

光纖光柵壓力感測器之研發

學生：高聖傑

指導教授：黃安斌 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

本研究主要目的是研發使用光纖光柵做壓力感測器並應用於地下水壓之監測技術，使其成為兼具解析度與穩定度的監測系統。

地層中水壓的量測為監測系統中，極為重要的一項數據，水壓力的改變往往可作為地層變化的重要依據。但在深層土壤中使用傳統電子式水壓計有其困難性及高成本，這都會影響到量測的品質。光纖光柵感測器，具有體積小、不受電磁波干擾、可長距離傳輸訊號與可分佈式之優點。本研究所研發之光柵壓力感測器有兩種，分別為漸變式光柵壓力感測器與拉伸式光柵壓力感測器，漸變式感測器具有多功的特性；拉伸式感測器，具有構造簡單和體積小的優點，較不受空間限制的特性。

本論文包括以上兩種光柵壓力感測器之設計原理，並以彈性力學為理論探討感測器量測上的效能，與感測器之室內標定檢驗並與理論相比較。

關鍵字：光纖光柵、光纖光柵壓力感測器。

Development of An Optic Fiber Bragg Grating Pressure Sensor

Student : Sheng-Chiang Kao

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering

National Chiao-Tung University

Abstract

The objective of this research is to develop an optic fiber Bragg grating (FBG) pressure sensor that can be applied in the field for ground water monitoring. The sensor should have the resolution and stability required for the field applications. Water pressure/level can be an important part of the field monitoring system for purposes such as ground subsidence and slope stability. The use of conventional electronic pressure sensors can have drawbacks that relate to electronic devices. If properly designed, FBG sensors have the advantages of small size, light weight and immune to electromagnetic interference. This research develops two types of FBG pressure sensors. The first type modulates the pressure by chirping of FBG (the chirp sensor). The other design is based on uniform stretching of FBG (the stretch sensor). The chirp sensor has the potential of multi-purpose as it can be used a load cell or displacement sensor. The stretch sensor is compact. The thesis describes the design principles of the two FBG pressure sensors, predict the performance of the sensors based on linear elastic analysis of the sensor components. The developed sensors were tested in the laboratory, and the results were compared with the linear elastic analysis.

Keywords: optic fiber Bragg grating, fiber Bragg grating pressure sensor.

誌謝

在兩年的研究所生涯中，衷心感謝 黃安斌教授在這兩年的指導與照顧，使得本論文得以順利完成。老師治學態度與研究風範給學生莫大的啟迪，讓學生受益良多。口試期間承蒙 羅裕龍教授、秦中天博士提供的寶貴意見，使得本論文能進一步嚴謹與充實。

在學期間感謝研究室博士班的何彥德與李瑞廷學長，同門的超哥、傑大和維尼的幫忙與照顧，以及學弟們的鼎力相助，好友兼室友阿華、仁弘等生活上的扶持與切磋，期待未來能繼續地互相照應。

最後感謝父母養育栽培之恩及妹妹的精神上的支持，感謝婷的體諒與陪伴，使我能順利完成碩士學位，期許未來日子我們一同努力，一起成長。

謹以此論文獻給我摯愛的雙親，家人及好友。



目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xi
第一章 緒論.....	12
1.1 前言.....	12
1.2 研究目的.....	12
1.3 內容架構.....	13
第二章 研究背景.....	15
2.1 水壓力感測系統.....	15
2.1.1 各式水壓力感測器.....	15
2.1.2 水壓力計的安裝.....	17
2.2 光纖基本介紹.....	19
2.2.1 光纖結構.....	19



2.2.2	光纖分類	19
2.2.3	光纖傳輸損失	21
2.3	光纖感測器簡介與分類	22
2.3.1	光纖感測器的種類及量測	22
2.3.2	基本光纖光學	24
2.4	光纖光柵感測器	26
2.4.1	光柵(grating)基本原理	26
2.4.2	光纖光柵的分類	27
2.4.3	光纖光柵波長飄移量的關係	29
2.5	光纖壓力感測器	32
2.5.1	光纖光柵式壓力感測器	32
2.5.2	漸變式光纖光柵感測器	34
2.5.3	光纖式壓力感測器	35
第三章	研究方法	56
3.1	光纖光柵壓力感測器的設計原理	56
3.1.1	漸變式光纖光柵壓力感測器	56
3.1.2	拉伸式光纖光柵壓力感測器	56
3.2	薄板理論	57

3.2 圓形薄板理論	60
3.2.1 圓板理論推導 (Circular Plate Theory)	61
3.2.2 圓板邊界條件的探討	63
3.3 光纖光柵壓力感測器的量測原理	65
3.3.1 漸變式光纖光柵壓力感測器	65
3.3.2 拉伸式光纖光柵壓力感測器	66
第四章 光纖光柵壓力感測器製作與標定	72
4.1 光纖光柵壓力感測器製作流程	72
4.1.1 漸變式光纖光柵壓力感測器	72
4.1.2 拉伸式光纖光柵壓力感測器	73
4.2 光纖壓力感測器標定程式與結果	74
4.2.1 實驗設備	74
4.2.2 壓力與應變之線性關係	75
4.2.3 溫度對於壓力感測器之影響	78
第五章 建議與結論	107
5.1 結論	107
5.2 建議	108
參考文獻	110

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖.....	14
圖 2-1 開口式水壓計示意圖.....	36
圖 2-2 Casagrande 開口式水壓計.....	37
圖 2-3 氣壓式水壓計感測示意圖.....	38
圖 2-4 線圈電子感測式水壓計.....	38
圖 2-5 振弦式水壓計式意圖.....	39
圖 2-6 光纖基本構造圖.....	39
圖 2-7 光纖依折射率分佈的分類.....	40
圖 2-8 光纖依傳輸模態分佈的分類.....	40
圖 2-9 光散射示意圖.....	41
圖 2-10 局部彎曲造成光損失.....	41
圖 2-11 光纖直徑的改變造成光損失.....	42
圖 2-12 光纖整體彎曲造成的光損失.....	42
圖 2-13 司乃耳定律示意圖.....	43
圖 2-14 光在光纖內傳播之路徑圖.....	43
圖 2-15 光纖光柵示意圖.....	44

圖 2-16 短週期光纖光柵示意圖.....	44
圖 2-17 長週期光纖光柵示意圖.....	45
圖 2-18 週期成連續遞增之漸變週期光纖光柵.....	45
圖 2-19 光脈衝經過漸變式光纖光柵被壓縮的情形.....	46
圖 2-20 漸變式光纖光柵受到入射波影響之反射頻譜.....	46
圖 2-21 裸光纖光柵壓力感測器.....	47
圖 2-22 以聚合物為外襯之光纖光柵壓力感測器.....	47
圖 2-23 球狀玻璃為外殼之光纖光柵壓力感測器.....	48
圖 2-24 以聚合物為內襯之光纖光柵壓力感測器.....	48
圖 2-25 側壓式壓力感測計.....	49
圖 2-26 不同聚合物封裝之光纖光柵壓力感測器.....	49
圖 2-27 微型光纖光柵壓力感測器.....	50
圖 2-28 雙光纖光柵懸臂式壓力感測器.....	50
圖 2-29 巴登管式光柵壓力感測器.....	51
圖 2-30 CFBG 感測器裝置示意圖.....	51
圖 2-31 CFBG 感測器的反射頻譜圖.....	52
圖 2-32 光纖光柵感測器之示意圖.....	52
圖 2-33 (a)、(b) 為光纖光柵發生漸變時之示意圖；(a)變形前 b)變形後.....	53

圖 2-34 光纖光柵發生漸變時的反射頻譜分析圖	53
圖 2-35 Fabry-Perot 壓力感測器示意圖	54
圖 3-1 漸變式壓力感測器示意圖	68
圖 3-2 拉伸式光纖光柵壓力感測器構造圖	68
圖 3-3 拉伸式光纖光柵壓力感測器構造示意圖	69
圖 3-4 平板上微小元素的內力示意圖	70
圖 3-5 圓板在極座標下示意圖	70
圖 3-6 極座標下內力的示意圖	71
圖 4-1 預拉裝置上與黏著光纖槽溝	80
圖 4-2 漸變式光纖光柵感測器的外殼	81
圖 4-3 漸變式光纖光柵感測器完成品	81
圖 4-4 拉伸式光纖光柵感測器的置於預拉裝置上	82
圖 4-5 拉伸式光纖光柵感測器的固定端上膠	83
圖 4-6 拉伸式光纖光柵感測器的固定端上膠後置於烤盤上加熱	83
圖 4-7 拉伸式光纖光柵感測器的感測端預拉組件	84
圖 4-8 拉伸式光纖光柵感測器的完成圖	85
圖 4-9 壓力與應變之線性關係實驗配置圖	86
圖 4-10 單 FBG 漸變式壓力感測器壓力與波長關係圖	87

圖 4-11 圓形薄板應變與位置關係圖	88
圖 4-12 雙 FBG 黏貼位置圖	89
圖 4-13 雙 FBG 漸變式壓力感測器壓力與波長關係圖	90
圖 4-14 單 FBG 與雙 FBG 漸變式感測器壓力與波長關係比較圖	91
圖 4-15 單光柵漸變式感測器受壓時光柵頻譜改變圖	92
圖 4-16 雙光柵漸變式感測器受壓時光柵頻譜改變圖(拉伸部分).....	93
圖 4-17 使用量測波長寬度差的標定結果	94
圖 4-18 使用量測波長飄移的標定結果	95
圖 4-19 漸變式壓力感測器壓力與波長關係圖	96
圖 4-20 漸變式壓力感測器實驗值與理論值比較圖	97
圖 4-21 拉伸式壓力感測器壓力與波長關係圖	98
圖 4-22 拉伸式壓力感測器實驗值與理論值比較圖	99
圖 4-23 溫度對感測器影響實驗配置圖	100
圖 4-24 漸變式壓力感測器溫度標定圖	101
圖 4-25 漸變式壓力感測器溫度標定誤差圖	102
圖 4-26 漸變式壓力感測器於 50°C 時波長變化圖	103
圖 4-27 拉伸式壓力感測器受溫度影響下波長變化圖	104
圖 4-28 拉伸式壓力感測器溫度標定圖	105

圖 4-29 漸變式壓力感測器溫度標定誤差圖106

表目錄

表 2-1 傳統式水壓計之優缺點比較表55

表 5-1 漸變式與拉伸式 FBG 壓力感測器比較表109

表 5-2 傳統壓力感測器比較表109



第一章 緒論

1.1 前言

地層中水壓的量測為監測系統中，極為重要的一項數據，水壓力的改變往往可作為地層變化的重要依據。但在深層土壤中使用傳統電子式水壓計有其高度的困難性與及較高的成本。目前所使用的感測器均以電子式感測器為主，傳統電子式感測器雖已發展了長久的時間，但是仍有一些無法避免的問題存在，像是電壓不穩定造成的雜訊，周圍環境電磁波的幹擾，溫度變化的影響，電線容易受水氣侵蝕而損壞，且受限於單線僅能單點量測，以及電纜線體積大佈放空間易受限制的問題，這些都影響到量測的品質。

近年來許多相關的研究及光電元件的成功開發，已使光纖感測技術趨於成熟階段，而光纖具有不受電磁波幹擾、光功率損耗小、重量輕、易佈放，且有一線多點量測等優點，所以使得光纖感測技術更具實用價值。加上光纖感測系統可用來測量各種物理量的微小變動，如聲音、溫度、壓力、磁場、振動等，尤其對於應變和溫度變化的量測，以布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)做成的感測頭，更具有高靈敏度及高動態範圍；因此，光纖感測技術將是未來感測技術的主流之一。本研究希望藉由光纖的感測技術，來提升監測品質與技術。

1.2 研究目的

本研究目的在於利用光纖光柵多工、高靈敏度及不易被腐蝕等優點，應用於壓力的量測。以光纖光柵壓力感測器取代傳統的壓力感測器，藉以減少使用上的不方便性及增加量測上的準確性。

1.3 內容架構

本研究內容在於以光纖光柵感測技術應用於壓力的量測，研究流程圖，如圖 1-1 所示。

主要內容包括：

- (1) 現有光纖光柵壓力感測器的介紹與優缺點。
- (2) 以彈性力學為理論，計算光纖光柵壓力感測器的理論可行性。
- (3) 光纖光柵壓力感測器的開發。
- (4) 光纖光柵壓力感測器的室內標定結果。

光纖光柵壓力感測器的室內標定實驗中，包括壓力與光纖光柵之關係、溫度對光纖光柵感測器之影響等。



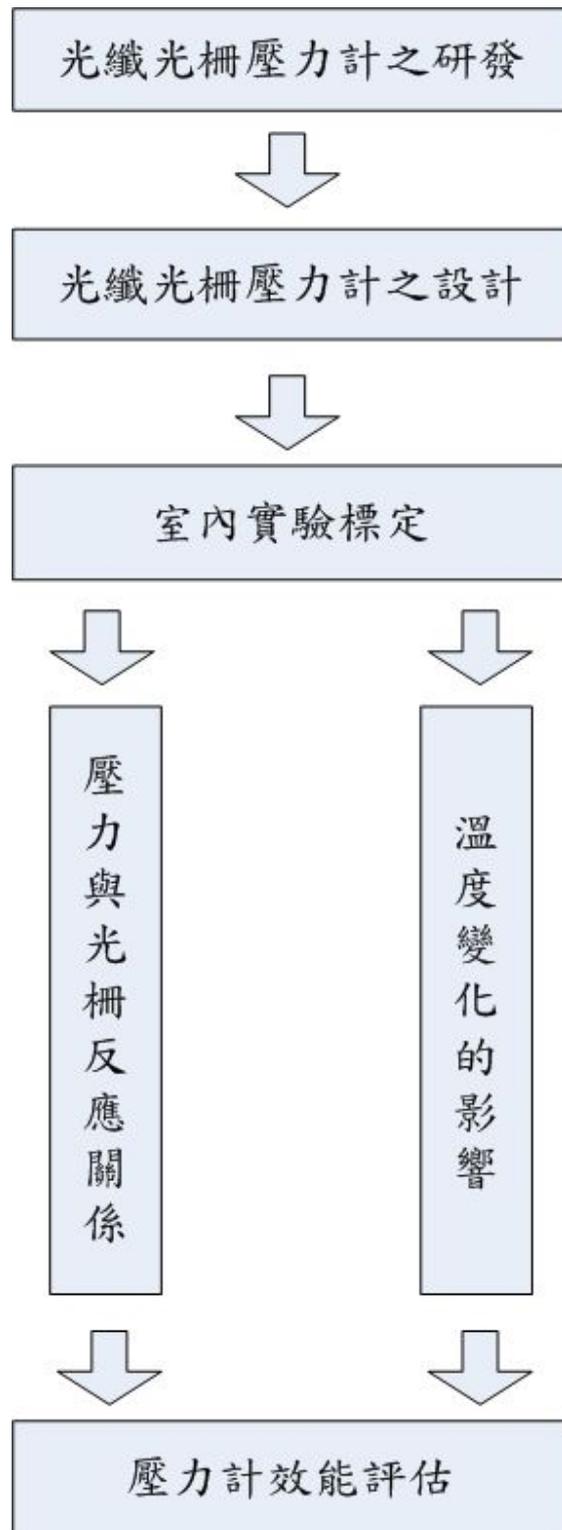


圖 1-1 研究流程圖

第二章 研究背景

2.1 水壓力感測系統

2.1.1 各式水壓力感測器

依壓力量測方法之不同，一般水壓計之型式可概分為氣壓式(Pneumatic Piezometer)、水壓式、電子式(Electrical Piezometer)及開口直管式(Open standpipe Piezometer)等數種，將其構造及原理說明如下，表 2-1 為各種感測系統的比較：

(1) 開口式水壓計

最常見的水位記錄方式就是直接在無套管的鑽孔或是觀測井中觀察水位，這個觀測方式最大的缺點在鑽孔可能使得不同水位高度的地下水層相互連結，使得所記錄的水位高度可能在進一步分析時缺乏代表性。不論使用何種設備，不同的含水層應該個別密封，並且在不同的水壓計要分開監測，這不只是為了得到較好的量測結果，並且可以避免不必要的污染。

開口式水壓計有不同的豎管直徑、種類、及不同體積的集水區域，其中最簡單的種類僅僅是一個在監測位置上方加上套管的監測井如圖 2-1，而水位高度則以一支探針直接量測，在這種狀況之下所得到的靜水頭代表的是整個監測區域的平均水位，而這個監測結果可能比實際的自由水位高或是低。這種監測方式在一般透水性較低的土壤中，可能需要很長的一段時間才能使得水位高度達到一個穩定的狀態。不論如何，要在低透水性的土壤中量測地下水位會因為時間因素使得所適合的量測儀器相當有限，在部分飽和的土壤中所得到的水位其代表性也難以評

估。

時間遲滯的狀況可以減少豎管直徑或增加透水石面積的方式來減少達到穩定狀態所需要的時間。Casagrande 開口式水壓計，如圖 2-2 所示，由鑽孔前端封口部分嵌入透水石及直徑為一公分的塑膠豎管所組成，適當的安裝下，根據過去的經驗這類水壓計適用於許多土壤狀況，特別是需要長時間讀取數據的情況，這是因為水壓計是非金屬所組成可以抵抗鏽蝕。一些尚未被驗證的水壓計可靠度經常安裝在 Casagrande 水壓計附近以驗證其可靠度。在邊坡滑動監測上如果較關注短時間內水壓的反應，則應該採用壓力感測式水壓計。

(2) 壓力感測式水壓計

氣壓式水壓計係一個裝設並密封於鑽孔內或插入在軟土中之透水頭，經由兩條塑膠氣導管連接至測讀器。水壓計頭部之感應器基本上由一個被柔性隔膜分成兩區(感應區及量測區)之剛性框架所構成。在感應區，水壓計外部之孔隙水壓透過濾石並作用至隔膜上。隔膜另一側緊貼在含有兩個小孔(進氣及回氣孔)之平坦防水壁上以構成儀器之氣壓區(量測區)，並以兩氣導管分別連接進氣孔及回氣孔至測讀器。

氣壓式水壓計之測讀係採用氣壓式測讀器。測讀時，高壓氣體經由進氣管送至儀器之量測室並作用於隔膜上，當供氣壓力足夠平衡作用在隔膜上之液壓時，隔膜即產生彎曲變形使進氣管與回氣管形成通路，使多餘之氣體經由回氣管排至測讀器上之回氣偵測器，此平衡壓力即可由測讀器上之壓力錶或數位顯示器測得。氣壓式水壓計構造示意如圖 2-3。

(3) 電子感測式水壓計

電子感測式水壓計是利用孔隙壓力作用在隔膜上來感測水壓力，隔膜反應水壓情況為比例關係，再利用各式電子轉換器來量測水壓力，一

般最常見的轉換器為線圈或應變計，這些裝置通常具有極快的反應時間，並且有很高的靈敏度，然而這些裝置不能受潮也不能在現地重新校正。資料傳輸距離超過限制而監測時間短時較適合使用電阻式應變片水壓計(Resistance Strain Gage Piezometer)，原理為當感應器內部電阻受到外力而展開或收縮時，藉以偵測其電阻變化量，經轉換計算土層之孔隙水壓力，亦易受環境電磁干擾，當資料傳輸距離超過限制而監測時間短時較適合使用；因為它會受到環境因素的影響並且在長期使用時穩定性較低，因此電阻式應變計不適用於需要長期且可靠讀數的監測中。圖 2-4 為一個典型的使用線圈電子感測式水壓計，一般來說這類水壓計在長期使用上會有較好的穩定性，但是並非所有這類水壓計都有如此的特性。

(4) 振弦式水壓計

振弦式水壓計(Vibrating Wire Piezometer)，其構造示意如圖 2-5，頭部為一剛性框架，內部以柔性薄膜分隔成感應區及量測區。其中感應區為感應外水壓力之單元，主要由透水性濾石所構成，外部水壓即透過濾石傳遞至薄膜上；薄膜之另一側為量測區，主要由一連接至薄膜上之鋼弦及磁性線圈所構成，並以電纜線連接至測讀箱。當薄膜受水壓作用產生變形時，將改變鋼弦之張力，因而導致鋼弦振動頻率改變，量測鋼弦振動頻率之變化情形，再依據出廠時率定之振動頻率與壓力之關係，即可推算出外部水壓力之大小，因只考慮振動頻率變化，於惡劣環境中長期使用能具可靠性。

2.1.2 水壓力計的安裝

地下水位及孔隙水壓監測可以使用之商業化水壓計有很多，但必須針對每個不同的狀況加以選擇最適合的水壓計。

地滑監測中，水壓計通常安裝在延伸到岩層或土壤的鑽孔中，利用鑽探資料所估計之地下水位及滑動面位置來決定水壓計的安裝位置。最簡單的開口式水壓計是在鑽孔內安置一軟管所組成，而監測水壓的部分必須是透水的，這個部分可以是透水材料或將軟管埋在細砂當中，以便水流能自由流入又能避免土壤顆粒進入水壓計當中，水壓計必須放置在鑽孔中央，周圍再用乾淨砂包覆當成濾層材料，隔開土壤及水壓計。

在水壓計的頂端安置不透水栓塞是必要的，不論是 Casagrande 水壓計、氣壓感測式、電子式水壓計配置在管中都可以用類似的方法封口，一個可用的安裝方式是在鑽孔與水壓計之間投入皂土並以環狀落錘將其搗實，有些丸狀或碎屑狀皂土顆粒比重可以沈入水中，並不需要使用落錘搗實。另一種方式就是將皂土漿灌入砂土濾層上方，這種封口的方式可以經由直徑 1.3 到 2.0 公分的管子直接將水泥漿打入孔中。

中等到軟弱的土壤中可能更適合將水壓計直接壓入地表下，結合鋼管將水壓計安置於地下，在水壓計的尖端必須堅硬以抵抗壓入地下時可能的損壞，並且要設計使得造成的擾動達到最小。Casagrande、氣壓感測式，或其他一般的電子感測式水壓計都可以利用這個方式安裝，而且具有密封及安裝快速的優點。使用氣壓感測式水壓計還是可以快速反應水壓的變化。因為這類的水壓計並沒有辦法在安裝完成後自動將尖端完全濕潤，因此必須在使用前先行泡水，並且保持完全濕潤直到安裝至定點。這樣的步驟可以確保在低透水性的黏土中能更快速的在安裝完成後反應孔隙壓力的變化。

2.2 光纖基本介紹

2.2.1 光纖結構

光纖的結構本身為圓柱長條的形狀，如圖 2-6，主要構造可分為纖核(Core)、纖殼(Cladding)以及作為保護的塗抹層(Coating)等三部分，而裡面的成分主要是由高含矽量的玻璃或多種成分的玻璃或塑膠組成，內層為折射率(refractive index)較高的纖核(core)，外面則是披覆其折射率較低的纖衣(cladding)；為了保護光纖不易受彎曲而折斷，會在外層在覆以樹脂，加強光纖強度韌性(Coating)。其中纖核(Core)直徑依光纖的種類不同約略 5~75 μm ，而纖殼的範圍則在 100~200 μm 間。事實上纖核和纖殼為構成了整個光纖的基本要件，但是光纖往往要放置在惡劣的環境中，所以一般除了在纖殼的外層塗佈上約為 200~1000 μm 不等的聚合物(Polymer)材質塗佈層(Coating)作為保護外，最後再使用尼龍製成的外皮包覆做成商品用的光纖。

2.2.2 光纖分類

光纖之種類非常多，可以依折射率之分佈、傳播模態、使用波長、製作的材料、製造方式等不同可以分類為各種不同的形式，而一般我們可以根據光纖傳播的模態數目、光纖內分佈的折射率形式以及光纖構成的材質等三大方向將光纖加以分類。

一、 光纖依折射率分佈的情形分類可分為：

(1) 階梯式折射率分佈光纖(Step index fiber)

如圖 2-7(a) 所示，當 core 和 cladding 的折射率分佈是呈階梯狀的稱之，其缺點會因光入射角度的不同，使得接收訊號的時間有所差異，容易造成色散的現象。

(2) 漸變式折射率分佈光纖(Graded index fiber)

如圖 2-7(b)所示，當 core 和 cladding 的折射率分佈是呈漸變式的分佈稱之，其優點是藉由漸變的折射率，來調整各個入射角度的光路徑，以修正階梯光纖造成的色散現象。

二、 光纖依傳播模態數的分類可分為：

(1) 單模態光纖(Single mode fiber)

單模態光纖如圖 2-8(a)所表示，其纖核直徑非常小約為 5 到 10 μm 左右，而因此使得光纖纖核中僅容許一種傳播模式存在(基本模態或稱 LP01 mode)，其餘高階的傳播模式(如 LP11 mode)都會被截止(Cut-off)而無法存在。單模態光纖的訊號單一、色散小且損失值低，適合作為高品質、大容量且長距離的光通訊媒體。

(2) 多模態光纖(Multi-mode fiber)

多模態光纖如圖 2-7(a)、2-7(b)以及 2-8(b)所示，其纖核直徑多為數十微米以上，而因此除了基本模態之外光纖纖核中還容許其他高階的模態(傳播模式)存在。相較於單模態光纖而言，多模態光纖可以容許多個模態耦合進入光纖故對於導光和耦光的精確度要求較低，但由於模態間色散(Dispersion)大且易互相干擾僅被用於短距離的光通訊之用。

所以由上可知單模光纖沒有傳播的時間差，頻寬因此變的相當廣，其資料傳輸速率(data rate)與衰減現象(attenuation)表現都是最好的。但單模光纖的核心小，耦合光線的難度較高，價格也較高。如海底電纜系統，都是用單模光纖，而交換機之間的電話幹線或資料連線，則多採用多模光纖，作為感測器而言，因為要求接收之光訊號無失真的問題，所以多採用單模光纖為主。

三、 光纖依構成材料可分為：

(1) 玻璃光纖(Glass fiber)

由純化的二氧化矽(SiO₂)添加二氧化鍺(GeO₂)或氟(F)製作的石英矽玻璃光纖以及摻鍺(Ge)、鈉(Na)、鎂(Mg)及鋰(Li)等成分的多成分玻璃光纖是目前最佳的光波導材質，由於具有良好的機械性質、加工容易以及優良的傳輸特性(如低損耗、頻帶寬極低損耗等)位目前應用最廣、使用率最高的種類。

(2) 塑膠光纖(Plastic fiber)

塑膠光纖纖核的主要成分是由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)製成，其優點是價格低，對外界溫度改變相當穩定，缺點是技術尚未如玻璃光纖那麼成熟，故傳遞損失較大，目前只適合作短距離傳輸的應用

(3) 其他新材質光纖

為了某些特殊之應用或是進一步改良光纖之特性，各種新材質的光纖陸續的被發展出來，比如結合與玻璃塑膠材質所製作的光纖、以氟化物玻璃所做的中紅外線光纖及以含鉻(Cr)離子摻雜之紅寶石為材質的光纖等。

2.2.3 光纖傳輸損失

在光纖傳輸過程中，能量或多或少是會損失的，而造成能量損失的主要原因，基本上有下列三種：

(1) 材料損失(Material loss)

光能量會被材料本身所吸收掉。

(2) 光散射 (Light scattering)

光能量被材料分子結構上之缺陷所散射，如圖 2-9 所示。

(3) 波導及彎曲彎曲損失 (Waveguide and bending loss)

為光纖結構上之變形所造成，包括直徑之改變、局部之彎曲或整體之彎曲，如圖 2-10 至圖 2-11 所示。

由造成光纖損失之第三點來看，可以發現當光纖結構受到外力過度壓迫變形者或者局部曲率過大時，都有可能引起光能量的損耗，在安裝感測器時要避免線路受重壓或局部扭轉太大。

光纖損失之定義為輸出能量與輸入能量之比值，多以對數單位分貝 (decibels dB) 來表示，而其數學表示式如下

$$Loss|_{db} = 10 \times \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2-1)$$

其中

P_{out} = 輸出能量

P_{in} = 輸入能量

光纖能量損失之多寡與光纖總長度有關，一般以每公里損失之分貝所表示。



單模光纖的最低傳輸損失，約在波長 1550nm 附近，其損失極限值大約在 0.16dB/km。實際上，針對直線傳輸的光纖而言，最主要的衰耗來自於雷射散射衰耗，但於工程應用上，需將光纖傳輸工作路徑的轉折、端點及分段連結器、接合處等產生的衰耗列為主要的訊號損失來源。

2.3 光纖感測器簡介與分類

2.3.1 光纖感測器的種類及量測

光纖感測器體積小、重量輕、不受電磁干擾、傳輸損耗低、靈敏度高、安全性高、以及特有的多工性質可以組合成監測網路，加上她可以輕易的和現有的龐大光通訊市場之儀器及元件整合，因此近年來被廣泛

地應用在許多地方，如工業、軍事、生物、電子、航太、機械、化工、造船、土木等領域。

所謂的光纖感測即將物理量的變化如溫度、應變、加速度、位移、壓力等之變化，解調成在光纖內傳輸之光信號的改變。除了溫度之外，大部分的物理量改變皆可以由應變的變化經過適當來獲得。通常我們可以以感測元件及解調方式將光纖感測器分類。

一、以感測元件分類

(1) 非本質式(Extrinsic)：

在此系統中，光纖只負責傳遞信號的工作，即感測元件間傳輸的介質，因此，在感測過程中，需要其他的感測元件配合。

(2) 本質式(Intrinsic)：

光纖本身扮演感測器的角色，當感測物體受到外在環境的影響改變，將調變光纖中光波的傳導模式，光傳導模式改變主要是外在因素的擾動而改變光纖長度、折射率或偏極面所致。光纖作為主要的感測元件，故要求較高，通常以單模光纖為主。

二、光纖解調類型的方式分類

(1) 光強度(Intensity)：

運用光的吸收、放射損失、散射、和發光特性。通常系統架構最為簡單，經過精密的設計後，光強度感測器可以得到絕對的量測數值。但由於需要外接光源，光強度可能會擾動，其靈敏度會受到限制，且不容易達到多工。

(2) 相位(Phase)：

運用光傳輸路徑長度上的改變來當做量測因數。通常需要一個調變訊號跟一個與外在環境改變隔離參考訊號做比較，當同調的兩道光重合

時，光波長的相位分佈會影響其干涉現象，由調變光波間的相對性相位差，將可做干涉式的量測。相位量測感測器可以極高的靈敏度以及動態量測範圍，並可以加以作多工作技術。但是當監測儀器在沒有啟動的狀態下，相位變化的過程便無法被紀錄下來，因此不容易做到直接之量測。

(3) 波長(Wavelength)：

運用光波長的飄移來當做測量因數。處理過後的光纖感測器暴露在感測環境下，可以由光譜波長的改變而獲得的物理量變化。波長感測器不僅有相位感測器的優點，加上波長可以直接被讀取，所以可以做到直接量測。

2.3.2 基本光纖光學

由前一節我們可以得知光纖藉著核心與外層不同的光學性質(折射率)來達到光傳導的目的，而此一現象使用幾何線性光學中的司乃耳定律(Snell's law)便可以加以描述。

