

以飛秒雷射精微加工系統製作光纖感測器

Fabrication of Optical Fiber Sensor by the Femtosecond Laser Precision Manufacturing System

陳建興、吳瑋特、湯兆崙、周禮君

Chien-Hsing Chen, Wei-Te Wu, Jaw-Luen Tang, Lai-Kwan Chau

飛秒雷射精微加工製作光纖感測器相較於傳統雷射製程，具有精密、製作快速與極低的热影響區等優點，本文簡單地介紹各式光纖感測器及本研究團隊以飛秒雷射開發製作之視窗型 D 形結構光纖感測器，並說明其檢測原理。

Femtosecond laser manufacturing of fiber optic sensor has advantages as compared to conventional laser process such as high precision, fast fabrication, and without creating laser-induced heat affected zone. This report will introduce the principles of several optical fiber sensors and the technology developed by our laboratory to fabricate D-shaped window on optical fiber sensor by femtosecond laser manufacturing.

一、前言

近年來隨著生物感測科技所發展出之生化感測系統的需求量與日俱增，促使農業檢測、食品分析、環境監測及生物醫學臨床檢測科技產業迅速的發展，目前全球每年約有數兆美元的市場價值。對生化感測系統而言，其設計開發以輕巧簡便、檢測靈敏度高、試樣體積小、使用壽命長，以及反應時間快等特點為目標。因此以精微製程技術研發微型生化感測器，為近年來感測科技發展之重點。由於光纖具有體積小、撓性佳、低光損耗、高靈敏度及抗電磁干擾等優點，換言之，就是具有導光、感測能力、微型化與即時監測等特性，極適合發展成微型生化感測器。

1993 年 Hill 等人提出以 KrF 準分子雷射 (KrF excimer laser) 微影法 (photolithographic method) 製作光纖感測器 (optical fiber sensors)⁽¹⁾。光纖感測器是利用光纖，將光源所產生的光波導引至待測區。若待測區中的物理量或化學量，如應力、應變、溫度、折射率或分子濃度等產生變化，將造成光波特性的變化。藉由分析光波特性的改變，即可推得待測區中物理量或化學量之變化。但此種準分子雷射微影法，需使用相位光罩 (phase mask)，且僅能製作於光敏材料，不僅費時且受限於材料特性，因此在精微製程技術上必須有所突破，譬如採用高重複率高功率的超短脈衝飛秒雷射系統。飛秒雷射 (femtosecond laser) 具有超短脈衝時間之加工機制，當單發脈衝照射在材料表面時，瞬間脈衝能

量可在短時間內產生極高峰值的功率，並在數十至數百飛秒的時間內，即可完成一次雷射脈衝加工。且飛秒雷射對材料加工為非線性多光子吸收 (nonlinear multi-photon absorption)，因此可加工於透明材料表面或內部。又所造成的熱影響區 (heat affected zone) 較小，使其成為精微加工製造中極具應用性的工具。主要應用範圍有：微孔加工、表面改質處理、生醫晶片及光纖感測器製作等，對於發展微型化生物感測系統而言，以飛秒雷射精微加工光纖感測器，極具學術性與發展性。

本文將針對飛秒雷射精微加工系統、常見之光纖感測器以及本實驗團隊所開發的視窗型光纖感測器，介紹其技術與原理，以提供讀者對於飛秒雷射加工製作光纖感測器的認識。

二、飛秒雷射加工系統

1. 飛秒雷射加工原理

雷射 (LASER)，其全名為 light amplification by simulated emission of radiation，意思為受激輻射之光放大。如圖 1 所示，構成雷射三大要素為：泵浦光源 (pumping source)、增益介質 (gain media) 與共振腔。雷射的基本原理為提供能量，使原子或分子在能階間躍遷而產生輻射，並以光學腔之回饋，激發雷射增益介質，產生更多之光子。當增強至某程度後，即為雷射光。雷射加工原理為利用高能量雷射光束，對材料表面加熱，使材料因高溫而產生熔化或汽化之相變化過程，以便對於材料進行剝除。

