

# 利用飛秒雷射微奈米加工技術於玻片上 製作高深寬比之微流道結構

李銘峯<sup>1</sup> 許芳文<sup>1,2</sup> 吳秉翰<sup>3</sup> 蘇信嘉<sup>3</sup> 曹宏熙<sup>3</sup> 胡杰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立嘉義大學光電暨固態電子研究所

<sup>2</sup>國立嘉義大學應用物理學系

60004 嘉義市鹿寮里學府路 300 號

<sup>3</sup>財團法人工業技術研究院南分院雷射應用科技中心

73445 台南縣六甲鄉工研路 8 號

## 摘要

我們利用中心波長為 800 nm、脈衝寬度為 115 fs、重複率為 1 kHz 的摻鈦藍寶石飛秒雷射，於玻片表面上進行微流道加工。我們依照不同的雷射功率、掃描速度、掃描次數等參數，觀察其雷射加工光斑大小、熱影響區、加工深度與加工寬度之關係。根據實驗參數曲線趨勢與流道截面觀察結果，我們在雷射加工功率為 65 mW、掃描速度為 0.8 mm/s，於相同加工線段重複掃描 7 次後，可成功製作出高深寬比（6.5 : 1）、流道管壁筆直且互為平行的結構，其流道表面粗糙度可小於 1  $\mu\text{m}$ 。此飛秒雷射微奈米加工技術可於日後應用於在玻片上製作微奈米等級元件，如分散布拉格反射鏡、光子晶體元件、微流道生物晶片與高精密干涉式生物光學感測器等，使其加工精密度與穩定性提高，並可簡化其製程步驟、縮短其製程時間。

**關鍵詞：**飛秒雷射，雷射加工光斑，熱影響區，微流道，高深寬比

## Fabrication of High-Aspect-Ratio Microfluidic Channels on Glass Using Femtosecond Pulsed Laser Micro and Nano Machining Technology

MING-FENG LI<sup>1</sup>, FANG-WEN SHEU<sup>1,2</sup>, PING-HAN WU<sup>3</sup>, HSIN-CHIA SU<sup>3</sup>, HONG-SHI CAO<sup>3</sup> and CHIEH HU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate Institute of Optoelectronics and Solid State Electronics, National Chiayi University

<sup>2</sup>Department of Applied Physics, National Chiayi University

No. 300, Syuefu Rd., Chiayi, Taiwan 60004, R.O.C.

<sup>3</sup>Industrial Technology Research Institute, Southern Campus, Laser Application Technology Center

No. 8, Gongyan Rd., Liu-jia, Tainan, Taiwan 73445, R.O.C.

## ABSTRACT

A Ti:sapphire femtosecond laser with a center wavelength of 800 nm, a pulse duration of 115 fs, and a repetition rate of 1 KHz was used to fabricate microfluidic channels on the surface of a glass

plate. The scribing laser spot size, heated zone size, scribing depth, and scribing width were investigated as a function of the pulse energy, scanning speed, and repeated number. According to the curve trend of the tested parameters and the result of cross-sectional channel inspection, we successfully achieved the fabrication of high-aspect-ratio (6.5:1) channels with straight and parallel walls of which the surface roughness was smaller than  $1 \mu\text{m}$  by using a laser power of 65 mW, a scanning speed of 0.8 mm/s, and a repeated number 7 times. In the future, micro and nano machining technology by femtosecond lasers can be applied to the manufacturing of micro and nano structured components on glass, such as distributed Bragg reflectors, photonic crystal devices, microfluidic channel biochips, and high precision interferometric biophotonic sensors. Such application can promote the processing precision and stability, simplify the fabrication steps, and shorten the manufacturing time.

