

# 應用D形光纖及鍍膜技術進行農園土壤濕度感測

## Application of D-shaped optical fiber and coating technology for soil moisture sensing in farmland

田春林\*、解鈞皓、莊家瑜  
Chuen-Lin Tien, Chun-Hao Hsieh, Jia-Yu Zhuang

\*逢甲大學電機系 cltien@fcu.edu.tw

### 中文摘要

本研究主要在探討側磨後之多模光纖 (multi-mode fiber, MMF) 結合蒸鍍及濺鍍技術分別鍍製單層薄膜與多層薄膜 ( $\text{SiO}_2/\text{Ge}/\text{SiO}_2$ ) 後, 製作出高靈敏度的土壤濕度感測器。其中 D 形光纖是利用實驗室自製的光纖拋磨機台來製作, 拋磨過程還搭配了光功率計即時監控系統, 來控制光纖殘留厚度。完成 D 形光纖土壤濕度感測器後, 利用損耗模態共振 (Lossy Mode Resonance, LMR) 的現象, 也就是當薄膜折射率為正值且高於薄膜的消光係數及環境折射率, 並滿足相位匹配條件及波導和薄膜模態間大量重疊, 使部分光訊號以漸逝場的形式耦合至薄膜材料, 以得到高靈敏度之 D 形光纖感測器。將感測器放入土壤讓濕氣能夠滲入薄膜微結構, 並觀察其穿透光譜之波形及中心波長位置飄移量, 來量測土壤相對濕度的變化量。同時搭配 Arduino 的電子式土壤濕度感測模組作為實驗對照組, 研究的土壤相對濕度範圍從 10%RH 至 90%RH。我們發現, D 形光纖剩餘厚度為 73  $\mu\text{m}$ 、ITO 薄膜厚度為 23 nm 的 D 形光纖感測器對相對濕度在 40%到 90%之間變化時的最高靈敏度為 8.6 nm/%RH。據我們所知, 這是首次提出的相對濕度光纖感測器能夠達到最高的靈敏度。

**關鍵詞：**D 形光纖、薄膜、損耗模態共振、土壤濕度感測器

### Abstract

In this study, after the multi-mode fiber (MMF) after side grinding is coated with single-layer film and multi-layer film ( $\text{SiO}_2/\text{Ge}/\text{SiO}_2$ ) by evaporation and sputtering technologies, a high-sensitivity soil moisture sensor is fabricated. Among them, the D-shaped optical fiber is made

by the optical fiber polishing machine set up by the laboratory. The polishing process is also equipped with the optical power meter real-time monitoring system to control the residual thickness of the optical fiber. After completing the D-shaped optical fiber soil moisture sensor, the phenomenon of loss mode resonance (LMR) is used. When the refractive index of the thin film is positive and higher than the extinction coefficient and ambient refractive index of the thin film, and meets the phase matching conditions and a large amount of overlap between the waveguide and the film modes, so that some optical signals are coupled into the film material in the form of evanescent field. D-shaped optical fiber sensor with high sensitivity can be made by loss mode resonance (LMR) effect. The LMR sensor was put into the soil so that moisture can penetrate into the film microstructure, and observe the waveform of its penetration spectrum and the drift of the central wavelength to measure the change of soil relative humidity. At the same time, with Arduino's electronic soil humidity sensing module as the experimental control group, the soil relative humidity range from 10% RH to 90% RH. In this work, we have fabricated a LMR-based optical fiber humidity sensor combined with thin-film coatings and side-polished fiber techniques. We found that the D-shaped fiber with a residual thickness of 73  $\mu\text{m}$  and ITO thin-film thickness of 23 nm has the highest sensitivity of 8.6 nm/%RH for relative humidity varying from 40% to 90%. To our knowledge, this is the first time that the proposed relative-humidity fiber-optic sensor can achieve the highest sensitivity.