圖 2-13 司乃耳定律的示意圖。圖中第一道光顯示光由折射率高(n_1)的介質射入折射率低(n_2)的介質時有一部分光會被反射，另一部份的光則會被折射。其公式為：

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2-2)$$

其中

n_1 、 n_2 = 射入端與射出端之折射率

ϕ_1 、 ϕ_2 = 入射角與折射角

由式中可以看到當入射角逐漸增大，折射角也會隨之變大。當折射角達到 90 度與交介面平行時， θ 會成為臨界角 θ_c (Critical angle; θ_c)，該臨界角公式為：

$$\frac{\sin \phi_1}{1} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \sin^{-1}\left\{\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}\right\} \quad (2-3)$$

其中

n_1 、 n_2 = 射入端與射出端之折射率

ϕ_1 = 入射角

所以當入射角繼續增大時，大於臨界角時，則無折射光會發生，所以入射光會因此而返回到原本之介質中，這也就是所謂的全反射(Total reflection)現象。

光在光纖內行進的路徑如圖 2-14 所示，其核心的折射率 n_1 較外層的折射率 n_2 大，由光纖的端面入射光，能在這條光管(Light pipe)內全反射而向前傳播，光能量的損失則因全反射作用降到最低。

由前面的討論可知光在光纖中傳播的角度(θ)必須大於一個臨界角度才能順利以全反射向前傳播，因此我們必須使光線進入光纖的角度(ψ)小於某個數值才能達到這個目的。此一數值稱為二分之一接受角(Half acceptance angle； ψ_a)，在三度空間中由接受角(Acceptance angle； $2\psi_a$)所形成的接受錐面(Acceptance cone)內入射的光才可以在光纖傳播，否則將折射溢散到纖核外界去。

通常我們會以數值孔徑(Numerical aperture；NA)來評估光纖接受角的大小，數值孔徑即二分之一接受角和纖核及核殼折射率的關係可以由簡單的三角關係得到：

$$NA = \sin \phi_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-4)$$

$$\phi_a = \sin^{-1} NA = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-5)$$

其中

NA=數值孔徑

ϕ_a =二分之一接受角

當光在光纖內發生全反射時會產生相位變化，因此在上下的交界面間反射一週期的行進間會產生橫向的相位變化，由電磁波理論的角度來解析可以知道為有此一相位變化量為 2π 的整數倍形成駐波(Standing wave)時才能傳播，因此除了光線射入光纖的角度要小於二分之一接受角外，光纖亦不容許任意傳播角的光在光纖中行進。由前述可知只有符合上述特定條件的那些光(彼此間並不連續)才能在光纖中傳播，這些得以傳播的光在徑向上的電場分佈再任意的軸向位置上會是相同的，這就是光傳播模態(Mode)的概念

2.4 光纖光柵感測器

以下先簡單介紹光柵基本原理以及光柵的種類，在對其中的布拉格光纖光柵多做討論，然後在對光纖光柵的製作方法做介紹以及應力、溫度和壓力對光纖光柵的影響做討論

2.4.1 光柵(grating)基本原理

由幾何線性光學中的繞射(diffraction)原理可知，由光源端入射到一個具有狹縫的平面，將會因入射光的波長及狹縫寬度，而在另一端產生不同間距的亮暗相間繞射條紋，而它是呈現貝色函數(Bessel function)的分不來呈現的。若將繞射原理中的單狹縫擴展成週期性狹縫，將可獲得疊加的效果，此一週期性狹縫的結構便是所謂光柵(Grating)結構，如圖 2-15 所示。光柵的繞射現象，由線性幾何光學的角度可以得到下式的結果：

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (2-6)$$

其中

n =介質的折射率

λ =傳播之光波長

Λ =光柵的週期

m =繞射的階數

θ_1 、 θ_2 =光的入射角及 -1 階繞射角。

2.4.2 光纖光柵的分類

依照製作光纖光柵時光柵週期的大小可以將光纖光柵分類為短週期式及長週期式兩類。這兩類的光纖光柵雖然只是在光柵週期長短的差異，但是其表現出來的特性卻是截然不同，以下將分別針對這兩者的工作原理加以說明：

(1) 短週期式光纖光柵(Short period fiber grating)

通常稱為布拉格光纖光柵亦被稱為反射式(reflection)光纖光柵，其週期大約為 $1 \mu\text{m}$ 。其原理為，當在光纖中傳播的光遇到短週期光纖光柵時，會有一特定波長的光受光纖光柵影響耦合至一反向前進的光上，也就是說入射光中該波長的光在短週期光纖光柵處產生了反射效果，如圖 2-16 所示。而其中反射要符合布拉格條件(Bragg condition)才可以，所謂布拉格條件簡單的說就是要滿足下列式子

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2-7)$$

其中

λ_B =布拉格光纖光柵的波長

n_{eff} =纖核有效折射率

Λ =光纖光柵的週期

(2) 長週期式光纖光柵(Long period fiber grating)

其週期約為 100~1000 μm 左右，也稱作為穿透式(transmission)光纖光柵，由於其週期較長，當在光纖中傳播的光，其特定波長的光，即滿足下列條件的式子。

$$\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2-8)$$

其中

β_1 =基本模態

β_2 =與 β_1 耦合的模態

Λ =光柵週期

遇到長週期光纖光柵時，受光纖光柵影響會耦合至一相同方向前進但不同模態光上，也就是說，入射光中該波長的光不會反射，而會穿透長週期光纖光柵如圖 2-17 所示。

大多數的光纖光柵感測器，所採用的解調方式乃利用布拉格光纖光柵的波長調變的特性。然而，有部分感測器採用漸變週期(chirped)光纖光柵或是特殊結構的光纖光柵做為感測元件，並且於相關文獻中發表。依照光纖光柵時光柵的週期均勻性可以將光纖光柵分類為均勻型及非均勻型兩類，均勻型光柵即上述介紹的短週期光纖光柵，而非均勻型光纖光柵稱為漸變式光纖光柵(Chirped fiber grating)，現在將漸變式光纖光柵加以說明。

漸變週期光纖光柵為布拉格光纖光柵的一種，一般運用在光纖通訊的色散補償。此種光纖光柵的折射變調呈現非均勻型態如圖 2-18 所示，不同波長的光分別於相關週期的光柵中反射。此種光纖光柵的反射光頻

譜與均勻型光纖光柵之差別在於它擁有較大的頻寬，可以做為光纖系統中的色散補償元件，如圖 2-19 所示，也就是能將變寬的脈衝再次的壓縮。

最簡單的週期性漸變光柵的型式是光柵的週期呈線性變化，

$$\Lambda = \Lambda_0 + \Lambda_1 \quad (2-9)$$

其中

Λ_0 =起始週期

Λ_1 =光柵之線性改變量的斜率

圖 2-20 分別代表 Raised-cosine-apodized，光柵週期受到圖 2-18 所示之週期性漸變的效應。

漸變式光纖光柵的解調為量測反射頻譜中的帶寬(Bandwidth)，

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}} \quad (2-10)$$

其中

λ_{max} 、 λ_{min} =最大與最小的波長



2.4.3 光纖光柵波長飄移量的關係

根據文獻，可知布拉格光纖光柵反射波長的飄移量 $\Delta\lambda_B$ ，和所受的應變及溫度變化量有關，其關係式如下：

$$\Delta\lambda_B = 2n_e\Lambda \left[\left\{ 1 - \left(\frac{n_e^2}{2} \right) \langle p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12}) \rangle \right\} \varepsilon + \left(\alpha + \frac{dn_e}{n_e} \right) \Delta T \right] \quad (2-11)$$

其中

P_{11} 和 P_{12} = 光纖的應變張量

ν = 光纖的波松比(Possion's ratio)

ε = 所受的應變

α = 光纖的熱膨脹係數(Thermal expansion coefficient)

ΔT = 所受的溫度變化量

我們把上式作簡化，便可寫成為：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T = K_\varepsilon\varepsilon + K_T\Delta T \quad (2-12)$$

其中

$$\xi = \frac{dn_e}{n_e dT} = \text{光纖的熱光係數(Thermal optical coefficient)}$$

$$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2}\right)[p_{12} - \nu(P_{11} - p_{12})] = \text{光彈常數(Photoelastic constant)}$$

K_ε = 所受應變的敏感係數

K_T = 所受溫度變化量的敏感係數

布拉格光纖光柵在受溫度和應變的變化環境下，其中心反射波長會受其影響而產生中心頻譜位移的現象，所以以下我們分別從溫度和應變的環境變化加以討論其影響的大小。

(1) 波長飄移量與應變的關係

首先將先前(2-12)有關溫度變化 ΔT 設為 0，也就是將系統放在恆溫的狀態下，只單純來討論應變與波長的關係。而式子簡化後也就是以下的(2-13)

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon = K_\varepsilon\varepsilon \quad (2-13)$$

其中

ε = 應變大小

K = 所受應變的敏感係數

$$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(P_{11} - p_{12})] = \text{光彈常數(Photoelastic constant)}$$

一般物質在平常的狀態下，原子間格之間維持一定的排列，彼此之間會有固定的拉引力互相作用著，原子間的排列是呈現同向性(isotropic)。當受外來的外力時，物體的形狀會因此而改變。而其原子間排列是呈現非同向性(anisotropic)，因此折射率也隨之會改變。K_e大約為 0.74，也就是說 1μ 的拉應變會使的布拉格光纖光柵中心波長往長波長的方向移動，且其飄移量大約為 0.0015nm~0.0012nm。

(2) 波長飄移量與溫度的關係

當光柵部分受到環境的溫度變化，其波長飄移可由(2-12)簡化得知，而得到下式：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T = K_T T \quad (2-14)$$

其中

α = 光纖的熱膨脹係數(Thermal expansion coefficient)

ξ = 光纖的熱光係數(Thermal optical coefficient)

K_T = 所受溫度變化量的敏感係數

布拉格波長飄移的溫度變化有些許的非線性，在高溫時的溫度變化會使波長飄移較為明顯， $\alpha \approx 0.55 \sim 1.1 \times 10^{-6}$ ，而 ξ 從 150⁰C 的 6.9×10^{-6} 的變化成 450⁰C 的 9.6×10^{-6} 。在室溫時， K_T 約等於 8.2×10^{-6} ，而當溫度升高至 300⁰C 以上時， K_T 約變為 11.2×10^{-6} 。所以在一般的使用環境，1⁰C 的升溫會使布拉格光纖光柵的中心波長往常波長飄移大約為 0.0115~0.012nm。

2.5 光纖壓力感測器

目前，已有許多對於光纖壓力感應器的研究，這節將對於這些壓力感測器加以介紹。

2.5.1 光纖光柵式壓力感測器

光纖光柵壓力計依據施加壓力方向之不同，大致上可分為軸向式壓力計與橫向式壓力計，軸向式壓力計是指壓力施加方向平行於光纖的軸向方向；橫向式壓力計是指壓力施加方向垂直於光纖的軸向方向，外力直接作用於光纖光柵上，或是以某種機制將力傳遞到光纖光柵上。

Raman (1999)有壓力感測器之研究，圖 2-21 所示，直接對裸光纖光柵施予不同壓力，因為光纖光柵的彈性模數較大，所以光纖光柵對於壓力反應靈敏度不佳，靈敏度為 $-1.98 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ 。

Zhang et al. (2001) 修改 Raman 的研究中靈敏度不佳的問題，利用聚合物的彈性係數較小的特性，將光纖光柵封裝於聚合物中，如圖 2-22 所示，此方式可以提高光纖光柵對於應變的靈敏度，以聚碳酸酯為外襯的光纖光柵為例，其對壓力量測的靈敏度為 $-6.25 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 。

Xu et al. (1996) 發展出以球狀玻璃為外殼的壓力感測器，如圖 2-23 所示，當玻璃球受壓時，該玻璃球內徑將隨著壓力的變化而改變，而黏貼於玻璃球直徑上的光纖光柵也會產生軸向應變。此種感測器的靈敏度約為 $-2.12 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 。

Zhang et al. (2001) 發展出以聚合物為外襯加以封裝之壓力感測器，如圖 2-24 所示，此感測器有鋁質外殼，光柵穿過鋁質圓桶的中心，並以軟性聚合物將光柵固結於鋁質圓桶中，藉外界壓力對聚合物產生擠壓變形時，聚合物會往軸向變形，進而帶動光柵的變形。唯此種方式可

能造成光纖光柵產生非均勻的應變，使得感測器的量測誤差較大。

申浩然 (2003) 因為光纖光柵為撓性不能感測壓縮，所以在軸向壓縮上的線性程度不佳，此感測器乃採用拉伸光纖光柵的方式來製造壓力感測器，如圖 2-25 所示，其工作原理為將光纖光柵埋入軟性聚合物中，當感測器受到側向的外力作用時，聚合物便會往軸向伸展，使得光纖光柵也一起拉伸。

光纖光柵為易受溫度影響的感測器，上述之壓力感測器均未對此影響加以考慮，所以量測誤差極大；另一缺點為柔性聚合物不具線彈性並且容易產生塑性變形，因此此種感測器於長期的監測使用上有其不適任之可能性。

Liu et al. (2000) 利用特殊的聚合物封裝，發展出一壓力感測器，如圖 2-26 所示，左端的 FBG1 使用受高靈敏的聚合物 A 封裝，其餘的 FBG2 由另一聚合物覆蓋 B，此聚合物 B 僅作為保護作用，不對於 FBG2 的產生應變，因此兩個光柵會發生不同的應變量，藉此得到壓力值。

Heo et al. (2005) 發展出微型光纖光柵壓力感測器，其簡易構造圖如圖 2-27 所示，其感測物件由一圓形板所構成，光纖光柵穿過於圓板中，當壓力由物件的上方施加時，光纖光柵會被拉伸，如圖 2-27 (b) 所示的情形，因為此種感測器是作為按鍵使用，所以設計時不考慮溫度對於光纖光柵的影響，僅需考慮外力對光纖光柵產生的變化。

Zhao et al. (2004) 利用雙 FBG 方式製作感測器，如圖 2-28 所示，此感測器的感測原理為將兩條光纖光柵分別黏貼於懸臂樑上下兩相對應的位置，當懸臂樑變形時，兩個光纖光柵會分別承受拉應力與壓應力，雖然溫度會對光纖光柵造成影響，但經由兩光纖光柵波長互減可以消除溫度對 FBG 之影響。

Kojima et al. (2003) 利用 巴登管(Bourdon Tube)發展一光柵壓力感測器，如圖 2-29 所示，巴登管是將具橢圓形斷面之銅合金薄管，彎成圓弧形，彎管之一端密封且允許有活動伸展空間，其另一端不封閉且焊定於固定管接頭上。當氣體或液體壓力自管接頭處引入時，會使彎管有向外伸展的趨勢，彎管末端連結光纖光柵，使光柵受到拉力作用，由光柵的變化向換算為壓力值，此感測器有放置一溫度光纖作為光纖受溫度影響時的比較值。

2.5.2 漸變式光纖光柵感測器

除了上述的光纖光柵壓力感測器外，還有一些利用非均勻型的光纖光柵所製作的壓力感測器，此小節將介紹這些感測器的量測原理及特色。

Dong et al. (2005) 使用漸變式光纖光柵 (CFBG) 製作感測器，將 CFBG 黏貼在一直角三角板的長邊處，如圖 2-30 所示，並斜穿過此三角板的中性軸，這種方式可以讓光纖光柵同時產生拉應變與壓應變，當變形產生時，光纖光柵的帶寬增加而中心波長不改變，如圖 2-31 所示。

Dong et al. (2002) 利用均勻型光纖光柵發生不均勻應變的方式來製作變位元感測器，應用材料力學彎曲應變的原理，如圖 2-32 所示，使用一座兩端簡支樑，從樑中心給予一向下位移，當位移發生時，此樑中性軸上方應變為負，下方應變為正，將光纖光柵斜穿過樑的中性軸並黏貼於此處，一部分的光纖光柵位於負應變區一部分位於正應變區；當樑受壓時，光纖光柵會同時發生正應變與負應變，如圖 2-33(b)所示，其反射頻譜變會變寬，此變化稱為漸變式 (Chirped)

光纖光柵式感測器所採用的解調方式是量測光纖光柵的波長變

化，一般是採用量測光纖光柵的中心波長 (Peak value)，而 Dong 所發展的感測器解調方式乃採用量測光纖光柵之帶寬 (Bandwidth)；圖 2-34 為光柵頻譜圖，在初始未受力時，光纖光柵的波峰帶寬為 λ_1 ，變形時，光纖光柵的反射頻譜會變寬為 λ_2 ，隨著壓力增加，帶寬也就跟著變大，帶寬的改變量會正比於光纖光柵應變量，此種解析方式可以消除溫度所產生之影響，因為當溫度對於光纖光柵產生影響時，只會使得反射頻譜的波形產生飄移的作用，但不影響帶寬的長度。

2.5.3 光纖式壓力感測器

Rao et al. (1994) 以 Fabry-Perot 的技術設計一感測器如圖 2-35 所示，其感測單元由一條單模光纖、一條多模光纖及中空矽晶管組成，兩光纖藉中空矽晶管組合，中間隔一空腔 (cavity)。光源接觸單模光纖末端時，分成反射光返回及折射光進入中空矽晶管，再藉由多模光纖反射回到發射端，當空腔距離受外在環境改變時，這兩個反射光波將會產生干涉，藉由量測干涉光波強度則可獲得空腔長度，由長度換算成感測的壓力值。

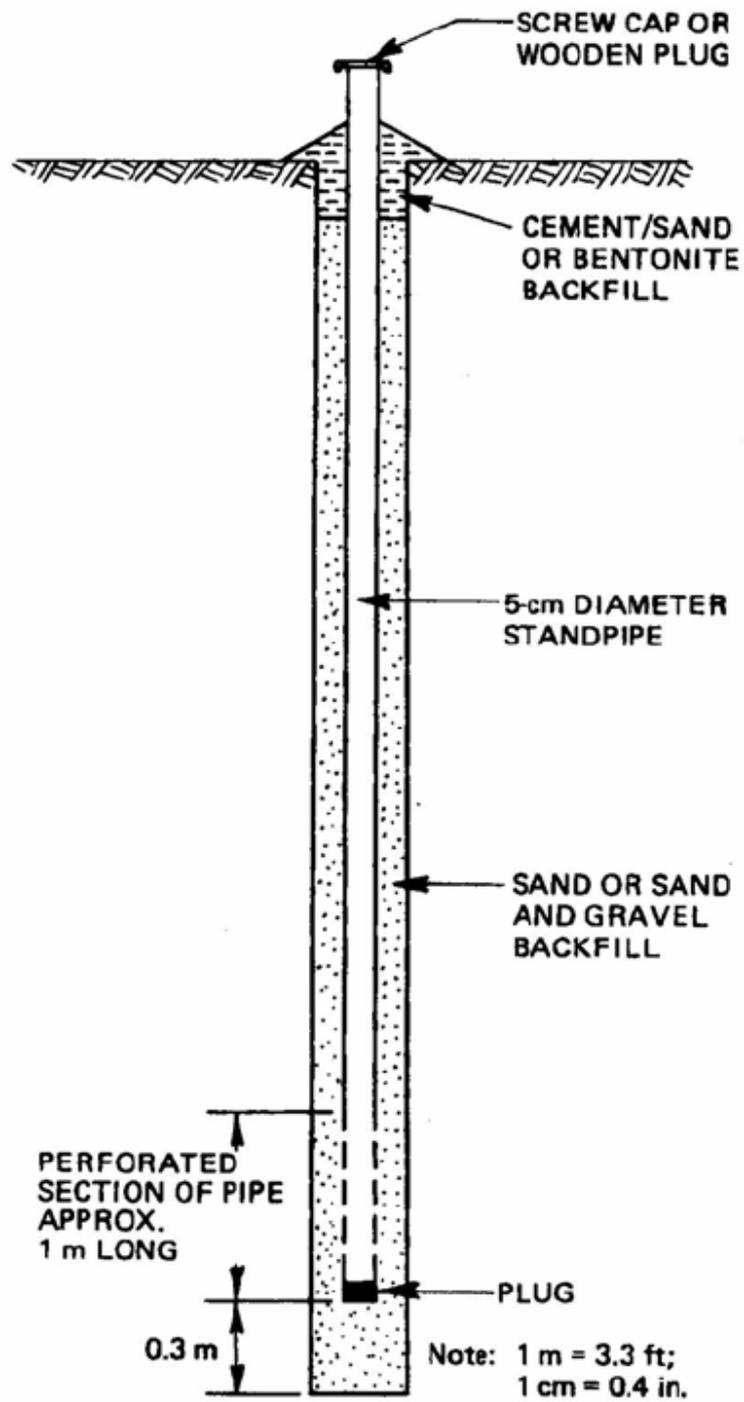


圖 2-1 開口式水壓計示意圖

(摘自 Wilson and Mikkelsen, 1978)

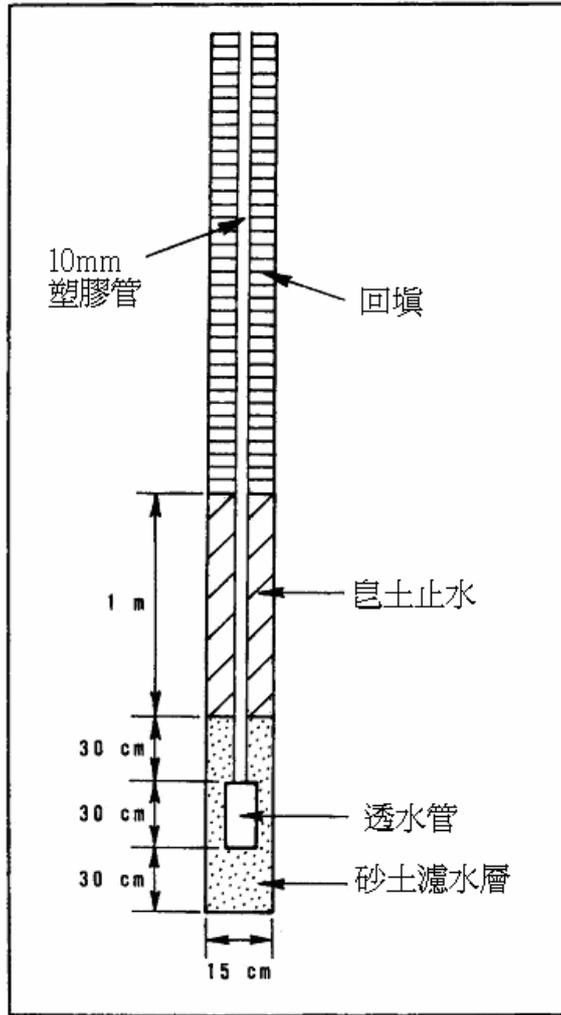


圖 2-2 Casagrande 開口式水壓計
(Wilson and Mikkelsen, 1978)

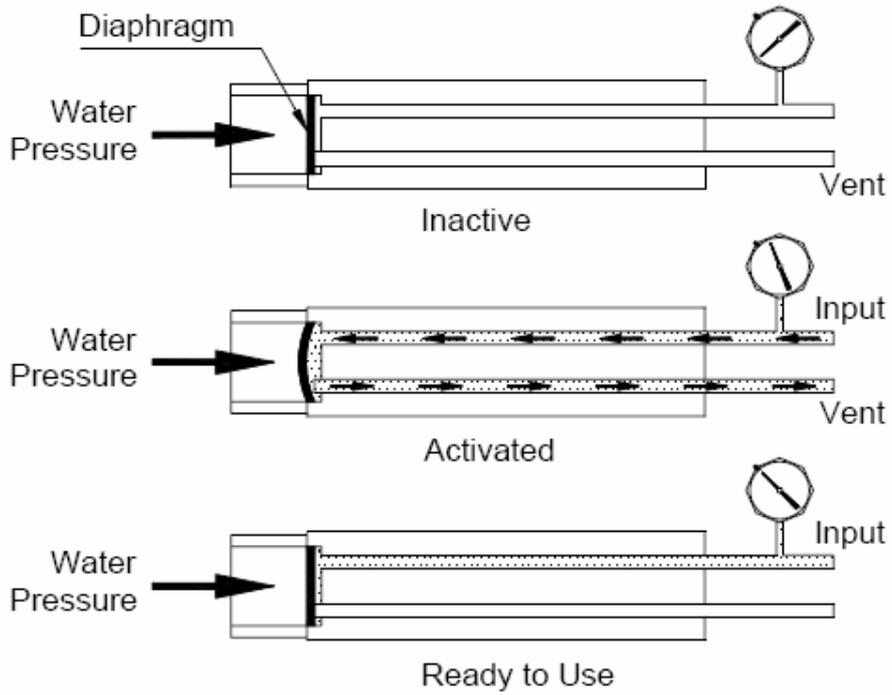


圖 2-3 氣壓式水壓計感測示意圖

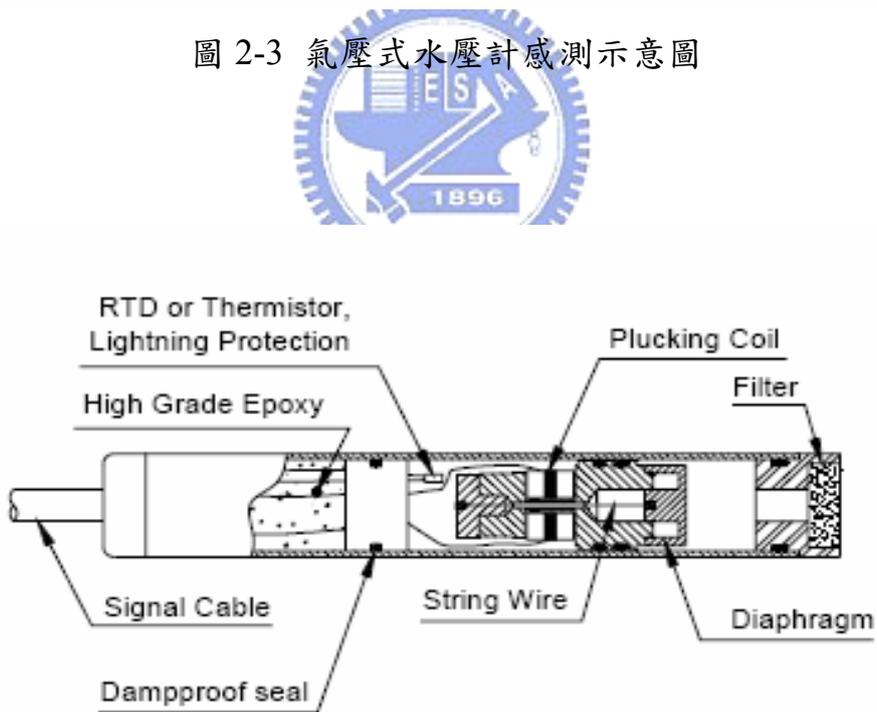


圖 2-4 線圈電子感測式水壓計
(Wilson and Mikkelsen, 1978)

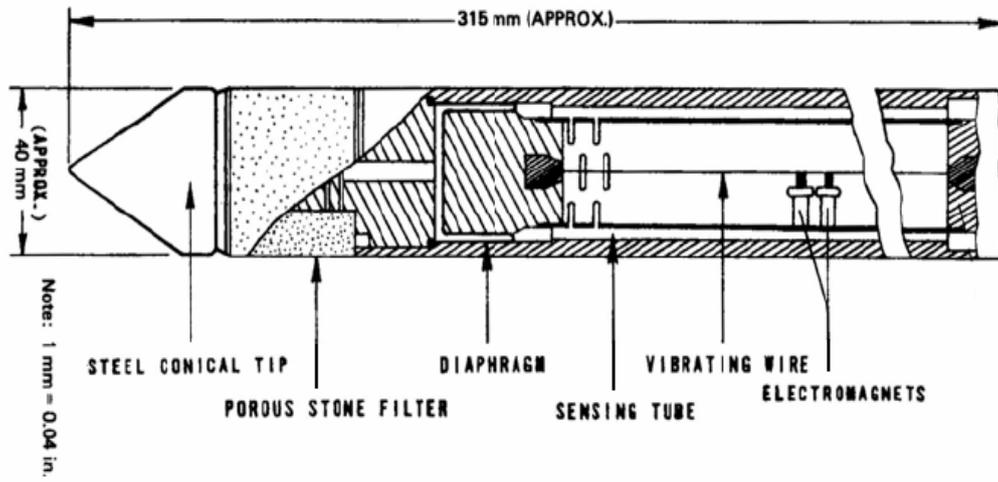


圖 2-5 振弦式水壓計示意圖

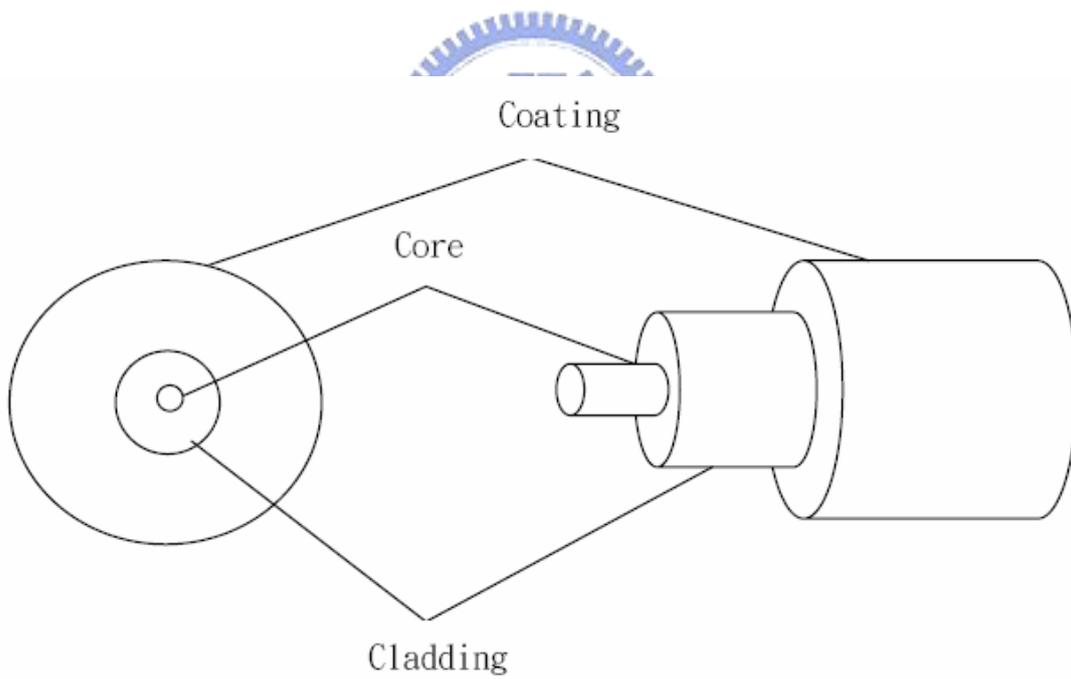


圖 2-6 光纖基本構造圖

(改繪自葉天傑, 2002)