**Key Words:** femtosecond laser, scribing laser spot, heated zone, microfluidic channels, high-aspect ratio

## 一、前言

近年來，以飛秒脈衝雷射在材料上進行微奈米加工引起相當大的矚目 [2]。由於脈衝寬度由以往的奈秒迅速縮短至飛秒，而擁有獨特的材料加工特性，多光子吸收效應可使加工區域小於聚焦尺寸，而突破繞射極限，實現不同材料的微精密加工 [1]。在加工剝除特性上，限制了材料加工區域周圍熱擴散效應，而使得加工表面品質得以提升 [5]，在加工過程中屬於非接觸式製程，因此可把製程的不確定因素降至最低，同時也可在一般環境下進行，其加工機制是利用飛秒雷射於極短時間內讓材料吸收光子能量，而破壞材料分子間的鍵結，於加工同時由於電子與材料分子的噴濺有助於生成電漿中的離子驅離，而使被加工區域剝除達到加工目的，其易與其他系統或是程式控制作整合之優點在相關市場上頗受好評，因此利用飛秒脈衝雷射對材料加工在工業應用層面也越來越常見。

另一方面，雷射加工參數間不同的組合與配合拖拉式光罩、beam shaper 或是雷射光本身的偏振方向等 [4, 6]，可適當的調整雷射能量分佈與加工剝除特性，使得不同形狀或立體結構可在材料表面上產生，但為了能製作出高深寬比結構 (2:1)，必須將雷射焦點持續於加工表面循序下移且事後需蝕刻處理，因而耗費很多製作時間 [3]。

因此於本實驗中，我們將利用飛秒雷射直接聚焦至玻片 (Assistant-Objekttträger Elka No. 2400) 表面上進行微流道加工。我們依照不同的雷射功率、掃描速度、掃描次數等參數，觀察其雷射加工光斑大小、熱影響區、加工深度與加工寬度之關係，以製作出高深寬比、流道管壁筆直且互為平行的微流道結構。

## 二、實驗系統

本實驗所使用之加工雷射源其中心波長為 800 nm，脈衝寬度 115 fs，重複率 1 KHz，平均輸出功率 3.5 W 的高強度飛秒級超短脈衝雷射，經過一連串的光學系統架設，將雷射聚焦至精密平移台，如圖 1 所示為此實驗所用飛秒雷射加工系統。

高強度飛秒雷射導出後，經  $\lambda/2$  波片與極化分光鏡 (polarizing beam splitter, PBS) 可初步調整雷射輸出功率，於極化分光鏡的反射方向以止光器 (beam dump) 阻擋分光後的雷射，可調濾光片 (neutral density filter) 可進一步衰減雷射光強度，使雷射平均功率調整幅度可達 0.01 mW 至 520 mW，經過分光鏡 (beam splitter, BS) 後，使雷射以 50:50 的比例分光，並於反射方向放置光偵測器，以此方式分光能有效顯示目前的加工功率，電子快門 (shutter) 的切換則可控制在適當位置或時間對玻片加工，經過兩反射鏡後利用一雙色鏡 (dichroic mirror) 使 800 nm 的雷射光得以全反射，透過物鏡聚焦至精密平移台上的玻片，以進行加工，雙

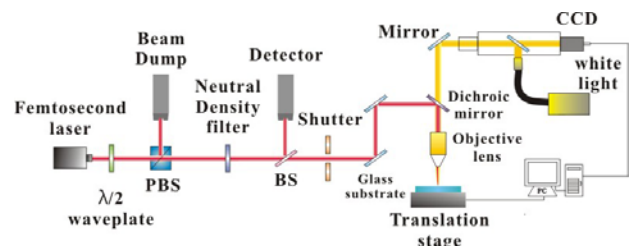


圖 1. 飛秒雷射加工系統

色鏡上方則以反射鏡、透鏡組、白光光源與 CCD (charge coupled device) 等構成成像系統，可於加工時同步觀察玻片表面的情形。

### 三、結果與討論

為了製作高深寬比、流道管壁筆直且互為平行的微流道結構，因此在製作前必須有效規劃雷射加工參數，以調整至結構所需之寬度、深度、截面形狀等。首先，以各種雷射加工功率配合三種平移台掃描速度，經 10X 物鏡聚焦於玻片表面掃描一次，並觀察其結果。

隨著雷射加工功率增加，在不同掃描速度下，其微流道寬度並無明顯差異且有震盪現象，此現象可能與玻璃平坦度有關，造成雷射聚焦之焦點無法在同一平面加工所導致，但仍可觀察出流道寬度有循序變大的趨勢，如圖 2 所示為不同雷射加工功率與三種掃描速度下的流道寬度變化曲線，可看出其三條曲線幾乎緊貼一起，由此可知，在掃描一次的情況下，隨加工功率增加，掃描速度對流道寬度影響幅度不大。

