12/84 sccm 與蝕刻時間 30 分鐘，由圖 6(c) 可知隨著腔體壓力由 2.5 調升至 20 mTorr 時，所對應的蝕刻深度由 8.1 減少至 5.06 mm，蝕刻速率由 270 減少至 169 nm/min 。

實驗結果發現腔體壓力與蝕刻速率是呈非線性關係， C_4F_8/He 氣體流量與蝕刻速率是呈線性關係，其中改變氣體壓力與 He 氣體流量條件，並未大幅增加蝕刻速率。代表在蝕刻過程， C_4F_8 氣體流量才是決定石英玻璃蝕刻速率之主要因素，且 C_4F_8 氣體具有較佳結構尺寸控制能力，故為了達成石英玻璃高蝕刻速率、低表面粗糙度及垂直側壁形貌，控制低腔體壓力、高氣體流量、高 ICP 功率與高 RF 功率是參數調整之關鍵。

綜合上述實驗製程探討，針對不同蝕刻遮罩之蝕刻製程參數與結果，歸納如表 2 所示。根據表中最佳參數，選定以上電極功率 1500 W、下電極功率 120 W、腔體壓力 5 mTorr、 C_4F_8/He 流量為 30/100 sccm 與蝕刻時間 180 分鐘，作為製作溝槽結構製程參數。由於發現蝕刻遮罩對結構表面輪廓之影響甚為重要，所以選定以 KMPR 負光阻作為蝕刻遮罩，且 KMPR 負光阻具有優異的材料強度與垂直性佳之特性，故實驗結果可得到最佳側壁垂直度約 89 度與蝕刻選擇比約 1:2。如圖 7 所示，