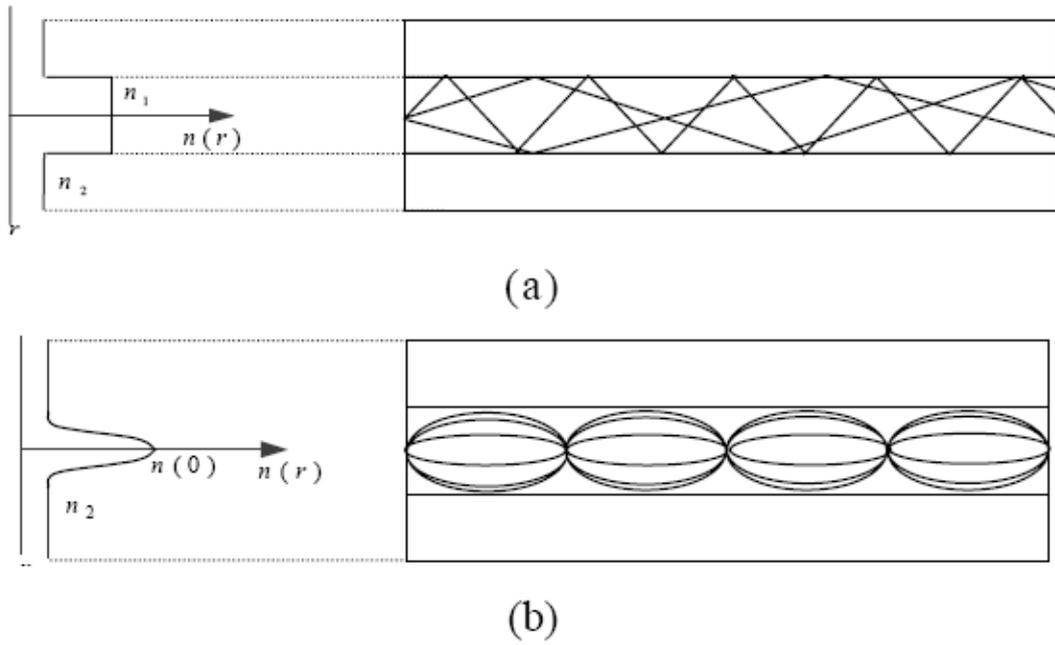


圖 2-7 光纖依折射率分佈的分類
(改繪自葉天傑, 2002)

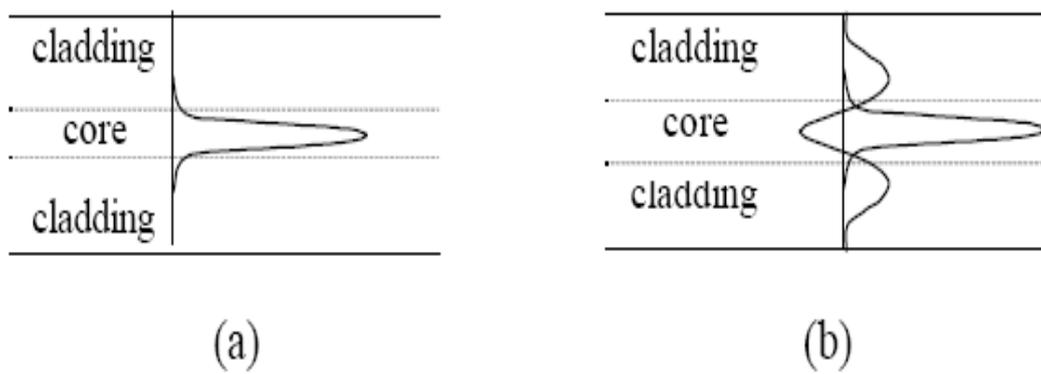


圖 2-8 光纖依傳輸模態分佈的分類
(改繪自葉天傑, 2002)

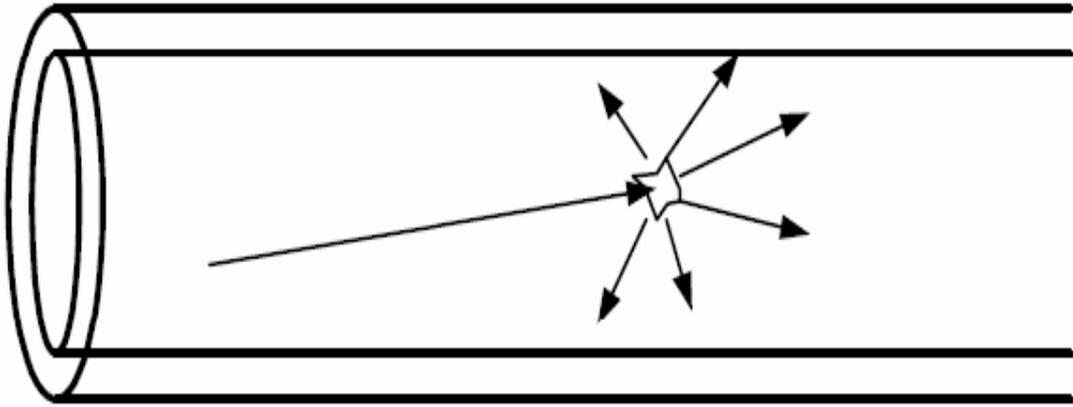
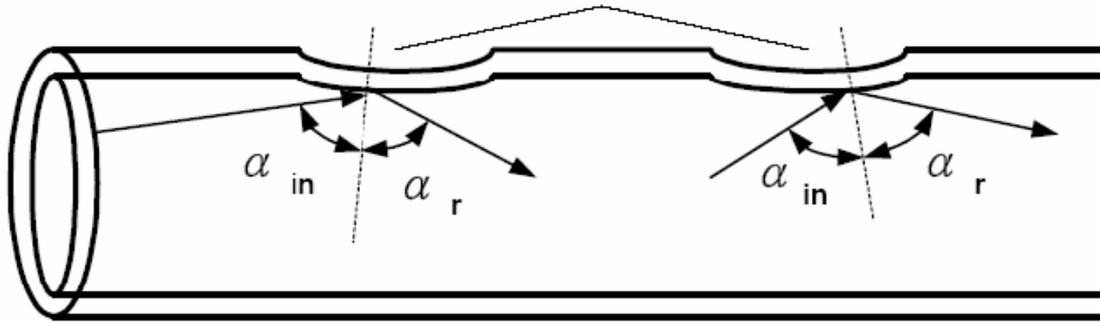


圖 2-9 光散射示意圖
(摘自簡旭君, 2003)



Microbends



$$\alpha_{in} = \alpha_r$$

圖 2-10 局部彎曲造成光損失
(摘自簡旭君, 2003)

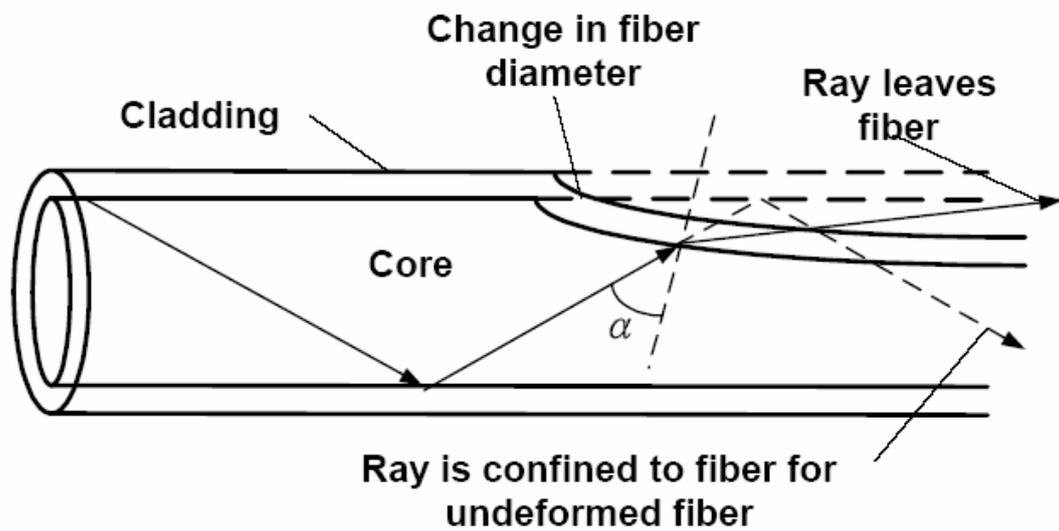


圖 2-11 光纖直徑的改變造成光損失
(摘自簡旭君, 2003)

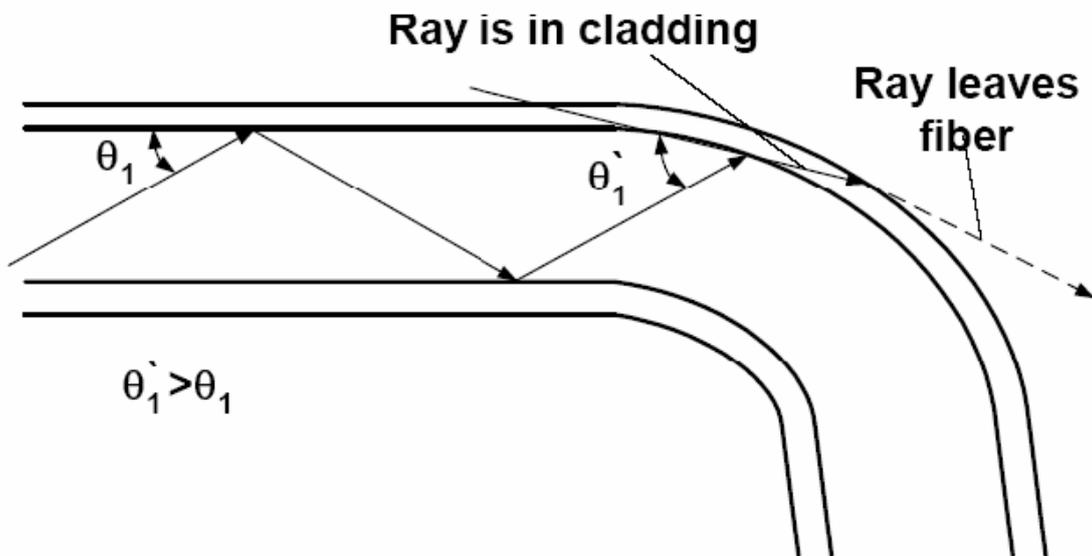


圖 2-12 光纖整體彎曲造成的光損失
(摘自簡旭君, 2003)

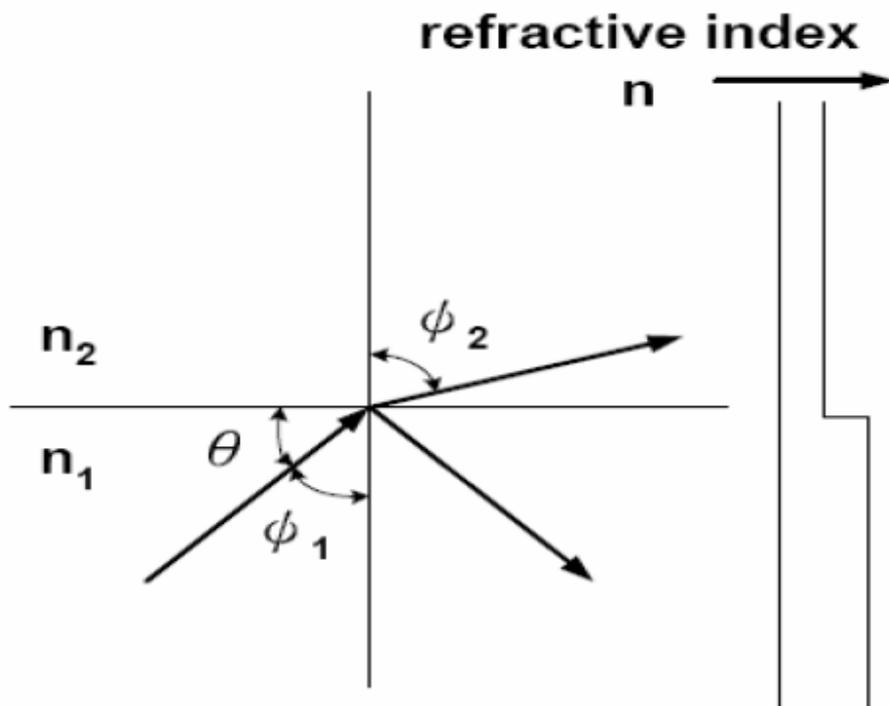


圖 2-13 司乃耳定律示意圖
(改繪自葉天傑, 2003)

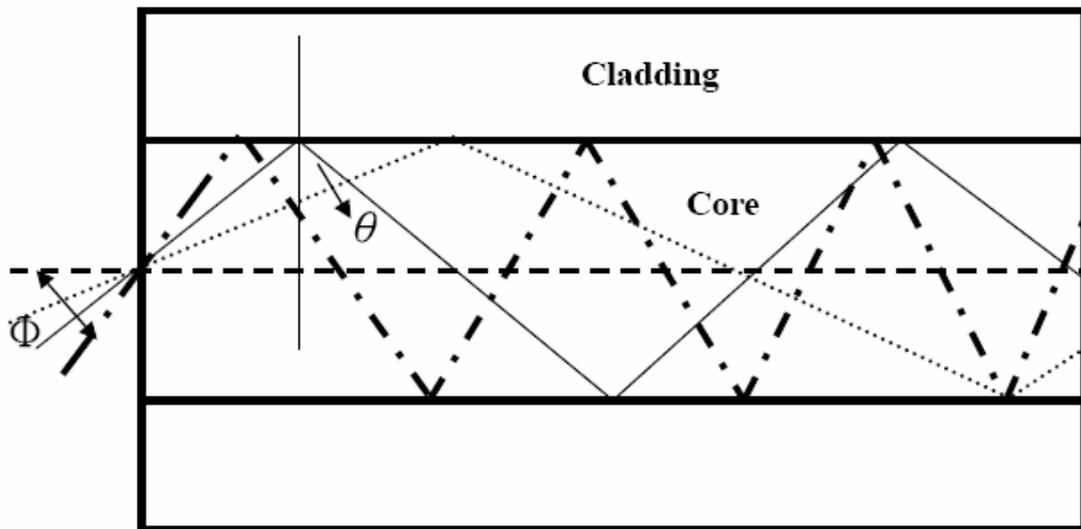


圖 2-14 光在光纖內傳播之路徑圖
(改繪自葉天傑, 2002)

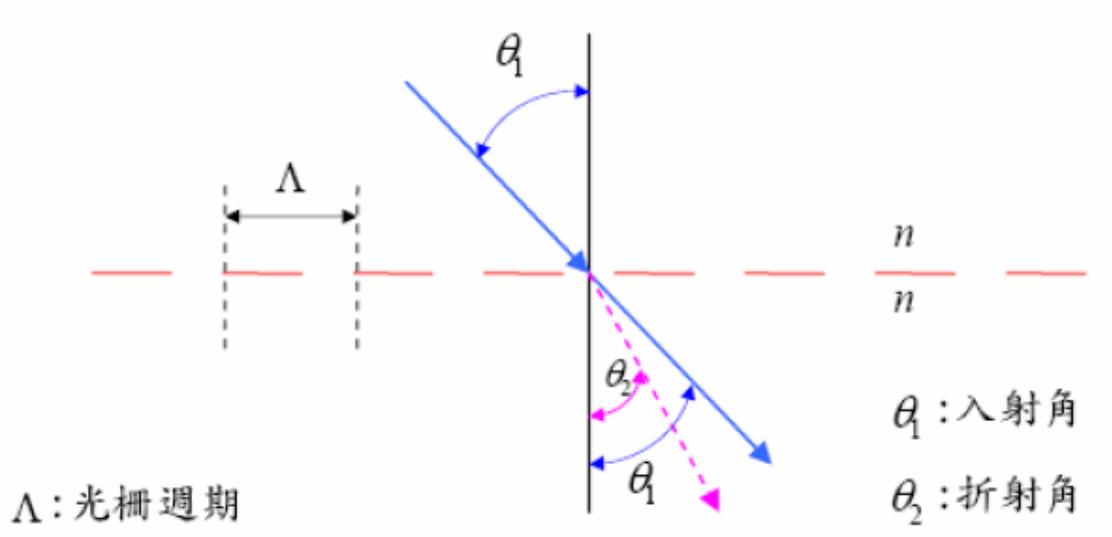


圖 2-15 光纖光柵示意圖
(摘自陳建成, 2003)

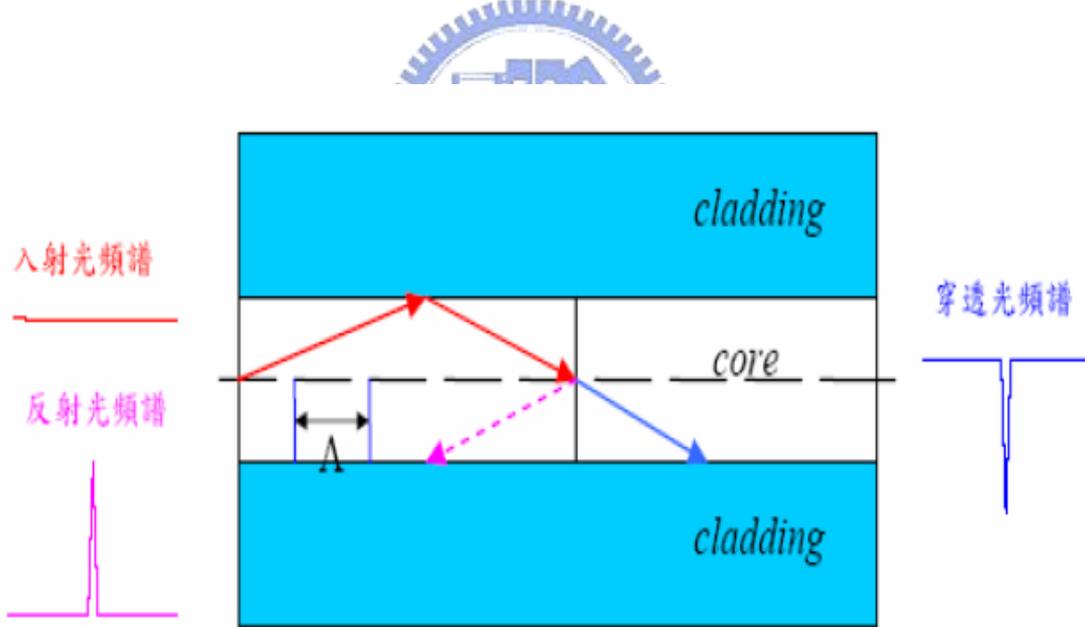


圖 2-16 短週期光纖光柵示意圖
(摘自陳建成, 2003)

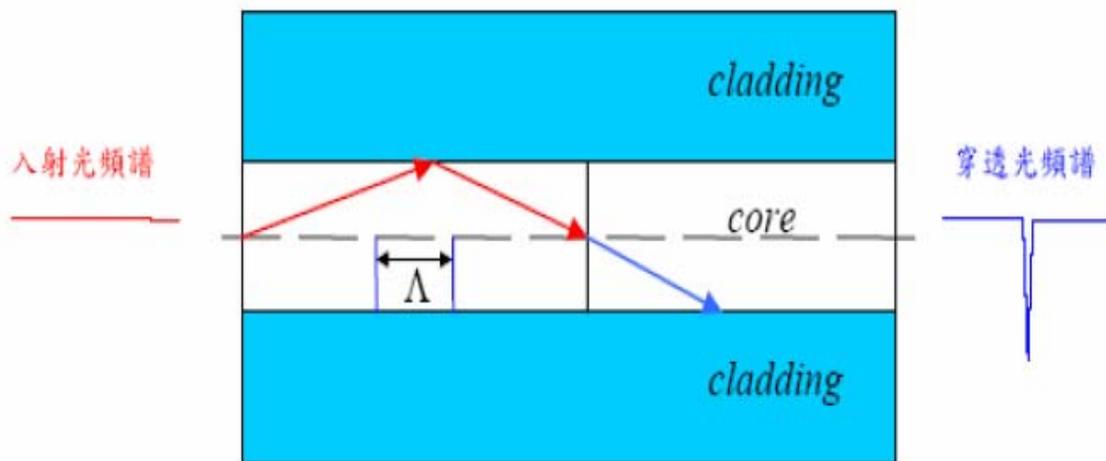


圖 2-17 長週期光纖光柵示意圖

(摘自陳建成, 2003)

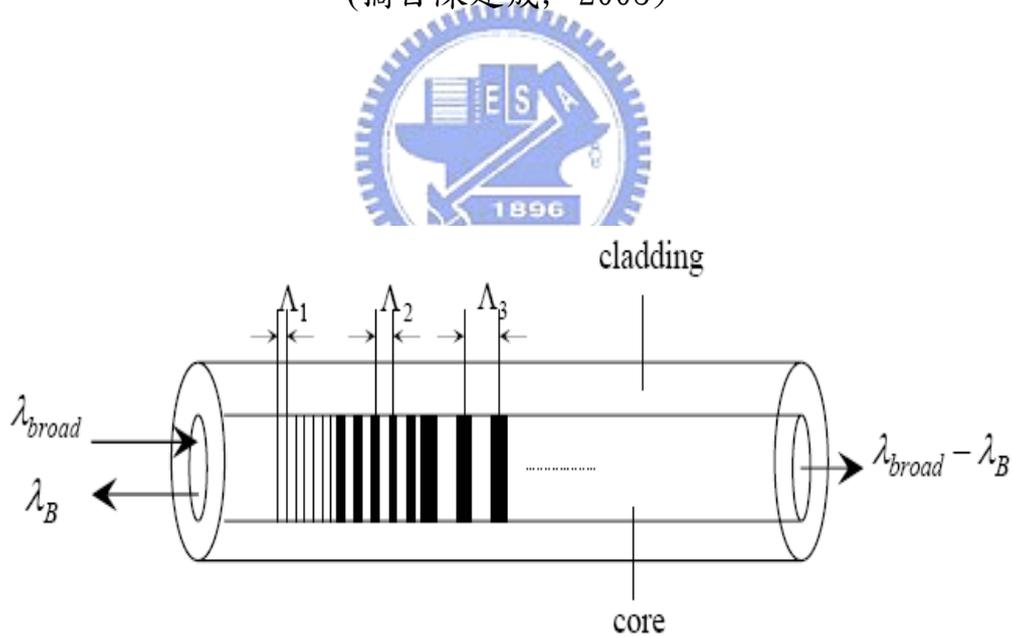


圖 2-18 週期成連續遞增之漸變週期光纖光柵

(摘自李雨青, 2003)

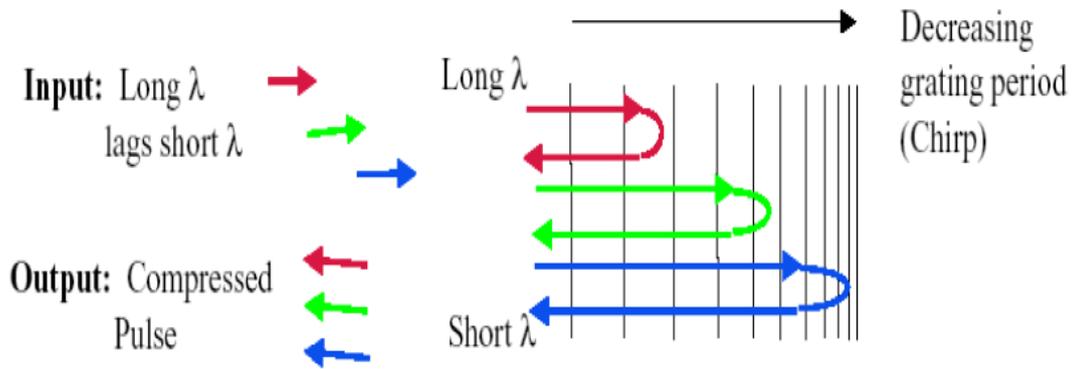


圖 2-19 光脈衝經過漸變式光纖光柵被壓縮的情形
(摘自蔡孟璋,2002)

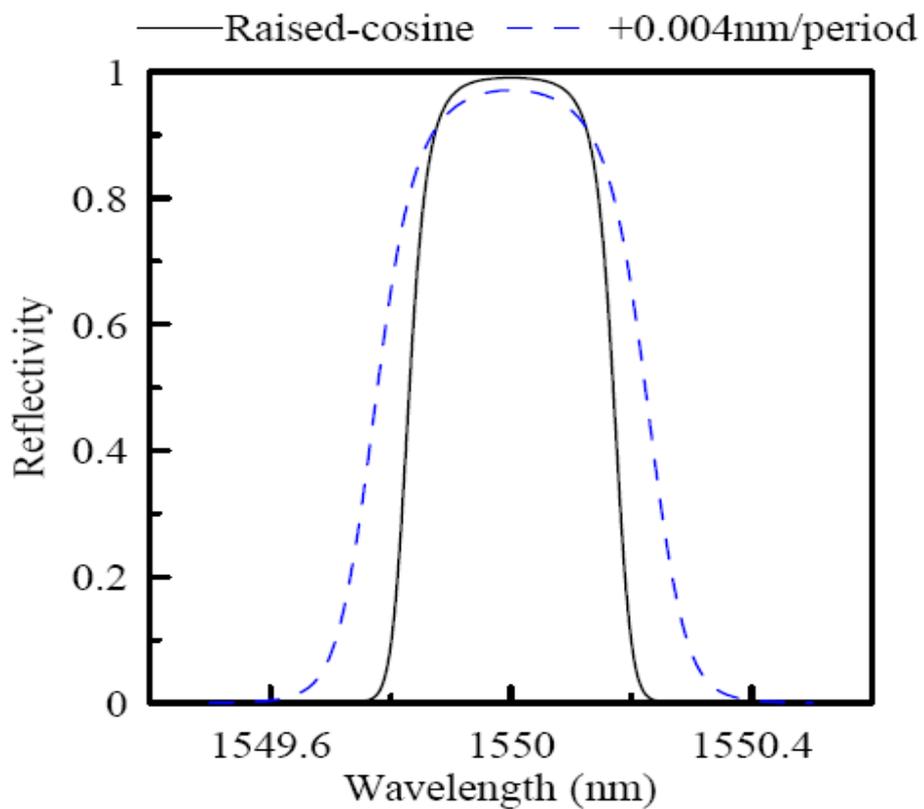


圖 2-20 漸變式光纖光柵受到入射波影響之反射頻譜
(摘自李雨青,2003)

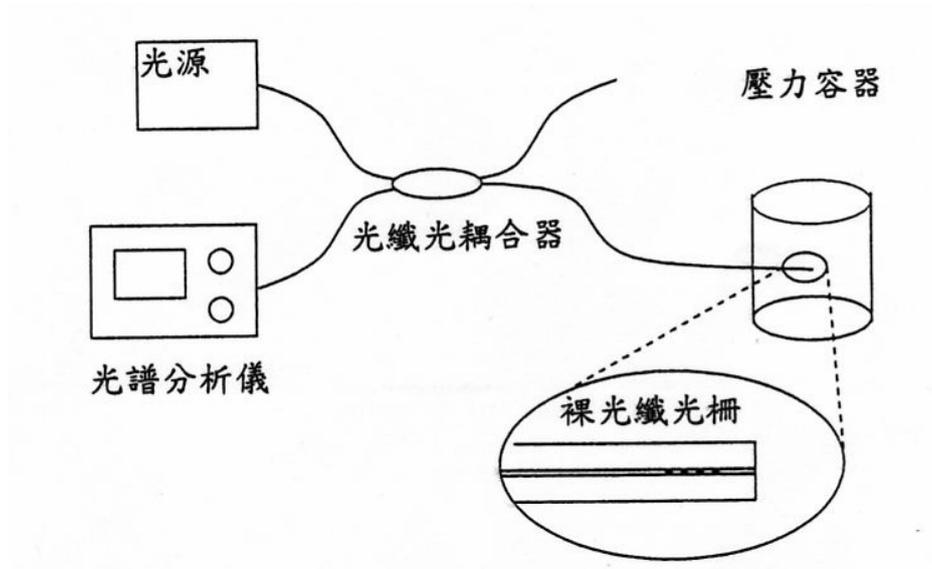


圖 2-21 裸光纖光柵壓力感測器

(摘自 Raman, 1999)

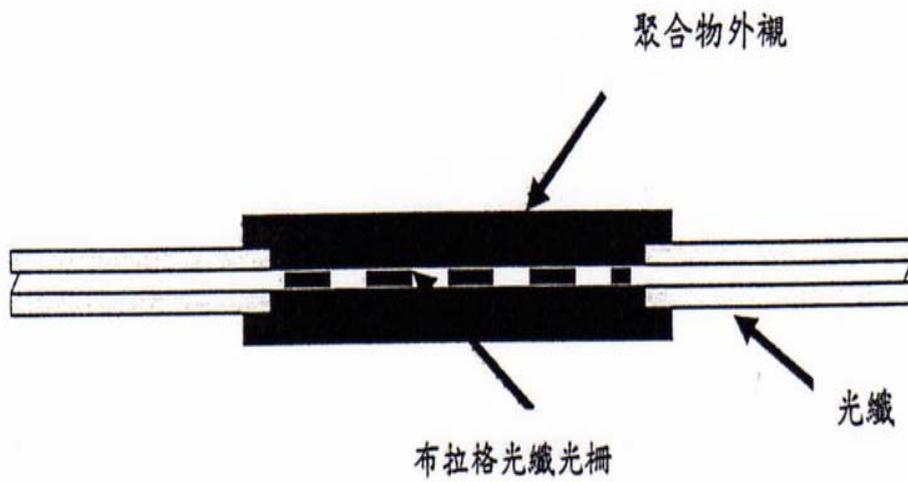


圖 2-22 以聚合物為外襯之光纖光柵壓力感測器

(摘自 Zhang et al., 2001)