在深度方面，如圖 3 所示為在雷射加工功率 30 mW 與 40 mW 之下，三種掃描速度所產生的流道截面結構與流道深度之 SEM (scanning electron microscope) 掃描式電子顯微鏡觀察結果。

在加工功率小於 35 mW 時，0.1 mm/s 掃描速度較慢，使單位加工長度所吸收的能量足夠，以達到剝除目的，但因掃描速度較慢的結果，在加工過程剝除的玻璃粒子因而累積在流道內，使其有機會吸收雷射的能量或是產生散射，造成額外的損耗，而 0.25 mm/s 掃描速度下，雖然單位加工長度所吸收能量較 0.1 mm/s 下少，但加工同時除了雷射功率本

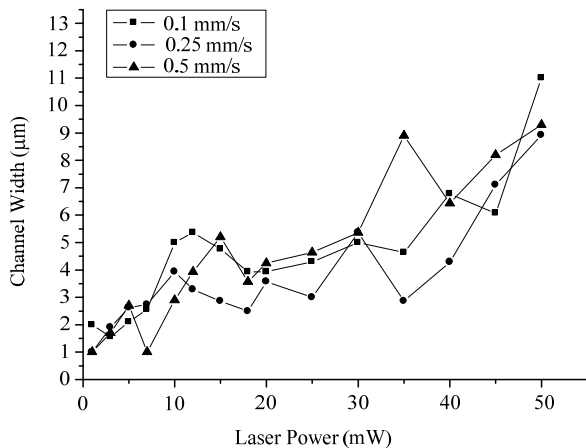
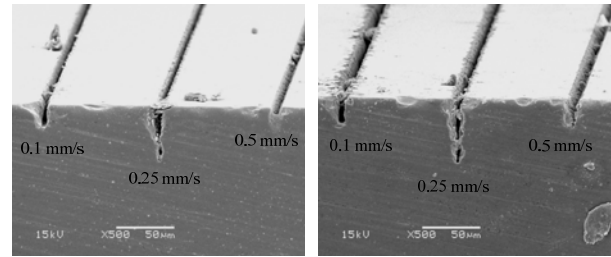


圖 2. 雷射加工掃描一次時流道寬度變化曲線



(a) 30 mW

(b) 40 mW

圖 3. 雷射加工掃描一次時流道深度變化 SEM 圖

身施予能量外，伴隨掃描速度增加有助流道底部玻璃粒子排出，以減少加工時的損耗，造成 0.25 mm/s 速度下所產生之流道深度較 0.1 mm/s 深，而 0.5 mm/s 則因掃描速度已過快，雖然因速度增加使剝除能力提昇，但由於單位加工長度吸收能量不足，而無法製作較深流道。

在加工功率大於 35 mW 時，掃描速度 0.1 mm/s 與 0.5 mm/s 所製作之流道深度大略相同，主要推測可能與熱效應有關，在較高加工功率時，以 0.1 mm/s 掃描速度加工，由於速度較慢，讓玻片表面有足夠時間吸收雷射能量而剝除，但卻無法利用掃描速度使流道底部玻璃粒子排除，因此其深度仍比以 0.25 mm/s 掃描來的淺，當掃描速度增加至 0.5 mm/s 時，雖然單位加工長度吸收能量比 0.1 mm/s 少，但此時除雷射功率本身能量外，會有熱效應產生而助於流道深度增加，另一方面，掃描速度較 0.1 mm/s 快的結果，使剝除後的玻璃粒子能迅速由流道底部排出，造成在高功率能量時，以 0.1 mm/s 及 0.5 mm/s 所製作之流道深度差距不大。

由此可知，欲製作高深寬比、管壁平行之微流道，在加工掃描次數少時是無法達到的，由於以 0.1 mm/s 掃描時，對流道剝除能力有限，後續將以 0.25 mm/s 及 0.5 mm/s 為主，掃描次數分別增加為 3、5、10 次進行測試，觀察流道寬度、深度及截面結構，如圖 4 與圖 5 所示為掃描速度 0.25 mm/s 及 0.5 mm/s 下，不同加工功率與掃描次數微流道寬度變化曲線。

