



逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

空氣間隙型長週期光纖光柵之 pH 感測器

作者：許鶴龍、陳立羲

系級：電機工程學系

學號：D9677072、D9672504

開課老師：劉文豐 老師

課程名稱：專題研究(二)

開課系所：電機工程學系

開課學年：九十九學年度 第一 學期



摘要

本研究探討利用空氣間隙型長週期光纖光柵完成一光纖 pH 感測器。此感測器的主要元件為空氣間隙型長週期光纖光柵，其製程包含光纖拋光、光纖微影、光纖蝕刻技術等製作而成。感測機制以不同 pH 值之待測液體具有不同的折射率，其將產生光柵有效折射率的變化以導致光柵損失峰波長的飄移。而本文實驗針對空氣間隙型長週期光纖光柵之高階模態及低階模態對酸鹼溶液作滴定感測，並進行比較分析。實驗結果顯示出光柵之高階模態的靈敏度較低階模態高，且鹼性溶液的靈敏度高於酸性溶液。未來期許可藉由鍍膜或應用不同種類光纖，提升感測器靈敏度，並實際應用於環境土壤或生物醫學等範疇。

關鍵字:光纖拋光、光纖微影、光纖蝕刻、

空氣間隙型長週期光纖光柵

Abstract

The pH sensor based on the air-gap long period fiber gratings is presented in this study. The fabrication of an air-gap long period fiber grating includes the fiber side-polished, fiber micro-lithography, and fiber etching. The sensing mechanism is based on the index variation of the testing the acid and the alkaline solution to cause the grating loss-dip wavelength shift.

The discussion of the experimental results is not only for the acid and the alkaline solution, but also the high-order and low-order modes are included. The sensitivity of the high-order mode is better than that of the low-order mode and the sensitivity of the acid solution is better than that of the alkaline solution. In the future work, we will try to use different coating materials or to change different types of fibers to improve the sensitivity of the sensor. The sensor has a wide range of practical applications, such as ground-acidification examination or bio-medical detection.

Key words: fiber side-polished, fiber micro-lithography, fiber etching, air-gap long period fiber grating (AG-LPG)

目 次

摘 要.....	i
Abstract.....	ii
目 次.....	iii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究方法及本文架構.....	3
第二章 長週期光纖光柵之光學特性與基本理論	4
2.1 前言.....	4
2.2 光纖簡介.....	4
2.3 光纖光柵簡介.....	5
2.4 長週期光纖光柵.....	7
2.4.1 長週期光纖光柵簡介.....	7
2.4.2 長週期光纖光柵基本理論分析.....	10

第三章 空氣間隙型長週期光纖光柵之理論分析及製作	14
3.1 前言	14
3.2 空氣間隙型長週期光纖光柵感測特性與原理	14
3.3 單側面光纖拋光.....	15
3.4 光纖微影.....	18
3.4.1 光阻劑塗佈(Spin coating)	20
3.4.2 軟烤(Soft bake)	21
3.4.3 曝光(Exposure)	22
3.4.4 曝後烤(Post Exposure bake).....	23
3.4.5 顯影(Development).....	23
3.4.6 硬烤(Hard bake).....	23
3.5 光纖蝕刻	24
第四章 光纖感測實驗與分析	25
4.1 實驗架構.....	26
4.2 酸鹼溶液調配方式.....	27

4.3 光纖感測元件對酸鹼溶液之量測.....	27
4.4 實驗結果與分析.....	28
第五章 結論與未來展望	33
參考文獻.....	34



第一章 緒論

1.1 研究動機

傳統檢測 pH 值有許多方法，可利用 pH 試紙、pH 指示劑、pH 計等，pH 值在科學上涵蓋很廣，主要表現在生物醫學[1]、環境研究[1]、化工生產[1]及臨床診斷[1]等，因為 pH 值具有影響化學反應的結果，所以監測 pH 值變得十分重要，光纖感測器優於一般傳統感測器的地方為光纖感測器可製作為全光纖的感測器。

光纖感測器已發展了許久，始終在光電領域的地位屹立不搖，因光纖具有質量輕、低傳輸損耗、耐腐蝕、不受電磁干擾、可撓性高等特性。應用範圍極為廣泛，像是能感測應力[2]、溫度[3]、氣體濃度[4]、液體折射率[5]、溼度[6]等，而本篇所應用的光纖性質以光纖本身的折射率特性作為探討的基準點。

若能將光纖光柵感測器的優點充分發揮並將其應用於各種工業、民生上所需的監測系統，必定能使系統提供更穩定及更高的準確性。

1.2 研究目的

目前已有許多學者從事有關光纖光柵之研究，光纖光柵大致上可分為長週期光纖光柵[7]與短週期光纖光柵[8]，而本實驗所探討的主要以長週期光纖光柵作為理論基礎。由於光纖的發明與應用，使得傳統以銅線為傳輸的工具及以電子元件作為感測器的方式獲得改善。因光纖感測器也可達成一般傳統感測器所能完成的感測，如氣體、壓力、磁力、液位、液體流量與溫度之量測。所以光纖感測器之研究，將是人類邁向全光路監測系統實用化的一大指標。

空氣間隙型長週期光纖光柵其製程包含光纖拋光、光纖微影、光纖蝕刻等製程製作而成，以此作為感測器的主要架構，進而利用空氣間隙型長週期光纖光柵對折射率有靈敏度的特性，讓待測液體與光柵產生光學反應，造成光柵折射率變化，影響光柵損失峰波長飄移，藉由觀察及記錄損失峰波長之飄移作為感測待測液體折射率變化的依據。

1.3 研究方法及本文架構

本專題論文內容提出以空氣間隙型長週期光纖光柵為主體之 pH 感測器。空氣間隙型長週期光纖光柵之製作包含光纖拋光(Fiber Polishing)、光纖微影(Fiber Micro-Lithography)、光纖蝕刻(Fiber Etching)等製程技術，來完成空氣間隙型長週期光纖光柵，以此為感測器主體，分別量測 pH 值不同之酸性與鹼性溶液。利用空氣間隙型長週期光纖光柵對折射率有靈敏度的特性，讓待測液體與光柵產生光學反應，造成光柵折射率變化，影響光柵損失峰波長飄移，再使用光頻譜分析儀進行觀測，最後探討長週期的損失峰波長漂移與酸鹼 pH 值之關係。本篇所使用不同 pH 值之酸鹼溶液，酸是以鹽酸(HCl)稀釋調配而成；鹼是以氫氧化鈉(NaOH)稀釋調配而成。

本專題研究共分五章節，第一章主要是在說明研究動機、目的與簡述研究方法。第二章則是在論述長週期光纖光柵之光學特性與基本理論。第三章是介紹空氣間隙型長週期光纖光柵之理論分析及製作。第四章說明光纖感測酸鹼 pH 值之實驗與分析。第五章是結論及未來展望，最後則是參考文獻。

第二章 長週期光纖光柵之光學特性與基本理論

2.1 前言

光纖光柵對環境之感測有著極佳的反應，因此被廣泛的應用在許多感測上。光纖感測器主要藉由觀察反射頻譜與穿透頻譜波長之飄移或能量變化，感測出外界環境的變化。在本章中將介紹長週期光纖光柵的光學特性與基本理論。

2.2 光纖簡介

光纖依照種類不同，其內部結構也有所不同。基本光纖結構由內而外可分三層，最內層為纖核層，中間層為纖殼層，因纖核折射率大於纖殼折射率，入射光於纖核與纖殼之間發生全反射，因此光能在纖核中行進；最外層為保護之塑膠層，可防止纖核及纖殼部份受到外界損害，也可提高光纖的機械性強度。圖 2-1 為光纖之基本結構示意圖



