

## 側壓式布拉格光纖光柵壓力感測器於水位量測之應用

申浩然\* 傅明宇\*\* 劉文豐\* 陳子江\*\*\*

\*逢甲大學電機工程學系

\*\*空軍官校航空電子工程學系

\*\*\*國防大學中正理工學院電機工程學系

### 摘 要

本文乃利用布拉格光纖光柵為壓力感測元件，將其有效封裝於一側面受壓的聚合物機構內，完成一側壓式壓力感測器，性能可以比裸光纖光柵獲得高靈敏度之壓力感測效果，壓力量測靈敏度大為提升。藉由水壓力的量測原理之應用，實施水位量測的實際製作與實驗。實驗結果顯示此型光纖光柵側壓式壓力感測器確實具備有效執行壓力量測的功能，且以其高度壓力感測的靈敏度，廣泛的除了在水位量測的應用上可發揮可觀的量測能力外，在水下載具潛水深度的量測應用上亦具有高度的潛力。

**關鍵詞：**布拉格光纖光柵，壓力感測器，聚合物

## Lateral Pressure Sensor Based on Fiber Bragg Grating for Liquid Level Measurement

Hao-Jan Sheng\*, Ming-Yue Fu\*\*, Wen-Fung Liu\*, and Tzu-Chiang Chen\*\*\*

\*Department of Electrical Engineering, Feng Chia University

\*\* Department of Avionics Engineering, Chinese Air Force Academy

\*\*\*Department of Electrical Engineering, Chung Cheng Institute of Technology National Defense University

### ABSTRACT

In this paper, we propose a lateral pressure sensor based on the use of fiber Bragg grating (FBG) encapsulated in a polymer-filled metal cylinder. The sensitivity of lateral pressure sensor is significantly improved compared to a bare FBG. The experimental results show that the sensor has the great performance for measuring pressure. By the principles for hydraulic measurement, the sensor can be applied in measuring liquid level. Beside, this sensor has the potential to be applied for the measurement of medium pressure and underwater depth.

**Keywords:** fiber Bragg grating, fiber sensor, polymer

## 一、前言

近年來，由於光電技術的蓬勃發展，光電工業成為本世紀的新寵，光纖在通訊上扮演了極重要的媒介，因其具有質量輕、耐久性、不易被腐蝕和不受干擾的優點，而且其具有低損耗高效能的傳輸能力，現在已經被廣泛運用在各個通訊網路裡。利用光纖光柵完成之感測器，近十年來亦已經成為在感測器領域上最受重視的理論之一。相較於傳統機電式的感測器，由於其纖細質輕、易於多工使用、且作為感測依據的布拉格反射波長不會受到環境因素的影響，因此可應用的範圍十分廣泛，如：橋樑、水壩、電力工業等方面的非破壞性結構感測，以及醫療、環保等方面。民生與國防武器系統屬於動態的大型載台如船艇、飛機等有關其操作系統中壓力、溫度、流量等等之感測，目前均以電式感測器為主。為了有效降低電磁波、電磁脈衝、環境溫度、機械衝擊等等因素對其感測功能的影響，甚而更考量避免因感測器的使用而對某些特殊環境造成安全上的危害(如電瓶艙內使用具有用於感測信號轉換的高溫電子元件之感測器)，感測器於結構上均採取許多保護措施，故從外觀上，大多顯得非常厚重，且體積也因而加大，因此不但增加製造成本，而且減少工作場所裡可運用的空間。

工業生產與大型載台如船艇、飛機中的操作所需的監測系統中，壓力感測器屬重要的元件之一，在感測器的使用數量上佔很高的比例。此外，由壓力感測器的充份運用，亦可以達成如氣體、液體的流量及液體液面的高度等等之量測。因此，進行光纖光柵感測器的研究，乃是步向全光路監測系統實用化的一大重點。由文獻可知，目前已有許多學者正從事以光纖光柵為骨幹之感測器研究，其中以壓力感測器的研究為例，但由於裸光纖光柵的對壓力感測的靈敏度有限，為達實用目的，必須透過結構封裝的技術，將壓力轉為軸向對光纖光柵最大的有效拉伸(中心波長往長波長移動)或壓縮(中心波長往短波長移動)的應力。在短短的幾年內，光纖光柵壓力感測器的靈敏度一再增加，由 $-1.98 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ 至 $-3.41 \times 10^{-3} \text{MPa}^{-1}$ 增加了1720倍[1-4]，顯示其研究無不朝向實用化為目標，但其機制乃是將應力轉為壓縮模