在兩種不同掃描速度下，隨著雷射功率增加，在不同掃描次數時，流道寬度亦有變大趨勢，當功率超過 40 mW 後，同樣掃描次數下，在寬度上會趨近於飽和，尤其以 0.25 mm/s 較為明顯，而 0.5 mm/s 之流道寬度則略為降低，其原因初步推測可能在加工掃描該線段時，玻片平坦度不佳造成離焦加工，或是玻片材料純度不均有關，使得雷射對玻片加工造成剝除程度不一致所造成。

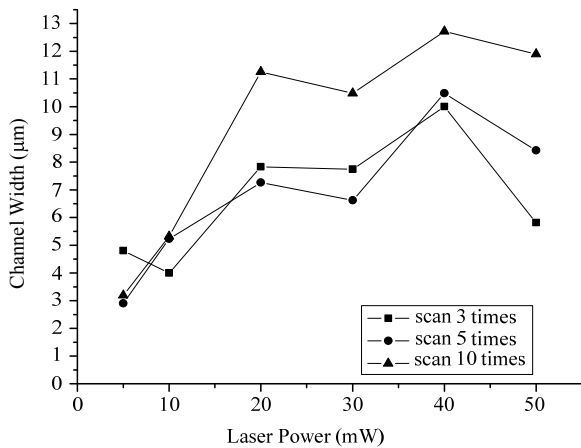


圖 4. 掃描速度 0.5 mm/s 時之流道寬度變化曲線

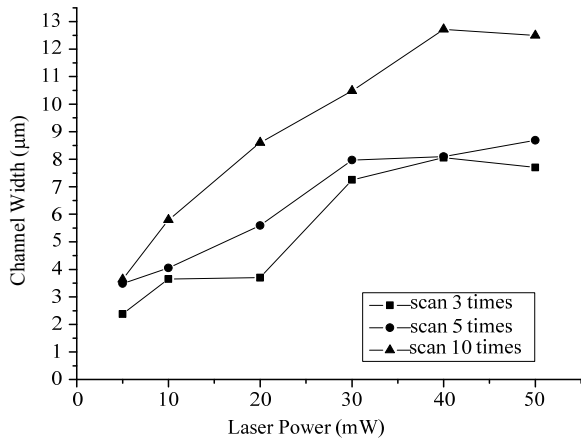


圖 5. 掃描速度 0.25 mm/s 時之流道寬度變化曲線

在微流道深度方面，如圖 6 所示為掃描速度在 0.25 mm/s 及 0.5 mm/s 下，不同加工功率與掃描次數下之微流道深度變化曲線。隨加工功率增加，流道深度也隨之增加，由曲線趨勢亦可預測當加工功率持續上升時，其加工深度將到達一極限值，尤其以掃描次數 3 次掃描速度 0.5 mm/s 及掃描次數 5 次掃描速度 0.5 mm/s 較為明顯，而在同一加工功率下，也可觀察到隨掃描次數增加，流道深度之增加幅度也會到達極限，主要原因為雷射聚焦於玻片表面利用光子能量來破壞玻璃分子間的鍵結時，因剝除能力在玻片表面為最強，隨著與焦點距離越拉越遠，雷射光子穿透玻片進入玻片表面後，一部份能量將被玻璃吸收，也可能因剝除後之玻璃粒子而散射，因此到達一定深度時，雷射光子能量將不足以使玻璃分子鍵結破壞，使得流道深度會到達一極限值。另一值得注意的是，在同一加工功率下，以掃描速度 0.25 mm/s