圖 2-1 光纖示意圖

光纖的模態數可由光纖的正規化頻率推得：

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot NA \quad (2-1)$$

$$N_m = \frac{V^2}{2} \quad (2-2)$$

方程式 2-1 中， V 為光纖正規化頻率， λ 為入射光波長， a 為纖核直徑， $NA = \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$ 為光纖數值孔徑， n_0 與 n_1 分別為纖核折射率與纖殼折射率，方程式 2-2 中 N_m 為光纖模態數。從方程式 2-1 與方程式 2-2 中可發現，光纖模態數與入射光波長、光纖纖核直徑及光纖數值孔徑有關。

2.3 光纖光柵簡介

光纖光柵為光纖被動元件之一，其發展非常迅速。於 1978 年由 K. O. Hill[9] 等人發現摻鍺光纖中的光感性，隨後便利用 514.5 nm 波長的氬離子雷射由光纖兩端射入，使此二束傳播方向相反的雷射光源在光纖纖核中產生干涉而造成駐波的發生，由於透過摻雜鍺的光纖纖核中的光感性對光的吸收而造成光纖纖核發生折射率週期性的變化，形成所謂的光纖光柵，此為世上第一個寫製完成的光纖光柵。由於所製作的光纖光柵因光纖軸向的孔徑太小，以致於雷射能量未能完

全進入光纖中，故其折射率變化不明顯。在寫製中容易受到外界環境的干擾而影響光纖光柵的品質，因此製作方式並不適用。之後的改良是以兩道雷射光束以側照方式產生干涉條紋來寫製光纖光柵，此法改善了光纖光柵的製成效率，並且可藉著改變兩道雷射光束的夾角來改變光柵週期，但也因具有較複雜和機械不穩定的缺點，於是在 1993 年 K. O. Hill 等人又提出了相位光罩法(Phase Mask)[8]，相位光罩是在一片玻璃上蝕刻出特定的週期，相位光罩法則是用特定的雷射光(KrF Excimer Laser at 248 nm 或 ArF Excimer Laser at 193 nm)透過相位光罩以近距離方式的貼近光纖曝照，在光柵的每一部份均會產生 +1 階與 -1 階的繞射光，造成干涉條紋來寫製光柵。此法至今仍最普遍被使用，因為架設簡單，且具有極高的穩定性與重複性，只需更換特定之相位光罩即可得到不同的光柵週期，為至今常用於製作光纖光柵的方式。

光纖光柵依週期大小可分為布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)與長週期光纖光柵(Long Period Grating, LPG)。布拉格光纖光柵之週期約為小於 1 μm ；而長週期光纖光柵之週期則為數十 μm 至數百 μm 。這兩種光纖光柵因其光譜特性不同，在應用方面亦隨之而異，但在光通訊或光感測領域上均為重要的光纖被動元件。

2.4 長週期光纖光柵

2.4.1 長週期光纖光柵簡介

均勻式的長週期光纖光柵(Long Period Grating, LPG) 之週期性折射率變化結構，如圖 2-2 所示。其結構可視為將光纖纖核中的基本模態(fundamental core mode)耦合至正向傳播的纖殼模態(cladding mode)的折射率週期性變化。其光傳播理論仍以耦合模態理論為基礎，用此法可以得到不同模態間的耦合量，例如基本正向傳導模態與纖殼模態間的關係，若再參考光纖纖核之週期性折射率變化，便可得到長週期光纖光柵的光學特性，如圖 2-3 所示。

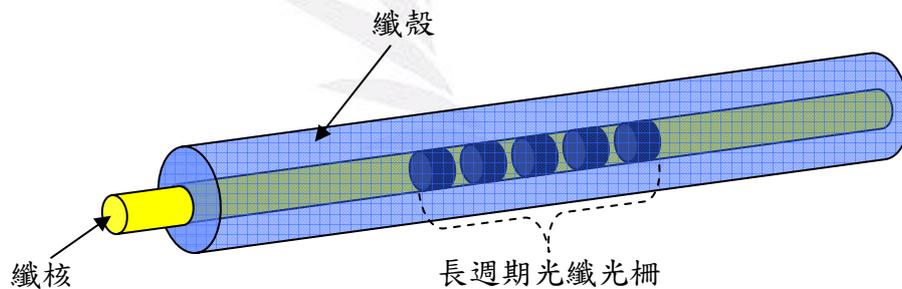


圖 2-2 長週期光纖光柵示意圖

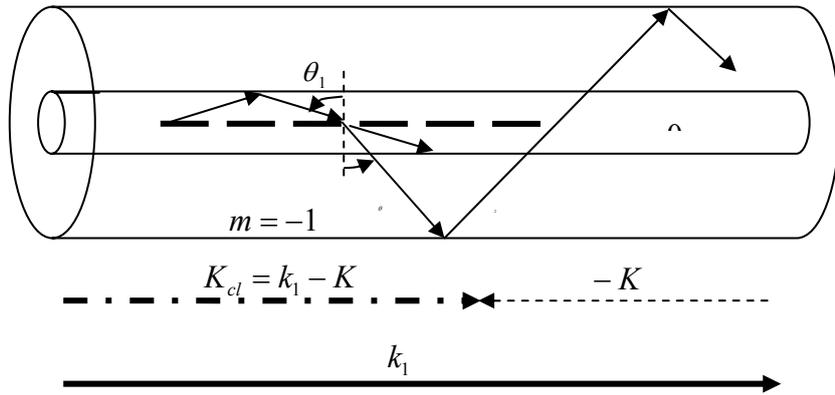


圖 2-3 沿光纖軸向行進的光受到到 LPG 之影響耦合至纖殼

當纖核內的光以入射角 θ_1 入射經過光柵，各階繞射光將滿足下面

之關係式： $n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda}$ ，其中 θ_1 為入射角， θ_2 為繞

射角， m 為繞射階數， λ 為光波波長， Λ 為光柵週期。因模態之波

向量 $k = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) n_{eff}$ ，且等效折射率 $n_{eff} = n \sin \theta$ ，故可得

$k = \frac{2\pi}{\lambda} n \sin \theta$ ，亦即 $n \sin \theta = k \frac{\lambda}{2\pi}$ 。所以 $k_2 \frac{\lambda}{2\pi} = k_1 \frac{\lambda}{2\pi} + m \frac{\lambda}{\Lambda}$ ，

亦即 $k_2 = k_1 + m \frac{2\pi}{\Lambda}$ 。光纖光柵的結構可視為簡單的光學繞射光

柵，如圖 2-4。

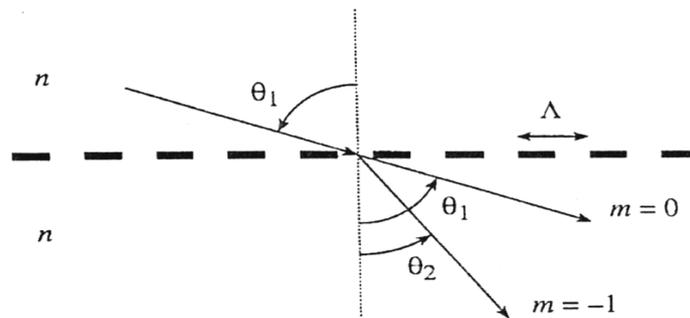


圖 2-4 光波行經長週期光纖光柵後所產生的繞射

正向傳播基本纖核模態耦合至正向傳播的纖殼模態，取階數 $m = -1$ ，可得 $k_1 - k_{cl}^{(n)} = \frac{2\pi}{\Lambda} = K$ 一相位匹配關係式 (phase match condition)，其中 k_1 為基本纖核模態的波向量，且 $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$ ， λ 為真空中的波長， $k_{cl}^{(n)}$ 為第 n 階纖殼模態的波向量且 $k_{cl}^{(n)} = \frac{2\pi}{\lambda_{cl}} n_{eff}$ ， λ_{cl} 為纖殼中傳播的波長， Λ 為基本模態耦合至第 n 階纖殼模態的光柵週期， K 為光柵波向量。