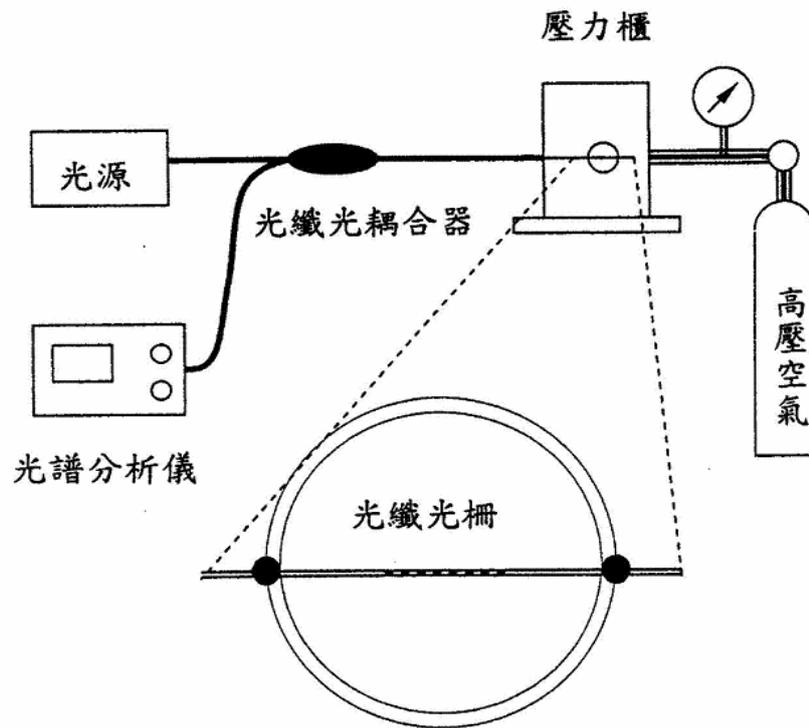


圖 2-23 球狀玻璃為外殼之光纖光柵壓力感測器
(摘自 Xu et al., 1996)

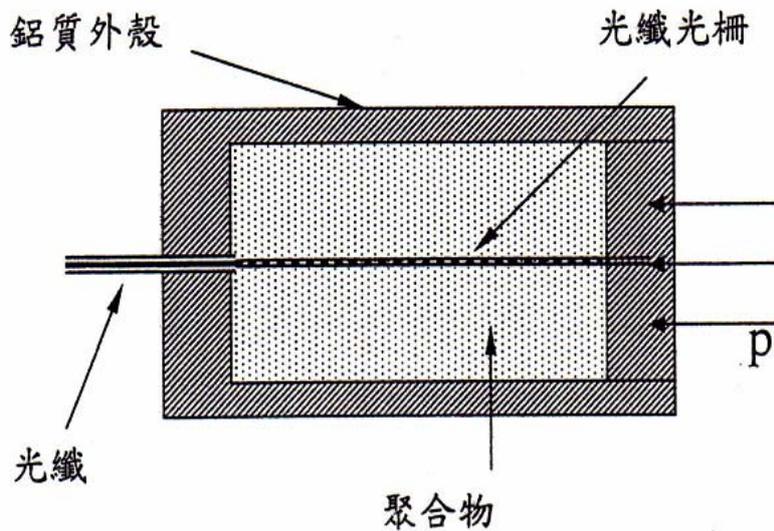


圖 2-24 以聚合物為內襯之光纖光柵壓力感測器
(摘自 Zhang et al., 2001)

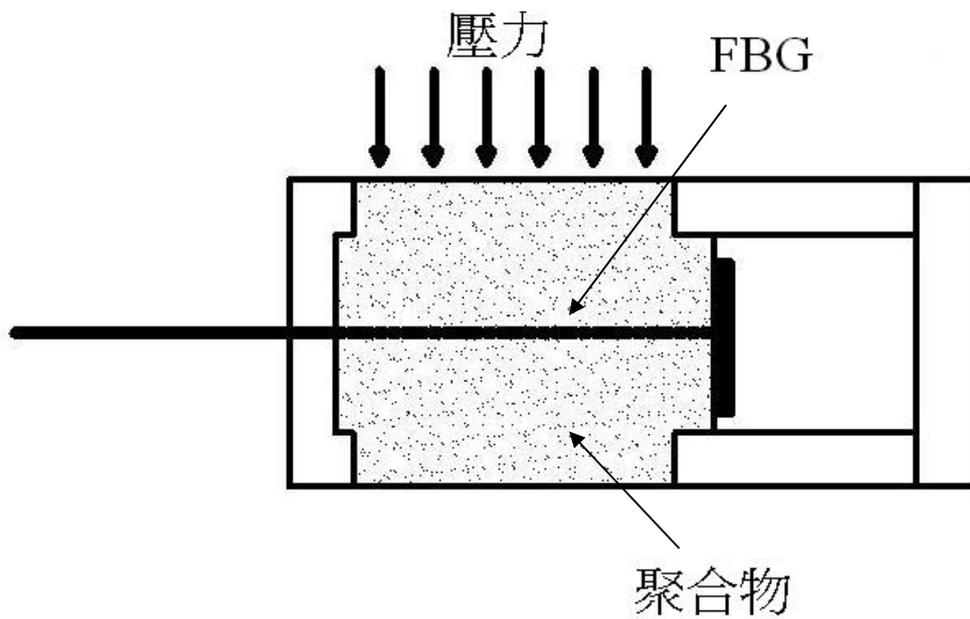


圖 2-25 側壓式壓力感測計
(改繪自申浩然, 2003)

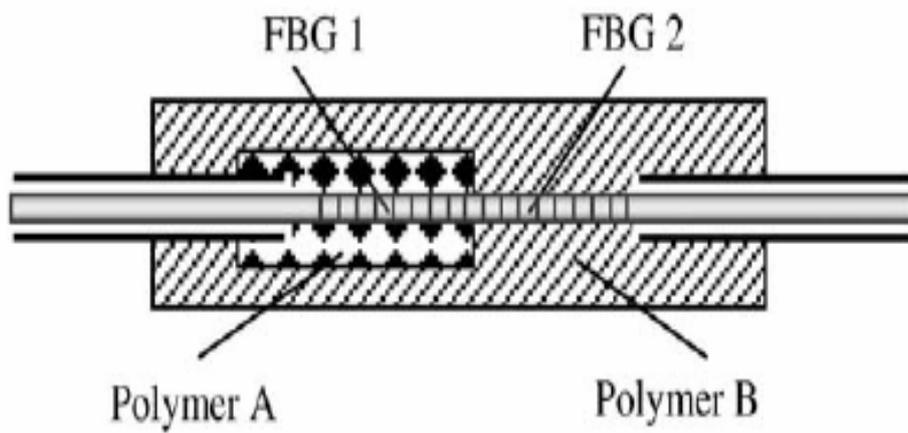


圖 2-26 不同聚合物封裝之光纖光柵壓力感測器
(摘自 Liu et al., 2000)

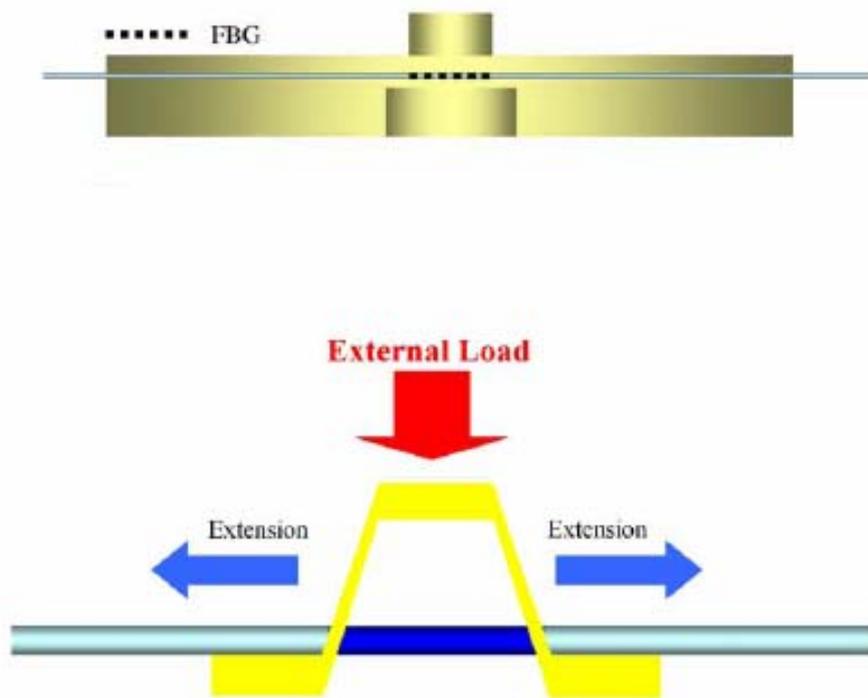


圖 2-27 微型光纖光柵壓力感測器
(摘自 Heo et al., 2005)

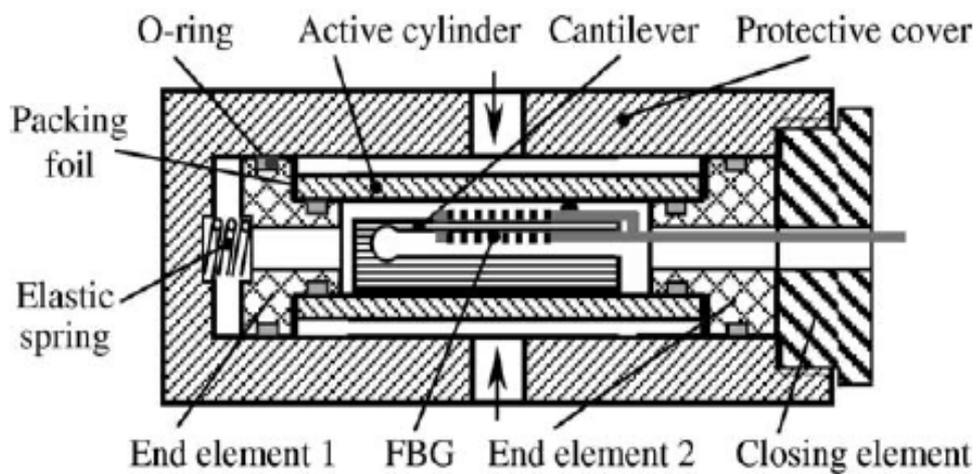


圖 2-28 雙光纖光柵懸臂式壓力感測器
(摘自 Zhao et al., 2004)

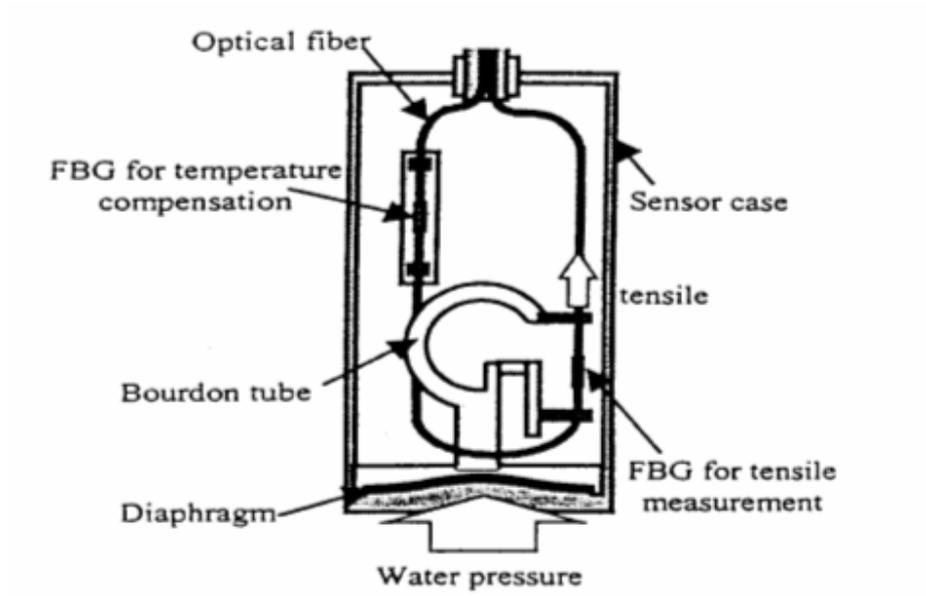


圖 2-29 巴登管式光柵壓力感測器
(摘自 Kojima et al., 2003)

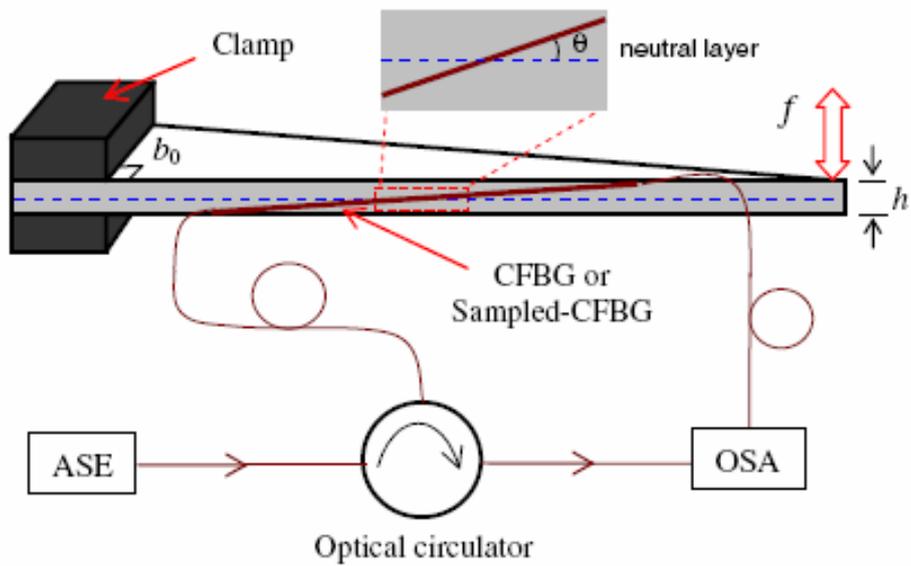


圖 2-30 CFBG 感測器裝置示意圖
(摘自 Dong et al., 2005)

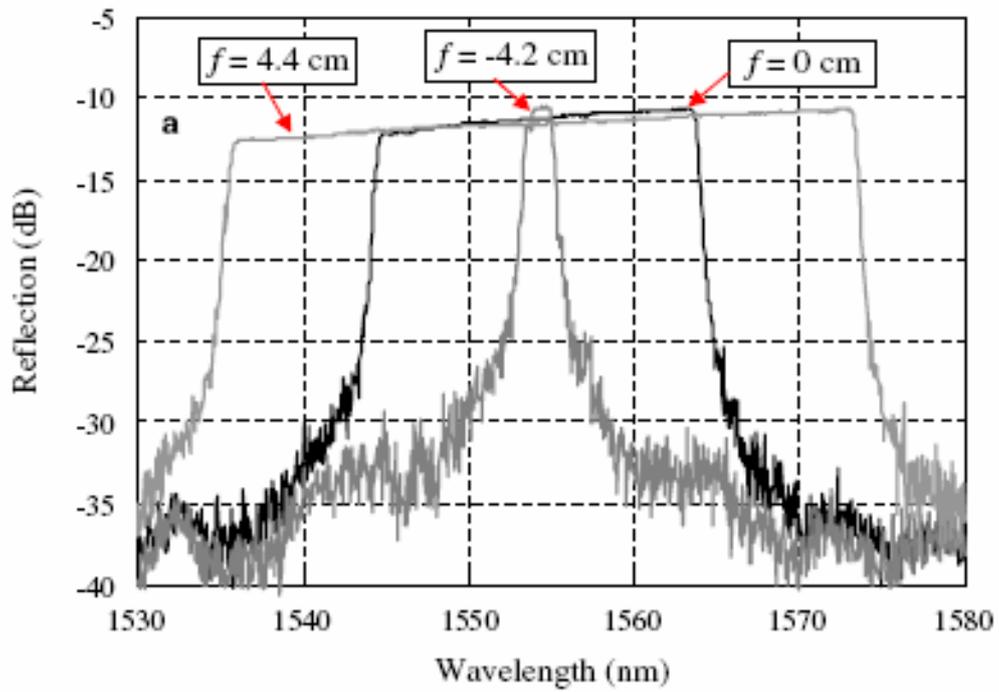


圖 2-31 CFBG 感測器的反射頻譜圖

(摘自 Dong et al., 2005)

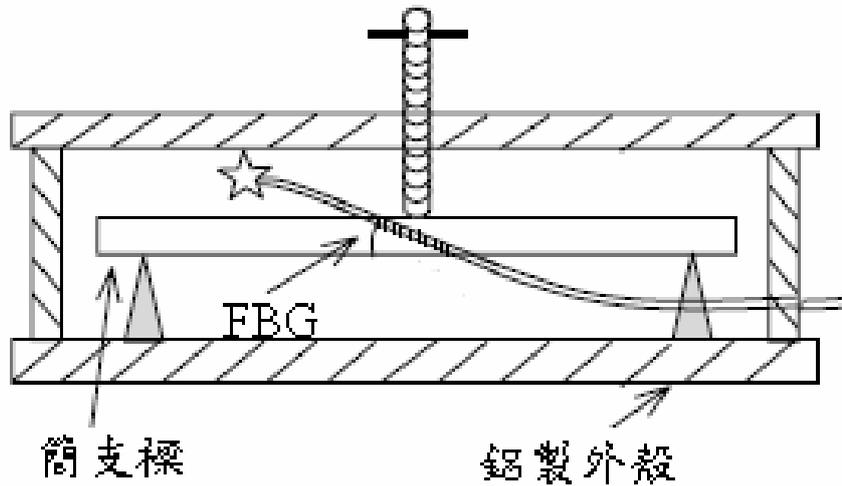


圖 2-32 光纖光柵感測器之示意圖

(摘自 Dong et al., 2002)

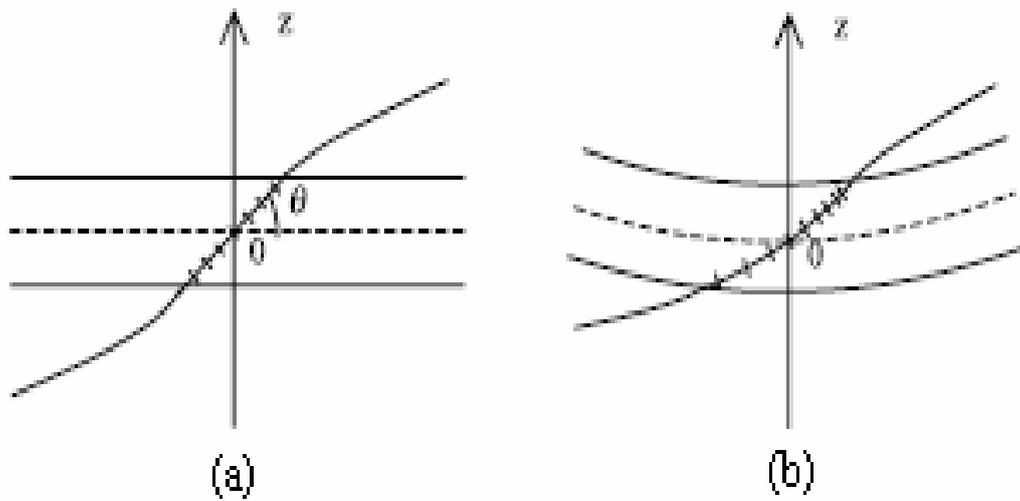


圖 2-33 (a)、(b) 為光纖光柵發生漸變時之示意圖；(a)變形前 b)變形後
(摘自 Dong et al., 2002)

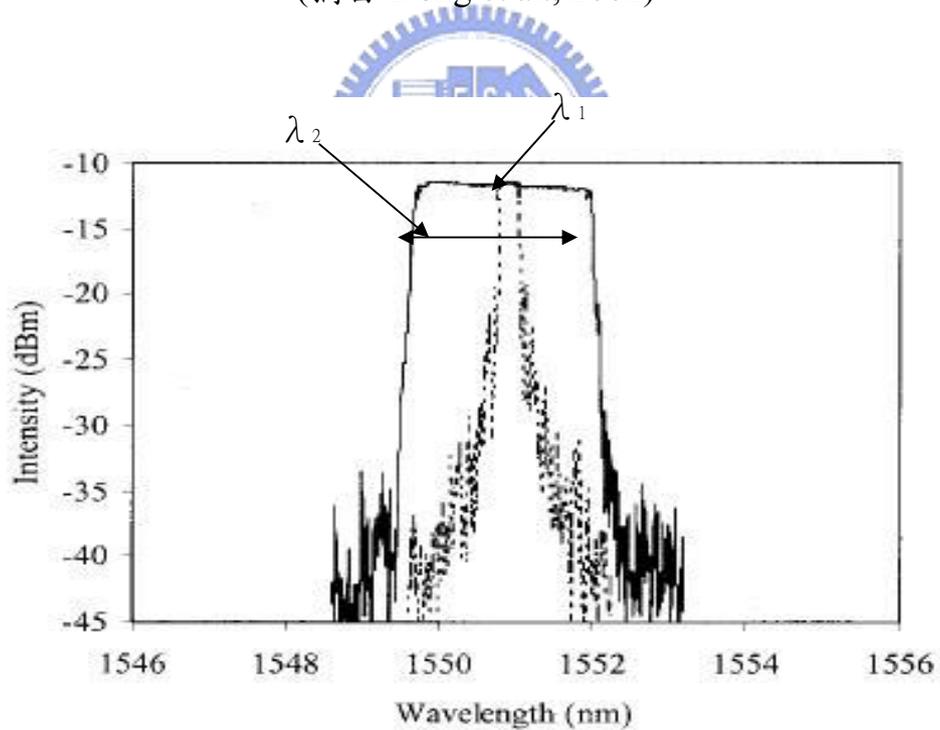


圖 2-34 光纖光柵發生漸變時的反射頻譜分析圖

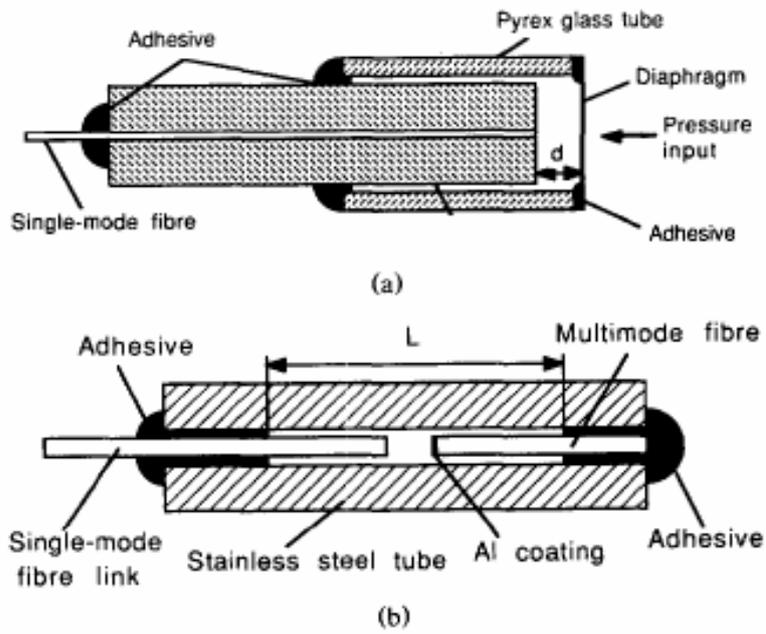


圖 2-35 Fabry-Perot 壓力感測器示意圖

(摘自 Rao et al., 1994)



表 2-1 傳統式水壓計之優缺點比較表

(修改自 USBR, 1987)

種類	量測參數	優點	缺點
豎管式水壓計	孔隙水壓	簡單、可靠、使用歷史長久、不須精細的控制面板、便宜	偶而壓力反應時間慢、豎管必須近乎垂直，容易遭施工機械破壞
氣壓式系統	孔隙水壓或總壓力	觀測站高程和壓力計的高程無關、壓力反應時間很快	防止濕氣進入壓力管、使用歷史短於密閉液壓系統、複雜測讀程式、施工過程壓力管容易被損壞、不易修復
振弦式系統	孔隙水壓或總壓力	容易測讀及維護、壓力反應時間很快、潛在高靈敏度、頻率訊號傳輸可以很遠、可以測讀負值孔隙水壓、較不易遭受施工的損壞	對於溫度敏感、有無法穩定歸零的可能、對大氣壓力的變化敏感、容易因閃電而損壞
電阻式系統	孔隙水壓或總壓力	觀測站高程與壓力計高程無關、壓力反應時間很快、潛在高靈敏度、適合自動測讀、可以測讀負值孔隙水壓	有無法穩定歸零的可能、可能對溫度、濕度、電線接續、電纜線長度及接頭的變化等因素敏感，因為這些因素會改變電路的電阻、一般不宜長時間使用

第三章 研究方法

3.1 光纖光柵壓力感測器的設計原理

3.1.1 漸變式光纖光柵壓力感測器

漸變式壓力感測器是由一個被圓形薄板分成兩區的剛性構件所構成其示意圖如圖 3-1 所示。在感應區，壓力計外部之孔隙水壓透過濾石並作用至薄板上，薄板的另一側貼有光纖光柵作為感測元件。感測器的原理以彈性力學薄板變形為基礎，依照薄板理論，當邊界束制的薄型圓板受到垂直於平面的力時，從圓心到邊界的應變會呈現先受伸張再受壓縮分佈；因此黏貼於薄板半徑上的光纖光柵會發生漸變的形式，也就表示光纖光柵的反射頻譜會以較寬的方式顯示。

漸變式壓力感測器可以應用於其他物理量的量測上，如應變，僅需利用其他構件將應變的改變量傳遞到圓板上即可；也可以做為差壓計，將兩不同壓力分別作用於感測器的兩側，即可得到壓力差。

漸變式光纖光柵壓力感測器的優點：

- (1) 單一孔內可進行多點串接量測，且量測品質不隨感測點數增加而降低。
- (2) 感測元件部份與水隔絕，地下水質狀況並不影響量測品質。
- (3) 可視感測需求，更改感測器的解析度。
- (4) 具有多工的特性，除了壓力感測外，還可以使用在其他物理量的量測上。

3.1.2 拉伸式光纖光柵壓力感測器

拉伸式光纖光柵壓力感測器是以圓柱型中空鋼材為外殼，內部含有一光纖光柵與作為感測元件的金屬薄片組成，如圖 3-2 所示，圖 3-3 為此感

測器的簡易構造圖，此感測器的設計原理採用等週期式光纖光柵波長與壓力間之關係來設計。含有光纖光柵的光纖之一端固定於壓力計下方，此部分視為固定不動點，而另一端則黏著於一彈性金屬模上，當壓力計內部壓力改變時金屬模隨之變形，因此光纖光柵所感受的應變也隨之變化。在彈性金屬膜的線彈性範圍內，此設計的光纖光柵波長做等週期式之變化，因此光纖光柵波峰值與壓力有一線性關係。但此一設計無法隔離溫度改變對光纖光柵波峰值之影響，因此必須加入一呆 (dummy) 光纖光柵做為感應溫度變化之用。

3.2 薄板理論

有關薄板理論(Thin Plate Theory)的研究歷史由來已久。現今為一般所認可的微小變形薄板理論，通稱為 Kirchhoff-Love plate theory。其正確性已經由大量的實務經驗所證實，值得信賴，。將其簡單介紹如下：

一、 基本假設：

Kirchhoff-Love plate theory 乃基於以下的基本假設：

- (1) 材料性質為彈性、均質、等向。
- (2) 薄板表面平坦。
- (3) 薄板的其他任一方向長度，應至少大於其厚度 10 倍以上。
- (4) 薄板的變形撓度與其厚度相較，仍屬微小，不可大於其 $1/10 \sim 1/5$ 。
- (5) 所有的變形概以薄板的中性面(middle surface)為準。
- (6) 變形之後，斷面的平面仍維持平面。
- (7) 垂直於中性面的應力忽略不計。
- (8) 由平面內應力所引起之應變不計。

二、 控制方程式推導

首先，可以考慮如此的薄板模型，圖 3-4，其中 u 、 v 、 w 為 X 、 Y 、

Z 方向上的變形撓度。並假設薄板僅承受 Z 向載重。

如此可得三個基本的靜力平衡方程式，如下：

$$\begin{cases} \sum M_x = 0 \\ \sum M_y = 0 \\ \sum M_{xy} = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

其中

M_x = 所有對 X 軸的彎矩總和

M_y = 所有對 Y 軸的彎矩總和

M_{xy} = 所有對 Z 軸的彎矩總和

以(3-1)式為例，考慮所有對 Y 軸的彎矩總和為 0，即得：

$$\begin{aligned} & (m_x + \frac{\partial m_x}{\partial x} dx)dy - m_x dy + (m_{yx} + \frac{\partial m_{yx}}{\partial y} dy)dx - m_{yx} dx \\ & - (S_x + \frac{\partial S_x}{\partial x} dx)dy \frac{dx}{2} - S_x dy \frac{dx}{2} - p dx dy \frac{dx}{2} = 0 \end{aligned} \quad (3-2)$$

其中

m_x 、 m_y = 彎矩(Bending moment)

m_{xy} = 轉矩(Twisting moment)

S_x 、 S_y = 垂直剪力

經合併簡化，並忽略高次項後，整理可得：

$$\frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_{yx}}{\partial y} = S_x \quad (3-3)$$

同理，由式(3-1a)對 X 軸總彎矩為 0，整理可得：

$$\frac{\partial m_y}{\partial y} + \frac{\partial m_{xy}}{\partial x} = S_y \quad (3-4)$$

又同理，由式(3-1c)，Z 軸方向合力為 0，整理後得：

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} = -p \quad (3-5)$$

將是(3-3)(3-4)都帶入式(3-5)，即得：

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial y^2} = -p(x, y) \quad (3-6)$$

另由二維的虎克定律(Hooke's Law)，可得知：

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{xx} + \nu \epsilon_{yy}) \\ \sigma_{yy} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{yy} + \nu \epsilon_{xx}) \\ \sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \end{cases} \quad (3-7)$$

其中

E=彈性模數

ν =波以松比

撓度 w 與 Z 無關，故薄板的撓度可以表示為 $w(x, y)$ ，又考慮微小變形的前提下，可以做下列的近似：

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = -Z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \epsilon_{yy} = -Z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} = -2Z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (3-8)$$


於是，將是(3-8)，代入式(3-7)，可得：

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = -\frac{EZ}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_{yy} = -\frac{EZ}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \sigma_{xy} = -\frac{EZ}{1+\nu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (3-9)$$

再者，可由彎矩的基本表示式，來連結起外應力與內應力之間的關係，如下所示：

$$\begin{cases} m_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} z dz \\ m_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yy} z dz \\ m_{xy} = -m_{yx} = \int_{-h/2}^{h/2} -\sigma_{xy} z dz \end{cases} \quad (3-10)$$

於是，將式(3-9)分別代入式(3-10)，並予以積分後，得：

$$\begin{cases} m_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ m_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ m_{xy} = -m_{yx} = -(1-\nu) D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (3-11)$$

其中

$$D = \frac{2Eh^3}{3(1-\nu)} = \text{彈性剛性 (flexural-rigidity)}$$

最後，將式(3-11)帶入式(3-6)，得

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] + 2(1+\nu) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right] = p(x, y) \quad (3-12)$$

再經整理簡化後，即可得薄板的控制方程式(Governing Differential Equation)，如下：

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x, y)}{D} \quad (3-13)$$

或以拉普拉斯運算符號表示，即：

$$\nabla^4 w = \frac{p(x, y)}{D} \quad (3-14)$$

完成薄板變形推導過程

3.2 圓形薄板理論

實務應用上，承受力的物件常使用圓形作為形狀，因為圓板具有對稱性，便於分析；通常在考慮圓版時，以極座標來分析之，因為以極座標分

析有形狀上或受力上的對稱性，可簡化分析上的複雜性。

3.2.1 圓板理論推導 (Circular Plate Theory)