**Keywords:** D-shaped fiber, thin film, loss mode resonance, soil humidity sensor

## 一、緣由與目的

由於每一種植物具有他們特別的喜水性，例如仙人掌喜歡讓土壤完全乾透，而鐵線蕨需要隨時保持土壤濕潤，澆水最關鍵的其實不在於水量多少，而是頻率高低。許多人會在固定的時間澆水（比如每週一次或每個星期天澆水），但由於我們居住的環境不同或氣候和季節的改變會影響水分的吸收，確認土壤濕度才是決定多久澆水最好的方法。

在接觸光纖感測器(Optical fiber sensors)之前，對光纖的了解就只有光纖通訊傳輸，但這已是數十年前發現的技術了，近十年內光纖蓬勃發展的方面在於感測器上，因為科技快速進步，光纖感測器在產業的各領域中皆有相當重要的用途，例如：生醫感測、工程監控、PH 值量測、壓力感測與液體折射率感測等等，由此可知利用光纖作為感測的媒介將會是未來的趨勢之一。在土壤濕度感測器方面，市面上有賣很多土壤濕度計可以插到土裡偵測濕度，這些幾乎都是電子式的感測器，但使用時間一久電子式感測器容易腐蝕而失效。因此本文將著重土壤濕度光纖感測器去研究並開發出高靈敏度且可實際應用於土壤濕度的光學感測器。理想的光學薄膜需在任何環境下都不變質，低光學耗損，且與化性不活潑才行，而且還必須能抵抗刮磨、強輻射等等。基於上述光纖本身的耐用性極佳及各種優點，再結合現今的濺鍍及蒸鍍技術在鍍製大量薄膜時能夠顧及到均勻性、重複性、並能持久耐用，這樣的結合肯定能夠在未來對各領域的產業有所幫助。

因此本研究著重於光纖感測器應用在智慧農業上，隨著資訊科技的發展與自動化控制系統的應用，農業的經營已逐漸脫離天然環境的控制，藉由光纖感測元件進行環境監控、資料收集分析，整合成高效率的智慧化環控系統，以自動化感測技術精確的控制栽種環境，以機器取代人力測量、抄寫，減少疏失，並將作物生長情況進行完整記錄與分析，降低栽種成本、提高作物收成率及品質。

## 二、研究方法

本研究提出一種新穎的土壤濕度光纖感測器，研究方法包括 D 形光纖製作、損耗模態共振原理、薄膜式光纖相對溼度感測器等，分別說明如下：

### 2.1 D形光纖製作

製作光纖感測器可藉由化學刻蝕法、熱熔拉法與機械式側磨方法[1-3]來改變光纖形狀，但化學刻蝕法、熱熔拉法都會使光纖本身結構變脆弱易斷裂，因此使用機械式側磨方法較佳。將光纖側磨成D形光纖來製作感測器，是為了使光纖感測區段中通過的光訊號能更接近外部環境，以利和環境介質相互作用，來改變光纖纖核內的光學特性(全反射條件消失)，影響光強度、極化偏振與相位。由Siao-Min Tseng與Chin-Lin Chen所提出的文獻中[4]，將光纖置於矽材料的V形槽中，結合機械式拋光技術，來完成光纖側面拋光，將光纖至於V形槽進行側面研磨拋光完成D形光纖的結構，三維示意圖如圖1。另外，利用光學影像顯微鏡可以精確地確定V形溝槽寬度及深度，確保光纖側磨後的殘留厚度符合期待。由Hussey和Minelly所提出的文獻中[1]，將光纖本身放在電動驅動的拋光輪上拋光，如圖2所示，這個方法可以有接近100%的研磨拋光成功率，且能大幅減少拋光時間和給予任意的均勻拋光區域長度。透過輕微調整拋光輪來增加或減少光纖的張力，可以改變拋光區域的長度，調到想要的D形光纖感測區長度。由Zhang和Wang等人提出的文獻中[5]，將光纖放置在細砂紙包圍的轉輪下方並固定光纖。當轉輪轉動時，就是在側面拋光研磨纖殼。藉由透射光訊號監控裝置，在進行光纖拋光過程中，拋光時間增加，光損功率也逐漸增加。當越靠近纖核時，光損功率迅速增加直到拋光到纖殼和纖核介面。

### 2.2 損耗模態共振原理

2019年時W.M. Zhao等人提出的損耗模態共振理論[6]，損耗模態共振(LMR)的產生是由於在纖核的導模和薄膜的損耗模態間的模態耦合。纖核的導模會滲透進入薄膜，然後當相位匹配條件滿足時，在薄膜會變成模導[7-9]，如圖3所示。