光纖軸向行進的光受到長週期光纖光柵作用而耦合至纖殼模態，因正向基本纖核模態的波向量與正向纖殼模態的波向量均為正值，觀察相位匹配關係式可知當光柵波向量 K 值很小，導致光柵週期 Λ 變大，約為數百 μm ，這也證明了產生同向模態耦合，需有較長週期的光柵。

將 $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$ 與 $k_{cl}^{(n)} = \frac{2\pi}{\lambda_{cl}^{(n)}} n_{eff}$ 代入相位匹配關係式可得到 $n_{co} - n_{cl}^{(n)} = \frac{\lambda_{cl}^{(n)}}{\Lambda}$ 其中 $\lambda_{cl}^{(n)}$ 為第 n 階纖殼模態的穿透波長， n_{co} 及 $n_{cl}^{(n)}$ 分別為纖核模態與第 n 階纖殼模態的等效折射率，入射光滿足此式時，兩模態才會耦合，故在反射頻譜上並不會看見任何反射波長，所以長週期光纖光柵(LPG)又稱為穿透式光纖光柵。

纖核中傳輸的基本纖核模態耦合至數個纖殼模態，激發出纖殼的傳導模態，使部份能量從纖核耦合至纖殼內，造成纖核中光能量的損失，形成從穿透頻譜可觀察到的數個損失峰(loss peak)或稱為共振峰(resonant peak)的現象，如圖 2-5：

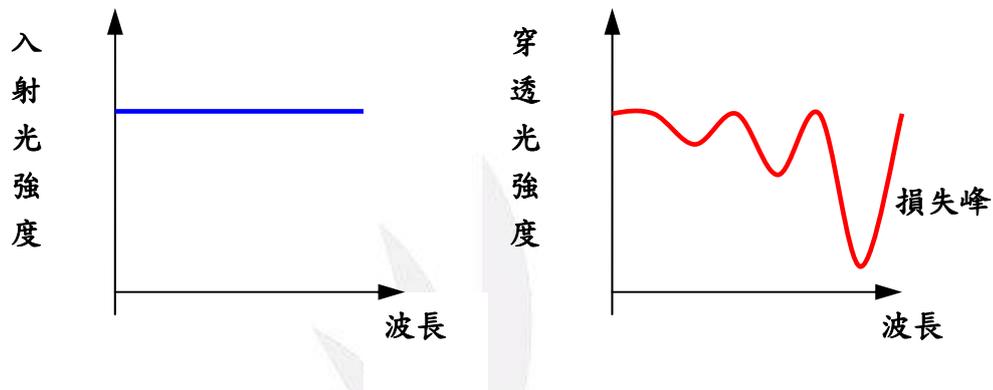


圖 2-5 長週期光纖光柵穿透頻譜

2.4.2 長週期光纖光柵基本理論分析

光在光纖中的波動方程式為：

$$(\nabla^2 + n^2 \kappa_0^2)E = 0 \quad (2-3)$$

其中 $n = n_0 + \Delta n(z)$ ， n 為有光柵時的纖核折射率， κ_0 為纖核與纖殼的模態耦合係數且 $\kappa_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ ， $\frac{2\pi}{\Lambda} = K$ 為光柵波向量， Δn 為光柵折射率的調變量。設定光纖中傳播之光波存在 E_1 與 E_2 兩平面波，且 V_1 與 V_2 分別為其振幅，則

$$E = E(z) = V_1 E_1 + V_2 E_2 \quad (2-4)$$

其中 $E_1 = E_1(x, y, z) = e_1(x, y)e^{-j\beta_1 z}$, $E_2 = E_2(x, y, z) = e_2(x, y)e^{-j\beta_2 z}$,

所以波動方程式(2-3)可表示為：

$$(\nabla^2 + n^2 \kappa_0^2)E = (\nabla^2 + n^2 \kappa_0^2)(V_1 E_1 + V_2 E_2) = 0 \quad (2-5)$$

將式 $n = n_0 + \Delta n(z)$ 代入上式可得：

$$\{\nabla^2 + [n_0 + \Delta n \cos(Kz)]^2 \kappa_0^2\} (V_1 E_1 + V_2 E_2) = 0 \quad (2-6)$$

因 $(\Delta n)^2 \cos^2(Kz) \approx 0$, 且 V_1, V_2 變化非常緩慢, 微分兩次可近似為零, 所以式 2-5 可乘開且經化簡與分項後可得耦合方程式：

$$V_1' = j\delta V_1 + jK_g V_2 \quad (2-7)$$

$$V_2' = -j\delta V_2 + jK_g V_1 \quad (2-8)$$

其中

$$K_g = \left(\frac{k}{4n}\right) \eta \Delta n_0^2 \quad (2-9)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\beta_{01} - \beta_{cl}^{(n)} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) \quad (2-10)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 為自由空間的波數, λ 為自由空間的波長, n 為光纖纖核的折射率, η 為兩模態場在光纖橫截面之重積分, $\Delta n(z)$ 為光柵折射率的

調變量。

因 $E(Z) = V_1(Z)e^{-j\beta_1 Z} + V_2(Z)e^{-j\beta_2 Z}$ ，令 $V_1(Z) = V_1 e^{jrZ}$ 、
 $V_2(Z) = V_2 e^{jrZ}$ ，代回耦合方程式中並解聯立方程式後，可得：

$$r = \pm \sqrt{K_g^2 + \delta^2} \quad (2-11)$$

且

$$\begin{aligned} V_1(z) = V_1 &= A_{1+} e^{jr_+ z} + A_{1-} e^{jr_- z} \\ V_2(z) = V_2 &= A_{2+} e^{jr_+ z} + A_{2-} e^{jr_- z} \end{aligned} \quad (2-12)$$

再利用邊界條件：

$$\begin{aligned} V_1(0) = 1, V_1(L) &= 1 - t \\ V_2(0) = 0, V_2(L) &= t \end{aligned} \quad (2-13)$$

可得

$$t = \frac{K_g}{2\sqrt{K_g^2 + \delta^2}} \left(-2j \sin \sqrt{K_g^2 + \delta^2} L \right) \quad (2-14)$$

$$\Rightarrow \frac{P_{cl}^{(n)}(L)}{P_{01}(0)} = T = t \cdot t^* = \frac{K_g^2}{4(K_g^2 + \delta^2)} \left(4 \sin^2 \sqrt{K_g^2 + \delta^2} L \right) \quad (2-15)$$

此即為基本傳導模態的功率與耦合至第 n 階纖殼模態的功率比
 (穿透率、耦合效率)， K_g 為光柵的耦合常數，正比於經 UV 照射後
 所產生之折射率改變量，而 δ 為調整參數(detuning parameter)，當
 $\delta = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n_{eff}(\lambda) - \frac{\pi}{\Lambda} = 0$ 或 $\lambda = \Delta n_{eff}(\lambda) \Lambda$ 時共振發生，所以共振波長即
 為 $\lambda_{res} = \Delta n_{eff}(\lambda) \Lambda$ 。 Δn_{eff} 及 K_g 會一直增加，直到第 n 階纖殼模態的耦