考慮卡式座標系與極座標的關係，可以假設圓板在極座標下，如圖 3-5 所示

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \end{cases} \quad (3-15)$$

再來，以極座標的系統，來描述一圓板之變形撓度

$$w = w(r, \theta)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3-16)$$

由(3-14)可得

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{x}{y} = \cos \theta \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{y}{x^2 + y^2} = -\frac{1}{r} \sin \theta \end{cases} \quad (3-17)$$



將(3-16)帶入(3-15)可得

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \cos \theta \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{1}{r} \sin \theta \frac{\partial w}{\partial \theta} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) = \left(\cos \theta \frac{\partial}{\partial r} - \sin \theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \left(\cos \theta \frac{\partial w}{\partial r} - \sin \theta \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \\ &= \cos^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \sin^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \sin^2 \theta \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{1}{r} \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \sin 2\theta \frac{\partial w}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (3-19)$$

同理可得

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \sin \theta \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \cos \theta \frac{\partial w}{\partial \theta} \quad (3-20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} &= \sin^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cos^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \cos^2 \theta \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} \\ &\quad - \frac{1}{r^2} \sin 2\theta \frac{\partial w}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (3-21)$$

將(3-19)、(3-21)，代入 Laplace operator $\nabla^2 w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$

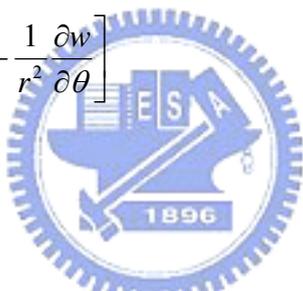
可得在極座標下的 Laplace operator 為：

$$\nabla^2 w = \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \quad (3-22)$$

由(3-14)的控制方程式可知圓板在極座標下的控制方程式為

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) = \frac{p(x, y)}{D} \quad (3-23)$$

將(3-19)、(3-21)，代入(3-11) 可得到極座標下內力的撓度表示式：

$$\begin{cases} M_r = -D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) \right] \\ M_\theta = -D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] \\ M_{r\theta} = D(1-\nu) \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right] \\ S_r = -D \frac{\partial}{\partial r} (\nabla^2 w) \\ S_\theta = -\frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\nabla^2 w) \end{cases} \quad (3-24)$$


當 x 軸與 r 軸重合時，即 $\theta=0$ 時，(3-23)可表示為：

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{p(r)}{D} \quad (3-25)$$

將(3-19)、(3-21)，代入(3-9)可得極座標下應力表示式：

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{zM_r}{I} \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{zM_\theta}{I} \\ \sigma_{zr} = \frac{S_r}{2I} (h^2 - z^2) \end{cases} \quad (3-26)$$

其中 $I = \frac{2h^3}{3}$ 為慣性矩

3.2.2 圓板邊界條件的探討

由於圓板的控制方程式，為四階的偏微分方程式。所以需要利用邊界條件，以提供足夠的方程式，來求解所需的係數。

再考慮半徑為 R 的圓板，其所對應常見的邊界型式，如下所示：

(1) 固定支承(clamped)

為固定端，其位移與轉角為零，得 $(w)_{x=R} = 0$; $\left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)_{x=R} = 0$

(2) 簡支承(simple supported)

為簡支端，其位移與彎矩為零，得 $(w)_{x=R} = 0$; $(M_r)_{r=R} = 0$

(3) 自由端(free)

在自由端，可得 $(Q_r)_{r=R} = 0$; $(M_r)_{r=R} = M_g$

3.2.3 圓板的軸對稱彎曲

在本研究中，僅需考慮邊界固定的條件下圓板的變形，因此以下對於此條件的圓板彎曲進行推導：



(1) 受均佈載重 p 作用的圓形薄板，假設半徑為 R，邊界固定，r 為半徑上圓心到邊界的距離。

首先，將(3-25)積分可得：

$$r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{pr^2}{2D} + C_1 \quad (3-27)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{pr^2}{4D} + C_1 \ln r + C_2 \quad (3-28)$$

$$r \frac{dw}{dr} = \frac{pr^4}{16D} + C_1 \left(\frac{r^2}{2} \ln r - \frac{r^2}{4} \right) + C_2 \frac{r^2}{2} + C_3 \quad (3-29)$$

$$w = \frac{pr^4}{64D} + C_1 \left(\frac{r^2}{4} \ln r - \frac{r^2}{4} \right) + C_2 \frac{r^2}{4} + C_3 \ln r + C_4 \quad (3-30)$$

因為在 r=0 處，撓度與內力為有限值，所以 $C_1=C_3=0$ ；在 r=R 處，

由邊界條件可知 $(w)_{x=R} = 0$; $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=R} = 0$ ，代入(3-30)得：

$$w = 0 = \frac{pR^4}{64D} + \frac{C_2R^2}{4} + C_4 \quad (3-31)$$

$$\frac{dw}{dr} = 0 = \frac{pR^3}{16D} + \frac{C_2R}{2} \quad (3-32)$$

解之，得 $C_2 = -\frac{pR^2}{8D}$, $C_4 = \frac{pR^4}{64D}$

$$w = 0 = \frac{pR^4}{64D} - \frac{pr^2R^2}{32D} + \frac{pR^4}{64D} = \frac{p(R^2 - r^2)^2}{64D} \quad (3-33)$$

將(3-33)，代入(3-24)得到：

$$\begin{cases} M_r = \frac{p}{16} [(1+\nu)R^2 - (3+\nu)r^2] \\ M_\theta = \frac{p}{16} [(1+\nu)R^2 - (1+3\nu)r^2] \\ S_r = -\frac{pr}{2} \end{cases} \quad (3-34)$$

- (2) 中心受集中荷載 P 作用的圓形薄板，假設半徑為 R ，邊界固定， r 為半徑上圓心到邊界的距離。

因為 $q(r) = 0$ ，可得

$$w = C_1r^2 \ln r + C_2 \ln r + C_3r^2 + C_4 \quad (3-35)$$

當 $r=0$ ，位移為有限值，所以 $C_2=0$ ，(3-34)可簡化為

$$w = C_1r^2 \ln r + C_3r^2 + C_4 \quad (3-36)$$

將(3-36)，代入式(3-24)可得

$$Q_r = -\frac{4DC_1}{r} \quad (3-37)$$

如果以圓板中央部分取出半徑為 r 、高度為 h 的圓柱體，由平衡條件得

$$2\pi Q_r + P = 0 \quad (3-38)$$

$$Q_r = -\frac{P}{2\pi} \quad (3-39)$$

比較(3-37)與(3-39)得 $C_1 = \frac{P}{8\pi D}$

由邊界條件可知 $(w)_{x=R} = 0$; $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=R} = 0$, 得 :

$$w = 0 = \frac{P}{8\pi D} R^2 \ln R + C_3 R^2 + C_4 \quad (3-40)$$

$$\frac{dw}{dr} = 0 = 2C_3 R + \frac{P}{8\pi D} (1 + 2 \ln R) \quad (3-41)$$

解之，得 $C_3 = -\frac{P}{16\pi D} (1 + 2 \ln R)$, $C_4 = -\frac{PR^2}{16\pi D}$

$$w = \frac{P}{16\pi D} \left(2r^2 \ln \frac{r}{R} + R^2 - r^2 \right) \quad (3-42)$$

將(3-42)，代入(3-24)得到：

$$\begin{cases} M_r = \frac{P}{16\pi D} \left[(1+\nu) \frac{r}{R} - 1 \right] \\ M_\theta = \frac{P}{16\pi D} \left[(1+\nu) \frac{r}{R} - \nu \right] \\ S_r = -\frac{P}{2\pi r} \end{cases} \quad (3-43)$$



3.3 光纖光柵壓力感測器的量測原理

3.1 節分別敘述，兩種壓力感測器的設計原理，3.2 節則討論出當圓板受力時的，圓板上內力的關係式，此節將運用 3.2 節的結果，討論壓力感測器的波長與壓力的關係。

3.3.1 漸變式光纖光柵壓力感測器

當半徑為 R ，厚度為 t 的感測元件受到壓力 p 作用時，漸變式壓力感測器的波長與壓力關係，如下所推導：

將(3-34)代入(3-36)，可以得到受均佈載重下，圓板的內應力關係式

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{zM_r}{I} = \frac{pz}{16I} [(1+\nu)R^2 - (3+\nu)r^2] \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{zM_\theta}{I} = \frac{pz}{16I} [(1+\nu)R^2 - (1+3\nu)r^2] \\ \sigma_{zr} = \frac{S_r}{2I} (h^2 - z^2) = -\frac{pr}{4I} (h^2 - z^2) \end{cases} \quad (3-44)$$

由虎克定律(Hooke's Law)，可得知：

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu\sigma_{\theta\theta}) \quad (3-45)$$

將(3-44)代入(3-45)，可得薄板上任一點的 r 方向的應變

$$\varepsilon = \frac{pzR^2}{16EI} \left[(1-\nu^2) - (3+5\nu) \frac{r^2}{R^2} \right] = \frac{3pR^2}{16Eh^2} \left[(1-\nu^2) - (3+5\nu) \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (3-46)$$

觀察(3-46)可知，若圓板的半徑越大，厚度越薄所產生的應變則越大。

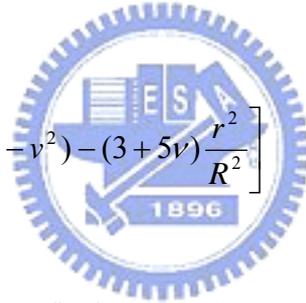
所以這種結構的壓力感測器，波長與壓力的關係可以由(2-12) 與

(3-46)得到：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon \varepsilon = \frac{3pR^2 K}{16Eh^2} \left[(1-\nu^2) - (3+5\nu) \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (3-47)$$

其中

K_ε = 光纖所受應變的敏感係數



3.3.2 拉伸式光纖光柵壓力感測器

拉伸式壓力感測器的光纖光柵是以感測器上的金屬薄片變形作為感

測的元件。當感測器受到壓力 p 作用時，金屬薄片會產生 z 方向的

變形，由(3-33)可以得到圓形薄片的 z 方向變形方程式為：

$$w = \frac{p(R^2 - r^2)^2}{64D} \quad (3-33)$$

薄片的變形量即為光纖光柵的變形量，因為光纖光柵位於感測器中心，且穿過薄板的圓心部分($r=0$)，所以光纖光柵所受到的應變為：

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{w}{l} = \frac{pR^4}{64Dl} \quad (3-48)$$

其中

l =光纖光柵的長度

所以這種結構的壓力感測器，波長與壓力的關係可以為：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon \varepsilon = K_\varepsilon \frac{pR^4}{64Dl} \quad (3-49)$$

其中

K_ε =光纖所受應變的敏感係數

$$D = \frac{2Eh^3}{3(1-\nu)} = \text{彈性剛性(flexural - rigidity)}$$



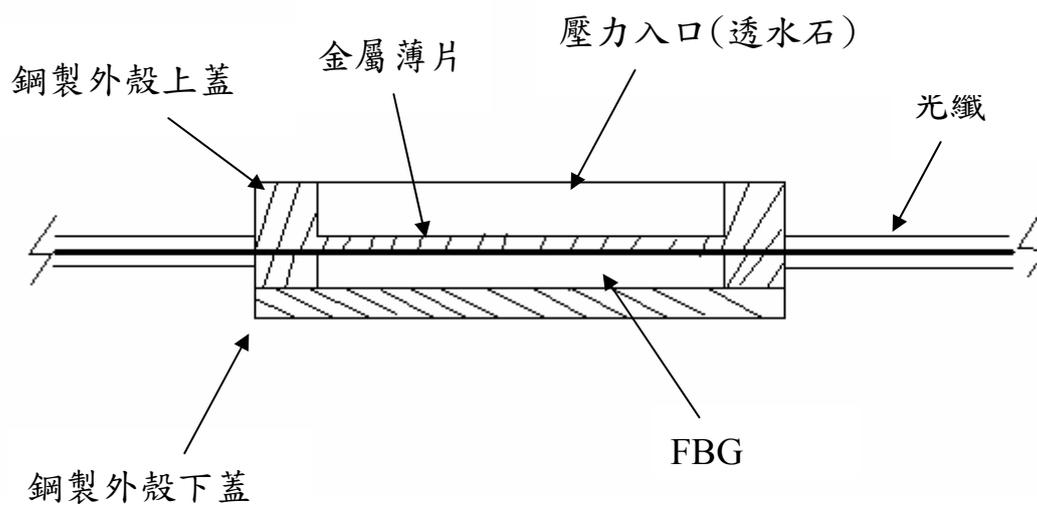


圖 3-1 漸變式壓力感測器示意圖

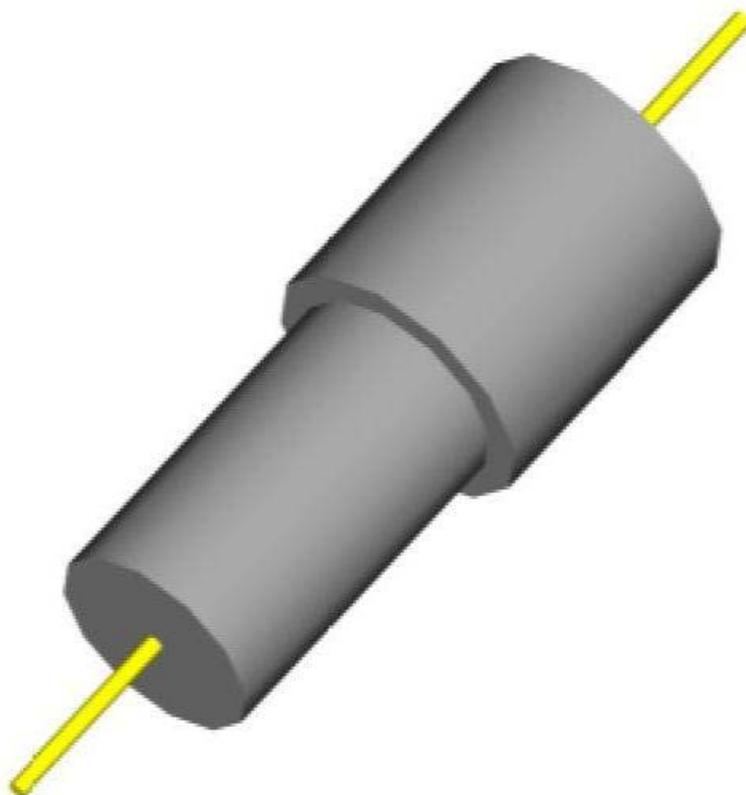


圖 3-2 拉伸式光纖光柵壓力感測器構造圖

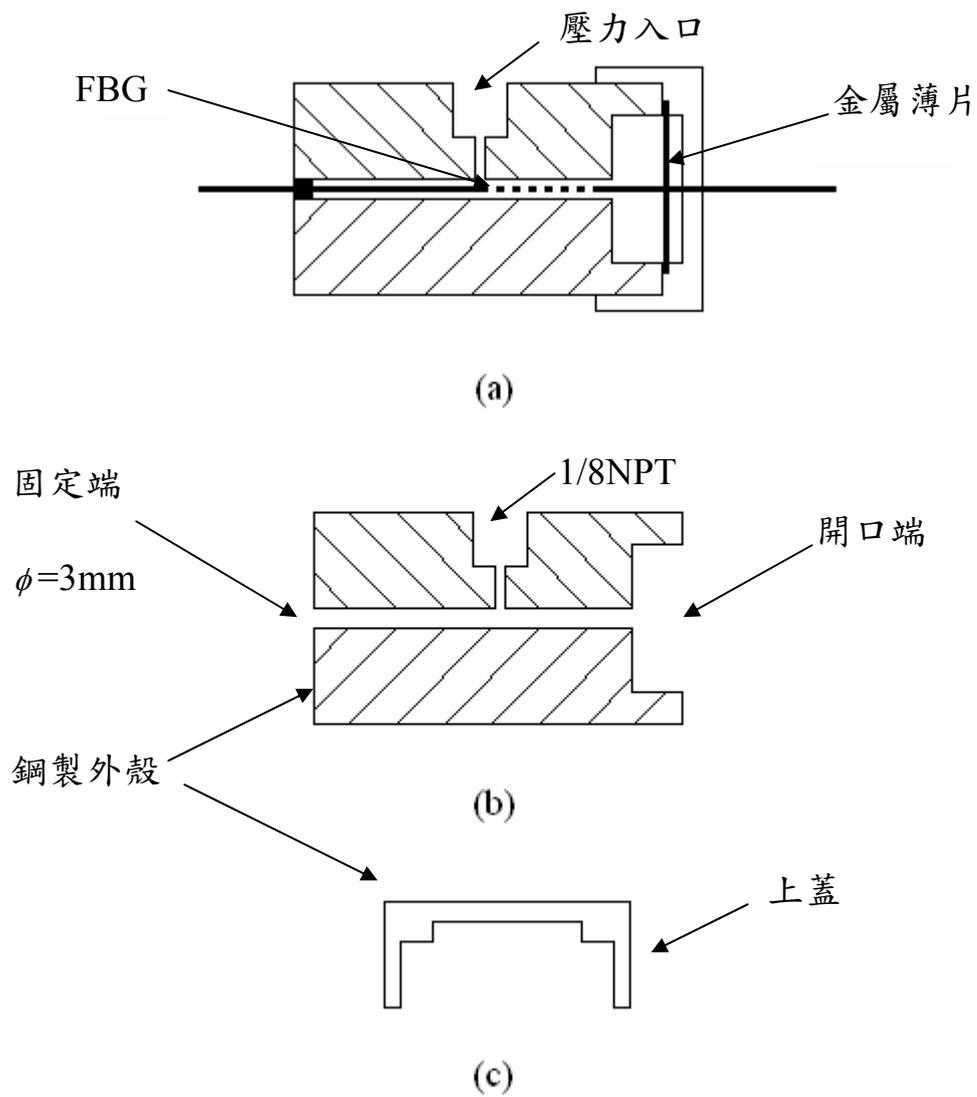


圖 3-3 拉伸式光纖光柵壓力感測器構造示意圖

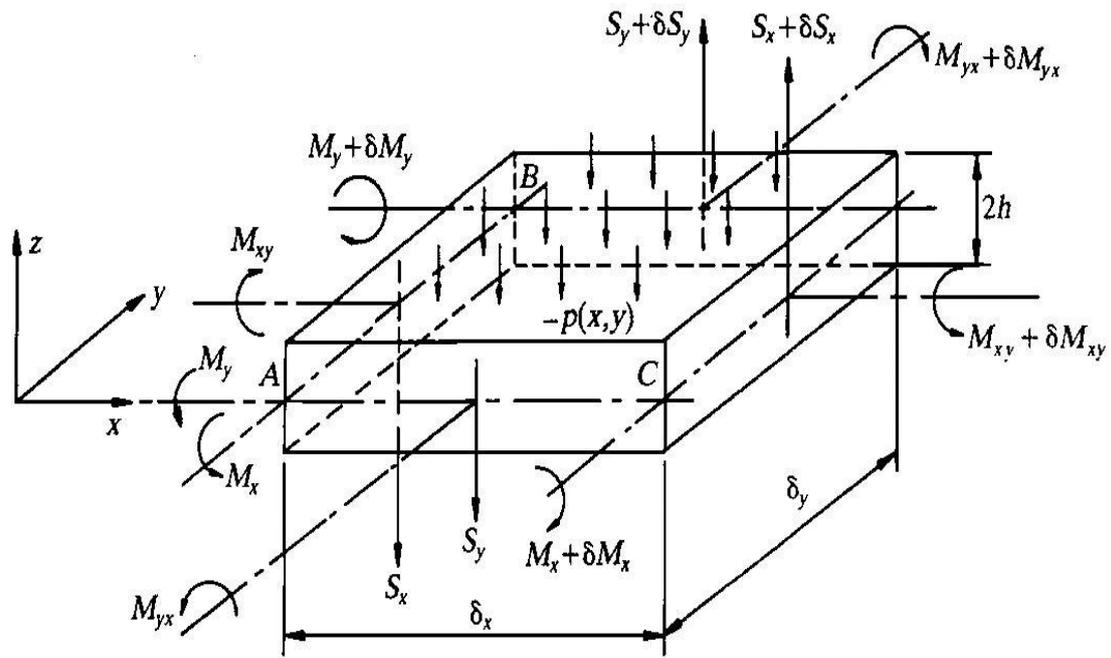


圖 3-4 平板上微小元素的內力示意圖

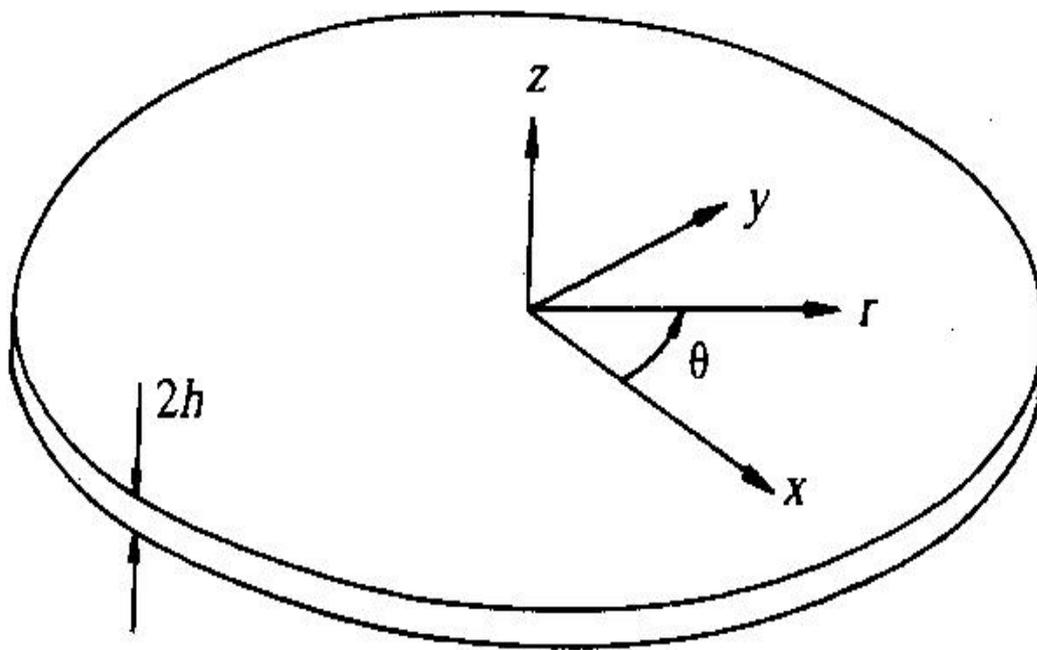


圖 3-5 圓板在極座標下示意圖

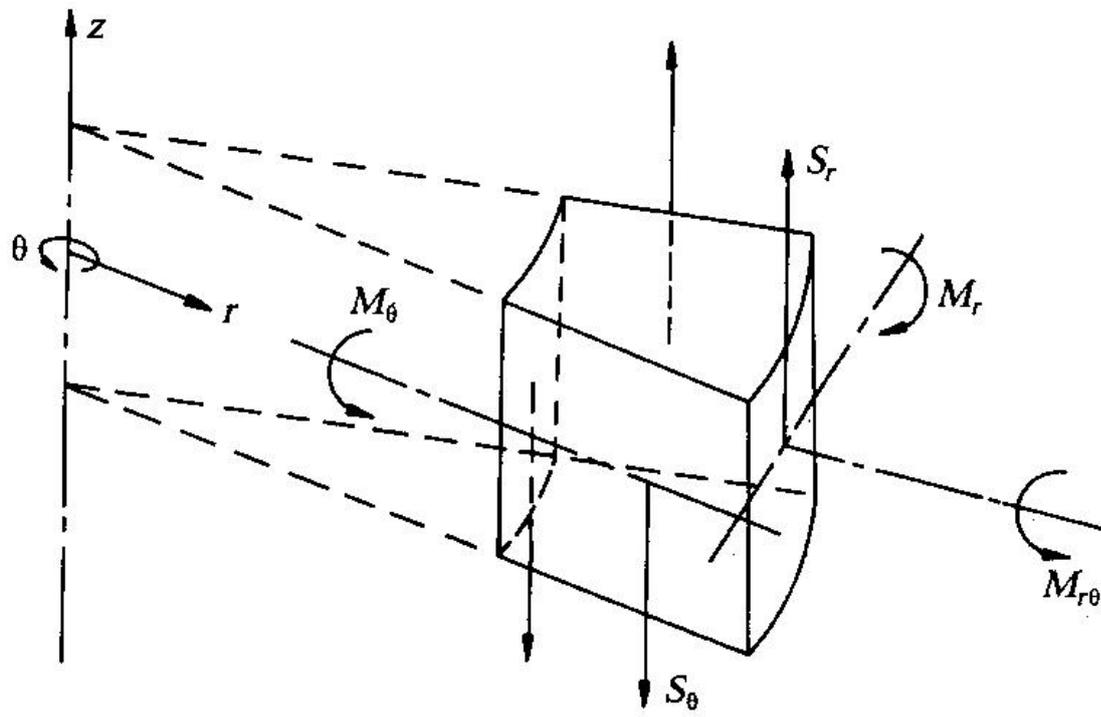


圖 3-6 極座標下內力的示意圖



第四章 光纖光柵壓力感測器製作與標定

本研究所研發之光纖光柵壓力感測器可分為兩種，一為漸變式光纖光柵壓力感測器，另一為拉伸式光纖光柵壓力感測器，本章將詳細說明有關兩種壓力感測器之製作方式與實驗程式介紹，並分別就理論與實驗結果進行比較，探討感測器的可行性與差異產生的原因。

4.1 光纖光柵壓力感測器製作流程

4.1.1 漸變式光纖光柵壓力感測器

本研究採用的黏貼方式為固定光纖光柵後始上膠固定的方式。在將光柵直接黏貼在材料表面存在著若干的缺點，最為重要的就是黏著劑的選擇，不當的黏著劑可能會使得光柵耐久性、抗水性等降低，在此壓力感測器中，所選用的黏著劑為尚貫股份有限公司所銷售的 power3077。

漸變式感測器製作流程如下：

- (1) 首先將作為感測元件的金屬薄片用丙酮把表面擦拭乾淨，此步驟可以清除物件上的油漬與雜質，油漬與雜質會造成黏著劑無法與物件緊密結合，容易產生剝落的情形。
- (2) 在黏貼光纖光柵前利用刀片於金屬薄片表面刻出光纖光柵所欲黏貼位置之指示刻痕，其中包括中心線兩端各一與黏貼方向平行刻痕，以及光纖光柵中心位置刻痕，其目的在於黏貼時能使光纖光柵黏貼方向與待測物理量方向平行並確保中心位置。
- (3) 再將含光柵之光纖置於如圖 4-1 所示之預拉裝置上，光纖黏在裝置兩端的波浪板上，利用此裝置把光纖光柵拉緊，使光柵的波長增加 3nm 左右，接著將光纖光柵對準於感測元件上所刻畫之位置，使用點膠機將黏著劑塗抹於所設定之黏貼範圍，盡量使黏著劑均勻的覆蓋於

光纖光柵上，再以催化劑塗抹於黏貼範圍內，約 1 小時固化，感測元件製作完成。

- (4) 製作好的感測元件置入鋼製外殼中，如圖 4-2 所示，並以螺絲鎖緊，把光纖熔上接頭，漸變式光纖光柵感測器製作完成，如圖 4-3 所示。

4.1.2 拉伸式光纖光柵壓力感測器

在拉伸式壓力感測器的製造上，因為不需要黏著光柵部分，所以選擇黏著劑時，僅需考慮黏著劑的接著力與防水性，在此感測器製造中，所選用的黏著劑為永寬化學股份有限公司所製造的 JA643 熱固膠與尚貫股份有限公司所製造的 power3077。

拉伸式壓力感測器的製作流程如下：

- (1) 先以機械加工製作感測器鋼製封裝外殼如圖 3-3(b)、(c)所示，外殼封閉端中心鑽有 3mm 的小孔，另一端為開口設計；在外殼側邊鑽一 1/8NPT 孔，用以安裝管線接頭連接加壓裝置。
- (2) 以光柵中心部分為基準，把光柵兩端各 25mm 的光纖外襯(jacket)剝除，再將光纖穿過鋼製外殼，並置於預拉裝置上，如圖 4-4 所示，利用此裝置把光纖光柵微微拉緊，使得光纖能夠位於外殼小孔的中心，在小孔內注膠約略 4mm 左右，如圖 4-5 所示，將整組裝置放置在烤盤上，如圖 4-6 所示，以 130⁰c 加熱 1 小時，接著劑開始固化，自此完成感測器的固定端。
- (3) 接著處理作為感測元件的金屬薄片，金屬薄片已於事先在圓心位置鑽直徑 1mm 的小孔，使用前先把金屬薄片用丙酮擦拭乾淨；在製作拉伸式壓力感測器的感測端部分，需要將光纖有一 1nm 的預拉量，不然會因為光纖仍在做彎曲的變形，產生量測上得盲區，而黏著金屬薄片與光纖的黏著劑 power3077，流動性較高所以無法採用預拉裝置的方式，因此使用直立感測器的方式來施作，首先將完成固定端

的感測器直立於光學桌上，把金屬薄片置於圓筒的開口端上端，把光纖繞過一 PCV 管如圖 4-7 所示，利用重力的方式來拉伸光纖，待光柵讀數穩定後，開始上膠並盡量使膠的範圍在直徑為 5mm 的小圓內，再以催化劑塗抹於黏貼範圍內，約 1 小時固化完成。

- (4) 將感測器的上蓋鎖上，把光纖熔上接頭，拉伸式感測器製作完成，如圖 4-8 所示。

4.2 光纖壓力感測器標定程式與結果

4.2.1 實驗設備

- (1) Fiber Bragg Grating Swept Laser Interrogator (FBG-SLI)

本研究採用 Micron Optical 製造，型號為 SM420 之光纖光柵掃描分析儀。規格如下：

工作波長範圍：1525~1565 nm

解析度(resolution)：小於 1 pm (約 0.8 $\mu\epsilon$)

所適用 FBG 規格：反射率(reflectivity)>90%、反射光頂點以下 3dB 處寬小於 0.25nm。

電腦：IBM-X22 及所附微軟作業系統

- (2) 光纖熔接機

光纖熔接機(Splicer, Sumitomo Electric Industries, Ltd.)是用以接合光纖的儀器，其加工原理是以高能量雷射光熔化兩端光纖，進而使之接合，並於接合完成後實驗拉力測試，以確保接合完成；熔接完成後，可用熱縮套管於熔接機後端的加熱腔內將光纖做保護。

- (3) 氣壓系統

空壓系統採 MITSUI SEIKI 的 ZS-066AH 之壓縮機，所供氣的上限是 10kg/cm²，其穩定壓力最大上限為 8 kg/cm²，壓力顯示表精度為 0.1 kg/cm²。