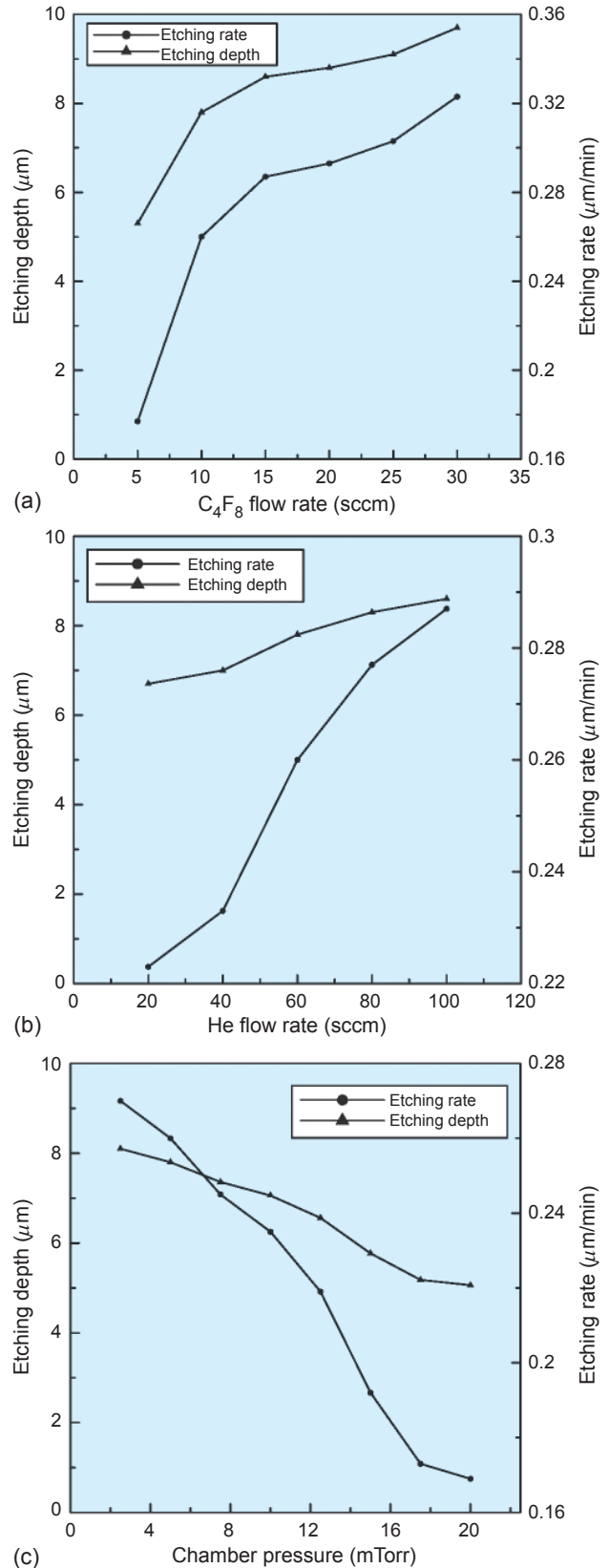


圖 6. 比較不同蝕刻參數對石英玻璃蝕刻深度與速率之曲線圖：(a) 改變 C_4F_8 氣體流量，(b) 改變 He 氣體流量，(c) 改變腔體壓力。

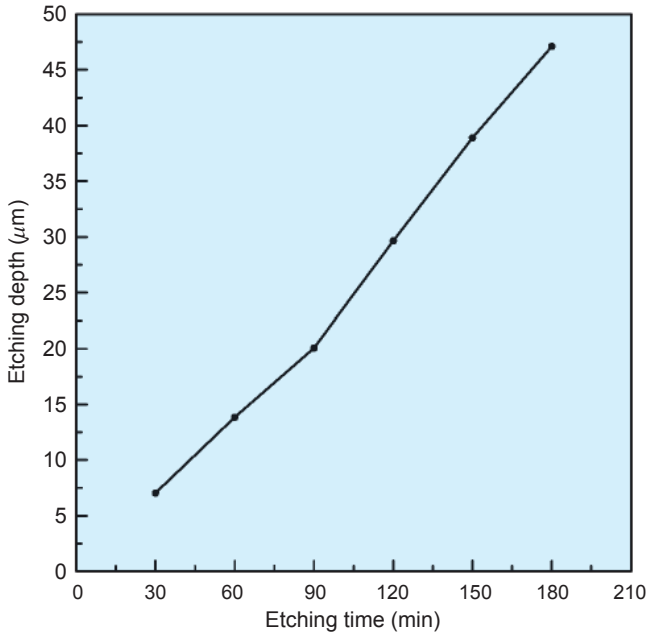


圖 7. 在石英玻璃最佳蝕刻參數 (上電極功率為 1500 W、下電極功率為 120 W、腔體壓力為 5 mTorr、 C_4F_8 流量為 30 sccm 及 He 流量為 100 sccm)，比較不同蝕刻時間對石英玻璃蝕刻之深度曲線圖。

為不同蝕刻時間對蝕刻深度之曲線圖，發現隨著蝕刻時間增加，蝕刻深度也相對增加，即當蝕刻時間為 30 分鐘時，蝕刻深度為 $7.05 \mu\text{m}$ 。當蝕刻時間增加至 180 分鐘時，蝕刻深度增加為 $44.6 \mu\text{m}$ ，由曲線圖計算，可得到平均蝕刻率為 $0.243 \mu\text{m}/\text{min}$ 。

6. 石英玻璃蝕刻製程之應用

石英玻璃蝕刻製程的開發，可使得微光學元件設計、製作及檢測能量更為完備，主要應用於微光柵、光束整型器、微奈米結構蝕刻、3D 封裝及生醫微流體等元件。微機電系統元件種類繁多，以下將針對繞射及抗反射元件，並各別說明乾式蝕刻在光學元件系統上之應用。

(1) 繞射元件部分

本研究目的係開發一種能產生多光點陣列的光學元件，該光學元件為一種特殊功能的繞射光學元件，以雷射為光源，經過準直後成為方型平面光束，入射於所製作的光學元件，可在距離元件之某一特定位置上產生所需光點陣列分布。再利用掃描

投影光學系統，將所產生的光點陣列投射於晶片上，使欲加工的晶圓光刻出適當尺寸的孔洞陣列，以使該晶圓得以進行下一階段的蝕刻製程。所設計與製作的光學元件係為一個八階非連續的繞射光學元件，製程上利用三道光罩的黃光微影技術與感應耦合電漿蝕刻法，在石英基板上製作出所需的結構，以使該光學元件能產生所需的光點陣列。多光點光學元件的製作流程如圖 8 所示，製程步驟包括