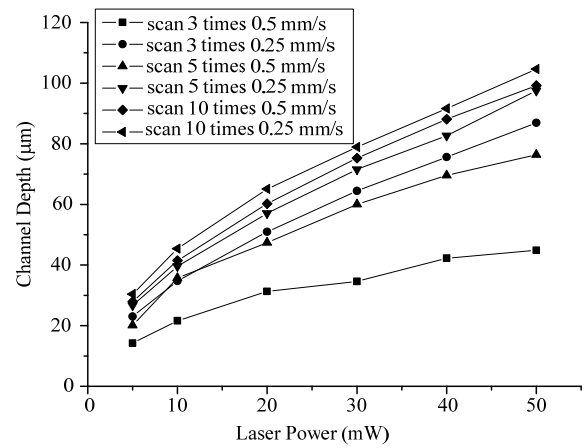


圖 6. 兩種掃描速度在不同掃描次數之流道深度變化曲線

掃描 3 次所得之流道深度比掃描速度 0.5 mm/s 掃描 5 次來的深，從單位加工長度 1 mm 所吸收能量觀點來看，在同樣功率下，前者在該線段內以 0.25 mm/s 掃描將耗時 4 秒，於掃描 3 次後，總加工能量為 12 秒累積總和，對於 0.5 mm/s 掃描 5 次而言，則總加工能量為 10 秒累積總和，且由上個以單次掃描探討流道深度實驗得知，在 0.25 mm/s 時有較佳剝除能力，綜觀上述，可預期在總加工能量較多且掃描速度助於剝除情形下，流道深度也相對來的深。

接著以 SEM 檢測，觀察上述不同參數下所製作微流道截面結構是否符合預期規格，以 0.25 mm/s 掃描雖然有較好剝除效果，但卻無法達到流道管壁平行之結構，隨著掃描次數增加，當掃描次數到 10 次，管壁結構則可分為兩部份，在上半部較為平行，但下半部卻會呈現 V 字形，使得截面結構無法全部都達到預期要求，但管壁則相較掃描次數少時來的平坦，如圖 7 所示為雷射加工功率 30 mW，掃描速度

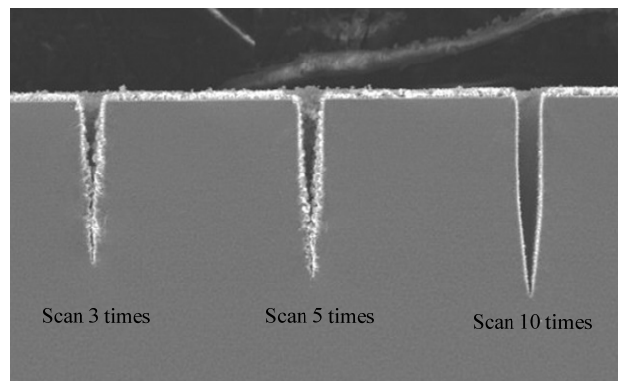


圖 7. 在 30 mW 以 0.25 mm/s 掃描 3、5、10 次之 SEM 圖

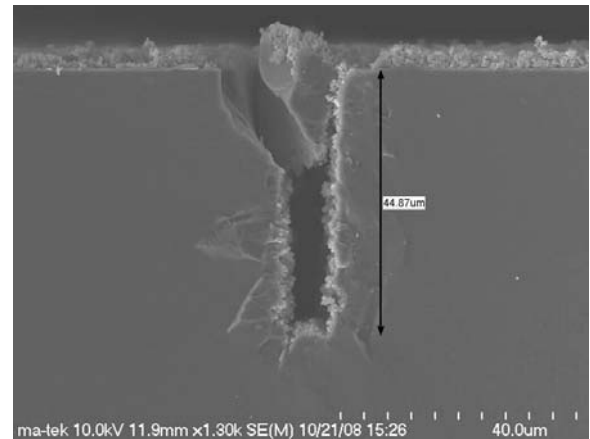
0.25 mm/s 在掃描次數 3、5、10 次所製作之流道截面結構。

相較於以 0.25 mm/s 掃描所產生的 V 形流道，當掃描速度增加至 0.5 mm/s，流道管壁則較為平行，由於雷射加工時經物鏡聚焦在自由空間中之能量分布為高斯分布，因此焦點上中心則會最強，邊緣則以指數函數衰減，當加工掃描速度快至一定程度，在加工單位長度位於焦點兩側因玻片吸收之能量分布恰好一致，且雷射光子因無法即時破壞玻片較底部玻璃分子鍵結，或是單位長度內所吸收能量不足，造成流道底部趨近平坦，因此可製作出較為平行的流道管壁，但仍可觀察接近玻片表面之流道結構有外擴現象，如圖 8 所示為 50 mW、40 mW、30 mW 加工功率下，以掃描速度 0.5 mm/s 掃描 3 次，所製作出的微流道截面結構。