4.2.2 壓力與應變之線性關係

為驗證光纖光柵壓力計在壓力與光柵波長變動量的關係，以及感測器的結果線性與重複性比較，本節將分別對兩種感測器加以討論。

實驗配置圖如圖 4-9 所示，以氣壓設備對感測器施加一定壓力，在對拉伸式感測器實驗時，需串接另一光纖光柵，作為溫度變化參考光纖，以減低室溫變化對實驗結果的影響。

實驗開始後先記錄初始讀數，之後增加壓力，待光纖光柵讀數穩定後紀錄讀數，再增加其壓力值，待壓力施加達容許變形極限後，再逐步返回壓力值。

(A) 漸變式光纖光柵壓力感測器

漸變式光纖光柵壓力感測器的初始設計理念為僅使用一個光纖光柵，是將光纖光柵一半黏貼於受拉區一半黏貼於受壓區，但經實驗後，因為光纖光柵的感測部分只有 0.3mm 所能感測範圍過小，使得解析度約為 1pm 的壓力變化量僅有 2.29kPa，其標定情形如圖 4-10 所示，此感測器所使用的金屬薄片為 0.5mm，圖中橫軸為感測器壓力變化量，而縱軸代表光柵同時間的波長飄移量；圖 4-11 所示，在各種厚度下，圓板上應變與位置的對應圖，當圓板越接近中心與邊界，所產生的應變越大，因為單光柵感測器的黏貼位置正好是應變最小處，所以精度過低，本研究試著採用新的感測方式，即黏貼兩個光纖光柵，一個黏貼於純受拉區一個黏貼於受壓區，黏貼位置如圖 4-12 所示，因此薄板產生變形時，受拉區的光纖光柵會往長波長方向飄移，而受壓區的光纖光柵往短波長方向飄移，藉此方式可以提高感測器的解析度，圖 4-13 所示為使用的金屬薄片 0.5mm 的雙光柵感測器的標定結果，其解析度達到 0.35kPa。圖 4-14 為兩種黏貼方式的比較，雖然感測器的線性程度不佳，可是仍可以看出兩種方式，解析度有著極大的差距。

漸變式壓力感測器的運算原本是採用量測反射頻譜的帶寬(bandwidth)變化，此種方式可以消除溫度效應，因為溫度僅會對光柵發生中心波長飄移的效果，其計算公式如下：

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}}=\lambda_2-\lambda_1 \quad (4-1)$$

其中

λ_1 、 λ_2 =加載後與初始的反射頻譜帶寬

以此方式在解析黏貼單一光柵時，可以明顯看出帶寬的改變量，如圖 4-15 所示；但當感測器改黏貼雙光柵時，單一個光柵波形的帶寬改變反而不明顯，主要的變化量為波長的飄移，使用雙光柵的情況下，則將兩光柵視為一大光柵，所量測的是波形單邊的位移，如圖 4-16 所示， $\Delta\lambda_1$ 為第一階加壓光柵的變化， $\Delta\lambda_2$ 為第二階加壓光柵的變化，以此類推。

本研究也試著使用另一種解析方式，因此反射頻譜的帶寬改變量很小，所以將整個帶寬的改變不計，光柵的變化視為僅有中心波長的改變，即光柵的中心波長（Peak value）飄移，其計算公式如下：

$$\lambda_1 = \lambda_t + \lambda_{\text{tensile}} \quad (4-2)$$

$$\lambda_2 = \lambda_t - \lambda_{\text{compressed}} \quad (4-3)$$

其中

λ_1 、 λ_2 =兩光柵的總波長改變量

λ_t =溫度對光柵波長造成的改變量

λ_{tensile} 、 $\lambda_{\text{compressed}}$ =拉應變與壓應變對光柵波長的改變量

接著將(4-2)減去(4-3)後，得到應變量。

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \lambda_{\text{tensile}} + \lambda_{\text{compressed}} \quad (4-4)$$

在雙光柵的情況下，對於這兩種方式進行解析，圖 4-17 所示為量測光柵波長的寬度差，圖 4-18 則為量測光柵中心波長的飄移，可以發現兩者的差異並不大，相關係數 R^2 均達 0.999，所以採用較易量測的中心波長飄移

方式解析。

對於感測器的線性程度不佳的問題，本研究發現可能性有兩種。第一，依照彈性力學理論，圓板有其彈性變化的上限值，但實驗的結果卻顯示此上限值實際上小於理論所陳述的；第二為光纖光柵黏貼時的技術，若光纖光柵黏貼的位置並不在直徑上的話，光纖無法產生線性的應變，所以造成感測器的線性程度不好。

圖 4-19 所示為使用厚度 0.4mm 的金屬薄片的實驗標定結果，其中包含了三組重複加載試驗，由圖中計算可得，感測器的解析度是 0.162kPa，全量度範圍之解析度為 0.0675%；若以實驗數據所回歸的線為實際正確值，實驗值與實際正確值的差異為誤差，則整體量測誤差的平均值為 1.407kPa，其準確度為 $\pm 0.586\%$ FSR，表示全量度範圍之誤差為 $\pm 0.586\%$ 。

圖 4-20 為實驗結果與理論計算的結果比較，實線由理論計算所得，而圓形符號部分為實際量測所得，由圖中可發現，理論所算出來的解析度約為 0.133kPa 略小於實驗所量測的。造成差異的原因可能有三種；第一，可能為黏著劑塗抹不均或是厚度過大，造成的應變反應不靈敏；第二，可能是光柵在光纖上的位置非黏貼前所認定的位置，使得光柵位於較小的應變反應區間內；最後是解析上的誤差，因為採用的方式為量測中心波長的飄移，若是有光柵因膠黏不慎或是其他原因使得應變的反應僅表現在帶寬的變化上，那麼有可能造成解析時的錯誤。

(B) 拉伸式光纖光柵壓力感測器

拉伸式的解析方式採用光柵的中心波長 (Peak value) 飄移，其計算公式如下：

$$\Delta\lambda = \lambda_t + \lambda_{tensile} \quad (4-5)$$

其中

$\Delta\lambda$ = 光柵的總波長改變量

λ_t =溫度對光柵波長造成的改變量

λ_{tensile} =外力對光柵波長造成的改變量

圖 4-21 為拉伸式光纖光柵壓力感測器的標定結果，其中包含了三組重複加載試驗，由圖中計算可得，感測器的解析度是 0.133kPa，全量度範圍之解析度為 0.0443%；若以實驗數據所回歸的線為實際正確值，實驗值與實際正確值的差異為誤差，則量測誤差的平均值為 1.651 kPa，其準確度為 $\pm 0.55\%$ FSR。

圖 4-22 為實驗結果與理論計算的結果比較，實線由理論計算所得，而圓形符號部分則為實際量測所得，由圖中可發現，理論所算出來的解析度約為 0.152kPa 大於實驗所量測的，實驗值略大於理論值，造成這種情形發生的原因可能為，黏著劑的影響，感測器所採用的黏著劑雖然強度很高，不易發生變形，但是在實際加壓情況下可能會產生一些微小的變形，使得光纖光柵的變形量大於僅考慮圓板的變形的理論值；就與壓力的關係而言，拉伸式光纖光柵壓力感測器的表現不俗。

4.2.3 溫度對於壓力感測器之影響

當溫度發生變化時，光纖光柵受到溫度應變及折射率變化結果，將會造成光纖光柵反射波長改變。雖然感測器在設計時，已將溫度影響考慮在內，可以藉由解調或是其他裝置來消除溫度對感測器的影響，但實際應用上卻不一定如此理想。

為了瞭解溫度對壓力感測器的影響，本節將分別對討論兩種壓力感測器在不同溫度下壓力與光柵波長變動量的關係。實驗配置圖如圖 4-23 所示，實驗步驟與實驗儀器皆和 4.2.2 節的相同，有差異的部分為感測器是放置在烘箱內施作。

(A) 漸變式光纖光柵壓力感測器

圖 4-24 為使用 4.2.2 節標定的感測器做溫度標定的實驗結果，當中三

組數據分別代表感測器在不同溫度下壓力與光柵波長變動量的關係，從圖中可以發現，隨著溫度的增加，感測器的斜率有逐漸變緩的趨勢，表示感測器的解析度變差，當溫度為 50°C，感測器的解析度為 0.175kPa，相關係數 $R^2 = 0.9984$ 。

圖 4-25 為感測器在不同溫度下量測值與實際值的誤差關係，若以 4.2.2 節所得到的回歸線為實際正確值，實驗值與實際正確值的差異為誤差，則感測器在 25°C、40°C 和 50°C 下的誤差平均值分別為 1.518 kPa、1.471 kPa 和 4.546 kPa。由圖 4-26 可以看出，在 50°C 時，感測器上受壓部分的光纖光柵，呈現非線性的變形，一般光柵受到壓縮時，會發生較不線性的應變然而，在 4.1.1 中有敘述到在黏貼光柵時，先施與一定的預拉量使光柵在受壓時有較大的反應空間，因此，此一情況應為光纖光柵與感測元件表面間黏著劑在厚度不均造成熱變形不同或是無法即時傳遞應變變化所造成。

(B) 拉伸式光纖光柵壓力感測器

利用 4.2.2 節標定的感測器進行溫度關係的標定，圖 4-27 與圖 4-28 分別為三組實驗數據扣除光柵感測的溫度變化量之波長變化圖與波長飄移和壓力的關係圖，由圖中可以看出感測器的解析度沒有很大的變化，最大與最小解析度差異為 1.49×10^{-3} kPa，與 4.2.2 節標定的感測器解析度差不多，圖中三條線段斜率雖然有所差異，但在壓力與反射波長飄移的關係上，仍有良好的線性關係。

圖 4-29 為感測器在不同溫度下量測值與實際值的誤差關係，若以 4.2.2 節所得到的回歸線為實際正確值，則感測器在 25°C、40°C 和 50°C 下的誤差平均值分別為 1.617 kPa、1.673 kPa 和 2.095 kPa。此值與常溫下感測器的誤差值差不多，所以在不同溫度下，對於拉伸式感測器的解析度與線性程度並沒有很大的影響。