式，在製作壓力感測器時須先將光纖光柵預拉將反射波長往長波長方向偏移至一範圍，因此可量測範圍最大的就受限於這預拉偏移的範圍。因此，本文利用布拉格光纖光柵為壓力感測元件，將其有效封裝於一側面受壓的聚合物機構內，而將應力轉為拉伸模式，則無壓縮模式的限制，可量測範圍則視光纖光柵本身材料的抗張強度可承受的最大應力。性能可以比裸光纖光柵獲得高靈敏度之壓力感測效果，壓力量測靈敏度大為提升至 $9.07 \times 10^{-2} \text{MPa}^{-1}$ 。另以側壓式光纖光柵壓力感測的方式來運用於水位的量測，可使優越的壓力感測器靈敏度能有效加以利用。

## 二、感測器的結構

裸光纖光柵壓力感測器等四種壓力感測器[1]-[4]的特色是布拉格光纖光柵的中心波長隨著壓力的增加而向短波長的方向偏移，換句話說，布拉格光纖光柵的中心波長偏移是與壓力的變化呈線性負斜率關係。而其工作的機制是以布拉格光纖光柵受壓力的壓縮來達到量測的目的。

側壓式布拉格光纖光柵壓力感測器的工作機制恰與前面四種壓力感測器相反。在運用上，不需要較強的反射光時，短長度光纖光柵(短光纖光柵)即可用於製作此型壓力感測器，若為了高反射強度的需求或其他如有短光柵獲得的問題，採用長度較長的光纖光柵(長光纖光柵)亦可完成此型感測器的製作。我們亦可視需要，以調整感測器尺寸的方式來改變其感測的靈敏度，且結合簡單的光波長解調機制就可以直接使用。

布拉格光纖光柵側壓式壓力感測器是以圓柱型空心鋁材為外殼。其內部包含布拉格光纖光柵，以及半滿且做為光纖光柵外觀的聚合物，且光纖光柵完全包覆於聚合物內，結構如圖1。

於聚合物的頂部有一中心與布拉格光纖光柵一端接著的圓型硬質平板。鋁質外殼兩側各有一個圓型開口，其內部所充填的聚合物即在此接受外界的壓力。布拉格光纖光柵則透過鋁質外殼底部中心的小孔，以光纖與外連接。