合強度達 $K_g L = \pi/2$ 時，光完全耦合至纖殼模態，此時為轉換到纖殼模態的最大功率；當 $K_g L = \pi$ 時，則光耦合回纖核模態。由於光柵的耦合強度正比於由 UV 曝照所引起的折射率變量，故更多的曝照量將會造成更多的能量由纖核模態傳送至纖殼模態。但若耦合強度太大，也就是曝照過量時，纖殼模態將會再度耦合回纖核模態。



第三章 空氣間隙型長週期光纖光柵之理論分析及製作

3.1 前言

本章主要為描述空氣間隙型長週期光纖光柵製作及其基本理論，一般以雷射寫製之光纖光柵，是將光纖經過高壓載氫提高其光敏性後，以 KrF 248 nm 準分子雷射寫製光柵，經退火後完成光纖光柵。有別於一般雷射寫製之光纖光柵，空氣間隙型光纖光柵的製作是先將光纖經單面拋光去除其部份纖殼部份，再以微影製程技術完成圖形轉移之目的，最後由氫氟酸蝕刻完成空氣間隙型光纖光柵。本章將依序介紹空氣間隙型長週期光纖光柵之感測特性、光纖拋光、光纖微影和光纖蝕刻。

3.2 空氣間隙型長週期光纖光柵感測特性與原理

長週期光纖光柵對溫度與環境折射率之靈敏度佳，其基本的感測原理為光入射至光纖中，在長週期光纖光柵範圍滿足相位匹配條件，部份入射光由纖核耦合至纖殼，而耦合波長會隨著光柵週期、纖核和纖殼折射率的變化而改變[7]：

$$\lambda_n = \left[n_{\text{eff-core}}(\lambda_n) - n_{\text{eff-cladding}}^n(\lambda_n) \right] \Lambda \quad (3-1)$$

其中 λ_n 為相對於第 n 階纖殼模態的峰值波長， $n_{eff-core}(\lambda_n)$ 為使 λ_n 相依的纖核有效之折射率， $n_{eff-cladding}(\lambda_n)$ 為使 λ_n 相依的纖殼模態有效之折射率， Λ 為光柵週期。當光纖的纖殼模態與外界環境互相作用時，待測之外界環境的變化會將光纖之傳輸特性進行調變，使長週期光纖光柵的穿透頻譜改變，觀察穿透頻譜並探測其變化，即可得知待測物之物理變化量。

光纖模態理論依下列式子[7]:

$$(\lambda_p - \lambda_{cut}) \approx \frac{\lambda_p \lambda_{cut}^2}{8n_{cl}(n_{eff} - n_{cl})} \cdot \frac{p^2}{a_{cl}^2} \quad (3-2)$$

在高模態時，模態數 p 值較大， λ_{cut} 值不受模態數影響，而其損失峰波長位於長波長處，其 $(\lambda_p - \lambda_{cut})$ 值較低模態高，因此可推斷在高階模態時，損失峰波長之飄移量較低階模態大，即高模態的靈敏度較低模態靈敏度高。

3.3 單側面光纖拋光[10]

光纖感測器可藉由將光纖蝕刻、加熱、拉長或單側面拋光的方式，減少其光纖纖殼直徑，以增強光纖纖核內傳遞之光訊號與外界環境之交互作用，藉此提昇感測的靈敏度。然而若採用加熱拉長與蝕刻方式，光纖會因拉長或蝕刻後變得容易斷裂而不利於後續之製程。

Shiao-min Tseng 等人將光纖置入矽基板拋光基座的 V 型凹槽內進行單側面研磨拋光[10]，由於只對光纖做單面拋光，保留住大部分的纖殼部份，因此較加熱、拉長等方式加工之光纖不易斷裂，也利於後續之蝕刻光纖實驗。

單側面拋光首先將光纖黏置在基板上之 V 型凹槽內，左右使用 UV 膠使光纖固定在基板上，如圖 3-1 所示，其正式圖與側視圖如圖 3-2 與圖 3-3 所示。放置光纖入凹槽時，要注意凹槽內是否有其他雜質，若有雜質則會影響光纖黏貼之深度，所以要清除凹槽內的雜質才能使光纖平穩固定於凹槽內，故在黏貼光纖前先將鋁製基板置入超音波振盪器做初步的清潔以確保凹槽內無任何雜質。接著將 UV 膠黏著在光纖之兩側，以 UV 燈曝照 1 分鐘使 UV 膠硬化，黏貼時要對光纖施點應力，這樣可確保光纖貼緊於 V 型凹槽內。在鋁拋光基板上，中間凹槽較淺其長度為 4cm，其餘部份則較深，如此可確定拋光時所拋光的位置。接著將放至於固定拋光基板上以手拿拋光皮在拋光面上加入拋光液，順著光纖縱向拋光，由於光纖承受橫向應力之能力極差，故採用縱向拋光方式可避免光纖斷裂；拋光皮與拋光粉的規格均使用顆粒最細小的規格，如此拋光面能達到平整光滑以利於後續實驗之進行。拋光後的光纖需經過清潔動作，利用超音波震盪清潔光纖，將拋光面的雜質去除。