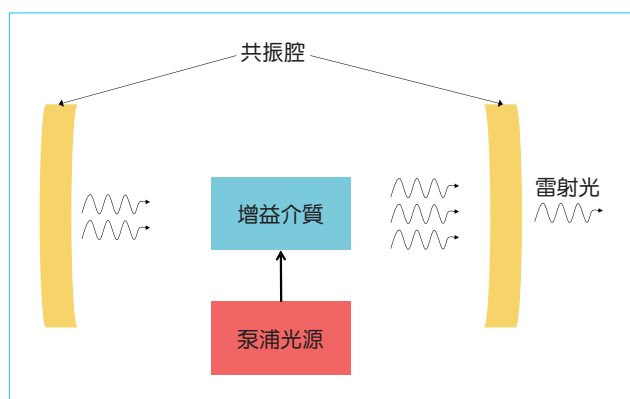


圖 1. 雷射原理。

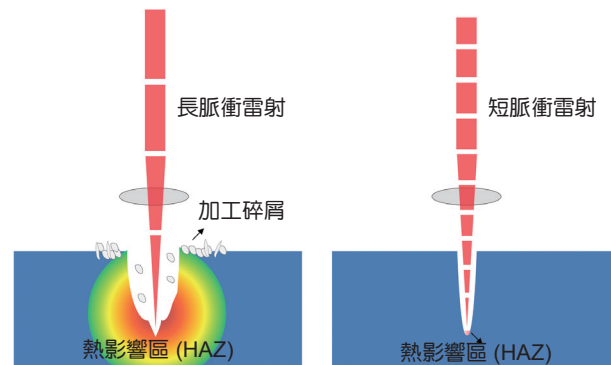


圖 2. 長脈衝與短脈衝雷射加工機制比較圖。

因此加工區域會有熱效應產生，影響加工品質。近年來不同型式的雷射源陸續被開發，由早期的染料 (dye) 雷射慢慢地演變為氣體 (gas) 雷射、固態 (solid state) 雷射以及光纖 (fiber) 雷射。脈衝時寬也朝向超短邁進 (連續 → 微秒 → 奈秒 → 皮秒 → 飛秒 → 埃秒)。進行單發脈衝雷射加工，隨著脈衝時寬縮短，其加工區域之熱效應也會隨之變小。

飛秒雷射的脈衝寬度為飛秒 (femtosecond, fs = 10^{-15} s) 等級，相較於材料內部的電子及聲子之轉換時間，約為數十至數百皮秒 (picosecond, ps = 10^{-12} s) 的數量級，其脈衝時寬極短。因此如圖 2 所示，有別於傳統長脈衝雷射，其加工區域具有極低的熱效應。當飛秒雷射光束聚焦後，可產生極高的功率密度，其加工機制為非線性多光子吸收⁽²⁻³⁾，因此可用於透明材料表面或內部的加工。例如，本文使用波長為 800 nm 的飛秒雷射在單模的玻璃光纖上加工，所使用之光纖為透明的二氧化矽材料，對於 800 nm 之光波長而言，其穿透率極高、吸收率極低，卻仍可對光纖進行有效的剝除加工。

2. 飛秒雷射加工系統

圖 3 為飛秒雷射精微加工系統。其雷射源為一組再生放大鎖模 (regenerative amplified mode-locked) 系統的鈦藍寶石雷射 (Ti:sapphire laser)，脈衝寬度 (pulse duration) 約為 120 fs，雷射中心波長 (central wavelength) 為 800 nm，脈衝重複率 (repetition rate) 為 1 kHz，最大輸出功率約為 3.5 mJ。雷射的輸出功率可利用 $\lambda/2$ 波長片 (wave plate) 和極化分光鏡 (polarization beam splitter)，進