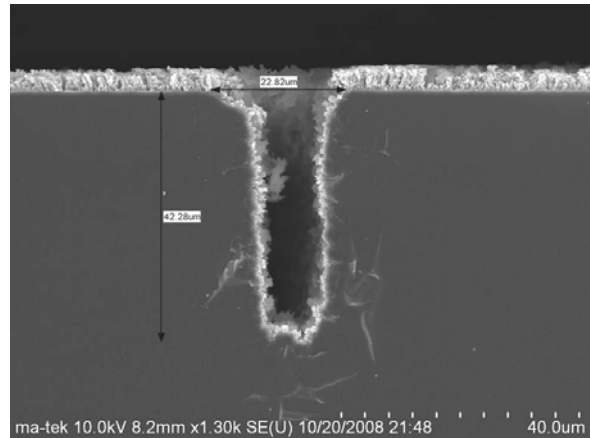
雖然在 50 mW、40 mW、30 mW 加工功率下，以掃描速度 0.5 mm/s 掃描 3 次，所製作出的微流道管壁截面較為平行，且在流道寬度與深度上亦可達到高深寬比結構，然而由於掃描次數較少關係，在玻片純度不夠的情況下，可能造成加工過後流道內仍殘留些微無法在該掃描次數內被剝除的部份，使得流道內表面粗糙度變高，後續可能影響此元件在做其他應用時的輸出品質。為了改善流道內表面粗糙度，因此必須把加工功率提高且掃描次數增加，但在此情況下，加工單位長度內所吸收的能量將遽增，所以在掃描速度上必須增加，以減少加工單位長度內所吸收的能量。以下我們將探討在較高加工功率下，以掃描速度 0.8 mm/s 掃描 5 至 7 次，微流道寬度、深度與截面結構之情形，並觀察其流道內表面粗糙度是否改善。

如圖 9 所示為在較高加工功率下，以掃描速度 0.8 mm/s，掃描 5 至 7 次之流道寬度曲線變化情形。在掃描速度 0.8 mm/s 同樣的掃描次數下，隨著加工功率增加，可觀察到流道寬度亦有增加的趨勢，而對同一加工功率而言，掃描次數增加對流道寬度的影響，並無增加加工功率來的大。由此推測若需要到達預期的流道寬度尺寸，可以較高加工功率配合較快掃描速度達到。

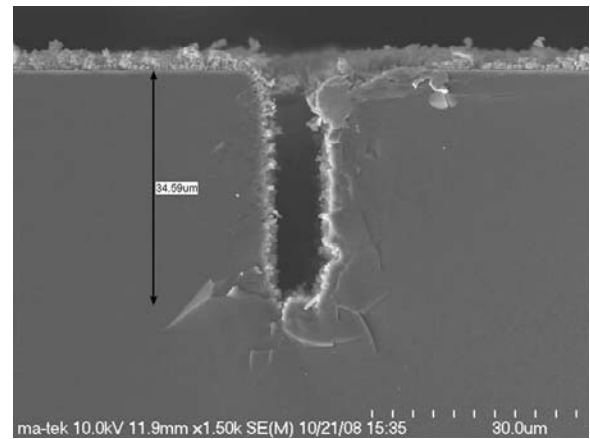
在微流道深度方面，如圖 10 所示為在較高加工功率下，以掃描速度在 0.8 mm/s，掃描 5 至 7 次之流道深度曲線變化情形。在掃描速度 0.8 mm/s 同樣的掃描次數下，隨著加工功率增加，可觀察到流道深度增加趨勢漸漸減緩，而對同一加工功率而言，隨著掃描次數增加，流道深度也將增加，另外在加工功率 48 mW、52 mW 及 55 mW 間流道寬度有下降趨勢，其原因推測為調整加工功率時因參數間隔太



(a) 50 mW



(b) 40 mW



(c) 30 mW

圖 8. 不同加工功率下以 0.5 mm/s 掃描 3 次之 SEM 圖

小，以至於熱感式光功率計無法即時反應，造成加工功率比原先來的低，因而導致流道深度下降。由此可知，將雷射經物鏡聚焦於玻片表面，在夠大的加工功率下以重複掃描的方式加工，可製作出高深寬比的微流道結構，而不需將焦點往下位移持續加工及事後蝕刻處理，可節省製程時間 [3]。