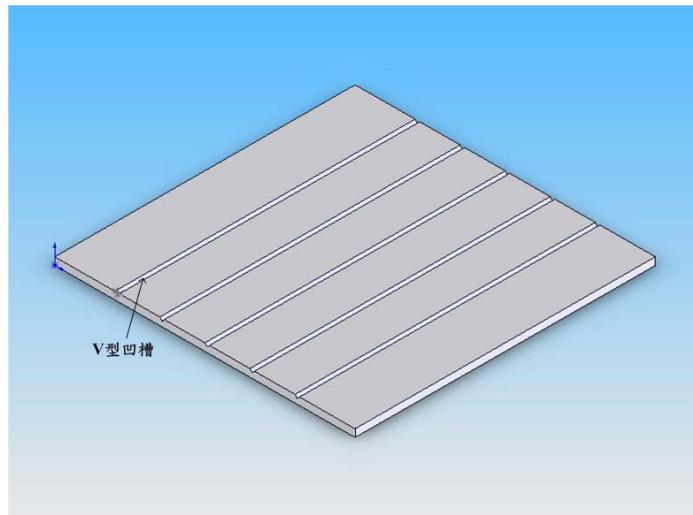


圖 3-1 拋光基板圖

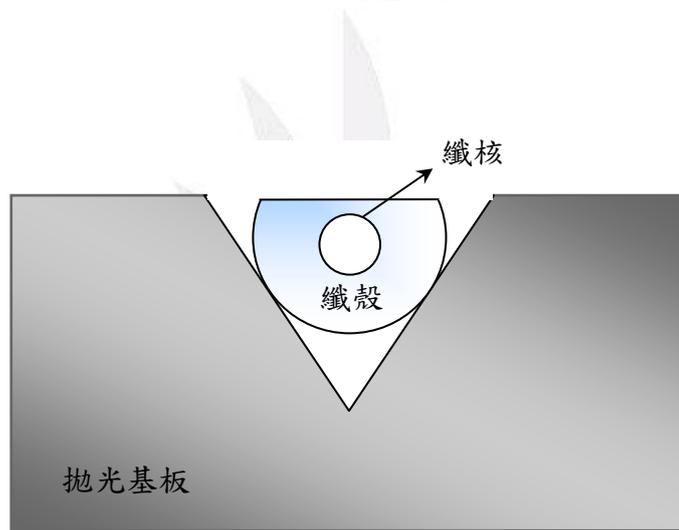


圖 3-2 拋光基板正視圖

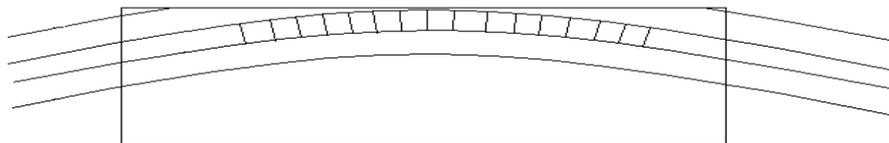


圖 3-3 拋光側視圖

3.4 光纖微影

微影製程主要目的為將光罩上之圖案轉移至光阻上面，首先將所需的圖案製作於光罩上，經曝光將光罩上的圖樣轉移至均勻塗佈正光阻的晶圓上，光阻層會呈現出和光罩上相同的圖案，再經顯影處理將曝到光的光阻洗除，保留沒曝到光的光阻覆蓋在光纖上，以此製程完成將圖案轉移至光纖上。

微影製程可分為光阻劑塗佈(Coating)、曝光(Exposure)及顯影(Development)三大步驟。光阻劑塗佈之前需先清洗晶圓和去水烘烤後再才進行光阻塗佈。經過軟烤(Soft bake)後進行曝光，曝光完成後使用顯影步驟顯現圖案，最後進行硬烤(Hard bake)。圖 3-5 為顯影流程圖。

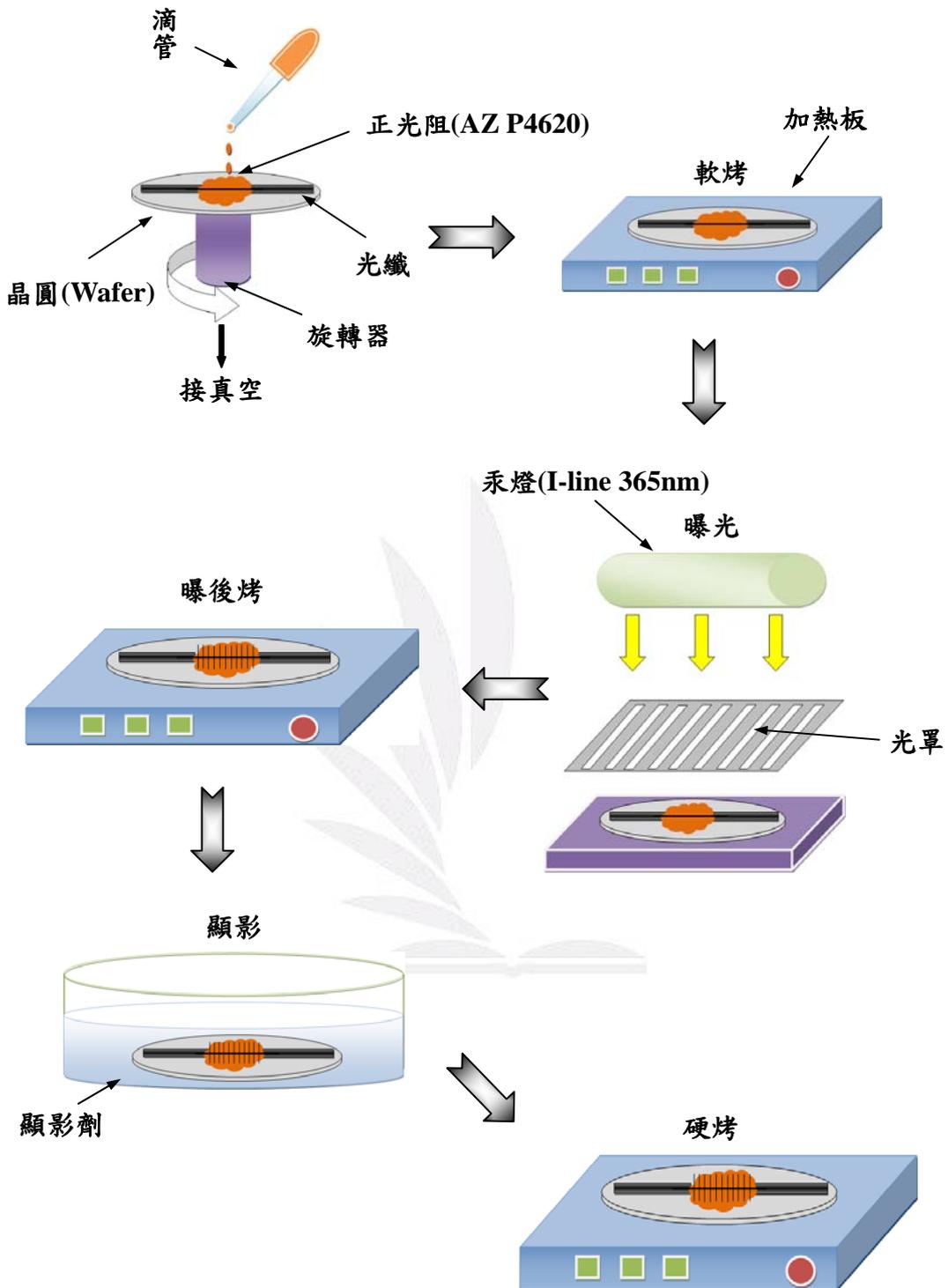


圖 3-5 顯影流程圖

3.4.1 光阻劑塗佈 (Spin coating)

光阻劑塗佈前須先清洗晶圓，目的是將晶圓上的塵粒、雜質金屬等清除，以不傷晶圓與改變晶圓表面化學性質，增加晶圓表面的附著能力，再經去水烘烤，去除吸附在晶圓表面的水氣。以下為清洗晶圓之流程：

Step	Clean Solution	Temperature	Removed
1	D.I Water	Room T	Rinse
2	H ₂ O ₂ +NH ₄ OH+H ₂ O	75~90°C	Particle
3	D.I Water	Room T	Rinse
4	H ₂ O ₂ +HCl+H ₂ O	75 ~ 90°C	Metal ions
5	D.I Water	Room T	Rinse
6	HF+H ₂ O	Room T	Oxide
7	D.I Water	Room T	Rinse

光阻旋轉塗佈(Spin coating)之目的為將滴在晶圓上的光阻以旋轉方式控制其厚度及均勻性。將晶圓放置旋轉載台的軸心上，載台軸心提供適當真空度吸著上方晶圓，當旋轉載台帶動晶圓旋轉後，利用離心力將滴在晶圓上之光阻往晶圓外圍移動，最後形成厚度均勻之光阻層。光阻層之厚度與光阻劑黏度和旋轉速度(ω)、時間有關，一般

與轉速平方根成反比，光阻厚度 $\propto \frac{1}{\sqrt{w}}$ 。

一般塗佈光阻時會分兩階段，第一階段通常為低轉速，使光阻均勻分佈，而後第二階段為高轉速，目的是控制光阻薄膜厚度。實驗時，第一階段轉速控制為 500 r.p.m 歷時 20 秒，第二階段轉速控制為 800 r.p.m 歷時 20 秒。由於光阻劑內含有機溶劑，其揮發性極強，因此旋轉加速度需夠快，以減少光阻因揮發導致的濃度變化，才能控制光阻層之均勻性。