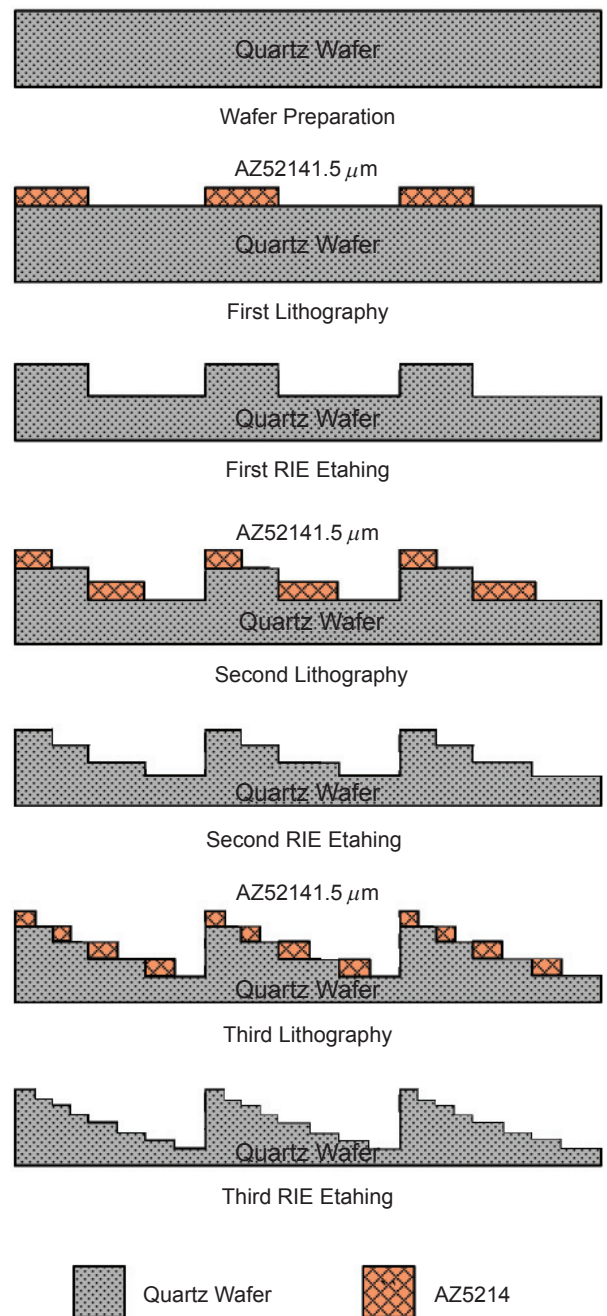


圖 8. 八階光學元件的微影蝕刻製作流程。

三道黃光微影製程與感應耦合電漿離子蝕刻製程，表面形貌定義為八階表面輪廓之光學元件，三道光罩製程的蝕刻深度設計為 $0.66247\ \mu\text{m}$ 、 $0.32417\ \mu\text{m}$ 與 $0.164964\ \mu\text{m}$ 。如圖 9 所示，以白光干涉儀 (Zygo) 進行蝕刻深度的量測，蝕刻深度誤差落在 3–5% 之間，三次蝕刻深度分別為 $0.661534\ \mu\text{m}$ 、 $0.332891\ \mu\text{m}$ 與 $0.16425\ \mu\text{m}$ 。

