Special Report on Research & Innovation

National Pingtung University of Science and Technology

光纖不談幾個M且論光纖感測器

葉柏寬1、陳建興2、吳瑋特1*、湯兆崙2

1國立屏東科技大學 生物機電工程系 2國立中正大學 物理學系

分機:7599 weite@mail.npust.edu.tw *國立屏東科技大學 生物機電工程系 助理教授

近年來由於光通訊產業蓬勃發展,為人類社會提供更方便、快速之資訊傳輸模式。光通訊產業中, 光纖研製屬硬體部分被動元件中重要發展之一環,因其與傳統電纜傳輸相比較,光纖能提供一近乎無損 失之傳輸介質,具有適合長途傳輸之優勢,而其低損耗、體積小、高撓性等優點,更吸引不少研究學者 利用這些優點,將光纖本體改造,成功研發各式光纖感測器。而光纖感測器顧名思義,光纖即為該感測 器之重要元件,其結構示意圖如圖1所示(1)。目前因光纖製造技術成熟使其價格相當合理,又因整體光 通訊產業已達經濟規模,因此相關周邊配件豐富、取得容易且價格合理,若於此利基產業上延伸發展出 光纖感測器,將有利於創造出新的利基市場。

於光通訊產業中,用來通訊傳輸之光纖以矽基材質為主,因此種通訊光纖,較適合於遠距離傳輸, 不同於適合短距離資訊傳輸之高分子材料光纖。而通訊光纖依傳播模態不同可分為多模態與單模態。而 本研究團隊為將光纖應用於感測,主要使用多模態之通訊光纖(纖核直徑為62.5 μm),原因為多模態通訊 光纖,應用於感測時,與單模態通訊光纖相比,具備耦光較容易與光傳輸訊號較強之優點,因此較利於 感測時後端檢測訊號之判別。

而為使通訊光纖具備感測之能力,可以採用許多種方法與架構,如光纖光柵感測器、光纖式干涉儀 及視窗型光纖感測器。其中光纖光柵感測器依光柵週期之長短,主要可再區分為:

(1) 長週期光纖光柵(long period fiber grating, LPFG):此形式之光柵週期約數十至數百微米。

(2) 布拉格光柵(fiber Bragg grating, FBG):此形式屬短週期光纖光柵,其光柵週期小於十微米。

光纖光柵主要使用CO2雷射寫入法、電弧放電加工法、UV雷射微影法、飛秒雷射直寫法加工,使 光纖之本體存在一週期性結構(2),即為光柵,如圖2所示,使得原於光纖內部傳輸之光波耦合至纖殼層 中傳播,經改變路徑之光波因色散損失,導致光速衰減,進而產生共振波峰。而此共振波峰會隨感測 環境不同而有飄移現象,因此藉由分析此飄移變化,即可進行溫度、應力及折射率之感測。但此種感 測器,因光柵尺寸精度要求甚高,所以許多加工方式都不太能滿足所需之精度,如以UV雷射加工,需 考慮加工材料之吸收特性問題。CO2雷射加工與電弧放電加工則需熱效應使其無法達到精微加工。而若 以飛秒雷射加工,不僅能快速製作長週期與短週期之光纖光柵,也因該雷射之特性,不受限於加工之 材料,可方便設計不同光纖光柵感測器之實現



圖1、光纖結構示意圖(1)

圖2、光纖光柵感測器(2)

圖3、Mach-Zehnder 干涉儀⁽³⁾

(2)法布里-珀羅(Fabry-Perot)光纖干涉儀⁽⁴⁾:此感測器具一半反射面之干涉結構,如圖4所示,因此原本於光纖內傳播之光 波,經過此界面,即會因該結構而形成一穿透光與反射光之現象造成光程差,進而產生干涉之現象。

> 干涉儀主要使用之加工法有光纖熔接法、CO2雷射寫入法、電弧放電加工法、飛秒雷射直寫法加工。其中熔接 法,因其參數調控困難,光纖損耗率極高,因此不適合用於檢測系統用之光纖,而CO2雷射與電弧放電加工法 則因熱效應不易控制,不利於精密加工,難以製作此類光纖感測器。若以飛秒雷射加工,因其具非線性多 光子吸收之特性,對於直寫式破壞與改質皆有快速、操作簡易之優點,因此近年來被廣泛應用來製作 此形式之光纖感測器。