3.4.2 軟烤 (Soft bake)

軟烤(Soft bake)或稱曝光前烘烤(Pre-exposure bake)，目的為降低光阻層溶劑含量，增加阻劑層對光纖的附著力。並可使光阻平坦化，降低阻劑層內部應力，防止阻劑層的龜裂。溫度與時間會影響軟烤之優劣，若溫度與時間控制不佳，不僅會影響光阻的固化結果，更會影響後續曝光與顯影之結果。當軟烤溫度較低，表示光阻含溶劑成份較多，太高的溶劑成份會造成光阻中“已曝光”與“未曝光”的光阻選擇性變差，造成圖紋轉移不良；反之，若軟烤的時間過久，造成光阻太乾，光阻內溶劑成份較低，光阻對光的敏感度變差，降低其解析度。因此，軟烤的溫度必須適當的調整並嚴密的控制。

3.4.3 曝光 (Exposure)

曝光主要目的是使光阻劑吸收適當的能量，以便進行光轉換，經過顯影的光阻才能成功的將圖案轉移至光纖上。控制曝光能量的主要因素為曝光光源的強度(Intensity, nW/cm^2)與曝光時間。曝光能量依微影製程之光阻厚度、軟烤程度、顯影條件等誤差不同而有所調整。

以步進機(Stepper)的方式曝光，由投影式演進的重複且步進(Step and repeat)，光罩圖案比例要大於轉移圖案，目前較常見為 4:1 或 5:1，Stepper 優點為所要轉移的縮小圖案之解析度較好。不需光罩之直寫法：不需光罩，直接將圖形寫於覆有光阻之晶片上，其光源有電子束、聚焦離子束與雷射光等。

曝光是以光為媒介進行光罩圖案轉移，通常是以汞弧燈管所產生的紫外光(UV light)作為執行曝光之光源。目前常見的光源波長：G-line (436nm)、I-line (365nm)、DUV (248nm)。微影曝光技術上，曝光機所提供的解析度與光源波長 λ 之關係式為解析度：
$$R = \frac{KI \times \pi}{NA}$$
其中 KI 為與光阻材料及製程相關之常數，NA 為曝光機鏡片系統的數值孔隙(Numerical aperture)之數值。由此方程式，可了解使用的光源波長愈短，則解析能力就愈小。

3.4.4 曝後烤 (Post Exposure Bake)

曝後烤主要目的是為了消除駐波(Standing wave)。曝光進行時，部份沒有被阻劑吸收的光，從光阻劑反射到晶圓表面，與入射光產生建設性(Constructive)及破壞性(Destructive)干涉，形成駐波，造成阻劑接受曝光的強度不均勻，顯影後阻劑側面形成波紋狀，易影響後續製程。利用曝後烤使光阻劑之結構重新排列，以消除駐波現象。

3.4.5 顯影 (Development)

顯影主要目的是將光纖表面光阻層已曝光過的區域，利用中和反應加以清除。實驗中使用的為正光阻，光阻劑經曝光後，因化學反應改變原有化學性質，使照射區及非照射區在顯影液中的溶解速率產生極大差別，顯影液將易溶的區域溶解洗去達成顯影目的。調整顯影的參數為顯影時間、顯影劑的濃度及溫度等。顯影的方法以浸泡式顯影，其操作容易，成本低但顯影液的濃度易改變，需常調整顯影時間、顯影劑濃度及溫度等，使曝光後的光阻能有效的被溶解洗去。

3.4.6 硬烤 (Hard Bake)

硬烤目的在於去除阻劑內部的顯影液及清洗液，促進阻劑化學反應，以增加光阻對熱之穩定性及底層物質之附著力，提高抗蝕刻，可固化輪廓與線幅，減少小孔洞的發生並增加平坦度，能確實發揮保護

圖形之功能。硬烤溫度為 120°C 到 200°C 之間，時間為數分到數十分鐘，依不同光阻種類及厚度作調整。

3.5 光纖蝕刻

纖核模態光場主要侷限於纖核中區域，且在纖殼中快速衰減，纖殼半徑比纖核半徑大很多時，纖殼半徑對纖核模態之有效折射率不會有明顯作用。因此利用氫氟酸蝕刻技術將光纖纖殼直徑變細，增加外界物質對於纖核及纖殼層的影響之折射率變化量，以增加光纖光柵反射波長飄移量，進而提升感測靈敏度。

首先將微影後之光柵部分置於鐵氟龍器皿底部，滴入濃度 25% 氫氟酸(HF)約 18 分鐘，蝕刻結束之後，使用丙酮清洗殘留之光阻劑，即完成空氣間隙型長週期光纖光柵。

第四章 光纖感測實驗與分析

本實驗使用的光纖為多模光纖，因為酸鹼水溶液對無拋光、無蝕刻光柵的感測效果極不明顯，為了增強感測效果，運用光纖側面拋光、光纖微影、光纖蝕刻技術，完成空氣間隙型長週期光纖光柵感測元件。此光纖纖核光柵折射率分佈為光纖纖核折射率與暴露於空氣之中的折射率所組成，而暴露於空氣中之纖核直接接觸待測物，使光柵有效折射率的變化而導致光柵損失峰波長飄移與反射能量的改變，此方法可提升感測靈敏度，將以增加光柵穿透波長變化量。

以多模光纖空氣間隙型長週期光纖光柵為實驗架構主體之 pH 感測器，利用待測物折射率改變光柵之有效折射率，造成穿透頻譜飄移，利用此原理作為感測折射率變化的依據。光纖經側面拋光後，在拋光面微影出空氣間隙型長週期光柵並以蝕刻完成長週期光纖光柵感測元件，此方法可用來增加外界物質折射率對纖核及纖殼之折射率變化的影響，故以此做為光纖感測元件。

在實驗中，以光纖感測元件量測不同 pH 值之鹽酸(HCl)及氫氧化鈉(NaOH)水溶液，觀察光柵損失峰波長之飄移，紀錄數據並作成波長飄移與 pH 值之關係圖。

4.1 實驗架構

本篇實驗使用之光纖為多模光纖(62.5 μm)，將光纖進行側面拋光，在拋光面上微影出週期為 500 μm 的光柵，光柵長度為 3 cm，並經氫氟酸蝕刻後，完成空氣間隙型長週期光纖光柵感測元件。

在設置實驗架構前，將空氣間隙型長週期光纖光柵感測元件以酒精擦拭清洗，確保實驗的準確性。使用光源以能量較強之 ASE 光源作為主要輸入光源。將清洗後之空氣間隙型長週期光纖光柵，一端熔接至 ASE 光源(頻寬為 1530~1610 nm)，另一端熔接至光頻譜分析儀(OSA)上，在光柵區滴上待測酸鹼溶液並進行即時量測。如圖 4-1 所示。