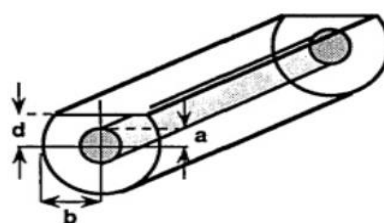


圖 1 D 形光纖結構三維示意圖

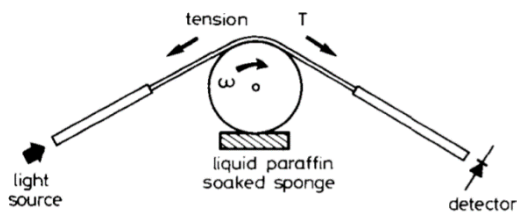


圖 2 D 形光纖拋光裝置

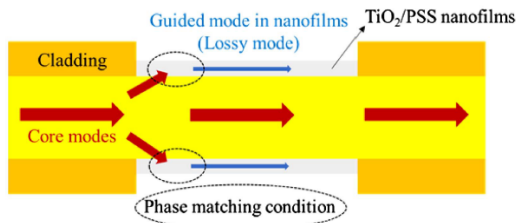


圖 3 損耗模態共振原理圖[6]

當發生損耗模態共振時，光譜上會有一個或多個衰減凹陷。利用基於損耗模態共振折射率感測器的感測原理解釋如下。鍍膜區域為感測區域。當環境折射率改變時，薄膜內光傳播的有效折射率也會改變。因此，共振波長也會由於相位匹配條件改變而改變。Wang 等人[10]提到待測物折射率的變化會導致纖核模態和損耗模態之間相位匹配條件改變，產生不同的損耗譜。因此，待測物折射率的變化可以利用測損耗波長的位移量有效的進行探測。基於損耗模態共振的光纖感測器，需要考慮的參數有薄膜厚度和薄膜折射率，由 Ozcariz 等人所提出的文獻[11]，提到了當薄膜厚度提高時，共振波長數量增加的同時，共振波長位置也往長波長飄移。Verma 等人提到[12]，當在薄膜中開始引導有損模態時會發生損耗模態共振，這會導致在光纖中引導模態的有效折射率的虛部增加。因此，薄膜材料的介電常數的實部必須是正的，並且其大小必須大於其自身的虛部以及光纖和周圍介質的介電常數。

### 2.3 薄膜式光纖相對溼度感測器

由 Zamarreno 和 Hernaez 等人提出的文獻[13]中，提出使用二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )和聚合物(PSS)作為光纖上的薄膜材料，做成損耗模態共振原理的光纖相對溼度感測器，使用的是多模光纖，並利用化學蝕刻法去除一小區段的纖殼(cladding)作為感測區，再透過逐層沉積技術(LBL)，靜電對電子進行反應附著的上鍍製40對雙層聚合物的結構(膜厚

2022 生態型市民農園學術論文暨成果觀摩研討會約  $1.3 \mu\text{m}$ )。選擇  $\text{TiO}_2$  是基於其光學條件足以產生損耗模態共振，當聚合物 PSS 與外部環境的水氣結合產生膨脹時折射率也會上升，藉此間接影響  $\text{TiO}_2$  的折射率變化產生交互作用[14]。實驗架構的輸入端為鹵素白光光源，輸出端有 NIR 紅外光與 VIS 可見光光譜儀兩種，如圖4，分別記錄其吸收光譜，並在光譜範圍內顯示兩種不同的共振(400nm-1700nm)，實驗的濕度範圍為 10%RH 至 85%RH 進行量測，可觀察到近紅光區域產生兩個共振區域，且隨著濕度上升有明顯的中心波長飄移現象。