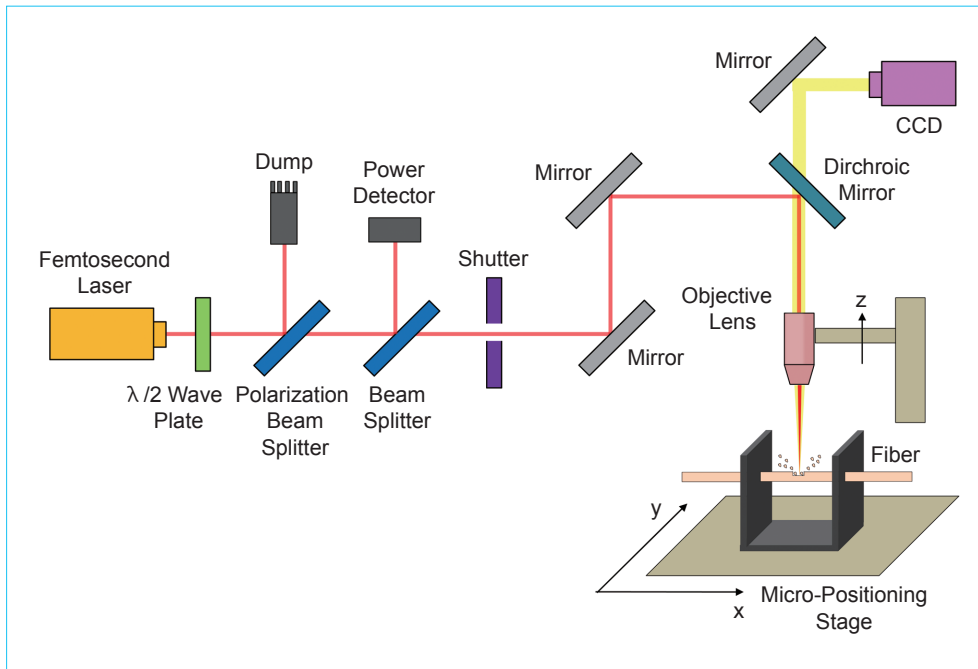


圖 3.
飛秒雷射加工系統示意圖。

行調整。雷射的加工時間則由機械式開關 (shutter) 控制。對於高斯光束 (Gaussian beam) 而言，由於繞射極限，此飛秒雷射加工系統經物鏡 (objective lens) (Mitutoyo-10X, NA = 0.28) 聚焦後，最小光斑半徑 ω_0 為：

$$\omega_0 = \frac{2\lambda f}{\pi D} M^2 \quad (1)$$

其中， $\lambda = 800 \text{ nm}$ 為雷射波長， $f = 20 \text{ mm}$ 為物鏡焦距， $D = 5 \text{ mm}$ 為入射光斑直徑， $M^2 \sim 1.3$ 為雷射光束品質因子。依此可推算 $\omega_0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。如前所述，由於飛秒雷射加工機制為非線性多光子吸收，當雷射光束為高斯能量分布，透過控制雷射能量，可使超過雷射加工門檻之材料被剝除，因此加工寬度可小於雷射聚焦直徑。當進行光纖的加工時，首先將光纖放置於 xyz 三維精密加工平台上，利用 CCD (charge-coupled device) 進行影像輔助，將雷射調整至加工物件表面，以確保雷射之加工光斑品質。而此 xyz 三維精密加工平台可利用軟體進行程式編輯，以控制雷射加工時所需之加工路徑及加工速度，藉此進行精微的光纖加工。

三、光纖感測器

常見的光纖感測器有光纖光柵感測器⁽⁴⁻⁵⁾、光纖干涉儀感測器⁽⁶⁻⁷⁾以及 D 形視窗光纖感測器⁽⁸⁻¹⁰⁾。下列將介紹常見的光纖感測器技術原理，以及本團隊以飛秒雷射開發製作的 D 形視窗光纖感測器。

1. 光纖光柵感測器

顧名思義，光纖光柵就是在光纖上製作形變或折射率變化的週期性結構。由於此種感測器對溫度及壓力具有高感測靈敏度，常用於橋樑及鋪面工程等土木領域。光纖光柵感測器依週期 (Λ) 大小可分為：

- (1) 長週期光纖光柵 (long period fiber grating, LPFG)：光柵週期約十至數百微米。
- (2) 布拉格光纖光柵 (fiber Bragg grating, FBG)：光柵週期小於十微米。

光纖光柵可視為一個簡單的光學繞射現象，如圖 4 所示，其繞射後會有一共振波長 λ 為

$$\lambda = 2n_{\text{core}}^{\text{eff}}\Lambda \quad (\text{適用於 FBG}) \quad (2)$$

$$\lambda = (n_{\text{core}}^{\text{eff}} - n_{\text{cladding}}^{\text{eff}})\Lambda \quad (\text{適用於 LPFG}) \quad (3)$$

其中 $n_{\text{core}}^{\text{eff}}$ 為纖心 (core) 之有效折射率， $n_{\text{cladding}}^{\text{eff}}$ 為纖殼 (cladding) 之有效折射率。

光纖光柵感測器之檢測原理為：當光波由纖心中傳遞，經過光纖光柵後，有部分的光被耦合至纖殼中，且受外在物理量或化學量的影響。由於纖殼模態 (cladding mode) 的色散損失，導致耦合至纖殼中的光快速地衰減，而產生共振波峰。共振波峰的位置及振幅大小，將隨外界環境 (surrounding medium) 的改變而產生飄移。藉由分析共振波峰飄移量變化，即可進行溫度、應力及折射率等檢測。

光纖光柵製造方法常見的有： CO_2 雷射書寫法、電弧放電加工法、UV 雷射微影法以及飛秒雷射直寫式加工。如前所述，以 UV 雷射微影法製作光纖光柵，不僅成本高、受限於材料本質，且以相位光罩製作之週期，無法調變。而 CO_2 雷射書寫法及電弧放電加工法，雖可快速地製作光纖光柵，但由於 CO_2 雷射繞射極限以及電弧放電尖端無法加工數十微米之週期，因此僅能製作 LPFG。而飛秒雷射直寫式加工，不僅能快速製作各種週期之光纖光柵，更不受限於材料特性，可讓研究者設計並實現多種變化型光纖光柵。