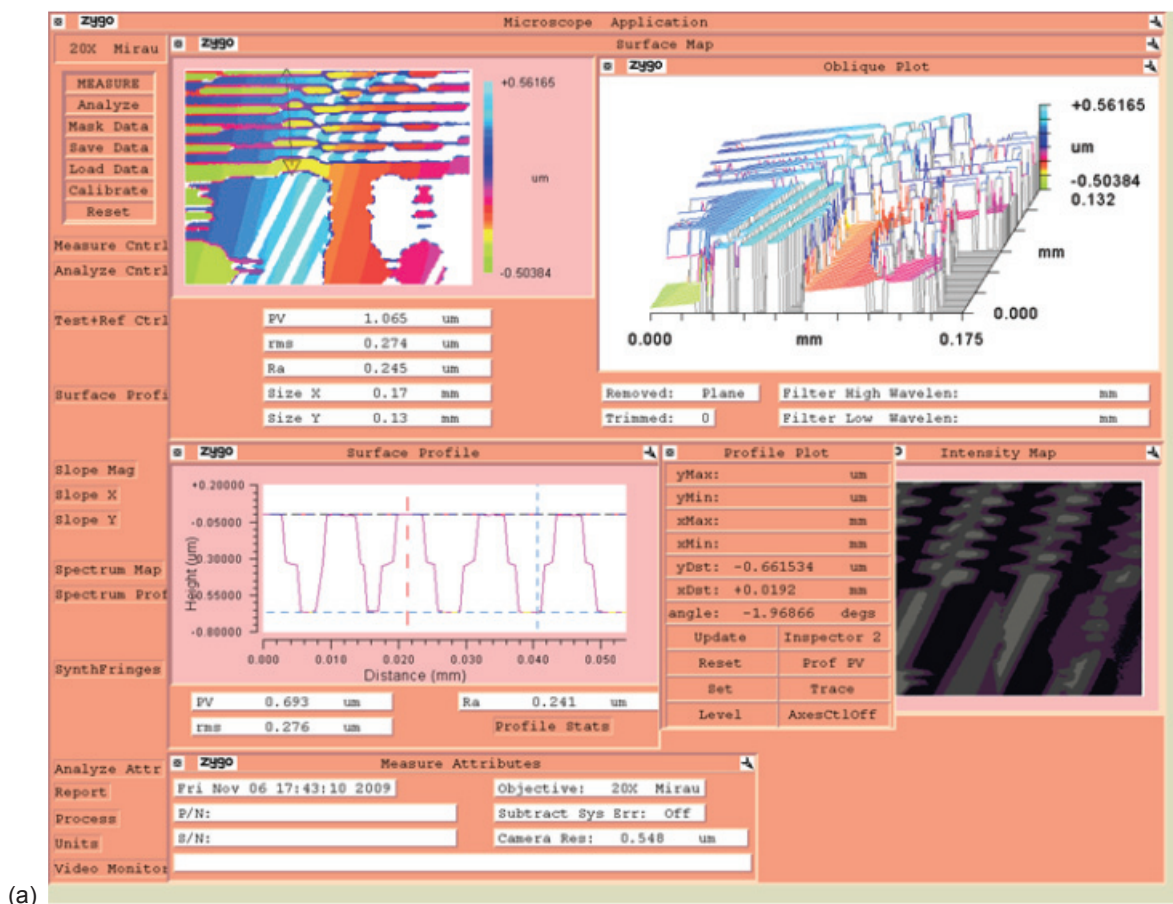
(2) 抗反射元件部分

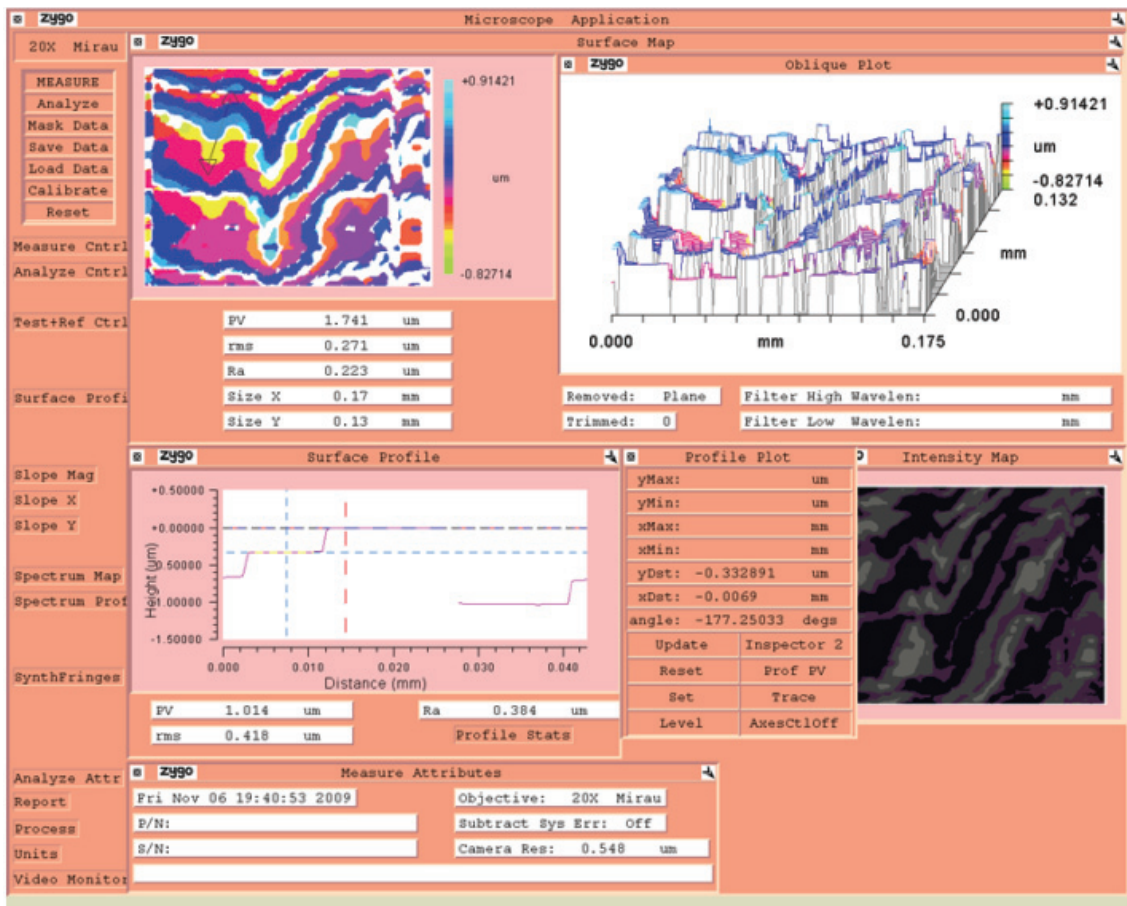
本研究結合自組裝奈米球微影 (self-assembled nanosphere lithography, SANL) 及 ICP-RIE 兩項技術，製作出具規模排列之錐狀陣列結構，可應用於光學系統之抗反射層。我們發展一種簡單的製程，成功地在石英玻璃基板上製作出次波長結構，期望能達到寬頻抗反射的效果，以增加入射光對石英玻璃的穿透率。實驗結果證實利用薄光阻格狀結構搭配震盪塗布法，可以在石英玻璃上製備一單層且整齊排列之聚苯乙烯奈米球，並以此為遮罩進行乾式

蝕刻。在乾式蝕刻方面，我們利用 $\text{C}_4\text{F}_8/\text{He}$ 電漿對石英玻璃進行蝕刻，以聚苯乙烯奈米球為遮罩所得到的結構為一圓柱狀，藉由調整蝕刻製程參數，則可得到尖錐狀結構，製程流程圖如 10 所示。實驗結果如圖 11 所示，顯示最佳的次波長抗反射結構尺寸，其結構高度為 $190\ \text{nm}$ 、直徑為 $108\ \text{nm}$ ，深寬比可達 1.81 : 1 之錐狀陣列，並使得波長 $300\text{--}1000\ \text{nm}$ 的入射光有效降低反射率至 6.75%，達到寬頻抗反射的效果。