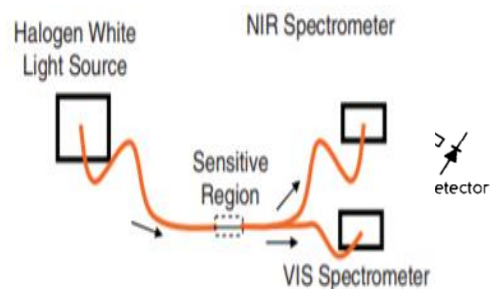


圖 4 濕度感測器實驗構想

### 三、實驗架構

由於我們要測量的是土壤濕度，所以在選擇要鍍製到光纖拋磨面的材料時須使用溼敏性材料，薄膜才能有效地吸附水分，讓水分滲透進入薄膜微結構，造成折射率增加，因此我們使用了二氧化錫( $\text{SnO}_2$ )作為薄膜材料鍍製單層膜， $\text{SnO}_2$  還有很好的化學穩定性。此外，我們還嘗試抗反射的多層膜( $\text{SiO}_2/\text{Ge}/\text{SiO}_2$ )鍍製在 D 形光纖上，總膜厚為 900 nm，其中  $\text{SiO}_2$  為溼敏性材料，Ge 為紅外線材料，雖然 Ge 不是溼敏性材料，但因為抗反射膜具高穿透的特性，所以使得 D 形光纖感測器同樣有不錯的靈敏度。

### 3.1 土壤相對溼度感測器

一般的感測器是將化學量、物理量及生物量等轉換成電訊號的儀器，感測器是用於偵測環境中所生事件或變化，並將此訊息傳送出至其他電子裝置(如中央處理器)的裝置，通常由敏感元件和轉換元件組成。電子式感測元件感測原理是將物理量的變化轉換成電壓或電阻的變化量而輸出訊號，可作為訊息傳遞、處理、紀錄、顯示及控制等，如圖

5 所示。從早期的類比式到近年來數位式訊號。應用無線網路傳輸技術，感測器可以進行數據處理及資料回傳，具備感測、運算與通信能力，少了實體訊號線，現場安裝更簡便。

本研究使用 D 形光纖，拋磨前須先將其最外層的保護層(jacket)剝除。側磨光纖時，將光纖固定於專用夾具上並架設於側面研磨機上，光纖側磨主要由機台滾輪上之側磨拋光皮配合拋光液進行側磨作業，並在夾具下方增加砝碼以增加拉力及光纖與機台滾輪的接觸面積，增強拋光效果，並減少拋磨時間。拋磨機的轉速不能太慢否則無法達到理想的拋磨效果，太快則會讓光纖激烈晃動進而導致斷裂。另外，由於拋光粉會沉澱導致拋光液的濃度分布不均勻，因此每隔 10 分鐘需攪拌一次，且半小時後將拋磨方向轉向，完成拋磨時間為 1 小時。

將製作完成的 D 形光纖土壤溼度感測區埋至土中，在光纖一端接上鹵素光源，另一端分別接上近紅外光光譜儀(NIR512)及可見光光譜儀(OtO)，來記錄土壤濕度 RH10%至 RH90%間不同溼度的光譜，實驗架構如圖 6 所示，由於鹵素光源的波長範圍較廣，因此可同時接收可見光及近紅外光，而非單一波長光譜，有利於我們取得損耗模態共振波長的飄移光譜。同時搭配 Arduino 和電子式土壤溼度感測器作為實驗對照組。觀測不同溼度下光譜共振中心波長的漂移量，進而算出此 D 形光纖土壤溼度感測器的靈敏度。

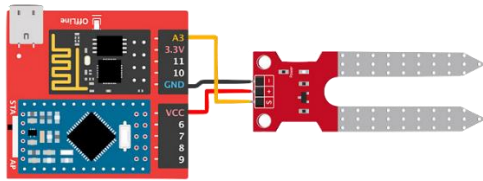


圖 5 土壤溼度計為類比訊號(以 Wi-Fi 傳輸)