當感測器接受到外界壓力或將它浸入水中時，感測器開口處的聚合物受到壓力的壓縮，因而產生之橫向應變將使埋於其中的布拉

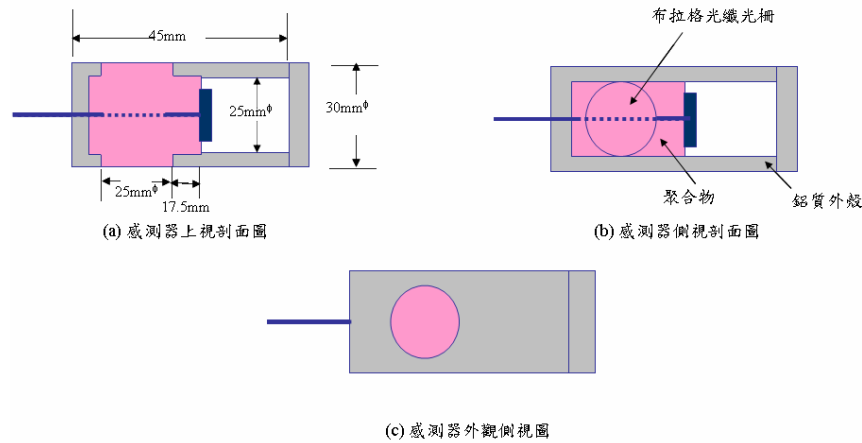


圖 1. 布拉格光纖光柵側壓式壓力感測器構造示意圖。

格光纖光柵獲得縱向應力，進而產生縱向應變。

### 三、理論分析

#### 3.1 三維應力與應變

三維空間中，設有一材質均勻的物體，它的彈性模數為  $E$ ，卜松比為  $\nu$ ，受  $x$ 、 $y$ 、 $z$  各方向應力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  的影響，而產生之各方向應變如下[5]：

$$\varepsilon_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]1/E \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]1/E \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]1/E \quad (3)$$

#### 3.2 布拉格光纖光柵中心波長位移與應變的關係

光纖光柵中光傳播的理論已經有許多方法被提出來使用[6]，其中一種耦合模態理論[7]，由於本身的簡單性，因此常用來作為光纖光柵的理論計算與分析之基礎，經由此法可以求得光纖光柵不同模態的耦合量，像是基本

正向傳導模與反向傳導模或是纖殼模態 (cladding mode) 間的耦合特性，基於理論計算，可以得知光纖光柵的光譜特性，再經由估計纖核的週期折射率變化，可以得知光纖光柵在實際量測時的光學特性。

以 UV(紫外光)經相位光罩技術製程的光纖光柵，在寫製的過程中，纖殼部分幾乎被照射光纖的紫外光所穿透，而由於纖核摻雜鍍或其他物質，會使得紫外光被纖核所吸收，因此於纖核中產生週期性的折射率變化，而纖核的折射率  $n = n_0 + \Delta n(z)$  [8]，其中  $n_0$  為纖核平均有效折射率， $\Delta n(z)$  為週期性的折射率調變量。若光柵沿著  $z$  方向週期性的均勻調變，折射率調變量可用複利葉級數的形式來描述，由於利於簡化計算，同時誤差亦在容忍範圍內，通常只選取複利葉級數的前兩項：

$$\Delta n(z) = \Delta n_{eff}(z) + \Delta n_{mod} \cos(Kz + \phi) \quad (4)$$

其中  $K = 2\pi / \Lambda$  為光柵的波向量， $\Lambda$  是光柵的週期， $\Delta n_{eff}$  為有效平均折射率調變量， $\Delta n_{mod}$  為折射率調變量之振幅， $\phi$  為相位角。當一個正向傳導模態入射於光柵內時，在到達每一面光柵時，會使一小部份的光反射，若每一光柵的反射波均在特定波長之同一相位，則此特定波長稱之為布拉格波長  $\lambda_B$  (Bragg wavelength) [8]，與光柵週期之關係是為：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (5)$$

藉由上式，我們可以獲得以下關係式：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (6)$$

現假設有一光纖光柵，它的軸向長度為  $L$ ，截面積為  $a$ ，且於三維空間中，它的軸向設為  $z$  方向。由於光柵的折射率變化週期  $\Lambda$  延著光纖縱軸的各部位均相同，所以當有一  $z$  方向的應力發生時，光柵折射率變化週期的變化量  $\Delta\Lambda$  與光纖軸向應變  $\varepsilon_z$  的關係為：

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (7)$$

根據光應變效應 (strain-optic effect)，折射率變量與應變向量間矩陣關係式為[6]：

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^6 p_{ij} S_j \quad (8)$$

其中  $S_j$  為應變向量， $p_{ij}$  為光應變係數，而所有下標均代表標準之矩陣元素位置碼。當光纖光柵遭受軸向( $z$  方向)的應力時，應變向量矩陣為：

$$S_j = \begin{bmatrix} -\nu\varepsilon \\ -\nu\varepsilon \\ \varepsilon \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

於一個同質且均勻的介質中，光應變係數矩陣中只有兩個數值，即  $p_{11}$  與  $p_{12}$ ，且延  $x, y$  方向 (即  $i=1,2$ ) 之折射率變化情形為：