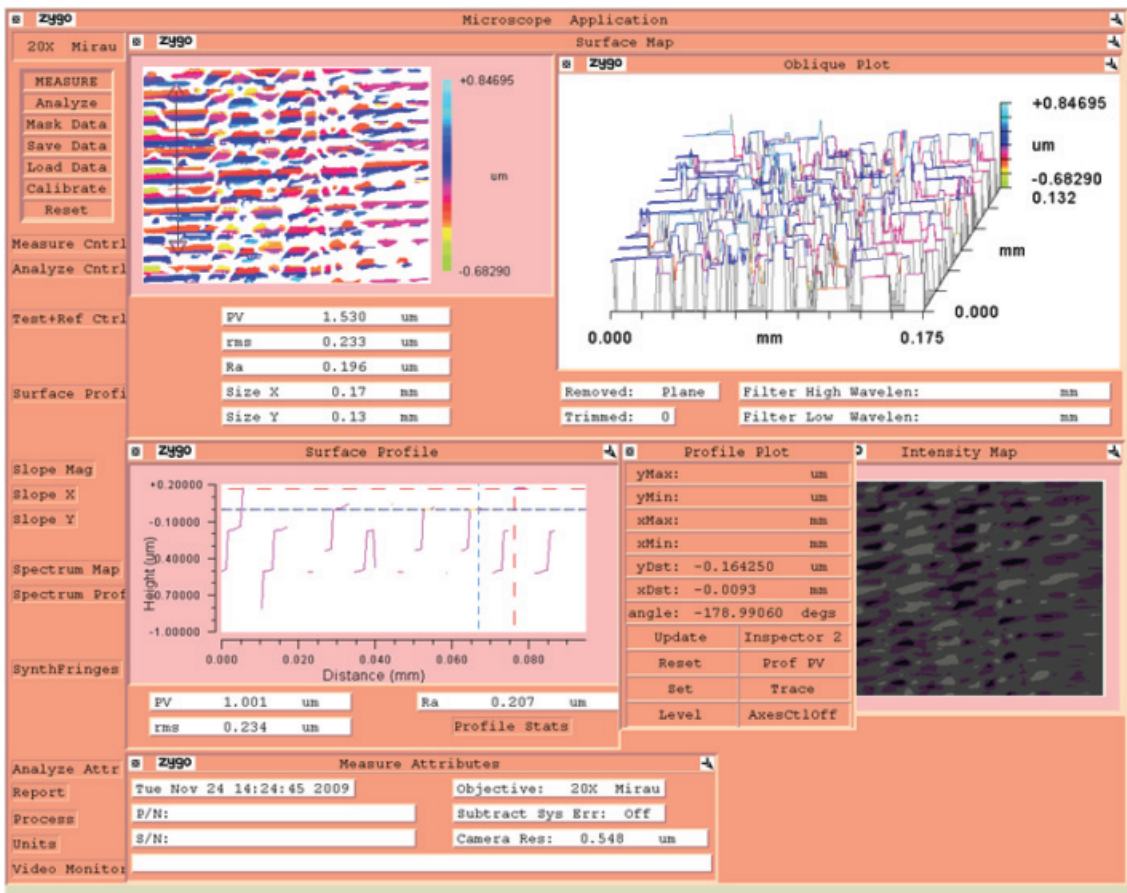
五、結論

本研究主要發展非矽蝕刻製程技術，其中石英玻璃蝕刻製程的開發，是藉由改變蝕刻遮罩選擇、反應氣體流量及蝕刻功率等參數影響，來探討側壁垂直度、表面粗糙度、蝕刻速率及選擇比之關係，以提供石英玻璃蝕刻技術所需。實驗結果分為三部分。第一為比較正光阻 (AZ 4620) 與金屬 (鋁) 當作





(b)



(c)

圖 9. 利用白光干涉儀量測元件表面蝕刻深度：(a) 第一道光罩製程後的結構深度，其值為 $0.66153 \mu\text{m}$ ，(b) 第二道光罩製程後的結構深度，其值為 $0.33289 \mu\text{m}$ ，(c) 第三道光罩製程後的結構深度，其值為 $0.16425 \mu\text{m}$ 。