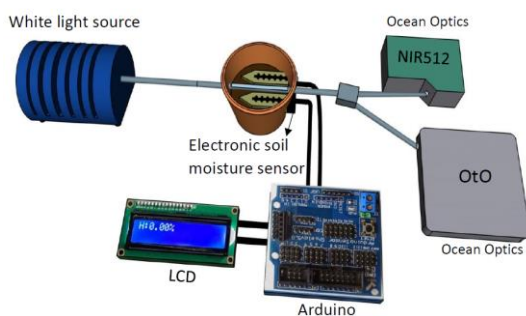


圖 6 土壤相對溼度感測實驗架構圖

本實驗所使用的 D 形光纖需用光纖側磨技術及薄膜射頻磁控濺鍍技術來製作高靈敏度的感測元件[15-17]。光纖放入拋光研磨機完成 D 形光纖側磨後，先用光學顯微鏡搭配 AMCap 視頻捕獲軟體拍攝拋磨後光纖厚度，再將照片用 Matlab 程式測量其殘留厚度後，測量 D 形光纖鍍膜前的穿透光譜，接著放入濺鍍機台進行鍍膜，鍍膜後再次分析其穿透光譜，最後再用簡式橢偏儀量測膜層厚度。把完成的 D 形光纖放入土壤內開始進行土壤溼度量測，進行穿透光譜的比較，找出適當的鍍膜材料、搭配 Arduino 電子式土壤溼度感測器確認其靈敏度及準確度。

## 四、結果與討論

### 4.1 單層膜 D 形光纖土壤相對溼度感測器

二氧化錫作為溼敏性材料[18,19]，對水氣有良好的物理吸附，很適合用於量測溼度，隨著土壤內的溼度增加，使得水氣吸附增加，造成折射率增加。Niedziakowski 等人[20]在多個領域進行的液體分析，例如光學和電化學(EC)，最近引起極大的關注。基於氧化銻錫(ITO)鍍膜光纖的簡單設備可用於 EC 過程的光學監測。在滿足 ITO 的光學特性和厚度的情況下，可以獲得有損模式共振(LMR)效應並將其用於監測 ITO 表面附近的分析物的光學特性。因此，本研究使用鍍膜 D 形光纖製作土壤溼度感測器，其中光學效應是基於損模共振原理，而不是眾所周知的表面電漿共振。D 形光纖的殘留厚度為  $96 \mu\text{m}$ 。其靈敏度為  $2.15 \text{ nm/RH}\%$ 。圖 7 為  $\text{SnO}_2$  單層膜鍍於多模 D 形光纖做土壤溼度感測實驗穿透光譜圖。圖 8 為 ITO-LMR 多模 D 形光纖的靈敏度線性擬合曲線圖。改用 ITO 薄膜厚度為  $23 \text{ nm}$  的 D 形光纖感測器，當對相對濕度在 40%到 90%之間變化時的最高靈敏度為  $8.6 \text{ nm}/\%RH$ 。

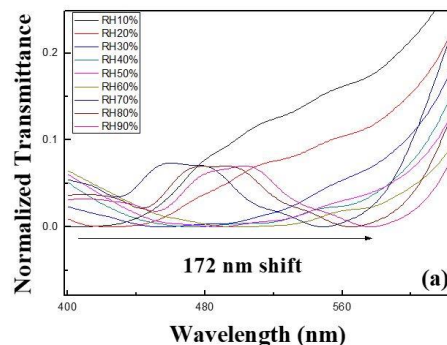


圖 7 單層膜土壤相對溼度感測器穿透光譜

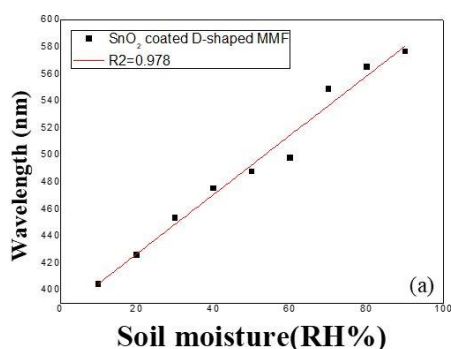


圖 8 單層膜 D 形光纖的靈敏度線性擬合

#### 4.2 多層膜 D 形光纖土壤相對溼度感測器

在鍍有多層膜的 D 形光纖中，97  $\mu\text{m}$  殘留厚度的 D 形光纖感測器具有相當高的靈敏度，由於其厚度較低，所以讓漸逝場的強度較強，我們在不同光纖殘留厚度的比較下，得到的最大靈敏度為 1.21 nm/RH%。圖 9 為最高靈敏度之穿透光譜圖。圖 10 為多層膜 D 形光纖土壤濕度感測器靈敏度之線性擬合。雖然鍍薄膜並不是溼敏性材料，但是由於多層膜為穿透高的抗反射薄膜，所以使得光纖感測器同樣具有良好的靈敏度。