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{1,2} = \varepsilon(1-\nu)p_{12} - (\nu\varepsilon)p_{11} \quad (10)$$

又

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = -2\left(\frac{1}{n^3}\right)(\Delta n) \quad (11)$$

因此，光向  $z$  方向行進時所看到的折射率變化為：

$$\Delta n = -\frac{1}{2}n^3\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{1,2} = -\frac{1}{2}n^3(\varepsilon(1-\nu)p_{12} - (\nu\varepsilon)p_{11}) \quad (12)$$

因而有

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n}{n} &= -\frac{1}{2}n^2(\varepsilon(1-\nu)p_{12} - (\nu\varepsilon)p_{11}) \\ &= -\frac{1}{2}n^2(\varepsilon p_{12} - \varepsilon\nu(p_{11} + p_{12})) \end{aligned} \quad (13)$$

最後以式 (7) 與 (13) 代入式 (6) 可得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon_z \quad (14)$$

$$P_e = \left(n^2/2\right)[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (15)$$

### 3.3 感測器光柵中心波長與壓力的關係

側壓式布拉格光纖光柵壓力感測器之光纖光柵係以聚合物為外襯，且位於聚合物的中心。首先考量三維空間中，聚合物的一向( $y$  方向) 受壓力或應力的情形，如圖 2。

當環境中僅有  $y$  方向存在壓力，且壓力為  $P$  時，聚合物受力的情況可以運用式(1)-(3)，設定其中  $\sigma_y=p$ 、 $\sigma_x=\sigma_z=0$ ， $\nu$  與  $E$  分別為聚合物的卜松比和彈性模數，則可以得到：

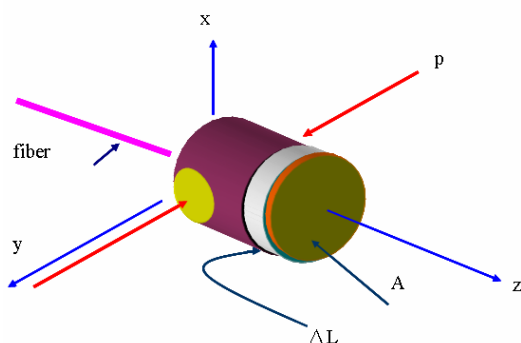


圖 2. 側壓式感測器內部聚合物軸向應變產生示意圖。

$$\varepsilon_x = -\nu P \frac{1}{E} \quad (16)$$

$$\varepsilon_y = P \frac{1}{E} \quad (17)$$

$$\varepsilon_z = -\nu P \frac{1}{E} \quad (18)$$

也就是當有 y 方向的壓力 P 產生時，將可分別於 x、y、z 方向產生  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  的應變。

將彈性模數為  $E_{fiber}$  且截面積為 a 的光纖光柵沿延著 z 軸埋設置於此聚合物的中心軸上，且光纖光柵的一端接著於面積與聚合物截面積相同為 A 且平貼於聚合物頂面的一個圓型硬質板的中心點上，另一端則固定於聚合物底面的中心點上。

當 y 方向的 P 產生時，在聚合物的頂面圓型硬質板上會產生 z 方向且大小為  $\nu P \times A (F_R)$  的力，此力又同時作用於光纖光柵與聚合物上，換言之也就是  $F_R = F_{fiber} + F_{polymer}$ ，而  $F_{fiber} = \varepsilon_{fiber} \times a \times E_{fiber}$ ，且  $F_{polymer} = \varepsilon_{polymer} \times (A - a) \times E_{polymer}$ 。當感測器受壓時，聚合物與 FBG 的軸向應變相同，即  $\varepsilon_z = \varepsilon_{fiber} = \varepsilon_{polymer}$ ，所以有

$$\nu P \times A = \varepsilon_z [a \times E_{fiber} + (A - a)E_{polymer}] \quad (19)$$