2. 光纖干涉儀感測器

光纖干涉儀感測器是由干涉結構所組成，常見的類型有二種：

- (1) 馬赫－詹德 (Mach-Zehnder) 光纖干涉儀 (如圖 5(a) 所示)。
- (2) 法布里－珀羅 (Fabry-Perot) 光纖干涉儀 (如圖 5(b) 所示)。

其檢測原理為：

- (1) 馬赫－詹德光纖干涉儀

當傳播於纖心的光通過干涉結構中之耦合點 (coupling point) 時，有部分的光被耦合至纖殼傳播，當經過干涉結構中之第二個耦合點時，於纖殼內傳播的模態再被耦合至纖心，二束光波具有光程差，進而產生干涉現象。

- (2) 法布里－珀羅光纖干涉儀

當傳播於纖心的光通過干涉結構之半反射面 (semi-reflective splice) 時，光波在此介面產生穿透及反射，當穿透光經過干涉結構之第二個半反射面

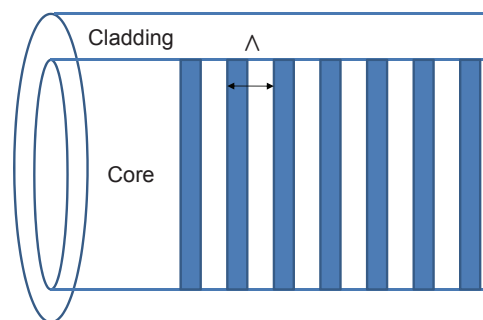


圖 4. 光纖光柵感測器示意圖。

時，仍然於介面處產生穿透及反射，此時二束反射光波具有光程差，進而產生干涉現象。因此無論是馬赫－詹德光纖干涉儀或法布里－珀羅光纖干涉儀，若外界環境變化，則干涉條紋之光學特性也會產生改變，可藉此進行檢測。

光纖干涉儀感測器製造方法有：光纖熔接法、雙光柵法、 CO_2 雷射書寫法、電弧放電加工法，以及飛秒雷射直寫式加工。光纖熔接法雖廣為利用，但其參數調整不易，且熔接後光纖損耗率大，較不易應用於檢測系統。雙光柵法是由二組光纖光柵進行熔接或直接製作於光纖上，不僅耗時，且成本較高。 CO_2 雷射書寫法和電弧放電加工法在製作上雖較容易，但由於 CO_2 雷射繞射極限及電弧放電尖