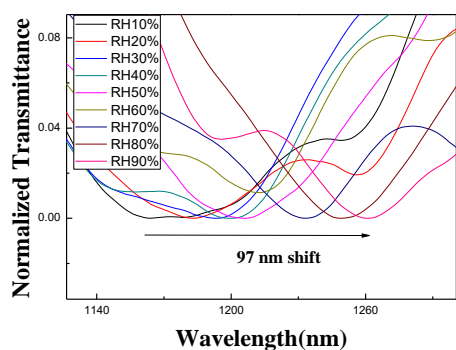


圖 9 多層膜土壤溼度光纖感測器穿透光譜

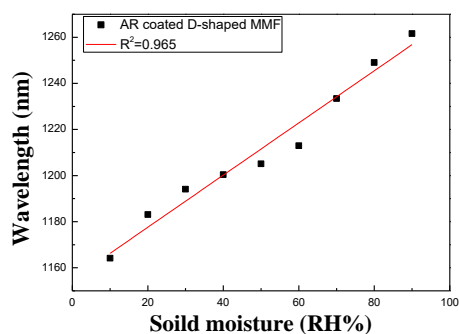


圖 10 土壤濕度感測器靈敏度線性擬合

## 五、結論

農業人口高齡化，缺工等問題，農業耕作技術發展朝向自動化及精緻化目標，將智慧科技導入農業生產，應用感測器收集生物及環境及田間作業數據，大數據分析及預測模型應用，藉由自動環控設備進行農園田間管理，達到節能省工管理模式。一般農民的耕作方式是觀察土壤乾濕程度，多數農民不會使用感測器偵測土壤相對溼度。在研究過程中瞭解智慧農業發展的重要性及其問題，透過本系統可以測得土壤相對溼度，並可即時監測土壤相對溼度，將蒐集與擷取到的感測數據(如：溫度、土壤濕度等)上傳至雲端資料庫。將數據轉換為農業經營有用的資訊，提供農場管理者進行產銷規劃、生產管理及顧客服務等經營決策判斷參考，協助產銷過程的智慧監控，減輕農場作業負擔降低勞動力需求。

本研究使用的是單層膜二氧化錫( $\text{SnO}_2$ )、ITO 薄膜和多層膜( $\text{SiO}_2/\text{Ge}/\text{SiO}_2$ )三層結構薄膜，在二氧化錫方面，我們有探討各種光纖殘留厚度搭配不同膜厚的靈敏度，多層膜則探討相同膜厚下不同光纖殘留厚度的影響。鍍二氧化錫單層膜的 D 形光纖土壤溼度感測器的靈敏度為 2.15 nm/RH%。在多層膜 D 形光纖上，可以看到 97  $\mu\text{m}$  殘留厚度的 D 形光纖具有最好的靈敏度；在土壤相對溼度範圍為 RH10%到 RH90%，靈敏度為 1.21 nm/RH%。另一研究發現，D 形光纖剩餘厚度為 73  $\mu\text{m}$ 、ITO 薄膜厚度為 23 nm 的 D 形光纖感測器對相對濕度在 40%到 90%之間變化時的最高靈敏度為 8.6 nm/%RH。據我們所知，這是首次提出的相對濕度光纖感測器能夠達到最高的靈敏度。在一些相關文獻中，靈敏度均不超過 3.5 m/%RH。

在未來的工作中，我們將研究鍍膜厚度對感測靈敏度的影響，並希望製造出更高靈敏度的 LMR 光纖濕度感測器。在單層膜方面會去改變製程參數，藉由改變鍍膜機台的通氧量、功率、沉積時間或增加感測區長度等等，讓感測器產生不同的效果，以得到更好的靈敏度。多層膜的方面可以考慮使用不同材料組成的多層膜，測試不同的性能。