因此

$$\varepsilon_z = \frac{-\nu P A}{aE_{fiber} + (A - a)E_{polymer}} \quad (20)$$

若此聚合物是存在於一如圖 3 的鋁質外殼中，在 y 方向受到壓力時，則除了 x 方向的  $\varepsilon_x$  因外殼的被覆而不會發生外，y 與 z 方向的應變仍為  $\varepsilon_y, \varepsilon_z$ 。同時裝置結構使得光纖會受到 y 方向的壓縮應力及 z 方向的拉伸應力，但其受到 y 方向的壓縮應力影響非常小可以忽略不計[1]，光纖的光傳播特性幾乎只有受到 z 方向拉伸應力的影響，光纖光柵的應變為  $\varepsilon_x = 0, \varepsilon_y \approx 0, \varepsilon_z \neq 0$ 。因此；側壓式布拉格光纖光柵壓力感測器光柵中心波長與壓力的關係可由式(14)與(20)得到：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \nu_e) \frac{-\nu P A}{aE_{fiber} + (A - a)E_{polymer}} \quad (21)$$

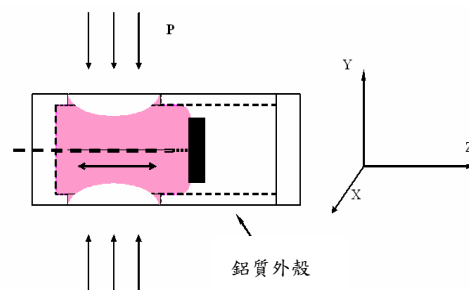


圖 3. 布拉格光纖光柵側壓式壓力感測器受壓示意圖。

#### 四、感測器之製作

布拉格光纖光柵側壓式壓力感測器之結構如圖 1。首先以直徑為 30mm 鋁質圓棒車製感測器之封裝外殼，外殼封閉之一端中心鑽有直徑 0.5mm 的小孔；自開口之一端量測，其內部直徑 25mm、長 45mm，殼厚 2.5mm。以距外殼封閉端 22.5mm 處為中心，於外殼兩側對稱位置各鑽一直徑 25mm 的壓力感測孔。將車製完成外殼的內部均平塗一薄層家用之 silicon sealing rubber，做為 RTV 矽膠(主要

特性如表 1) 灌注後之底膠(primer)；兩側的壓力感測孔以膠紙平整封貼，並於外殼內部軸心設置一條光纖後，即執行灌膠，使膠面與外殼開口距離 17.5mm。俟膠硬化後，將以 Fibrecore Co. ps-1250/1500 光纖之寫製完成的布拉格光纖光柵(光柵中心波長 1540nm，長度 25mm)，與矽膠內的光纖置換。於感測器內部矽膠面處，完成圓型鋁質平板與光纖光柵一端的膠合。於外殼封閉端之小孔處，以 epoxy 將光纖光柵之另一端固定。以直徑 30 mm，厚 5mm 之鋁質圓板將開口端完全膠封。將壓力感測口之膠紙祛除後，即完成本實驗之拉伸式壓力感測器之製作，並將於下節實際驗證於水位量測之應用。

表 1. 感測器實驗用之 RTV 矽膠主要特性表。

性 質	規 格
楊氏模數 (彈性模數)	$1.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
卜松比	0.4
抗拉	$28 \text{ Kgf/cm}^2$
抗撕	$15 \text{ Kgf/cm}^2$
硬化時間	25 min
黏度	45000CPS
延伸率	350 %

## 五、實驗結果

將側壓式光纖光柵壓力感測器應用於水位量測之實驗架構如圖 4 所示，包含下列幾項裝置及儀器。

1. 側壓式布拉格光纖光柵壓力感測器。
2. 光源。
3. 光譜分析儀(OSA)。
4.  $15\text{cm}^2 \times 15\text{cm}$  壓力櫃一個，含水壓接頭及壓力表金屬接頭。
5. 0-2.5 BAR 壓力表一只，德國 HAENNI 公司製。