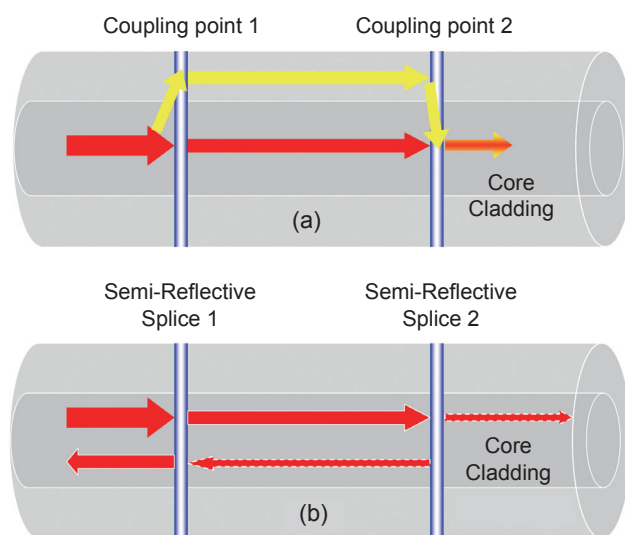


圖 5. 光纖干涉儀感測器示意圖：(a) 馬赫－詹德 (Mach-Zehnder) 光纖干涉儀；(b) 法布里－珀羅 (Fabry-Perot) 光纖干涉儀

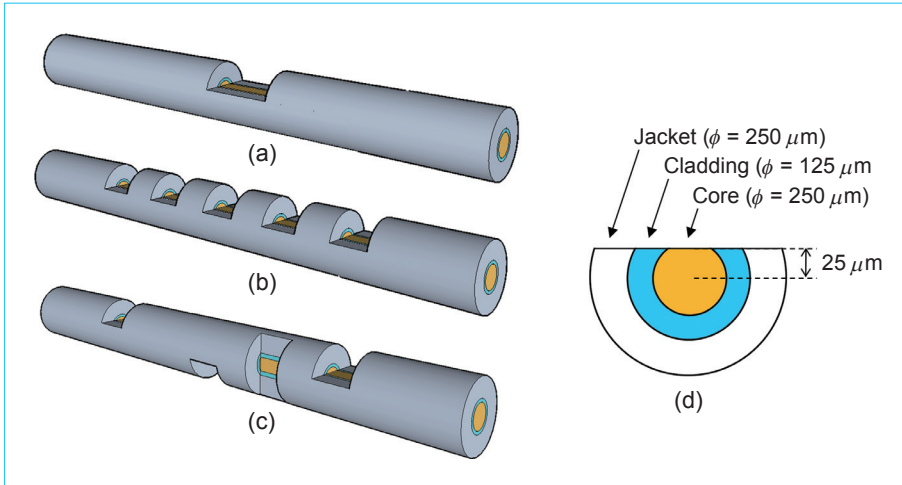


圖 6.
D 形光纖示意圖。

端無法精微加工，因此難以製作微小化光纖干涉儀感測器。而飛秒雷射由於其非線性多光子吸收之特性，對於製作直寫式破壞區或直寫式改質區，皆有快速、操作簡易等優點，因此近年來有許多研究皆採用此法⁽¹¹⁻¹²⁾。

3. D 形視窗光纖感測器

本實驗團隊提出視窗光纖之概念，主要是在光纖上創造出一個或複數個視窗缺口，並可變化缺口排列，以設計不同幾何結構之 D 形視窗型光纖感測器。這些視窗光纖分別為單視窗 D 形光纖感測器 (圖 6(a))、單相位多視窗 D 形光纖感測器 (圖 6(b))，以及多相位多視窗 D 形光纖感測器 (圖 6(c))。上述三種 D 形視窗型光纖感測器，皆設計成部分纖心暴露於外界環境。

其檢測原理為：當傳播於纖心內的光行經 D 形區域時，由於此區之纖心為暴露於外界環境中，因此部分模態會散逸至外界環境中，當外界環境改變時，散逸的程度不同，此時 D 形視窗型光纖感測器接收到的光訊號量不同，藉此進行檢測。此類型光纖感測器亦稱為衰減式全反射式光纖感測器。

如圖 7 和圖 8 所示，D 形視窗型光纖感測器的製作的流程為：將飛秒雷射光斑聚焦至光纖表面，設定加工參數—雷射脈衝能量為 20 mW 及掃描速度為 0.1 mm/s，進行 $x = 100 \mu\text{m}$ 、 $y = 1 \text{ mm}$ 的區域式掃描，調整聚焦位置 $z = 0、60、120 \mu\text{m}$ 往下移動的加工，直至所設定之加工區材料完全剝除乾淨，

則單視窗 D 形的光纖感測器即可製作完成。藉由更換不同光纖夾具，可完成單相位多視窗及多相位多視窗 D 形視窗的光纖感測器，在此不詳加說明。圖 9 是加工後的各種 D 形視窗光纖的 SEM 圖。

圖 10 是 D 形視窗型光纖感測器偵測折射率變化的實驗架設。此系統係由函數訊號產生器 (function generator) 提供訊號源，以驅動綠光之發光二極體 (light-emitting-diode, LED)。D 形視窗型光纖被置入一微流道晶片內，並在該晶片內分別注入不同濃度之蔗糖溶液，以針對其折射率改變進行偵測。當 LED 光源被導入光纖內時，隨著注入不同濃度之蔗糖水溶液，其所造成的折射率變化，使得接受端之光訊號產生改變。