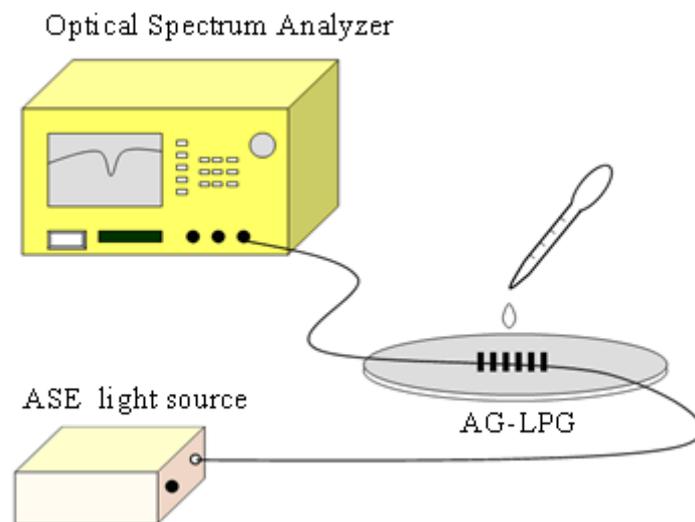


圖 4-1 pH 感測器之實驗架構圖

4.2 酸鹼溶液調配方式

待測之酸性溶液以鹽酸(HCl)與去離子水稀釋調配而成，鹼性溶液以氫氧化鈉(NaOH)與去離子水稀釋調配而成，並以酸鹼度計(SUNTEX TS-1,如圖 4-2)檢查調配出來之 pH 值準確度。所調配的酸鹼溶液 pH 值依序為 1、2、4、6、7、8、10、12、14，在實驗進行中，量測順序以 pH 值為 7 的優先，再依序增強酸性之強度達 pH 值為 1，在測量每一次待測溶液之 pH 值時，將感測元件以清水洗淨，確保實驗準確度。



圖 4-2 手提式酸鹼度計

4.3 光纖感測元件對酸鹼溶液之量測

使用空氣間隙型長週期光纖光柵為感測元件，空氣間隙型光纖光柵折射率分佈為光纖纖核折射率與暴露於空氣之中的折射率所組成，而暴露於空氣之中光柵直接接觸待測溶液，使光柵有效折射率的

變化而導致光柵中心波長偏移與反射能量的改變，此方法可提供高靈敏度感測，將以增加光柵穿透波長變化量，提昇感測靈敏度。

4.4 實驗結果與分析

在光纖中光傳播模態為高階模態時，由圖 4-3 酸性液體 pH 值與波長飄移關係圖所示，當 pH 值為 1 增加到 pH 值為 7 時之酸性溶液時，長週期損失峰波長由 1570.4 nm 飄移至 1565.9 nm，其靈敏度約為 -0.72 nm/pH，線性度約為 0.9913；而如圖 4-4 鹼性溶液 pH 值與波長飄移之關係圖所示，當 pH 值為 7 增加到 pH 值為 14 時，損失峰波長由 1565.9 nm 飄移至 1573.1 nm，其靈敏度約為 1.031 nm/pH，線性度約為 0.9502，由圖 4-3 及 4-4 比較可知，以 pH 等於 7 為中心點，不論是往 pH 值越高或越低，即不論往越鹼或越酸的溶液，皆往長波長飄移，而鹼性溶液的靈敏度較酸性溶液的靈敏度高。

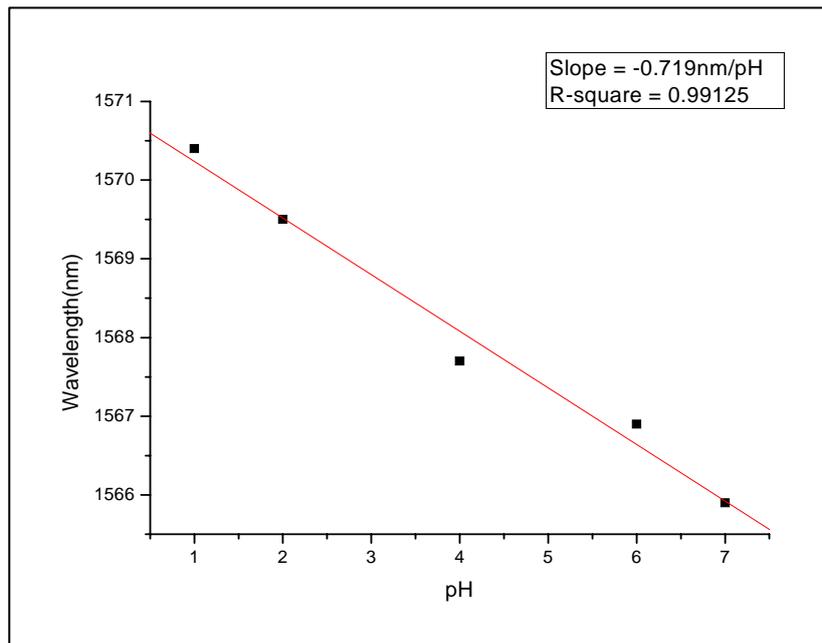


圖 4-3 酸性溶液 pH 值與波長飄移關係圖

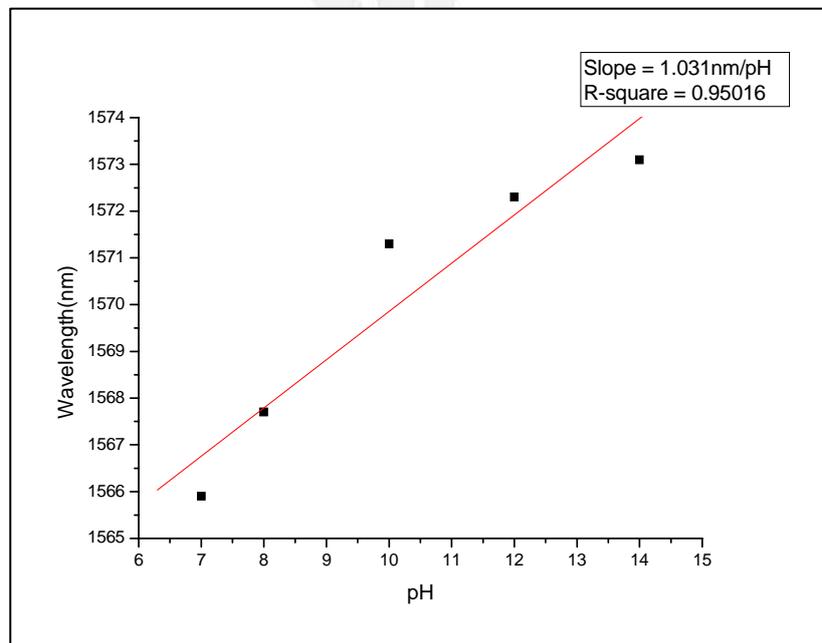


圖 4-4 鹼性溶液 pH 值與波長飄移關係圖

在光纖中光傳播模態為低階模態時，由圖 4-5 酸性液體 pH 值與波長飄移關係圖所示，當 pH 值為 1 增加到 pH 值為 7 時之酸性溶液時，長週期損失峰波長由 1554.8 nm 飄移至 1553.3 nm，其靈敏度為 -0.219 nm/pH，線性度為 0.96858；而如圖 4-6 鹼性溶液 pH 值與波長飄移之關係圖所示，當 pH 值為 7 增加到 pH 值為 14 時，損失峰波長由 1553.3 nm 飄移至 1555.1 nm，其靈敏度為 0.248 nm/pH，線性度為 0.99464。比較圖 4-5 和圖 4-6 之結果，和圖 4-3 及圖 4-4 具有相同趨勢，量測酸鹼溶液之 pH 值，當越酸或越鹼時，結果皆會往長波長範圍飄移，而鹼性溶液的靈敏度較酸性溶液的靈敏度高。