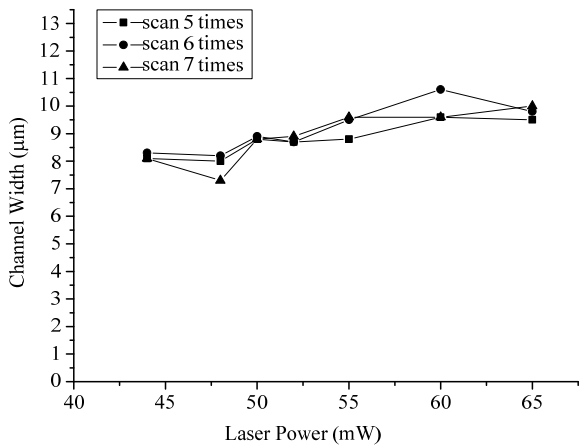


圖 9. 掃描速度 0.8 mm/s 時之流道寬度變化曲線

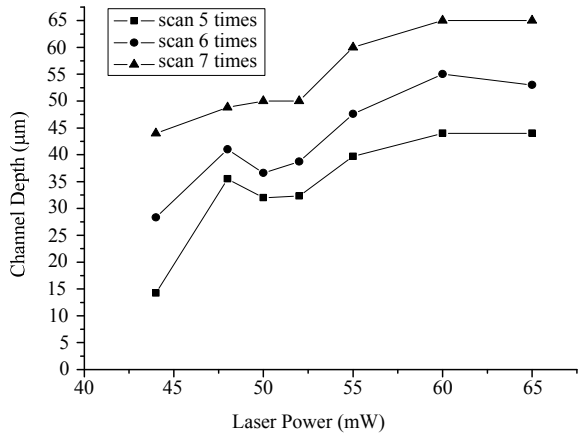
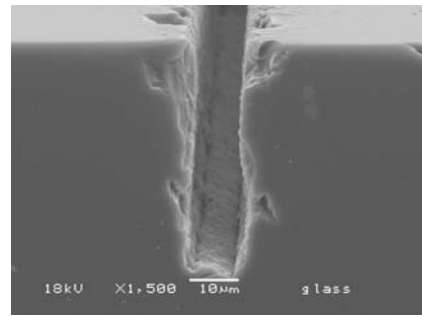


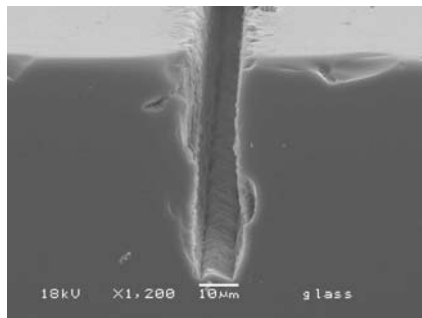
圖 10. 掃描速度 0.8 mm/s 時之流道深度變化曲線

接著以 SEM 檢測，觀察上述不同參數下所製作微流道截面結構是否符合預期規格，如圖 11 所示為在加工功率 65 mW 以掃描速度 0.8 mm/s 掃描 5 至 7 次所製作之流道截面結構。

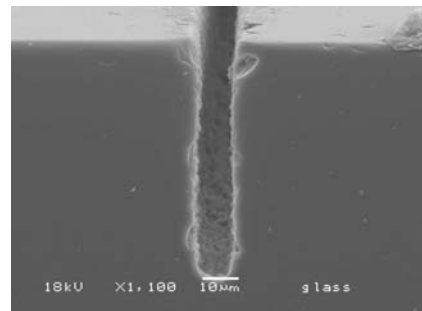
我們發現在加工功率 65 mW 以掃描速度 0.8 mm/s 掃描 7 次可製作出流道深度 65 μm、寬度 10 μm (深寬比 6.5 : 1) 且流道管壁互為平行、流道內之表面粗糙度較低之結構。如圖 12 所示為在加工功率 65 mW 以掃描速度 0.8 mm/s 掃描 7 次之流道管壁 SEM 檢測結果，其表面粗糙度小於 1 μm。從圖 9 及圖 10 可以看出，若以 55 mW 或 60 mW 的確也可製作出高深寬比的微流道結構，但經 SEM 檢測其橫截面後，發現其流道管壁結構較不平行，並不符合實驗目的。由以上實驗結果可以得知，欲製作流道深度 65 μm、流道寬度 10 μm 之高深寬比且流道管壁互為平行之微流道結構，以在