表 1 為蔗糖溶液之各種濃度與折射率的關係。改變後之光訊號係由光纖末端的光電二極體 (photodiode) 所接收。光電二極體將光訊號轉換為

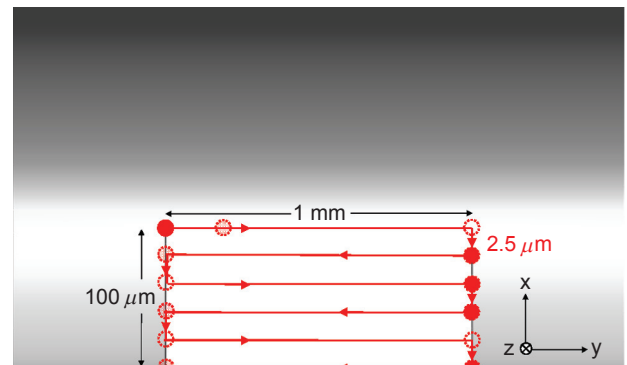


圖 7. 飛秒雷射加工 D 形視窗光纖掃描路徑圖。

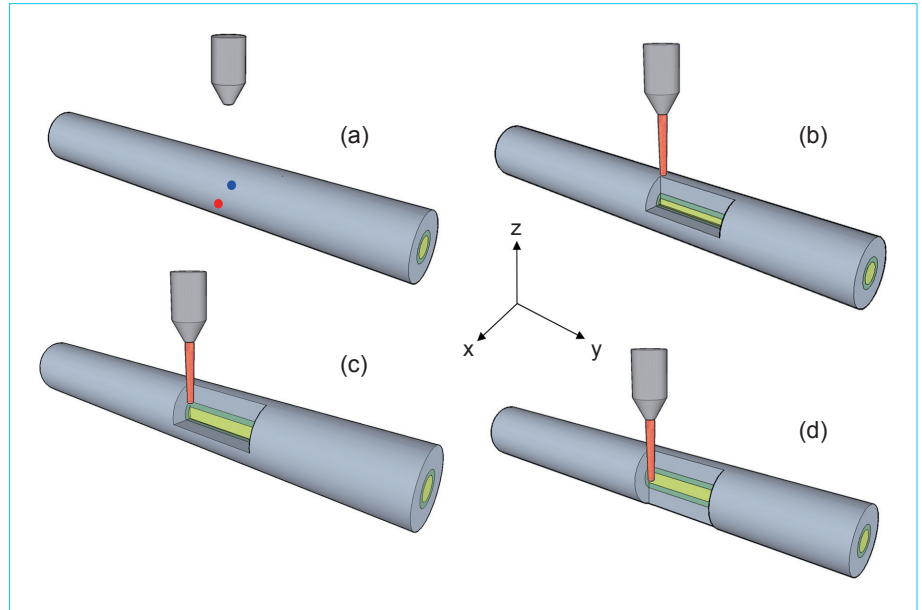


圖 8.
飛秒雷射加工 D 形視窗光纖
示意圖。

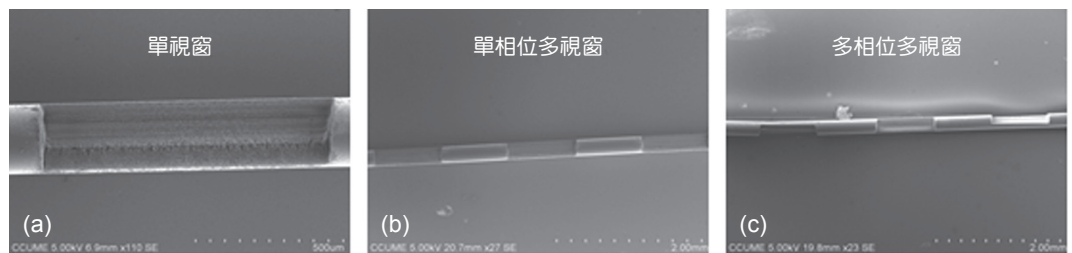


圖 9.
三種 D 形視窗光
纖 SEM 圖。

電訊號，並透過鎖相放大器 (lock-in amplifier) 做訊號之放大處理，最後再由電腦分析其訊號，做為檢測結果之判讀。數據的分析主要是由所量測到的光強度改變量，計算系統的感測靈敏度。結果顯示，當折射率由 1.333 逐漸增加至 1.403 時，所偵測的光訊號也隨之增加，呈現階梯狀的增加，並逐漸達到平衡訊號，結果如圖 11(a) 所示，此為折射

率變化所造成的現象。將光訊號對折射率作圖，如圖 11(b) 所示，以直線方程式擬合所得的數據後，結果顯示，多相位多視窗 D 形光纖感測器之訊號相關係數 (correlation coefficient) 約為 0.99914，標準差 (standard deviation) 為 5.36×10^{-4} 。利用三倍標準偏差除以斜率，可得多相位多視窗 D 形光纖感測器之折射率感測靈敏度 (refractive index

表 1.
蔗糖溶液之各種濃度與折射率關係

Refractive index	Sucrose concentration (wt%)	Weight of Sucrose (g)	Weight of water (g)	Total weight (g)
1.343	6.8	1.088	14.912	16
1.353	13.25	2.12	13.88	16
1.363	19.45	3.112	12.888	16
1.373	25.4	4.064	11.936	16
1.383	31.05	4.968	11.032	16
1.393	36.55	5.848	10.152	16
1.403	41.7	6.672	9.328	16