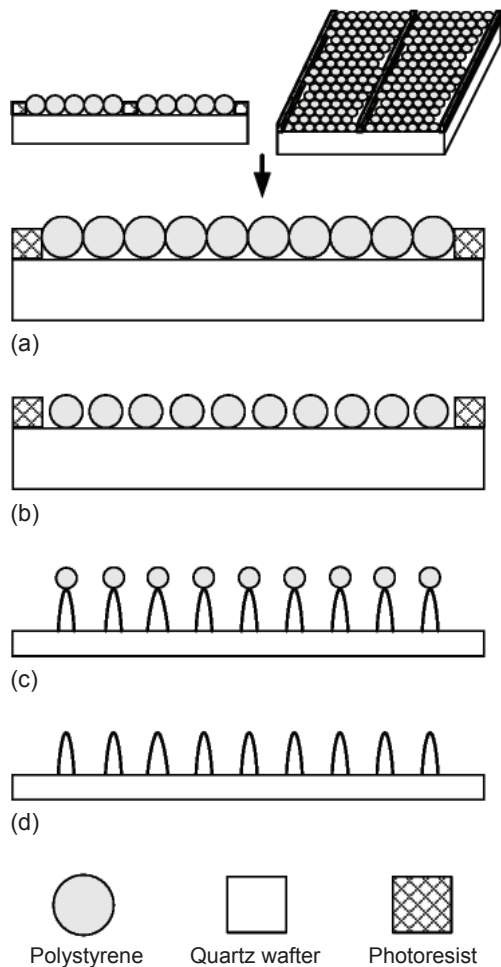


圖 10. 次波長錐狀陣列之製程示意圖：(a) 結合薄光阻製作格狀結構及震盪塗布法排列奈米球，(b) 使用氧電漿進行奈米球縮球，(c) 感應耦合電漿離子蝕刻技術，(d) 去除奈米球。

蝕刻遮罩時之結構形貌，以正光阻為蝕刻遮罩，蝕刻後量測結構之垂直度為 83° 、蝕刻選擇比為 1:1、粗糙度為 8.4 nm 及蝕刻率為 $0.228 \mu\text{m}/\text{min}$ ；若以金屬為蝕刻遮罩，蝕刻後量測結構之垂直度為 84° 、蝕刻選擇比為 40:1、粗糙度為 4.9 nm 及蝕刻率為 $0.237 \mu\text{m}/\text{min}$ 。第二為以負光阻 KMPR 1050 作為蝕刻遮罩時之表面形貌，可得到約 89° 之側壁垂直度，證明使用負光阻定義結構可得到最佳之側壁垂直度。第三為石英玻璃深蝕刻製程探討，以 KMPR 負光阻作為蝕刻遮罩，所以我們可得到一最快蝕刻速率約為 $0.249 \mu\text{m}/\text{min}$ ，蝕刻後深

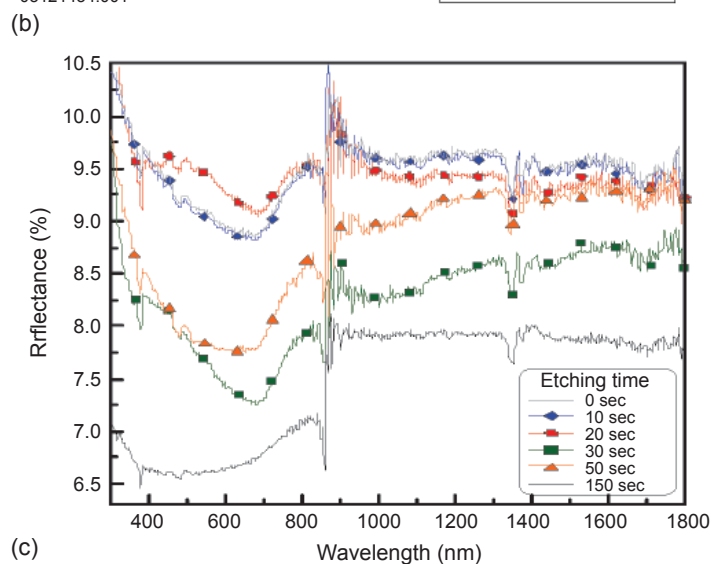
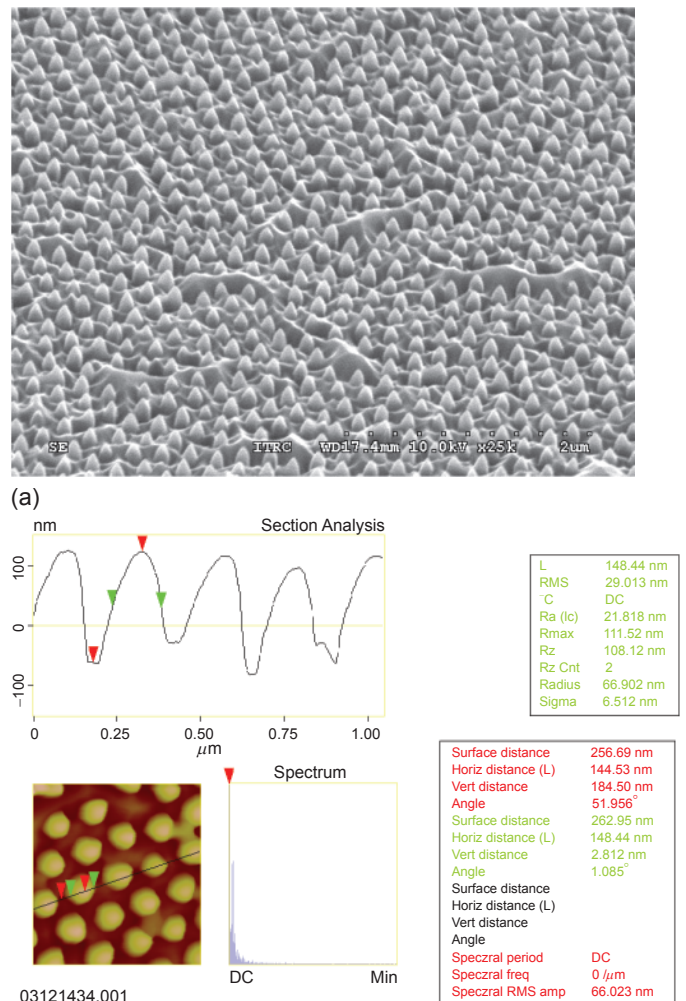