(a) 5 次



(b) 6 次



(c) 7 次

圖 11. 在 65 mW 以 0.8 mm/s 掃描之 SEM 圖

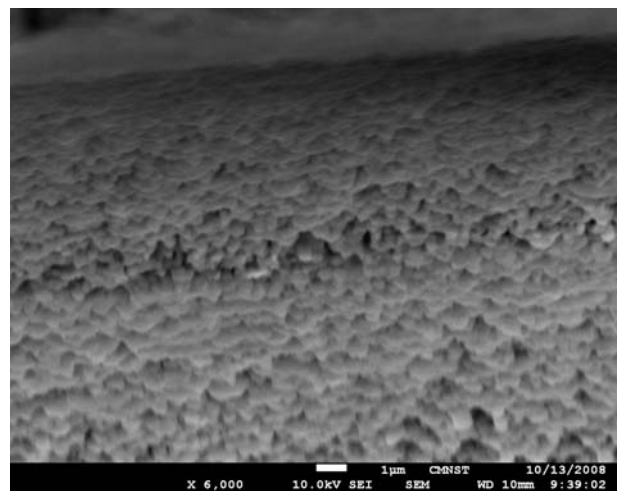


圖 12. 高深寬比流道管壁表面粗糙度 SEM 檢測結果

加工功率 65 mW，以掃描速度 0.8 mm/s 掃描 7 次為最佳。若使用更高的雷射加工功率，並配合適當的加工參數，應可製作出更大深度或更大深寬比的微流道。但在上述加工條件之下，我們已經可以製作出深度約略大於一般常用光纖半徑大小 (62.5  $\mu\text{m}$ ) 的高深寬比微流道，讓我們可以於日後將此微流道元件與光纖元件互相結合，達到了我們利用飛秒雷射做此高深寬比微流道加工的原始目的。所以本研究並未繼續深入探討在更高的雷射加工功率之下，微流道加工結果的各種特性趨勢會如何變化。

#### 四、結論

從以上實驗研究結果，我們得到以下初步結論：

1. 隨著雷射加工功率增加，所製作出微流道尺寸結構必須把熱效應列入考慮。
2. 一定的加工掃描速度有助於微流道內部玻璃粒子的排除，驅使微流道變深。
3. 透過雷射多次掃描加工，可進一步增加微流道深度。
4. 欲製作高深寬比且流道管壁互為平行之微流道結構，可將雷射聚焦於玻片表面，在一定速度下多次掃描。
5. 此加工技術所製作出的微流道結構，未來將可應用在分散布拉格反射鏡、光子晶體元件、微流道生物晶片與高精度干涉式生物光學感測器等。

#### 誌謝

感謝財團法人工業技術研究院南分院雷射應用科技中心所有同仁在實驗設備上的支援、協助及專業知識上的分

享。本研究由工研院 FY97 產學研共同研發前瞻計畫 (契約編號 B200-97G270001816) 提供經費補助。許芳文的電子郵件信箱：fwsheu@mail.ncyu.edu.tw。

#### 參考文獻

1. 蔡昆霖 (民 94)，應用飛秒雷射對高分子及不銹鋼金屬材料做細微加工之研究，國立台灣科技大學機械工程系碩士班碩士論文。
2. Bäuerle, D. (2000) *Laser Processing and Chemistry*, 3rd Ed., Springer-Verlag, Berlin, Deutschland.
3. Bellouard, Y., A. Said, M. Dugan and P. Bado (2004) Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching. *Optics Express*, 12(10), 2120-2129.
4. Borowiec, A. and H. K. Haugen (2004) Femtosecond laser micromachining of grooves in indium phosphide. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 79(3), 521-529.
5. Chichkov, B. N., C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben and A. Tünnermann (1996) Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 63(2), 109-115.
6. Crawford, T. H. R., A. Borowiec and H. K. Haugen (2005) Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800 nm pulses. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 80(8), 1717-1724.

收件：98.04.01 修正：98.05.18 接受：98.06.19