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

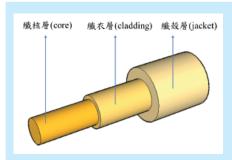


圖1、光纖結構示意圖(1)



圖2、光纖光柵感測器(2)

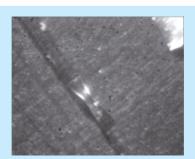
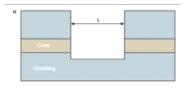


圖3、Mach-Zehnder 干涉儀⁽³⁾

而另一種被廣為研究探討之光纖感測器為干涉儀光纖感測器,此種光纖感測器常見的類型有以下兩種:

- (1)馬赫-詹德(Mach-Zehnder)光纖干涉儀⁽³⁾:此感測器主要為具一產生光程差之特殊結構,如圖3所示,使得原於光纖內部傳播之光波,改變路徑於光纖之外殼材質內傳播,而經該結構改變路徑傳播之光波,將會再由該結構耦合至原始傳播之位置傳播,因此形成光程差,造成干涉之現象。
 - (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。



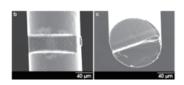
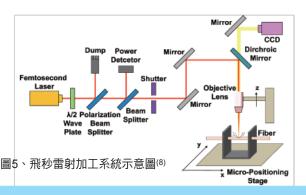


圖4、Fabry-Perot干涉儀⑷



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:

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

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,ω。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



圖6、U形視窗光纖感測器(9)

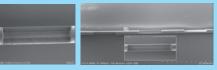


圖7、D形視窗光纖 感測器(10)

圖8、多視窗多相位D形視窗 光纖感測器(11)

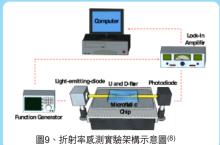


表1、不同濃度折射率調配表(12)

	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®

	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

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10⁻⁴ 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