## 致謝

本研究經費來源由科技部計畫 MOST 109-2622-E-035-020 所提供。

## 參考文獻

1. C.D. Hussey and J.D. Minelly, "Optical fibre polishing with a motor-driven polishing wheel," in *Electronics Letters*, vol. 24, no. 13, pp. 805-807, 23 June 1988.
2. Danh Tran, Kee Koo and Sang Sheem, "Single-mode fiber directional couplers fabricated by twist-etching techniques (stabilization)," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 17, no. 6, pp. 988-991, June 1981.
3. H.S. MacKenzie and F.P. Payne, "Saturable absorption in a tapered single-mode optical fibre," in *Electronics Letters*, vol. 26, no. 21, pp. 1744-1745, 11 Oct. 1990.
4. S.M. Tseng and C.L. Chen, "Side-polished fibers," *Appl. Opt.* 31, pp.3438-3447, 1992.
5. Y.X. Zhang, L. Wang, Z.H. Liu, "The polishing detection method of Side-polished fiber," *SPIE*, Vol.8202, 2011.
6. W.M. Zhao, Qi Wang, X.Z. Wang, X.L., J.Y. Jing, and H. Z. Sun, "Theoretical and experimental research of LMR-based high-sensitivity optical fiber refractive index sensors," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 36, No. 8, Aug. 2019.
7. I. Del Villar, Miguel Hernaez, Carlos R. Zamarreño, Pedro Sánchez, Carlos Fernández-Valdivielso, Francisco J. Arregui, and Ignacio R. Matias, "Design rules for lossy mode resonance based sensors," *Vol. 51*, pp.4298–4307, 2012.
8. A.B. Socorro, I. Del Villar, J.M. Corres, F.J. Arregui, and I.R. Matias, "Spectral width reduction in lossy mode resonance-based sensors by means of tapered optical fibre structures," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 200, pp.53-60, 2014.
9. I. D. Villar, C. R. Zamarreño, M. Hernaez and F. J. Arregui, "Generation of lossy mode resonances with absorbing thin-films", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 23, pp. 3351-3357, December 2010.
10. X.Z. Wang and Qi Wang, "Theoretical Analysis of a Novel Microstructure Fiber Sensor Based on Lossy Mode Resonance," *Electronics*, Vol.8, Apr. 2019.
11. A. Ozcariz, M. Dominik, M. Smietana, C.R. Zamarreño, I. Del Villar, F.J. Arregui, "Lossy mode resonance optical sensors based on indium-gallium-zinc oxide thin film," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 290, pp.20–27, 2019.
12. R. K. Verma, A. Joy, N. Shama, and Vikas, "Performance study of surface plasmon resonance and lossy mode resonance based fiber optic sensors utilizing silver and indium oxide layers: An experimental investigation," *Optics and Laser Technology*, Vol. 112, pp.420-425, 2019.
13. C.R. Zamarreno, M. Hernaez, P. Sanchez, I. Del Villar, I. R. Matias, F. J. Arreguia, "Optical Fiber Humidity Sensor Based on Lossy Mode Resonances Supported by TiO<sub>2</sub>/PSS Coatings", *Procedia Engineering*, Vol.25, pp. 1385-1388. 2011.
14. S. P. Usha, A. M. Shrivastav, B. D. Gupta, "Semiconductor metal oxide/polymer based fiber optic lossy mode resonance sensors: A contemporary study," *Optical Fiber Technology*, Vol. 45, pp.146-166, Nov. 2018.
15. 李正中, "薄膜光學與鍍膜技術"第八版, 藝軒圖書出版社, 2016.
16. 李啟源, "基於透明導電薄膜及損耗模態共振研製高靈敏度光纖感測器", 逢甲大學電機工程研究所碩士論文, 2014年。
17. 毛皓陞, "利用光學鍍膜技術研製高靈敏度D形光纖感測器", 逢甲大學電機工程研究所碩士論文, 2017年。
18. Qi Wang, Xiang Lia, W.M. Zhao, S.W. Jina, "Lossy mode resonance-based fiber optic sensor using layer-by-layer SnO<sub>2</sub> thin film and SnO<sub>2</sub> nanoparticles," *Applied surface science*, Vol. 492, pp.374-381, 2019.
19. 張少華, 曾捷, 孫曉明, 穆昊, 梁大開, "光纖 SPR 濕敏傳感器及其共振光譜特性研究", *光譜學與光譜分析*, vol 32, No.2, pp.402-406, 2012.
20. P. Niedziałkowski, W. Białobrzaska, D. Burnat, P. Sezemsky, V. Stranak, H. Wulff, T. Ossowski, R. Bogdanowicz, M. Koba, and M. Śmietana, "Electrochemical performance of indium-tin-oxide-coated lossy-mode resonance optical fiber sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 301, Dec 2019.