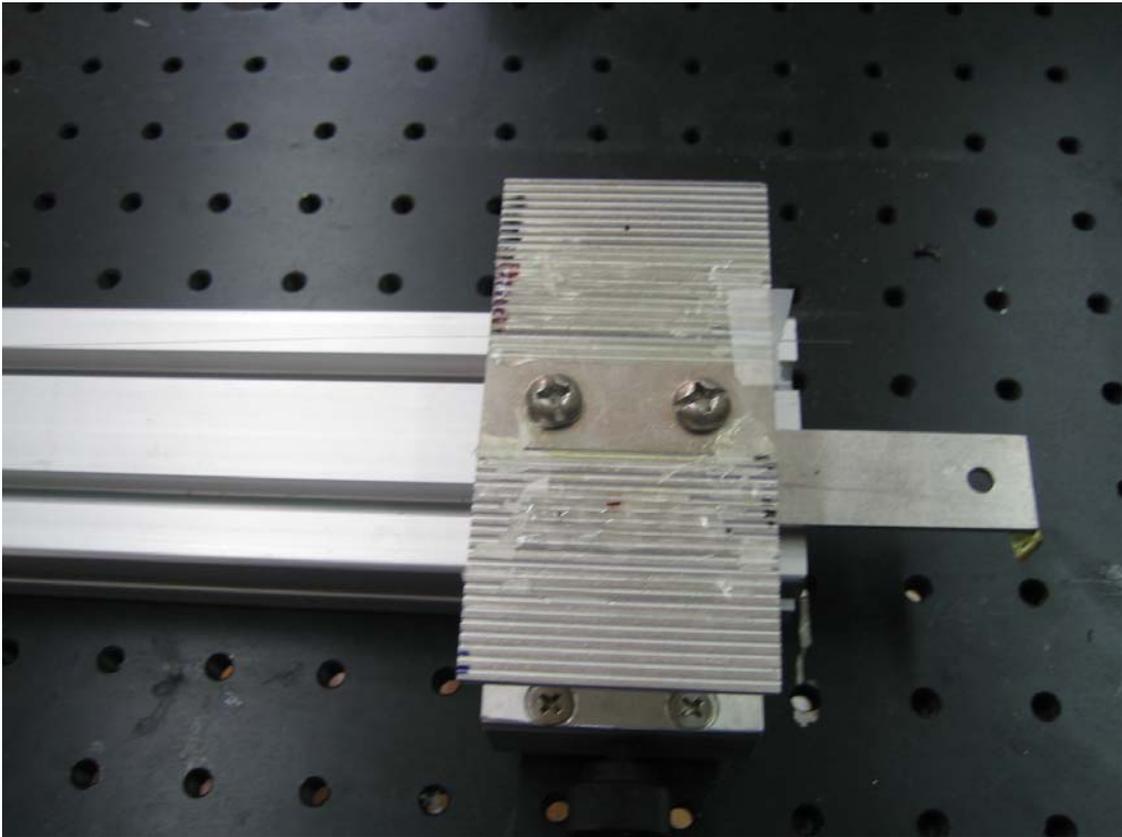


圖 4-1 預拉裝置上與黏著光纖槽溝



圖 4-2 漸變式光纖光柵感測器的外殼



圖 4-3 漸變式光纖光柵感測器完成品



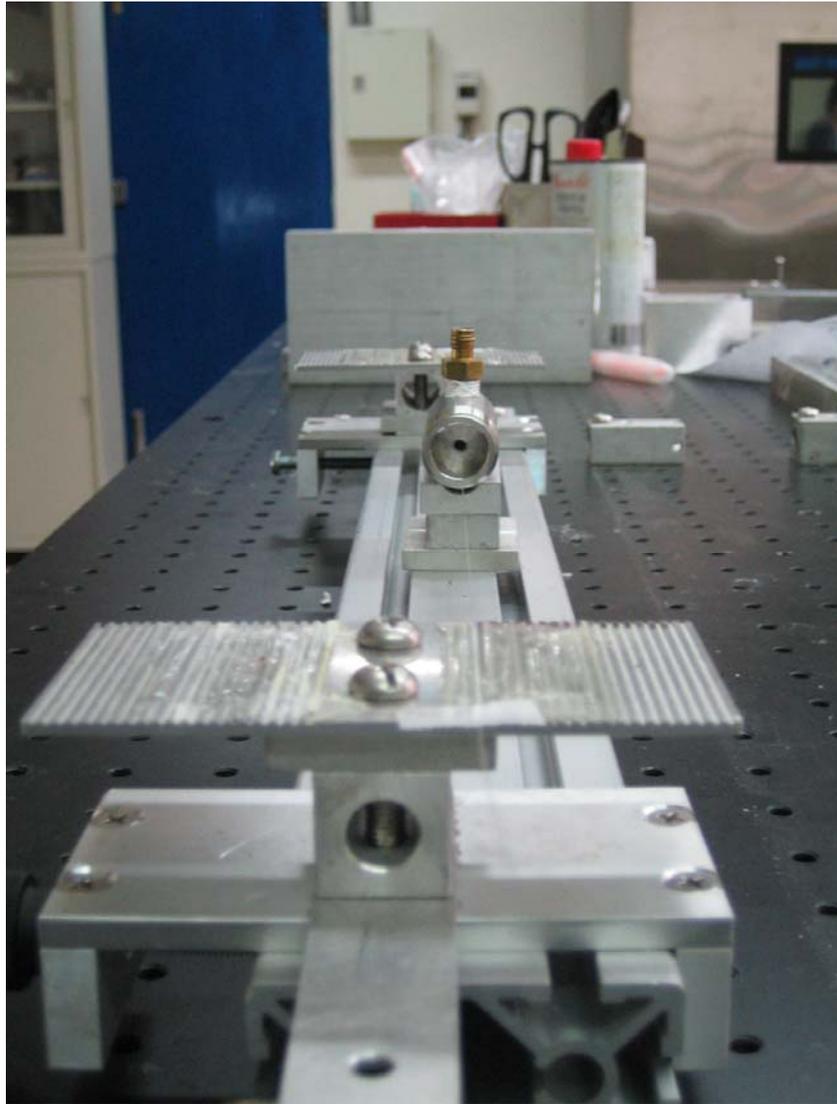


圖 4-4 拉伸式光纖光柵感測器的置於預拉裝置上

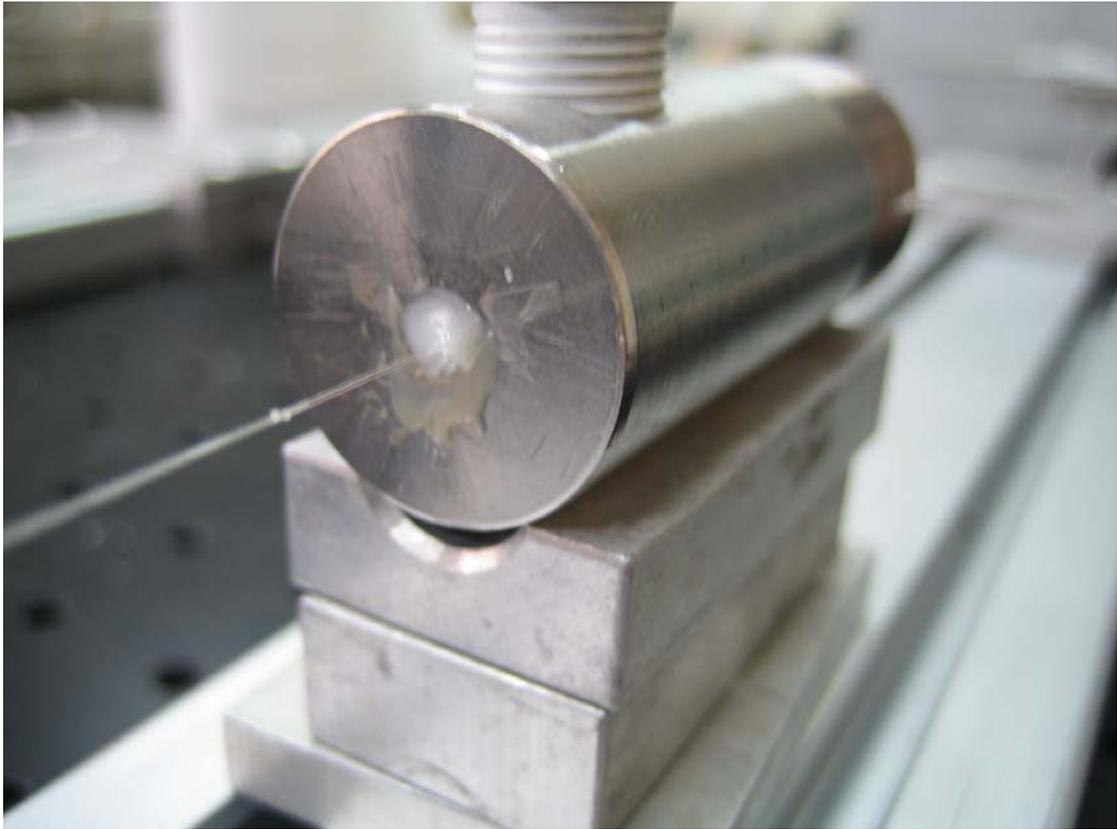


圖 4-5 拉伸式光纖光柵感測器的固定端上膠



圖 4-6 拉伸式光纖光柵感測器的固定端上膠後置於烤盤上加熱

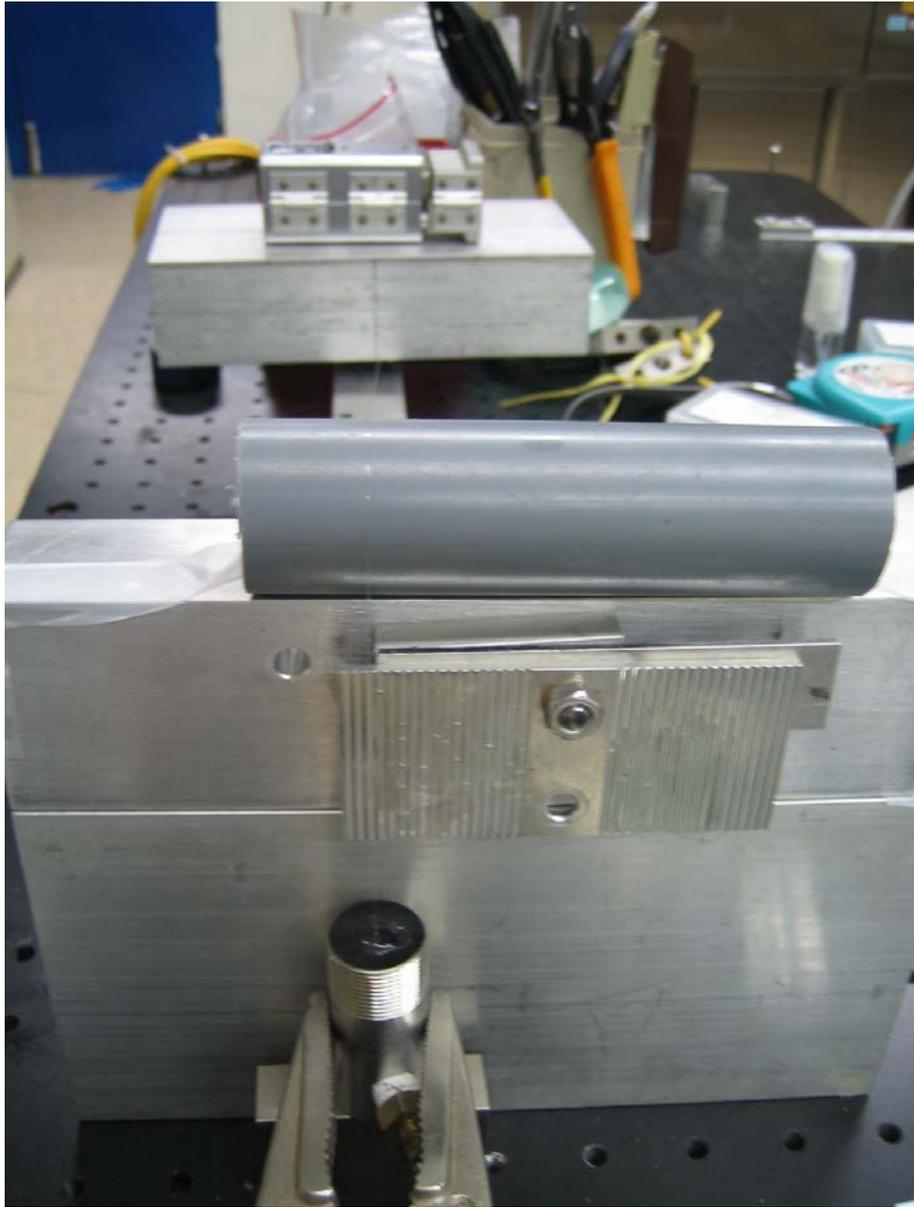


圖 4-7 拉伸式光纖光柵感測器的感測端預拉組件

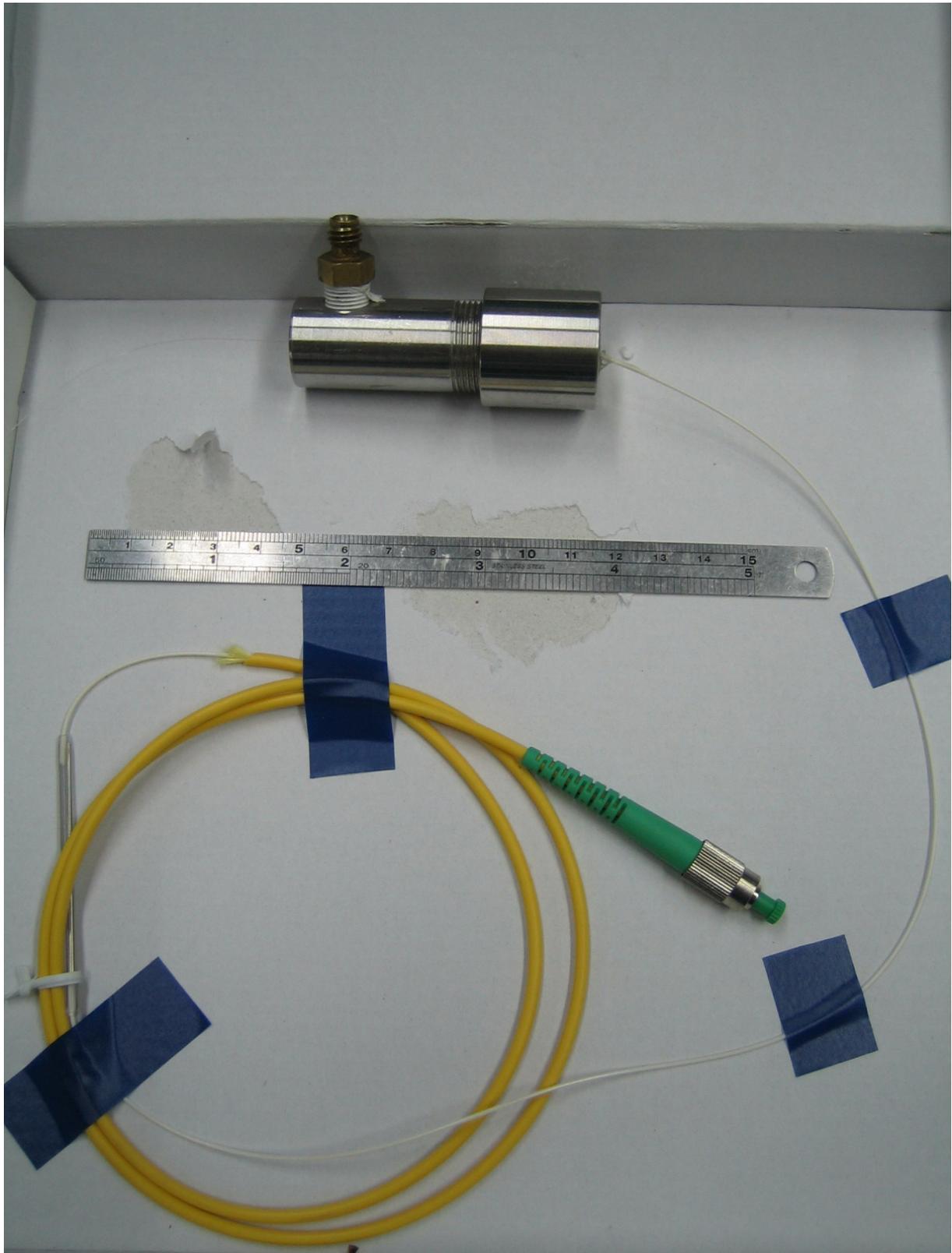


圖 4-8 拉伸式光纖光柵感測器的完成圖

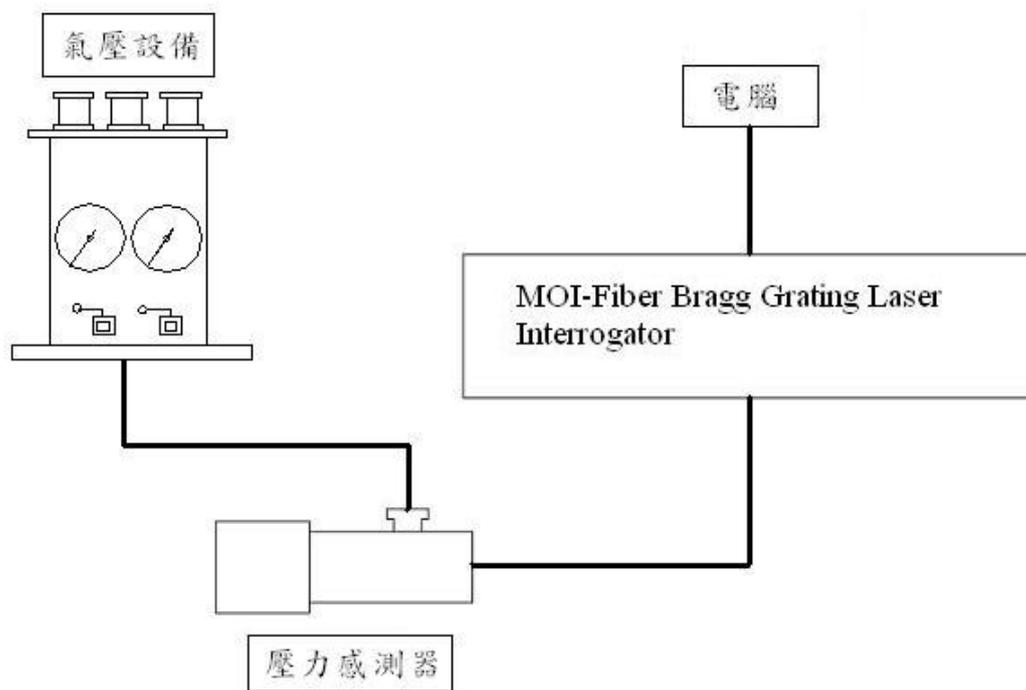


圖 4-9 壓力與應變之線性關係實驗配置圖



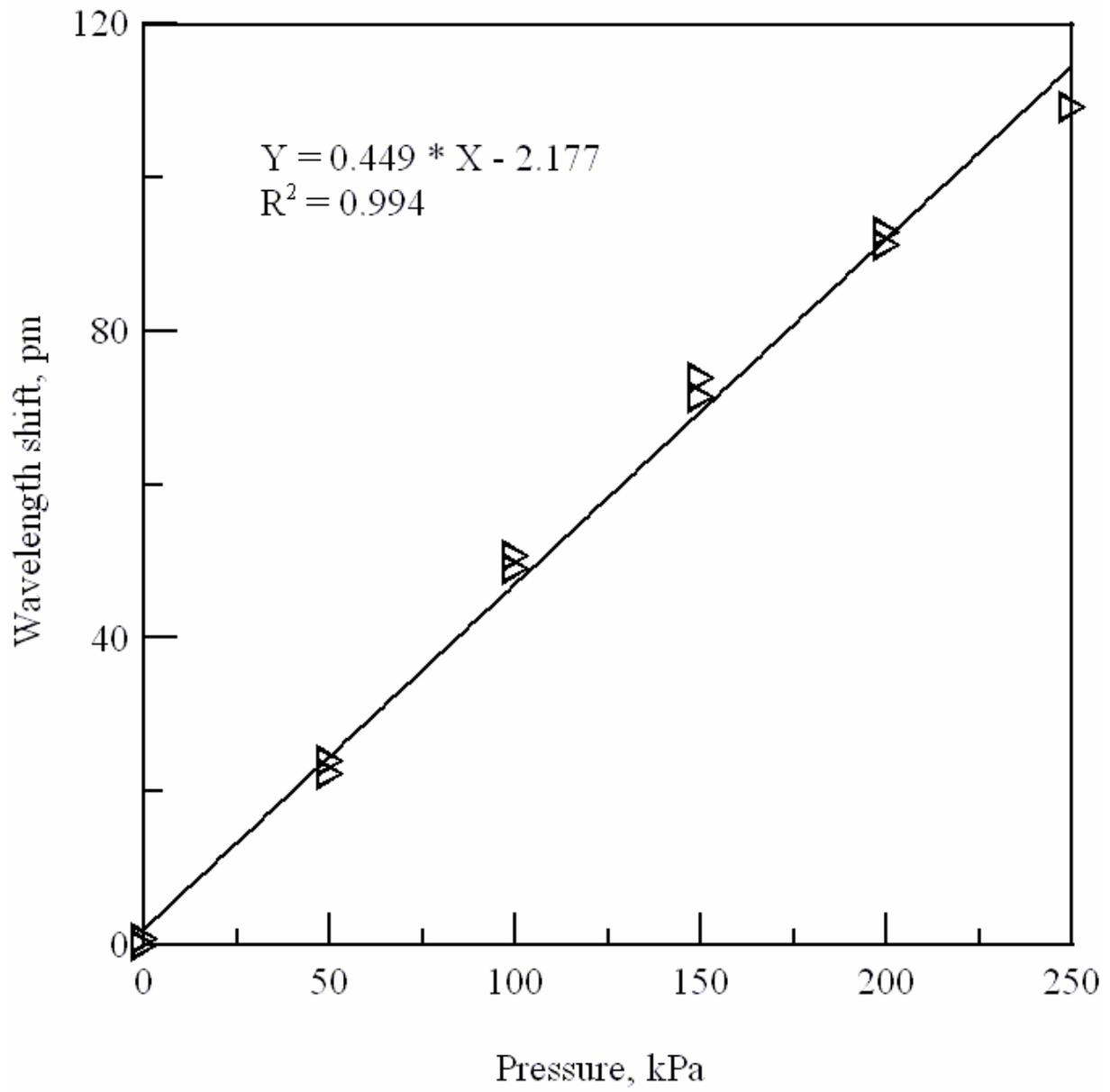


圖 4-10 單 FBG 漸變式壓力感測器壓力與波長關係圖

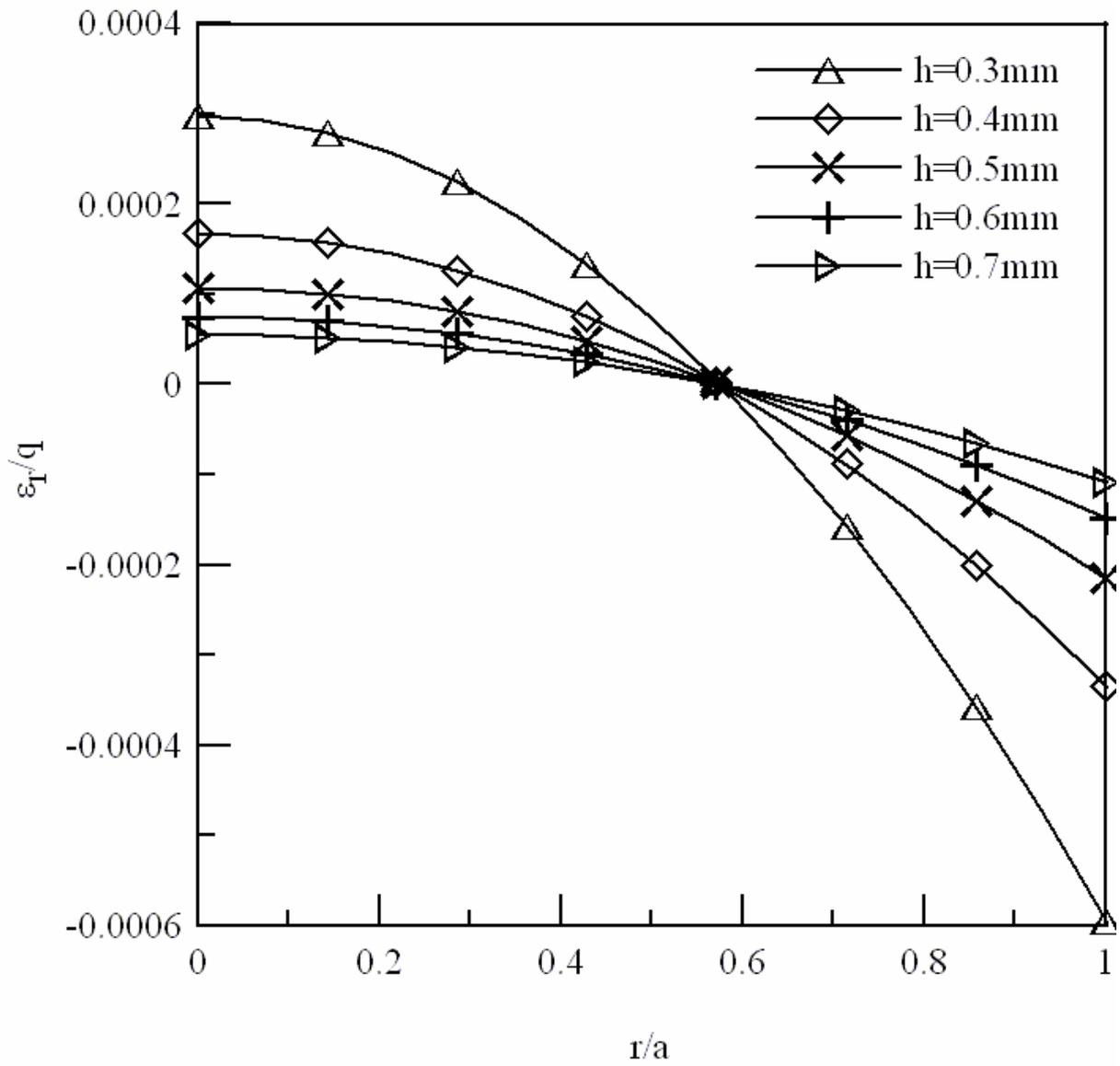


圖 4-11 圓形薄板應變與位置關係圖

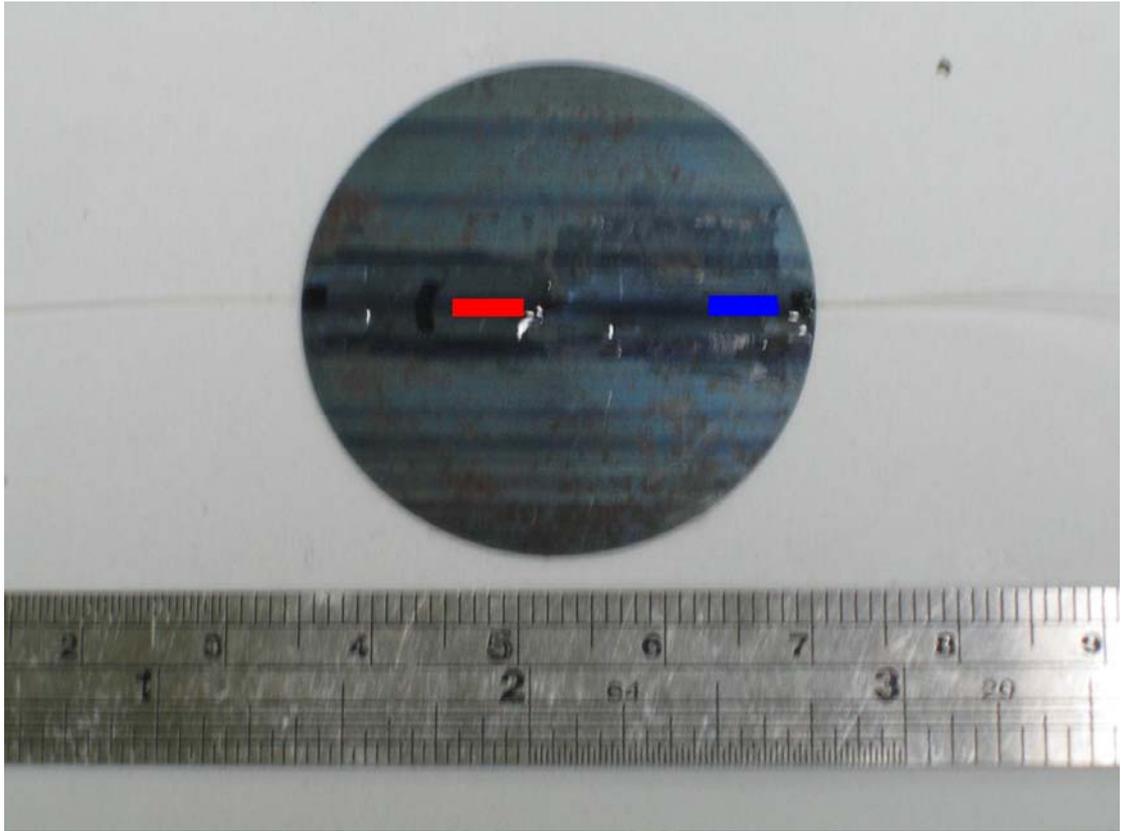


圖 4-12 雙 FBG 黏貼位置圖



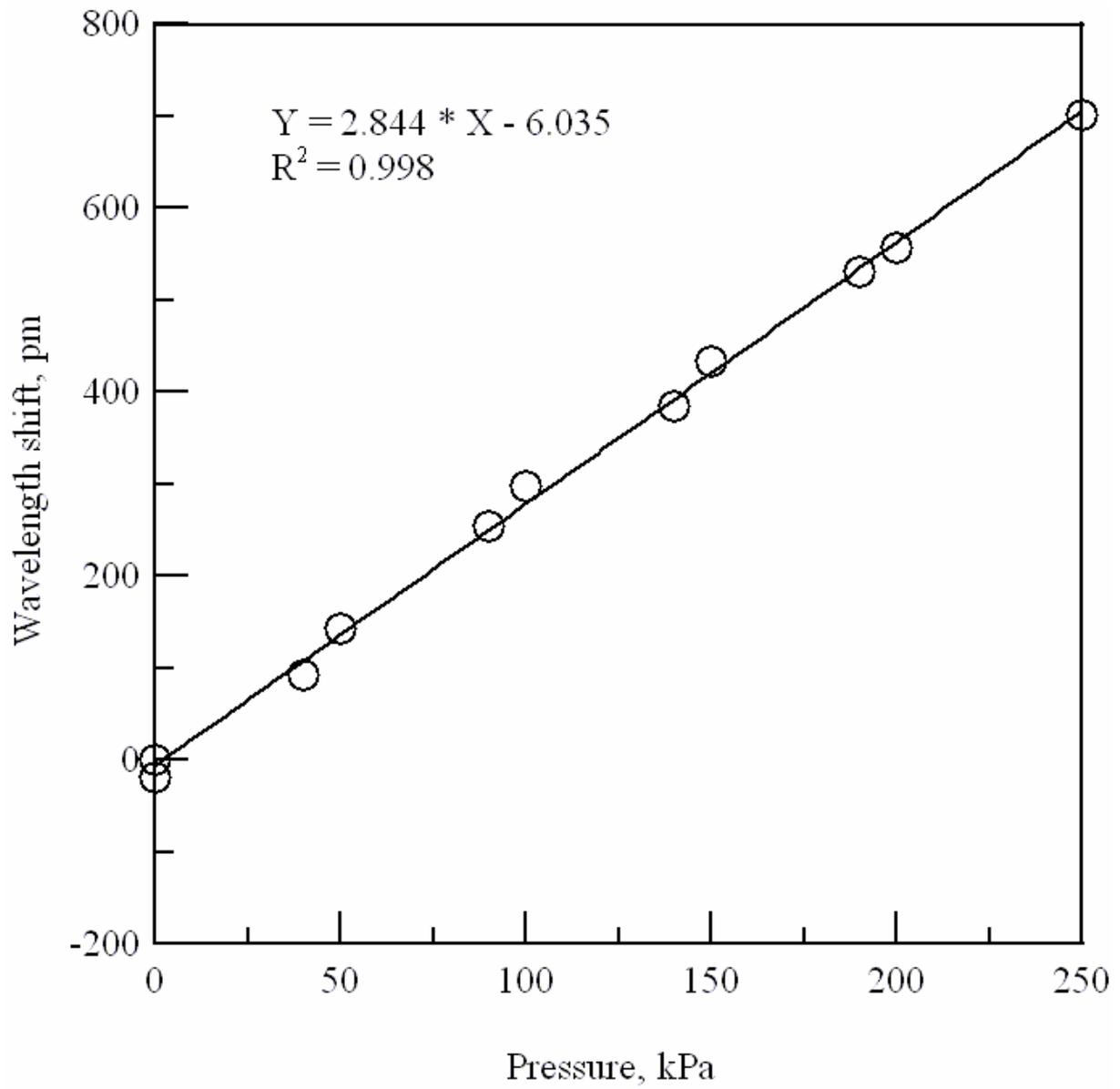


圖 4-13 雙 FBG 漸變式壓力感測器壓力與波長關係圖

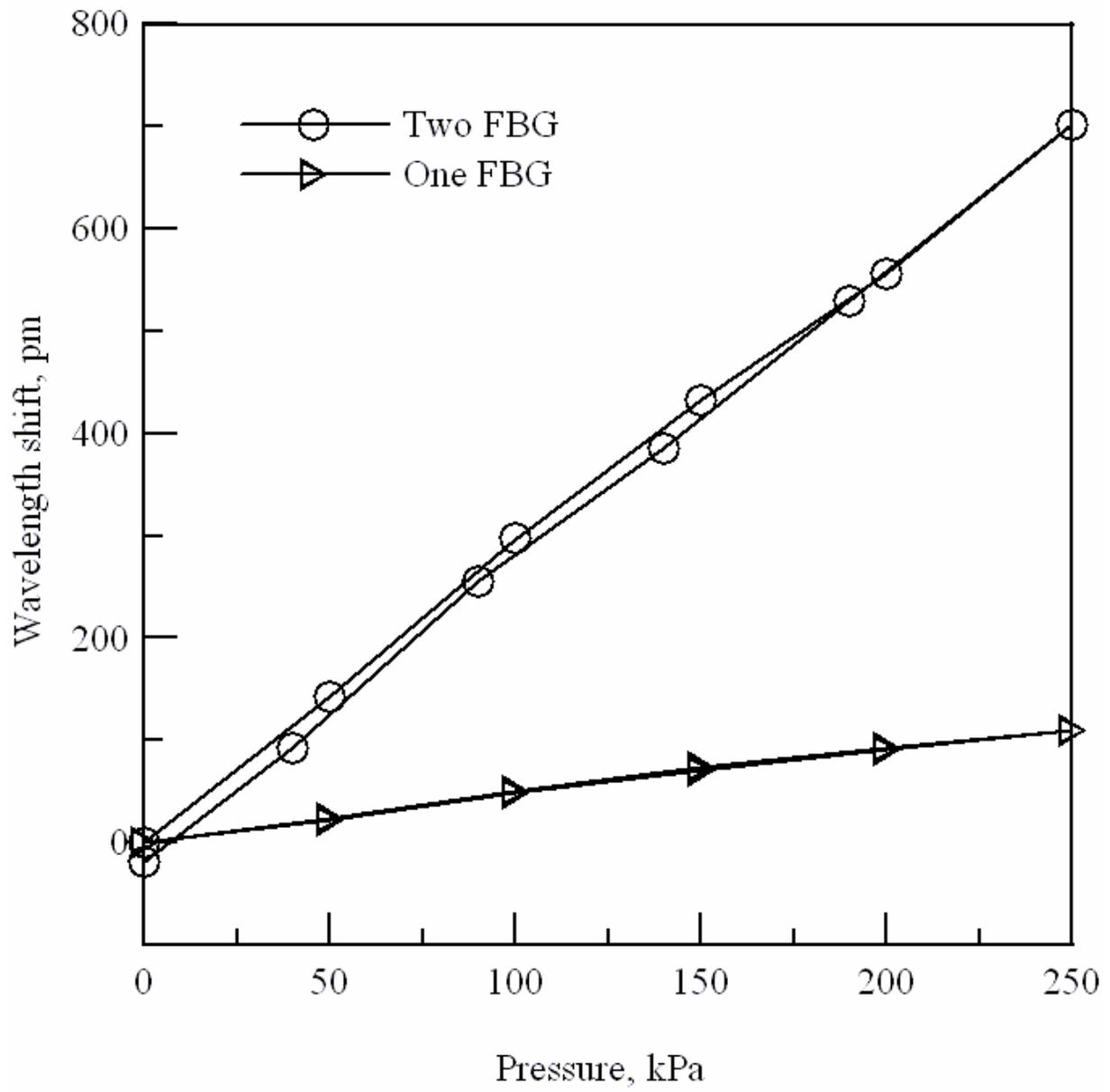


圖 4-14 單 FBG 與雙 FBG 漸變式感測器壓力與波長關係比較圖

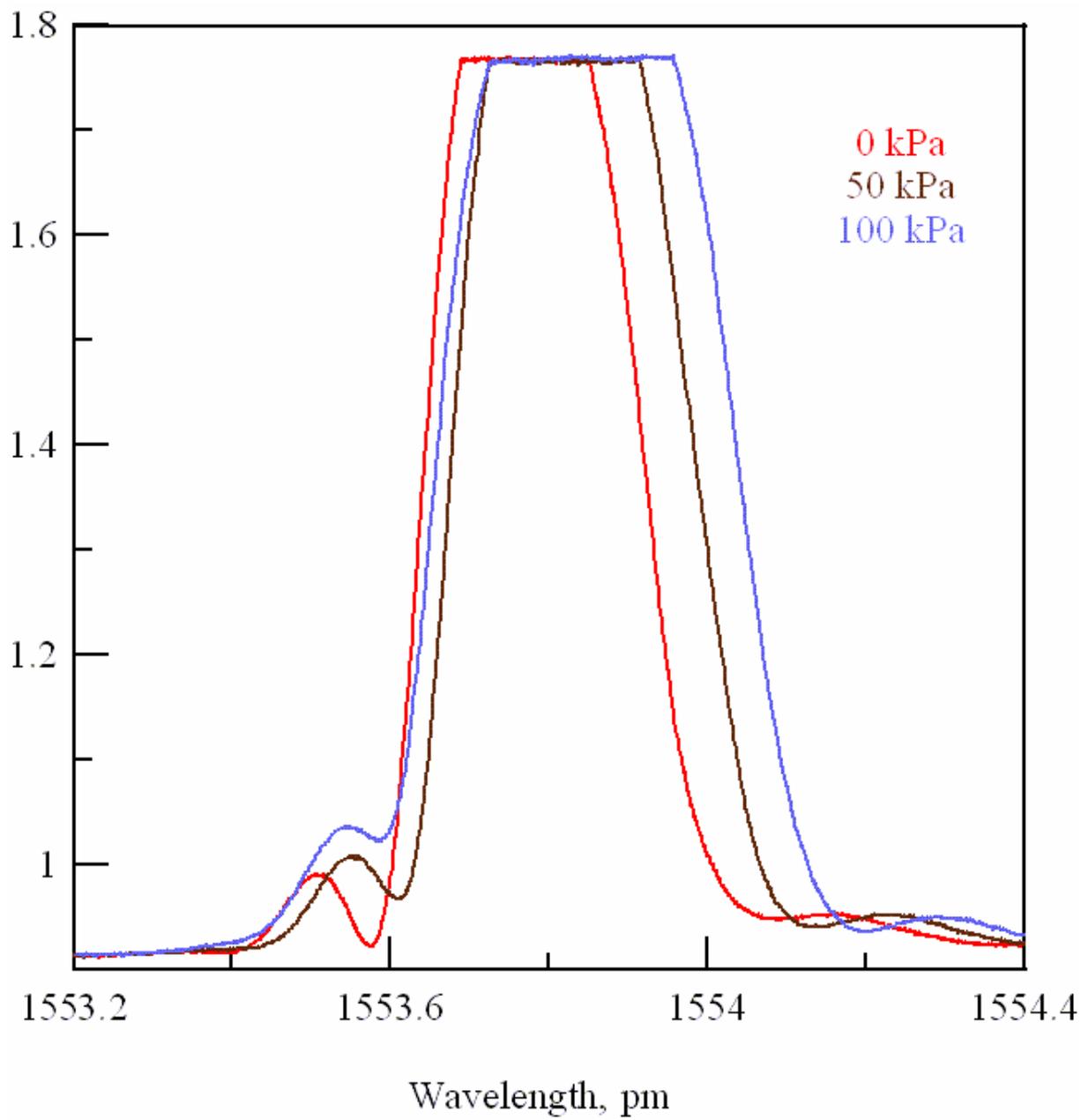


圖 4-15 單光柵漸變式感測器受壓時光柵頻譜改變圖

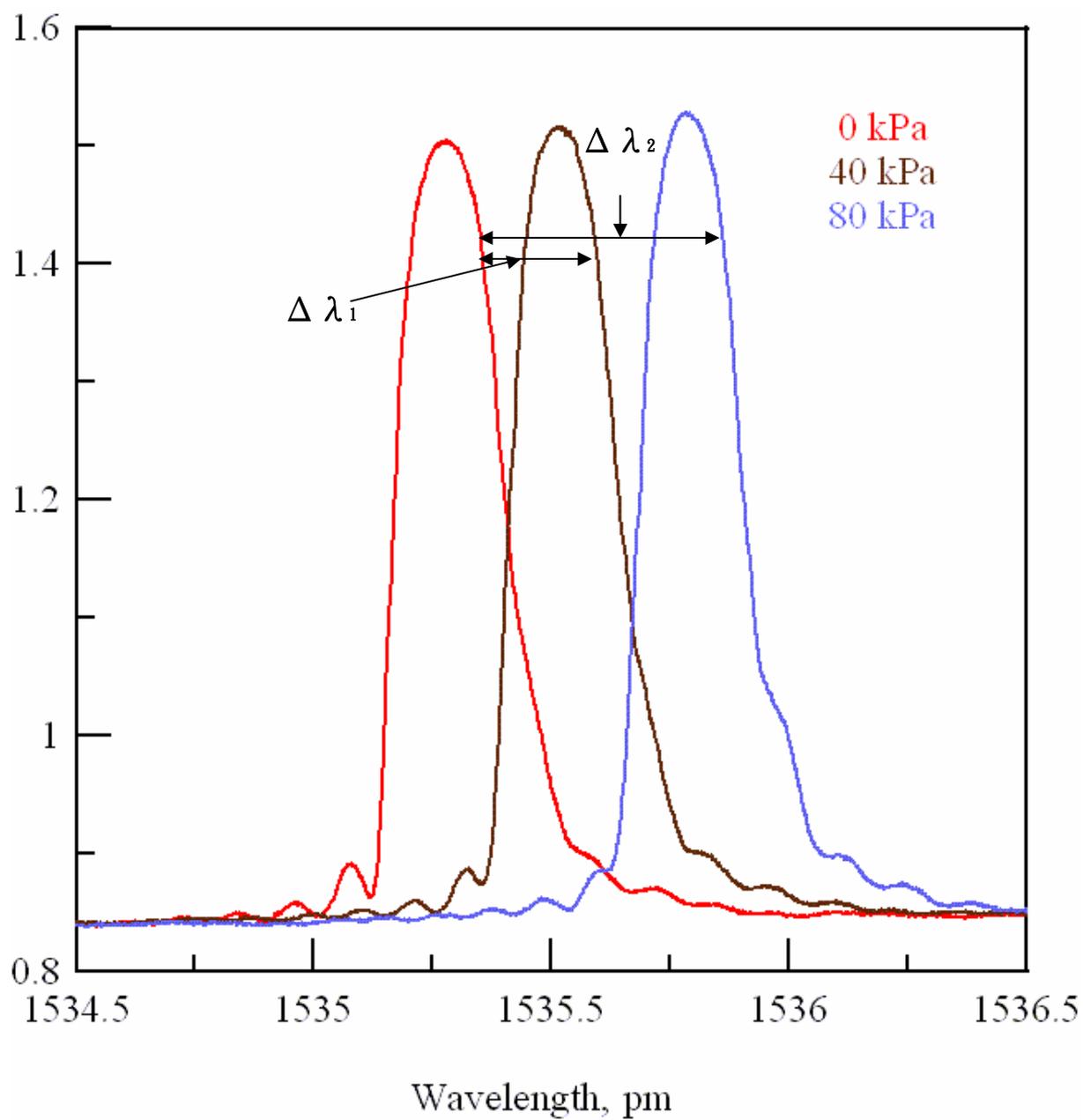


圖 4-16 雙光柵漸變式感測器受壓時光柵頻譜改變圖(拉伸部分)