5

屏科

大

研

發

專刊





圖4、Fabry-Perot干涉儀⁽⁴⁾

而本團隊提出視窗型光纖之概念,其實是最簡單的一種架構,僅需將其部分纖殼層材料移 除,裸露部分纖核層,利用此裸露視窗之結構,使該感測器與待測環境以漸衰式全反射法 (attenuated total reflection, ATR)進行環境折射率之感測。而此簡單的架構更具有擴充性,於該 裸露之纖核層結構修飾功能性表面,如奈米金薄膜、奈米金粒子等,即能使其以表面電漿共 振(surface plasmon resonance, SPR)(5)與粒子電漿共振(particle plasmon resonance, PPR)(6-7)法進 行感測。而本團隊以超精密型飛秒雷射加工之方式,利用飛秒雷射加工之特性,有別於傳統 長脈衝雷射,其屬短脈衝雷射,脈衝寬度達飛秒(femtosecond, fs=10-15 s)的數量級,因此其加 工區域之熱效應影響極低,而本團隊採用飛秒雷射波長為800 nm,矽材料對此波長而言,吸 收率極低且穿透率高,但因其加工機制屬非線性多光子吸收,能突破此限制,有效對矽材質 光纖進行加工剝除材料,因此可於透明材料表面或內部加工。本團隊即利用此加工機制,於 矽材質之光纖上製造出一個或多個裸露之結構即"感測視窗"。

飛秒雷射加工架構示意圖,如圖5所示,雷射源為一再生放大鎖模(regenerative amplified mode-locked)之鈦藍寶石雷射(Ti: sapphire laser),其脈衝寬度(pulse duration)約為120 fs, 雷射 中心波長為800 nm,脈衝重複率(repetition rate)為1 KHz,最大輸出功率約為3.5 mJ。雷射輸出 功率可利用半波長片(1/2 wave plate)和極化分光鏡(polarization beam splitter)進行調整。雷射加 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 (Mitutoyo-10X, NA=0.28)聚焦後,最小光斑半徑ω為: (1)

 $\omega_0 = (2\lambda f/\pi D) \times M_2$

其中, λ = 800 nm為雷射波長,f = 20 mm 為物鏡焦距,D = 5 mm為入射光斑直徑, $M_2 \sim 1.3$ 為 雷射光束品質。依此可推算,ω₀約為2.5 μm。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,用以控制雷射 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(8)。

本團隊研發之視窗型光纖感測器,包含U形結構視窗之光纖感測器⁽⁹⁾,如圖6所示,於折 射率感測實驗結果顯示,此種U形視窗,可能會因為感測視窗過小,環境溶液與感測視窗間 之空氣不易排出,導致感測溶液無法與感測視窗之界面接觸,即所謂的micro-loading effect, 進而影響感測之靈敏度與解析度。因此,本團隊提出D形結構之感測視窗⁽¹⁰⁾如圖7所示,用以 解決上述之問題。並且為了達成多感測標的同步感測的效果,更提出多感測視窗之概念,並 進而提出能促使感測溶液混合之多相位D形結構光纖感測器^{(11),}如圖8所示。

本團隊評估視窗光纖感測器之性能時,建立一套折射率感測實驗其示意圖如圖9所示^{(8),} generator)提供一固定週期之訊號源,驅動綠光之發光二極體 首先先由函數產生器(function) LED),並將光耦合進光纖感測器,而視窗光纖則被置入一微流道晶片 (light-emitting-diode, (microfluidic chip)內,並在該晶片內分別注射不同濃度具有不同折射率之蔗糖溶液,蔗糖溶液

調配方式如表1所示⁽¹¹⁾,以針對其折射率改變進行感測。感測基理為ATR,將LED光源耦合至光纖之纖核層內傳播,再藉由光纖之全反射 特性,將光傳導至感測區域與環境進行感測,經感測後之光訊號再由光纖傳導至後端光電二極體(photodiode),進行光電訊號之轉換,並透 過鎖相放大器(locked-in amplifier),做訊號之放大與處理。最後,再經由個人電腦(personal computer)分析訊號,做為感測結果之判讀(1)。此 外本團隊亦與國立中正大學化學暨生物化學系周禮君教授團隊合作,周教授團隊協助修飾金奈米粒子於視窗長度6 mm之光纖感測器上,使 該感測器得以PPR方式感測折射率,各式視窗結構之感測實驗結果經折射率感測靈敏度之計算結果如表2所示⁽⁸⁾。

總和上述,本團隊成功經由超精密型飛秒雷射加工視窗型光纖感測器,包含U形、D形結構,且亦以飛秒雷射加工之特性,成功製作單相位D 形、單相位多D形及多相位多D形之視窗型光纖感測器,上述感測器經由折射率感測實驗,由實驗結果得知⁽⁸⁾,僅6mm的感測長度其感測解析 度即可達10⁴ RIU。因此,未來若能將飛秒雷射加工技術朝向高量產之方向,並且搭配通訊光纖之成熟周邊技術,便能促進光纖感測器之發展, 屆時大家討論的光纖將不只是頻寬,更會討論解析度、靈敏度甚至是偵測極限!