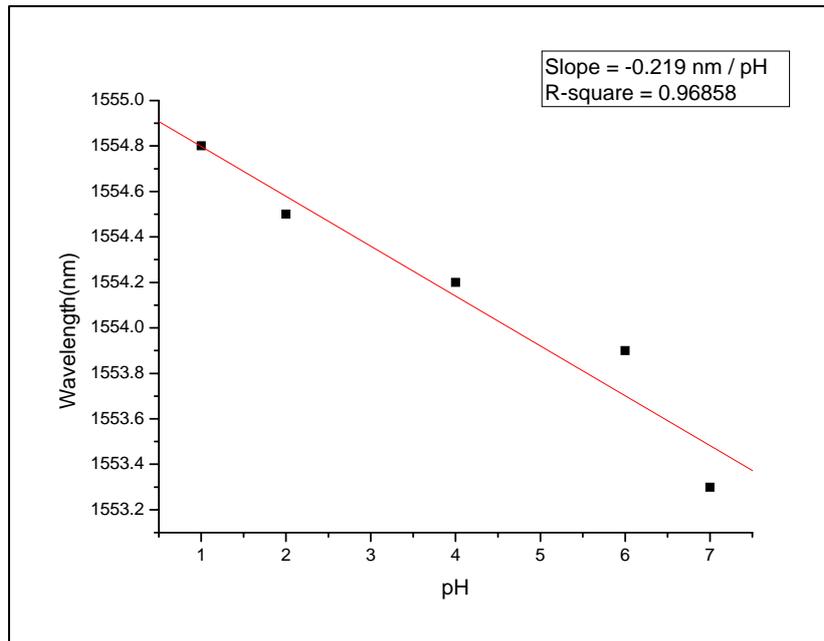


圖 4-5 酸性溶液 pH 值與波長飄移關係圖

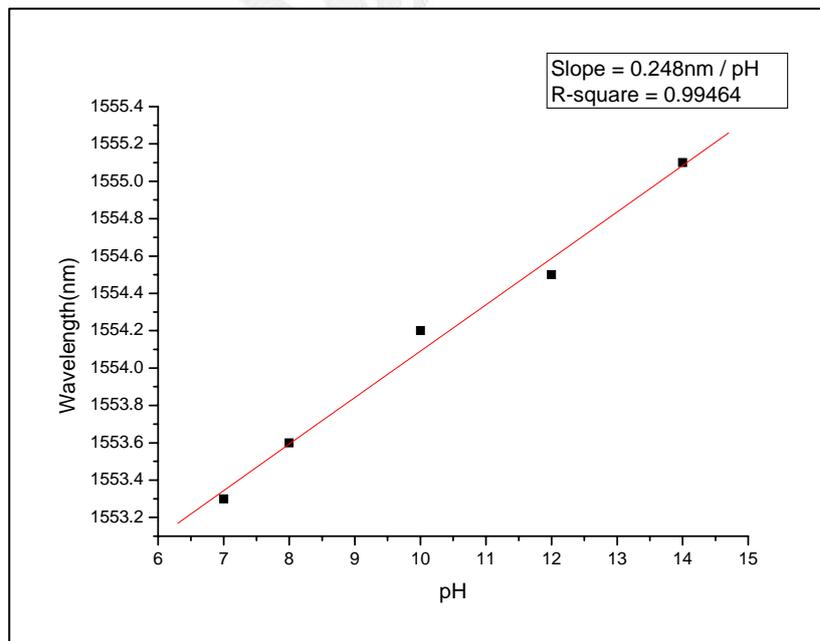


圖 4-6 鹼性溶液 pH 值與波長飄移關係圖

從高階模態與低階模態的實驗結果得知，高階模態靈敏度高於低階模態，依 3-2 式可得證，實驗結果與理論相符合。

由於使用阿貝折射儀無法準確測量出酸鹼溶液之折射率，由實驗結果顯示，以中性 pH=7 為中心點，待測液強度越酸或越鹼，其損失峰波長越往長波長飄移，利用式子 3-1，當液體折射率上升時， $n_{eff-core}$ 及 $n_{eff-cladding}^n$ 皆有變化，因多模 AG-LPG 之纖殼部份經過較多的結構破壞，影響 $n_{eff-cladding}^n$ 變化較大，故將 $n_{eff-core}(\lambda)$ 及光柵週期 Λ 視為固定項。當損失峰波長往長波長飄移時，表示 $n_{eff-cladding}^n(\lambda)$ 項越小。依式子 3-1 及實驗結果推斷，溶液越酸或越鹼時，其折射率越小，並與損失波長呈線性關係。

第五章 結論與未來展望

本研究已初期研究出以多模光纖空氣間隙型長週期光纖光柵為主體之 pH 感測器，在高階模態時，酸性液體靈敏度為 -0.72 nm/pH ，鹼性溶液靈敏度為 1.031 nm/pH ；低階模態時，酸性液體靈敏度為 -0.219 nm/pH ，鹼性溶液靈敏度為 0.248 nm/pH 。以感測結果而言，對鹼性溶液之靈敏度較酸性溶液高；高階模態之靈敏度較低階模態高。

未來將希望可於不同種類的光纖上寫製長週期光纖光柵，如雙折射光纖(birefringence fiber)[11]上完成長週期光纖光柵的寫製，以感測液體折射率或是酸鹼液體 pH 值的變化。在雙折射光纖的橫截 xy 面上，其 x 軸分量之折射率與 y 軸分量之折射率不同，因此相較於傳統的單模光纖，雙折射光纖之長週期光纖光柵的損失峰會有 x 極化及 y 極化的兩不同波長的損失峰，可深入探討此種雙折射率光纖光柵之光學特性，或許可用於同時量測兩種不同之參數，將來可朝此方向邁進。

參考文獻

- [1] J. Lin, "Recent development and applications of optical and fiber-optic pH sensors," *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 19, No. 9, pp. 541-552, 2000.
- [2] Z. C. Zhuo, B. S. Hama, "A temperature-insensitive strain sensor using a fiber Bragg grating," *Optical Fiber Technology*, Vol. 15, pp. 442-444, 2009.
- [3] Y. Wang, W. Jin, D. N. Wang, "Unique temperature sensing characteristics of CO₂-laser-notched long-period fiber gratings," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 47, pp.1044-1048, 2009.
- [4] R. M. Wynne, B. Barabadi, K. J. Creedon, A. Ortega, "Sub-Minute Response Time of a Hollow-Core Photonic Bandgap Fiber Gas Sensor," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 11, pp.1590-1596, 2009.
- [5] T. Zhu, Y. J. Rao, J. L. Wang, Y. Song, "A Highly Sensitive Fiber-Optic Refractive Index Sensor Based on an Edge-Written Long-Period Fiber Grating," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, No. 24, pp.1946-1948, 2007.
- [6] F. J. Arregui, I. R. Matías, K. L. Cooper, R. O. Claus, "Simultaneous Measurement of Humidity and Temperature by Combining a Reflective Intensity-Based Optical Fiber Sensor and a Fiber Bragg Grating," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 2, No. 5, pp.482-487, 2002.
- [7] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filter," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 1, pp.58-65, 1996.
- [8] K. O. Hill, G. Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp.1263-1276, 1997.
- [9] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides : Application to Reflection Filter fabrication," *Applied*

Physical Letters, Vol. 32, pp. 647-649, 1978.

[10] S. M. Tseng, and C. L. Chen, "Side-polished fibers," Applied Optics, Vol. 31, No. 18, pp. 3438-3447, 1992.

[11] Y. Zhou, K. Gao, R. Huang, R. Qu, and Z. Fang, "Temperature and Stress Tuning Characteristics of Long-Period Gratings Imprinted in Panda Fiber," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 12, pp.1728-1730, 2003.