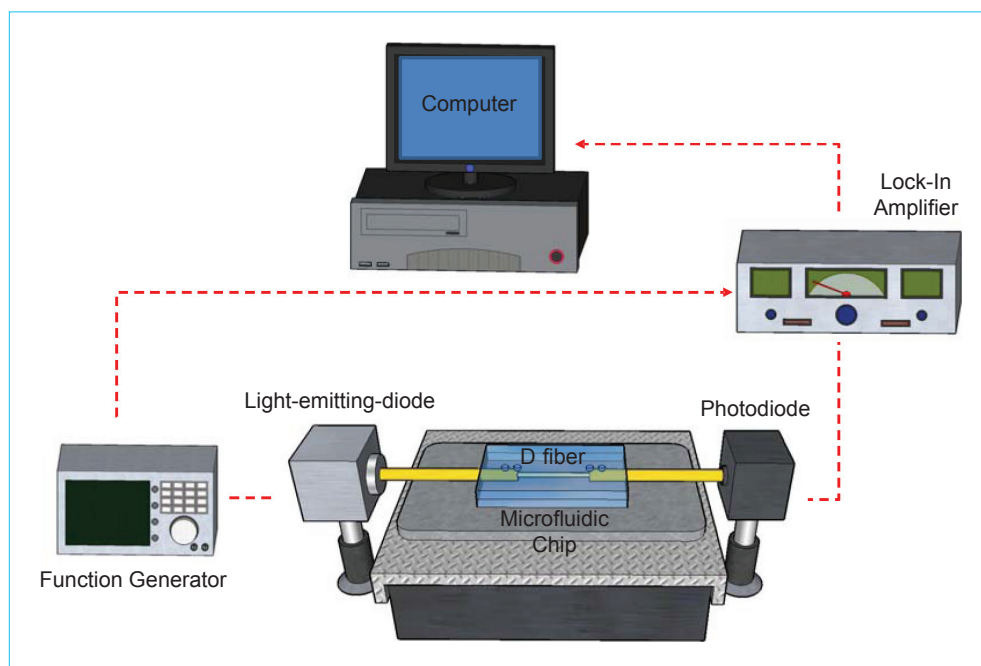


圖 10.
D 形視窗光纖感測器之
折射率感測實驗平台。

resolution) 為 1.67×10^{-4} RIU (refractive index unit)。表 2 為三種 D 形視窗型光纖感測器之折射率感測靈敏度的比較。

四、結論

本文介紹各式光纖感測器原理以及本團隊以飛秒雷射技術所開發製作之視窗型 D 形結構光纖感測器。結果顯示，以飛秒雷射加工的 D 形視窗光纖感測器，其折射率靈敏度可達 10^{-4} RIU。未來若