參考文獻

- 参考又厭
 主 華柏寬, 2011, CO2雷射製作光纖式折射率感測器及其特性研究, 碩士論文, 國立屏東科技大學, 生物機電工程系, 屏東。
 2. Chen, C. H., Chen, S. C., Chen, Y. C., Hu, H. T., Wei, T. H., Wu, W. T., Wang, J. N., Tang, J. L., 2009, "Research on laser-induced long-period fiber grating sensor modified with gold nano-rods," The 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Shanghai.
 3. 陳奕均、翁姿婷、陳建興、陳善儉、吳瑋特、周禧君、王劍能、湯兆崙, 2009「多模光纖干涉儀,折射率感測器之研究」, 台灣光電科技研討會, 國立師範大學, 台北。
 4. Hitz. Breck, 2008, "Tiny Fiber Fabry-Perot Created with Femtosecond Pulses," Photonics Spectra, Vol. 42, no. 5, pp. 90-91.
 5. Homola, J., Yee, S., Gauglitz, G., 1999, "Surface plasmon resonance: review," Sensors and Actuators B, Vol. 54, pp. 3-15.
 6. Salamon, Z., Macleod, H. A., Tollin, G., 1997, "Surface plasmon resonance: review," Sensors and Actuators B, Vol. 54, pp. 3-15.
 6. Salamon, Z., Macleod, H. A., Tollin, G., 1997, "Surface plasmon resonance spectroscopy as a tool for investigating the biochemical and biophysical properties of membrane protein system. II: Applications to biological systems," Biochimica et Biophysica, eta, vol. 131, pp. 131-152.
 7. Chau, L. K., Lin, Y. F., Cheng, S. F., Lin, T. J. 2006, "Fiber-optic chemical and biochemical probes based on localized surface plasmon resonance," Sensors and Actuators B, Vol. 113, pp. 100-105.
 8. Chen, C. H., Hsu, C. Y., Lyu, P. S., Wang, J. N., Chau, L. K., Wu, W. T., Tang, J. L., 2011 "Novel Trench Type Fiber-Optic Sensors Realized by Femtosecond Laser Direct Microstructuring," IPC2011.
 9. 曹子謙, 2009, "X纖式定域化型提供指定地電鍵提供指定地電機提供研究, 領土論文, 國立中正大學, 機械工程研究所, 嘉義。
 10. Chen, C. H., Chao, T. C., Li, W. Y., Shen, W. C., Cheng, C. W., Tang, J. L., Chau, L. K., Wu, W. T., 2010, "Novel D-type fiber optic localized plasmon resonance sensor realized by femtosecond Laser Machining," Journal of Laser Micro/Nano ESngineering, Vol. 5, pp. 1-5.
 11. Chen, C. H., Weng, T. T., Wang, J. N., Cheng, C. W., Tang, J. L., Chau, L. K., Wu, W. T., 201









圖9、折射率感測實驗架構示意圖⁽⁸⁾

表1、不同濃度折射率調配表(12)

	RIU	Wt %	
DI	1.333	0	
No.1	1.343	6.8	
No.2	1.353	13.25	
No.3	1.363	19.45	
No.4	1.373	25.4	
No.5	1.383	31.05	
No.6	1.393	36.55	
No.7	1.403	41.7	

表2、各式視窗結構之PPR式感測結果(8)

	感測長度	斜率(RIU ⁻¹)	標準差 σ	R	折射率解析度(RIU)
單U形	6 mm	0.81	1.06×10 ⁻³	0.9999	1.06×10 ⁻³
單D形	6 mm	2.90	1.49×10^{-4}	0.9987	1.54×10 ⁻⁴
多D形	6 mm	5.47	5.96×10 ⁻⁴	0.9991	3.27×10 ⁻⁴
多相位多D形	6 mm	9.62	5.36×10 ⁻⁴	0.9991	1.67×10 ⁻⁴

6

研

發 快

派

RESEARCH EXPRESS