6. 50:50 光纖耦合器一組。
7. 高度 6m 之水槽一個，附水位刻度表。

首先，將所有測試儀具及側壓式光纖光柵

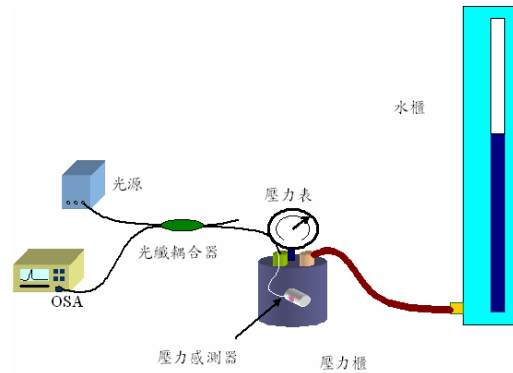


圖 4. 側壓式布拉格光纖光柵感測器量測水位與波長關係實驗架構圖。

壓力感測器按圖 4 安裝與連接。水壓式均勻型光纖光柵水位計之光信號導引光纖完成填料水密處，且壓力櫃內盛以清水後，將水壓式均勻型光纖光柵水位計置入壓力櫃並蓋上壓力櫃之上蓋。由水櫃內之水位高度以每 50mm 一個階段提供水壓，並於光譜分析儀分別記錄每一階段水壓相對應之水位計中光纖光柵的反射中心波長。實驗時主要先於光路系統中，求得自製之側壓式光纖光柵感測器中光柵反射波長的偏移與水位間變化間的關係，而此實驗所用的側壓式光纖光柵感測器中，與矽膠緊貼的圓型硬質平板的直徑為 22mm(截面積為  $121 \times \pi \text{ mm}^2$ )。水位自水櫃之水位刻度表高度 0 mm 起，以每 50mm 逐步升高，直至 4m 止。過程中實際量測並記錄水位計的受壓力、水位高度與光纖光柵的反射中心波長的偏移。當此感測器視為壓力計時，當壓力自 0 MPa 升到 0.04MPa 時，光纖光柵的反射光中心波長由原來的 1540nm 偏移至 1545.6nm。此種壓力感測器的機能可在原來的光柵反射中心波長為 1540nm 的情況下，每增加 0.01MPa 的壓力，將會以 1.396nm 的增幅向上偏移如圖 5；換言之，其對壓力量測的靈敏度為  $9.07 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ ，如圖 6。

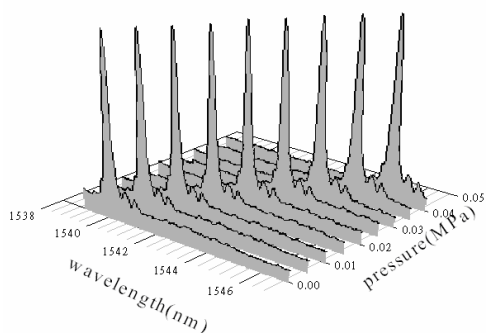


圖 5. 側壓式布拉格光纖光柵感測器波長光譜與壓力關係圖。

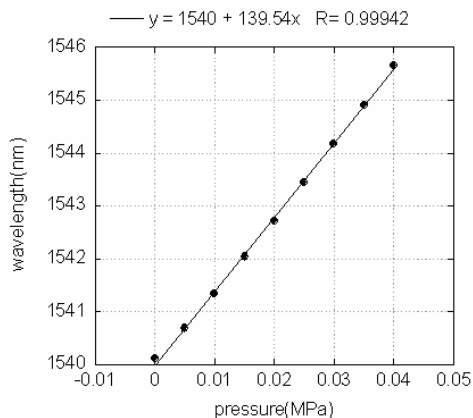


圖 6. 側壓式布拉格光纖光柵感測器壓力與波長關係圖。

然而根據 (21) 式，以  $\lambda_B=1540\text{nm}$ ， $P_e=0.22$ ， $\nu=0.4$ ， $A=(11)^2 \times \pi \text{ mm}^2$ ， $a=(0.0625)^2 \times \pi \text{ mm}^2$ ， $E_{\text{fiber}}=7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ， $P=0.1 \text{ MPa}(=10^5/\text{m}^2)$  等數值代入可得靈敏度為  $7.69 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ 。實驗值較理論值為高的原因與側壓式長光纖光柵壓力感測器相同，即是經過封裝後的矽膠，