圖 11. 次波長抗反射結構之表面輪廓與光譜量測：(a) 錐狀陣列結構之 SEM 圖，(b) 錐狀陣列結構之 AFM 階高圖，(c) 在不同蝕刻時間之反射率光譜圖。

度可達 44.6 μm 、側壁垂直度可達 89°、蝕刻選擇比可達 1 : 2 及蝕刻底部粗糙度約為 12.9 nm，期望此研究能提供石英玻璃蝕刻製程技術所需之參考依據。

參考文獻

1. C. Peirrat, T. Siegrist, J. D. Marco, L. Harriot, and S. Vaida, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **14**, 63 (1996).
2. K. Lilienthal, M. Stubenrauch, M. Fischer, and A. Schober, *J. Micromech. Microeng.*, **20**, 025017 (2010).
3. Y. Morikawa, T. Koidesawa, T. Hayashi, and K. Suu, *Thin Solid Films*, **515**, 4918 (2007).
4. M. Stjernstrom and J. Roeraade, *J. Micromech. Microeng.*, **8**, 33 (1998).
5. T. Clausnitzer, J. Limpert, K. Zöllner, H. Zellmer, H. J. Fuchs, E. B. Kley, A. Tunnermann, M. Jup, and D. Ristau, *Appl. Opt.*, **42**, 6934 (2003).
6. J. N. Mait, A. Scherer, O. Dial, D. W. Prather, and X. Gao, *Opt. Lett.*, **25**, 381 (2000).
7. H. Chae, S. A. Vitale, and H. H. Sawin, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **21**, 381 (2003).
8. I. Rodriguez, P. Spicar-Mihalic, C. L. Kuyper, G. S. Fiorini, and D. T. Chiu, *Anal. Chim. Acta*, **496**, 205 (2003).
9. L. Li, M. Esashi, and T. Abe, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2652 (2004).
10. X. Li, L. Ling, X. Hua, M. Fukasawa, and G. S. Oehrleinc, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **21**, 284 (2003).
11. E. Metwalli and C. G. Pantano, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **207**, 21 (2003).
12. T. Ujiie, T. Kikuchi, T. Ichiki, and Y. Horiike, *Japan. J. Appl. Phys.*, 393677 (2000).
13. L. Ceriotti, K. Weible, and E. Verpoorte, *Microelectron. Eng.*, **67**, 68865 (2003).
14. K. Mohamed and M. M. Alkaisi, *Microelectron. Eng.*, **87**, 1463 (2010).



湯喻翔先生為國立台灣師範大學機電科技碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Yu-Hsiang Tang received his M.S. in mechatronic engineering from National Taiwan Normal University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃茂榕先生為國立中山大學機械與機電工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Mao-Jung Huang received his Ph.D. in mechanical & electro-mechanical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



林郁欣先生為國立交通大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Yu-Hsin Lin received his Ph.D. mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蕭銘華先生為國立中興大學材料科學與工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼任真空科技與奈米製程組副組長。

Ming-Hua Shiao received his Ph.D. in materials science and engineering from National Chung Hsing University. He is currently a researcher and deputy division manager of Vacuum Technology and Nanofabrication Division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.