能將飛秒雷射精微加工朝有效、快速以及量產之能力發展，預期可開發出新穎之 3D 微結構製程、奈米結構模具等設備與技術能力，將可促進生物感測科技進一步的發展。

誌謝

感謝經濟部技術處的經費支持，以及工業技術研究院南分院雷射應用科技中心同仁之協助，使本文得以順利完成，在此致上誠摯的謝意。

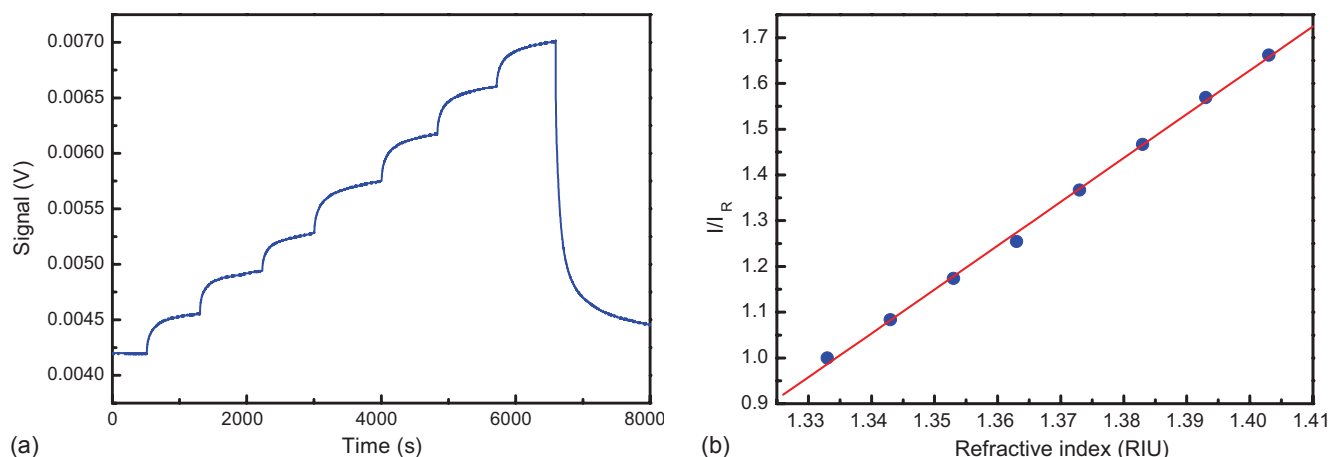


圖 11. (a) D形視窗光纖感測器之折射率感測實驗—不同折射率下訊號即時偵測圖。(b) D 形視窗光纖感測器之折射率感測實驗—不同折射率下訊號強度變化圖。

表 2. D 形視窗型光纖感測器之折射率感測靈敏度比較表。

	Sensing length	Slope m (RIU ⁻¹)	Standard deviation σ	Correlation coefficient	RI resolution $3\sigma/m$ (RIU)
單視窗 D 形光纖感測器	6 mm	2.90	1.49×10^{-4}	0.99865	1.54×10^{-4}
單相位多視窗 D 形光纖感測器	6 mm	5.47	5.96×10^{-4}	0.99911	3.27×10^{-4}
多相位多視窗 D 形光纖感測器	6 mm	9.62	5.36×10^{-4}	0.99914	1.67×10^{-4}

參考文獻

1. K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1035 (1993).

2. B. Rethfeld, K. Sokolowski-Tinten, D. Von Der Linde, and S. I. Anisimov, *Appl. Phys. A*, **79**, 767 (2004).

3. 鄭中緯, 吳秉翰, 沈威志, 林岑盈, 物理雙月刊, **32** (3), 208 (2010).

4. J. L. Tang, S. F. Cheng, W. T. Hsu, T. Y. Chiang, and L. K. Chau, *Sensors & Actuators: B. Chemical*, **119**, 105 (2006).

5. C. H. Chen, S. C. Chen, Y. C. Chen, H. T. Hu, T. G. Wei, W. T. Wu, J. N. Wang, and J. L. Tang, *The 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2009)*, 3 (2009).

6. Y.-J. Rao, M. Deng, D.-W. Duan, X.-C. Yang, T. Zhu, and G.-H. Cheng, *Opt. Express*, **15**, 21 (2007).

7. T. Wei, Y. Han, Y. Li, H.-L. Tsai, and H. Xiao, *Optics Express*, **16**, 5764 (2008).

8. C.-H. Chen, T.-C. Chao, J.-L. Tang, and W.-T. Wu, *Sensors*, **10**, 4794 (2010).

9. C.-H. Chen, T.-C. Chao, W.-Y. Li, W.-C. Shen, C.-W. Cheng, J.-L. Tang, L.-K. Chau, and W.-T. Wu, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, **5**, 1 (2010).

10. C.-H. Chen, T.-C. Tsao, W.-Y. Li, W.-C. Shen, C.-W. Cheng, J.-L. Tang, C.-P. Jen, L.-K. Chau, and W.-T. Wu, *Microsystem Technologies*, **16**, 1207 (2010).

11. Y. J. Rao, M. Deng, D. W. Duan, X. C. Yang, T. Zhu, and G. H. Cheng, *Opt. Express*, **15**, 14123 (2007).

12. T. Wei, Y. Han, H. L. Tsai, and H. Xiao, *Opt. Lett.*, **33**, 536 (2008).



陳建興先生現為國立中正大學物理研究所博士班學生。
Chien-Hsing Chen is currently a Ph.D. student in the Institute of Physics at National Chung Cheng University.



吳瑋特先生為國立中正大學機械博士，現任國立屏東科技大學生物機電工程系助理教授。
Wei-Te Wu received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chung Cheng University. He is currently an assistant professor in the Department of Biomechanics Engineering at National Pingtung University of Science and Technology.



湯兆崙先生為美國德州大學奧斯汀分校物理博士，現任國立中正大學物理系副教授
Jaw-Luen Tang received his Ph.D. in physics from the University of Texas at Austin, USA. He is currently an associate professor in the Department of Physics at National Chung Cheng University.



周禮君先生為美國愛俄華州立大學分析化學博士，現任國立中正大學化學暨生物化學系教授及奈米生物檢測科技研究中心主任。
Lai-Kwan Chau received his Ph.D. in analytical chemistry from Iowa State University, USA. He is currently a professor in the Department of Chemistry and Biochemistry and the director of Center for Nano Bio-Detection at National Chung Cheng University.