除了位於壓力感測口與圓型平板底部外，其餘均與鋁質外殼內壁緊密貼結，所以當感測器受壓力的作用時，與外殼壁接觸的矽膠因受牽制而不會產生應變，但兩個感測孔的實際受壓方向並非只有在一座標方向，因此矽膠仍然可以獲得放大的軸向應力，感測器中圓型平板係完全平貼於矽膠之外，完全不受外殼壁的活動限制，因此會有光纖光柵實際受到的應力或應變比理論值大的情形。由實驗證明此機構可獲得線性且靈敏度更佳的壓力感測能力。當此感測器視為水位計時，它的靈敏度為  $8.92 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ，如圖 7。

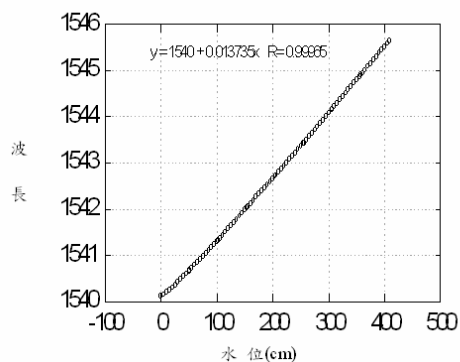


圖 7. 側壓式布拉格光纖光柵感測器實驗水位與波長關係圖。

## 六、結論

雖然因裸光纖光柵的對壓力感測的靈敏度有限，為達實用目的，已有一些將光纖光柵做特殊封裝，使得壓力感測的靈敏度增大的相關研究。然而，目前的研究中，均依壓力存在時的壓縮特性，以光纖光柵的軸向壓縮機制為主。本文中已證明，藉著使光纖光柵產生軸向拉的封裝，可以達成靈敏度高達  $9.07 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$  的壓力感測效果。並藉由水壓力的量測原理之應用，實施水量測的實際製作與實驗。實驗結果顯示此型光纖光柵側壓式壓力

感測器確實具備有效執行壓力量測的功能，且以其高度壓力感測的靈敏度，廣泛的除了在水位量測的應用上可發揮可觀的量測能力外，在水下載具潛水深度的量測應用上亦具有高度的潛力。

## 參考文獻

- [1] Xu M. G., Reekie L., Chow Y. T., and Dakin J. P., "Optical in-Fiber Grating High Pressure Sensor," *Electron, Lett.*, Vol. 29, pp. 398-399, 1993.
- [2] Xu M. G., Geiger H., and Dakin J. P., "Fiber Grating Pressure Sensor with Enhanced Sensitivity Using a Glass-bubble Housing," *Electron, Lett.*, Vol. 32, pp. 128-129, 1996.
- [3] Liu Y., Guo Z., Zhang Y., Chiang K. S., and Dong X., "Simultaneous Pressure and Temperature Measurement with Polymer-Coated Fiber Bragg Grating," *Electron, Lett.*, Vol. 36, pp. 564-566, 2000.
- [4] Zhang Y., Feng D., Liu Z., Guo Z., Dong X., Chiang K. S., and Beatrice Chu C. B., "High-Sensitivity Pressure Sensor Using a Shielded Polymer-Coated Fiber Grating," *Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13, pp. 618-619, 2001.
- [5] Hocker G. B., "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Applied optics*, Vol. 18, pp. 1445-1448, 1979.
- [6] Raman Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, BT Laboratories, Martlesham Heath Ipswich, United Kingdom, 1999.
- [7] Turan Redogan, "Fiber Grating Spectra," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, pp. 1277-1294, August, 1997.
- [8] Kenneth O. Hill and Gerald Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, pp. 1263-1276, August, 1997.