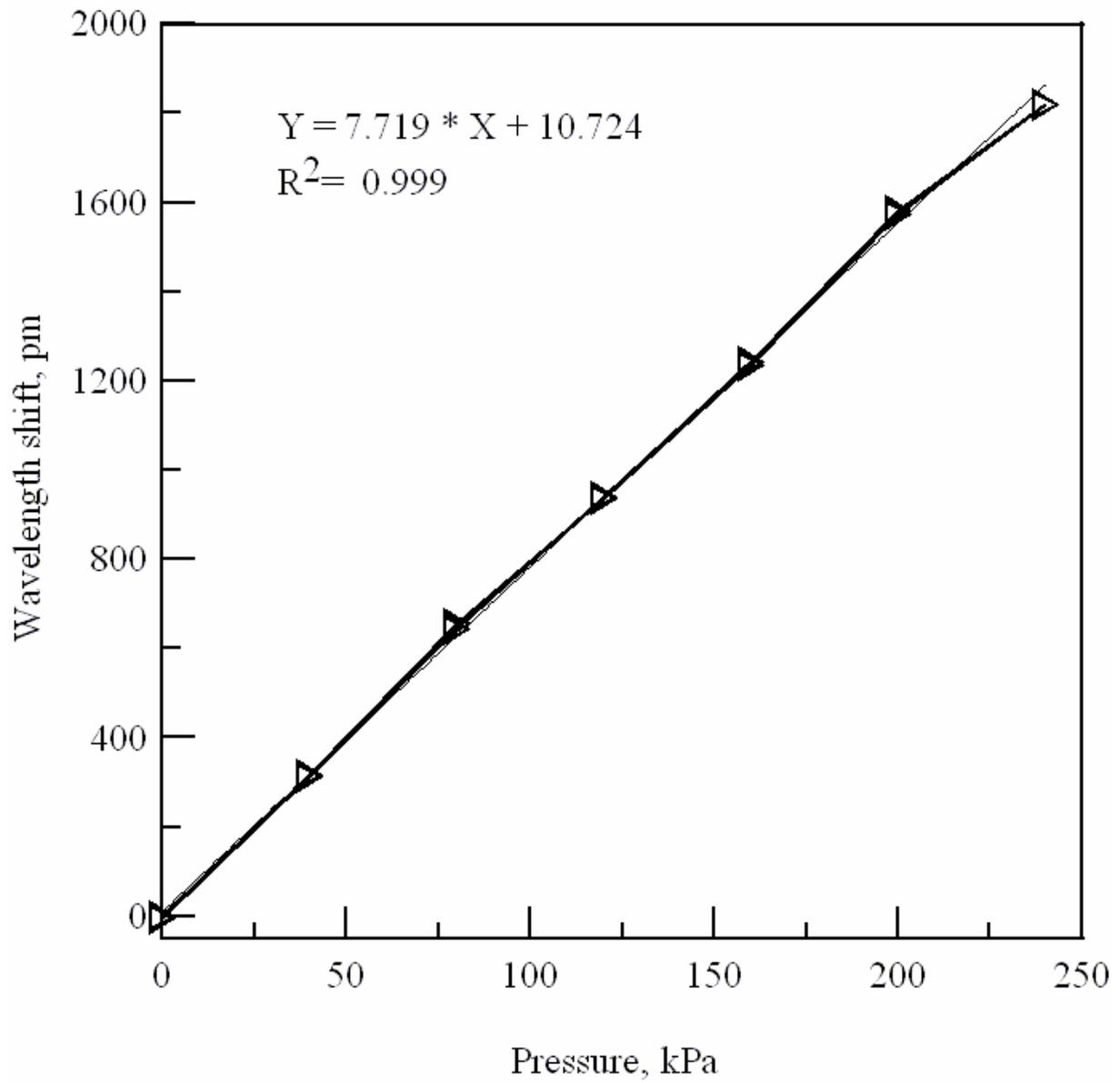


圖 4-17 使用量測波長寬度差的標定結果

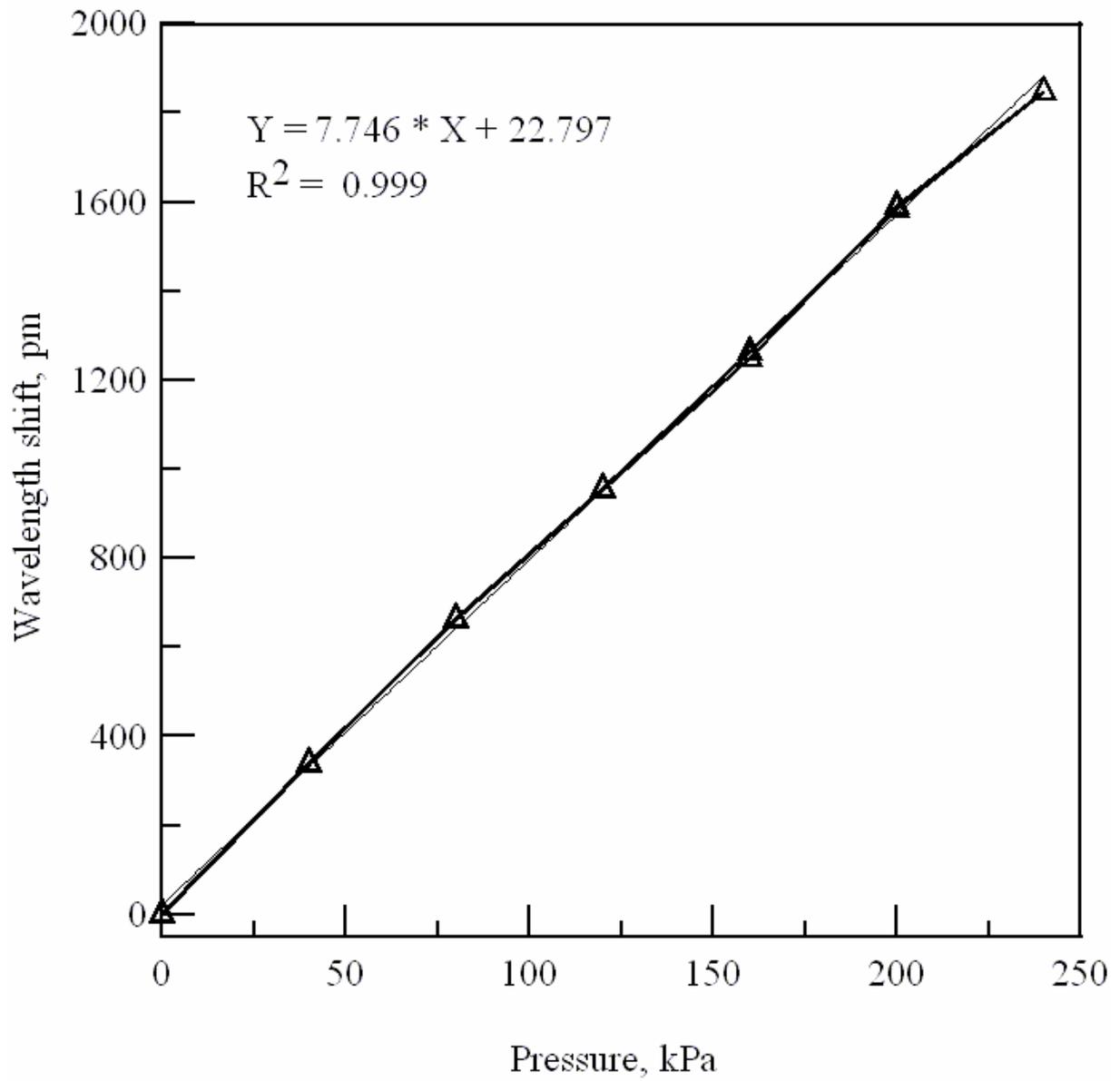


圖 4-18 使用量測波長飄移的標定結果

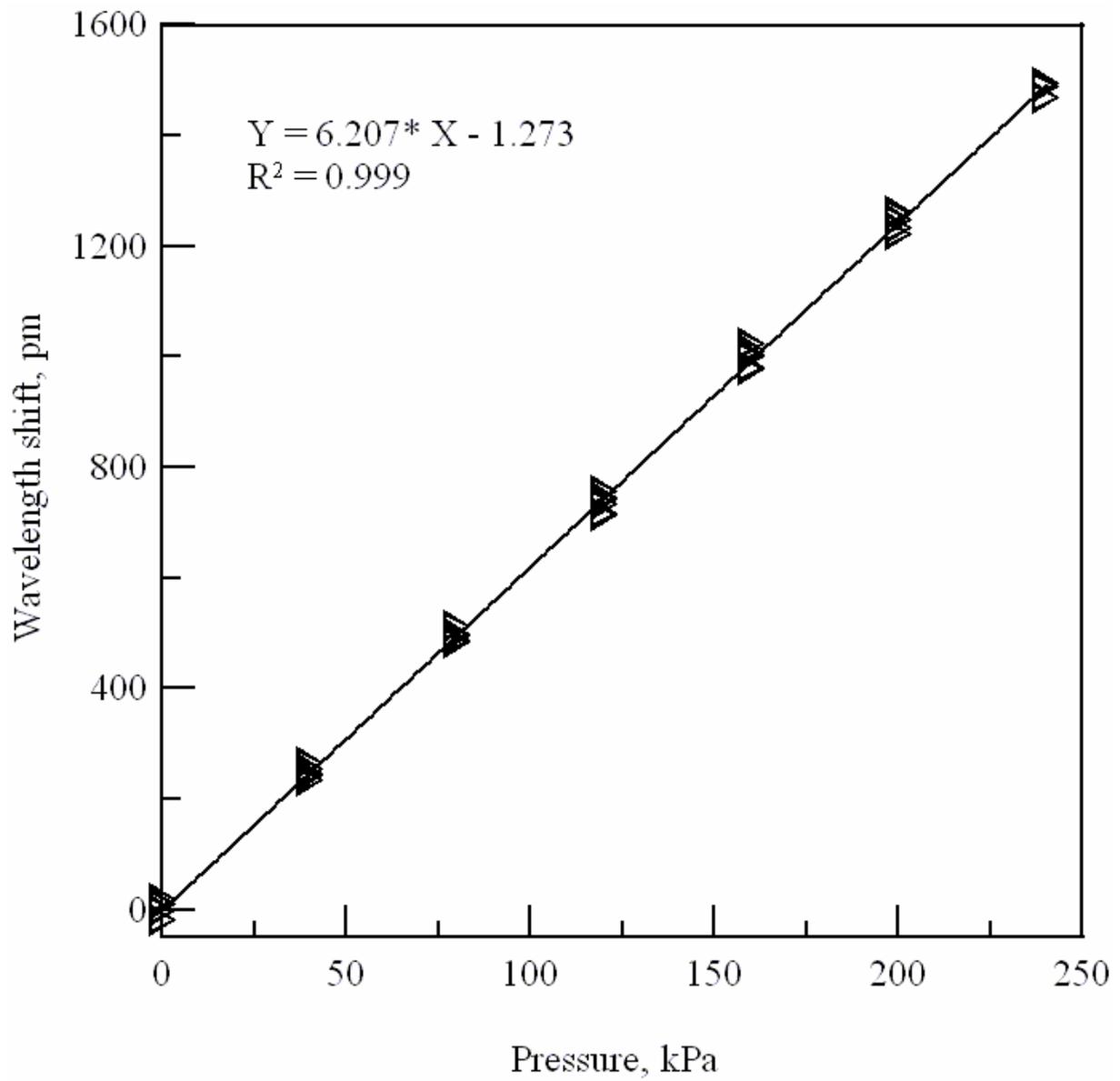


圖 4-19 漸變式壓力感測器壓力與波長關係圖

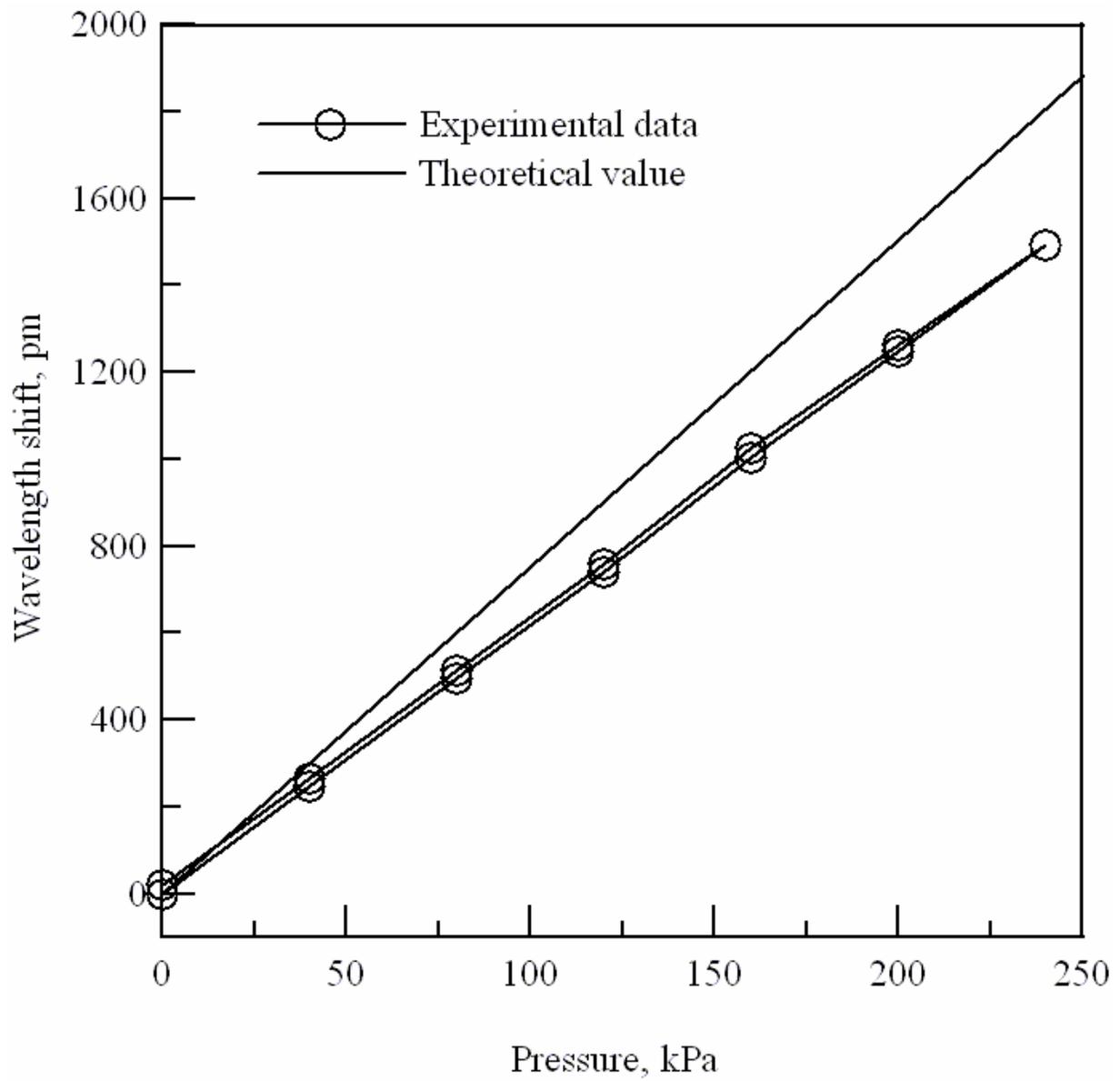


圖 4-20 漸變式壓力感測器實驗值與理論值比較圖

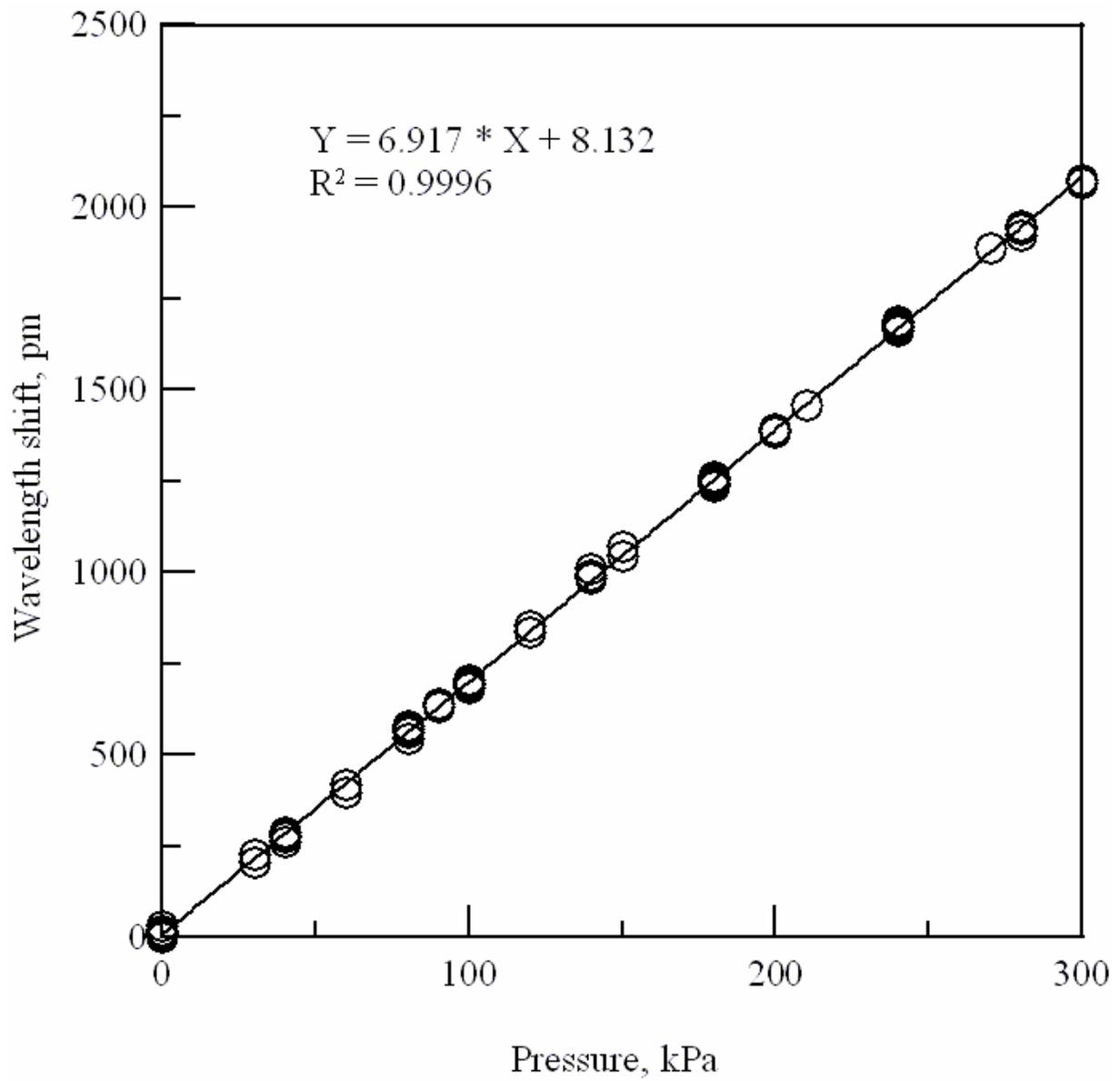


圖 4-21 拉伸式壓力感測器壓力與波長關係圖

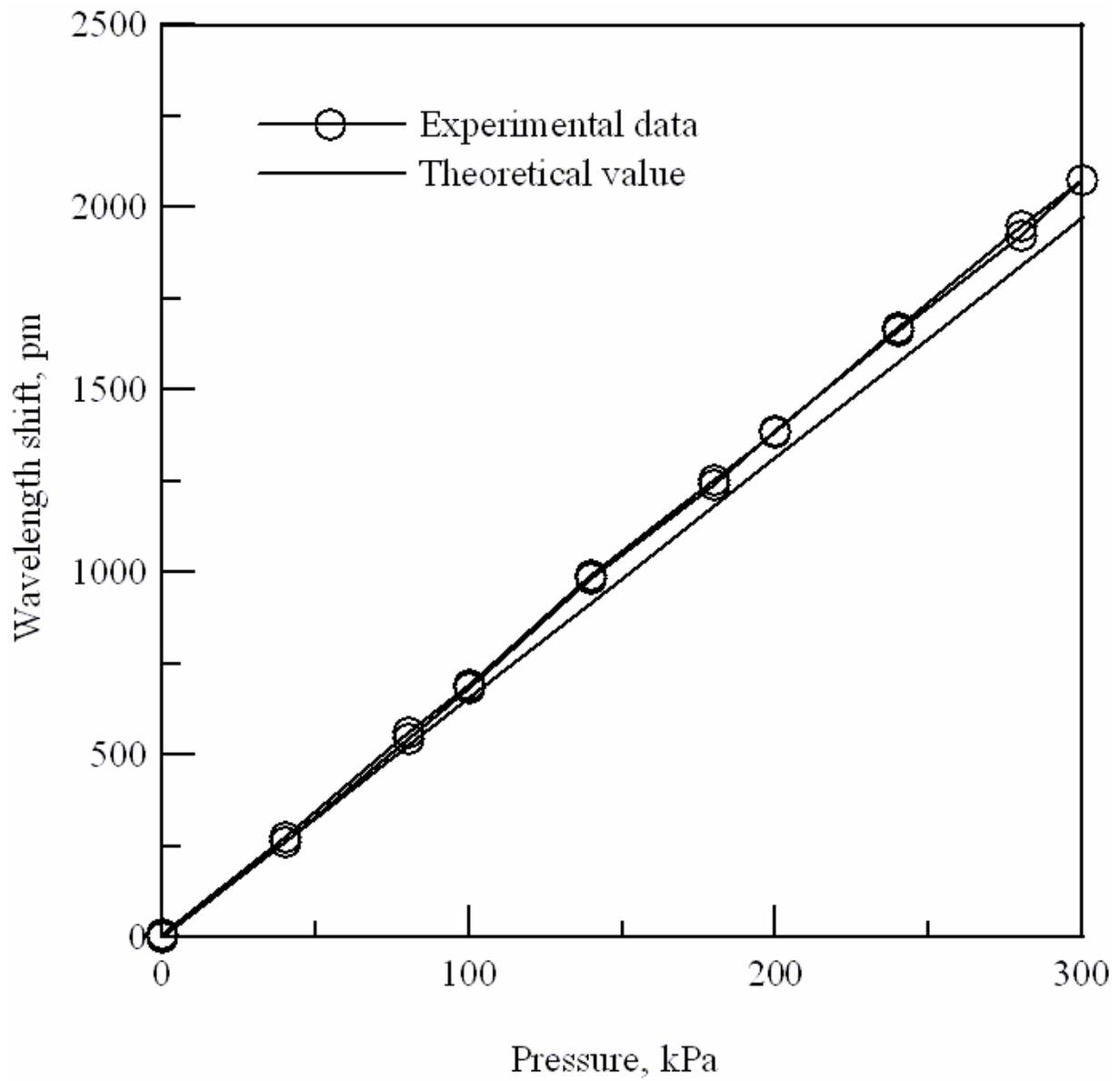


圖 4-22 拉伸式壓力感測器實驗值與理論值比較圖

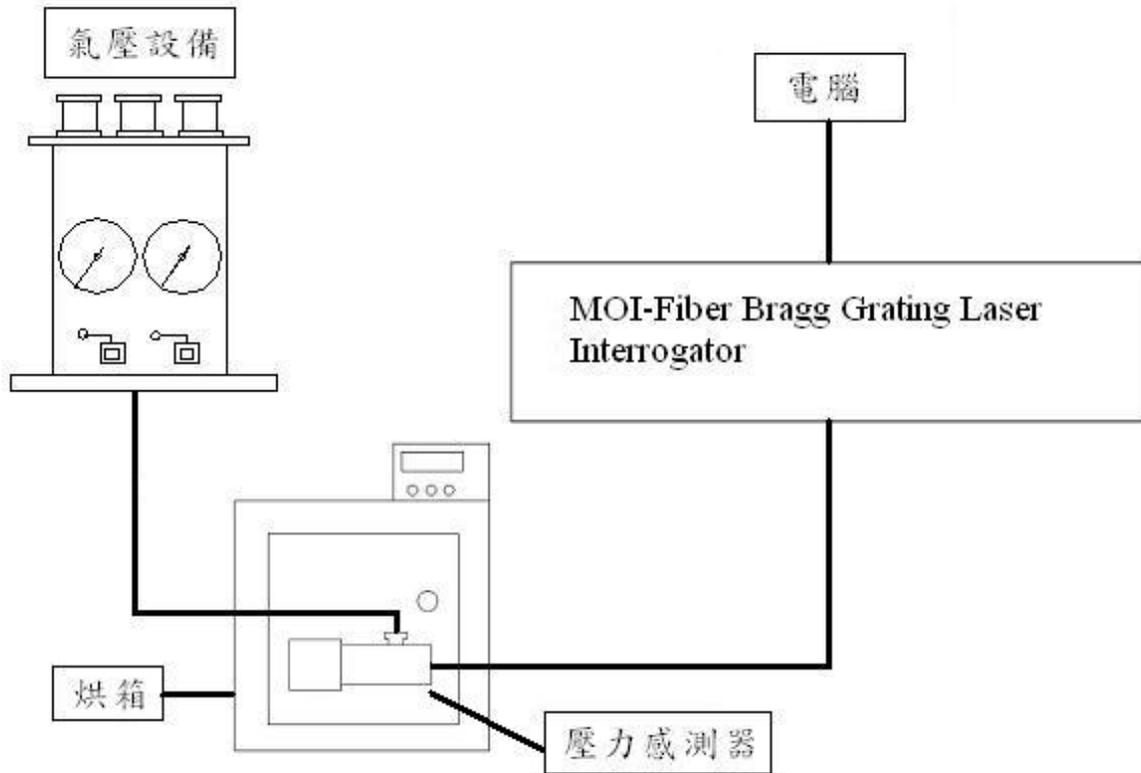


圖 4-23 溫度對感測器影響實驗配置圖



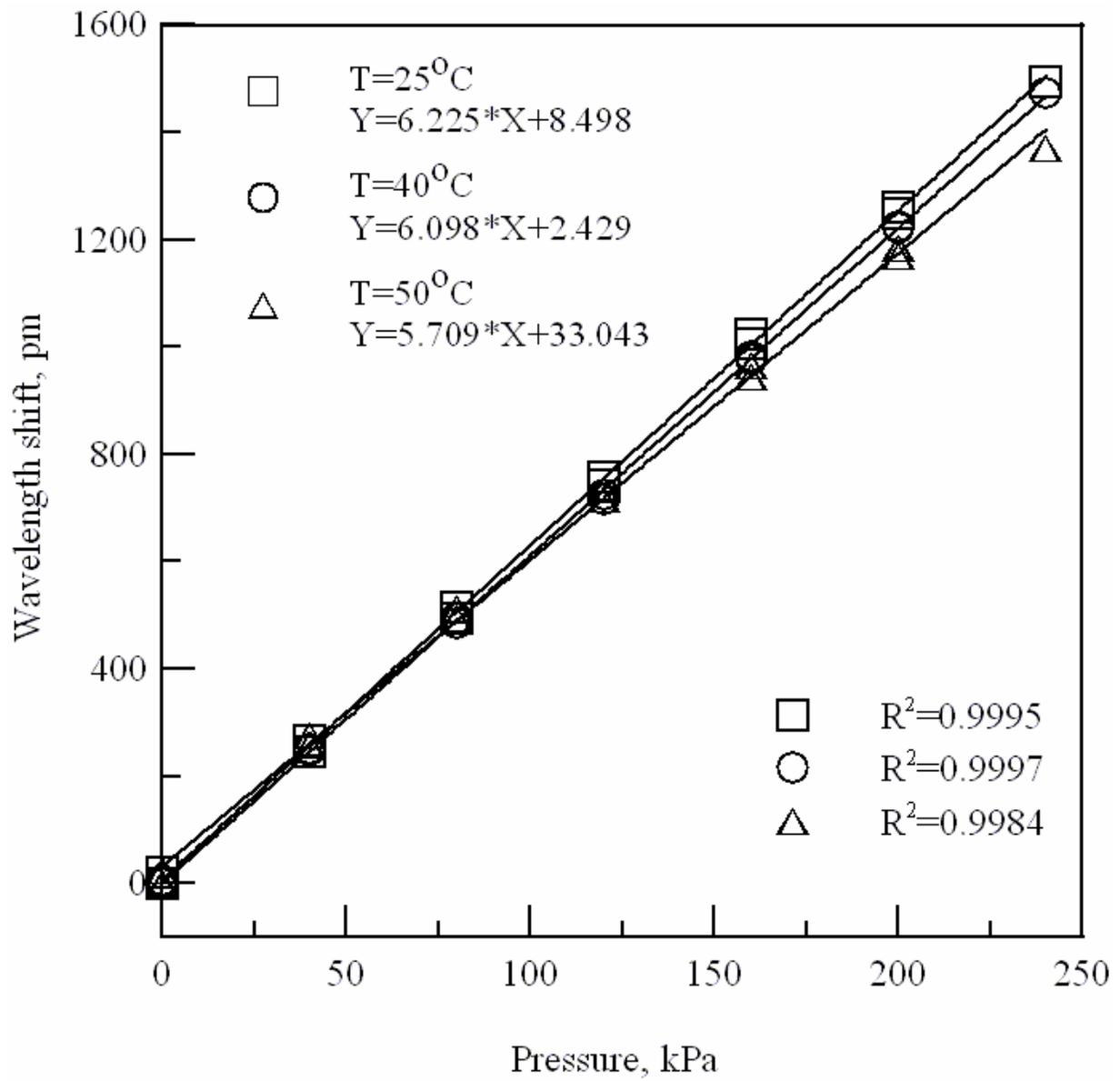


圖 4-24 漸變式壓力感測器溫度標定圖

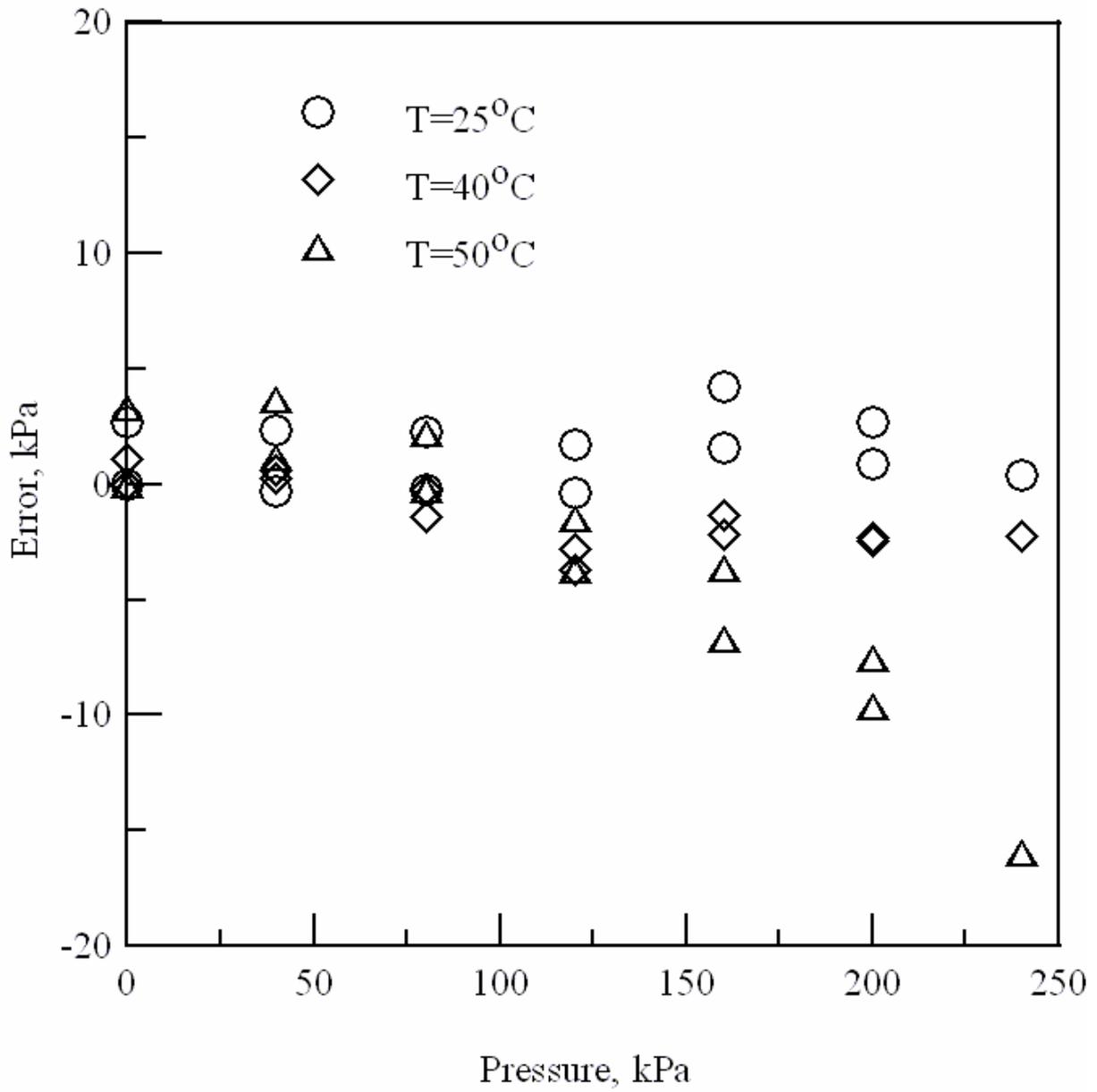


圖 4-25 漸變式壓力感測器溫度標定誤差圖

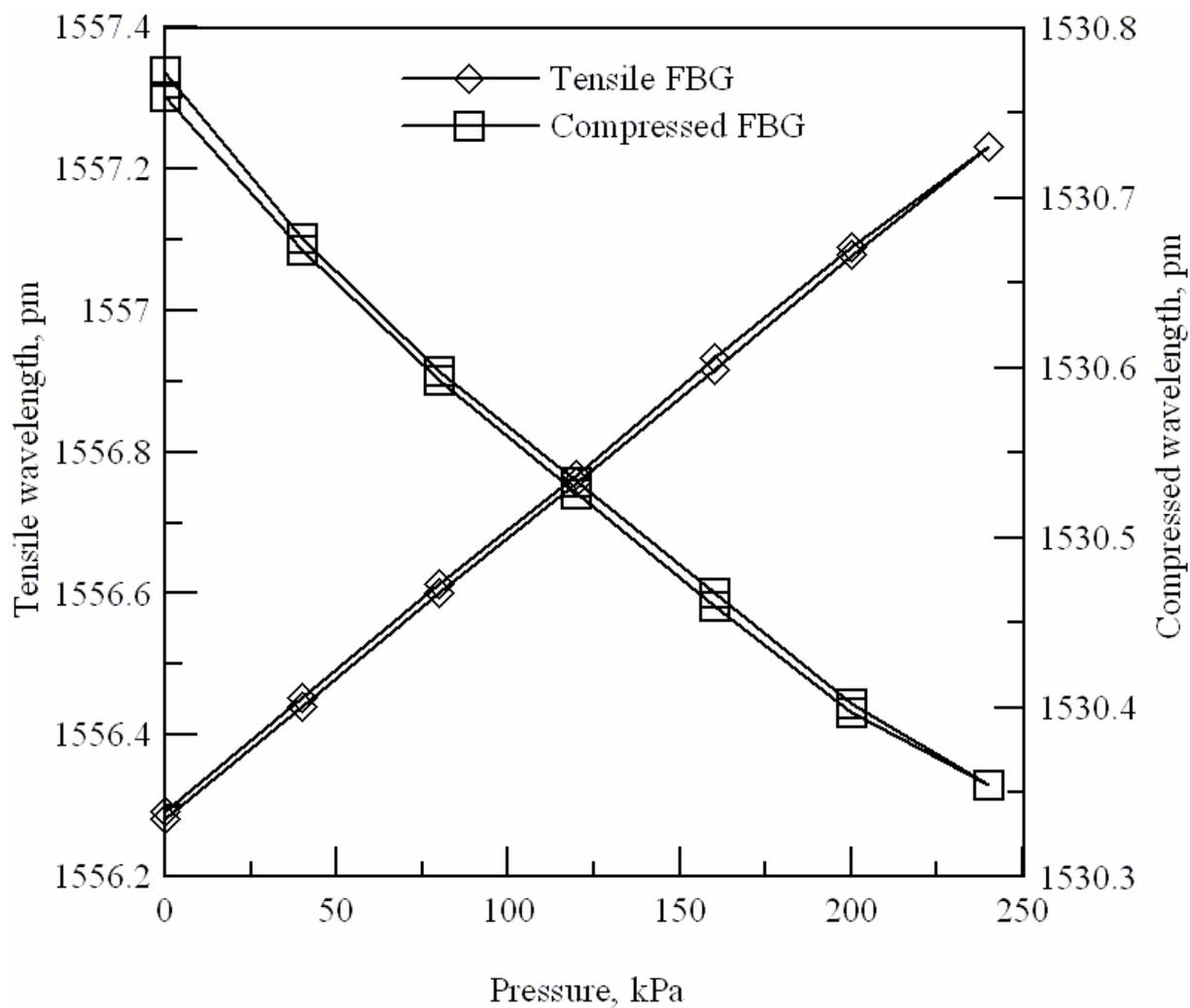


圖 4-26 漸變式壓力感測器於 50°C 時波長變化圖

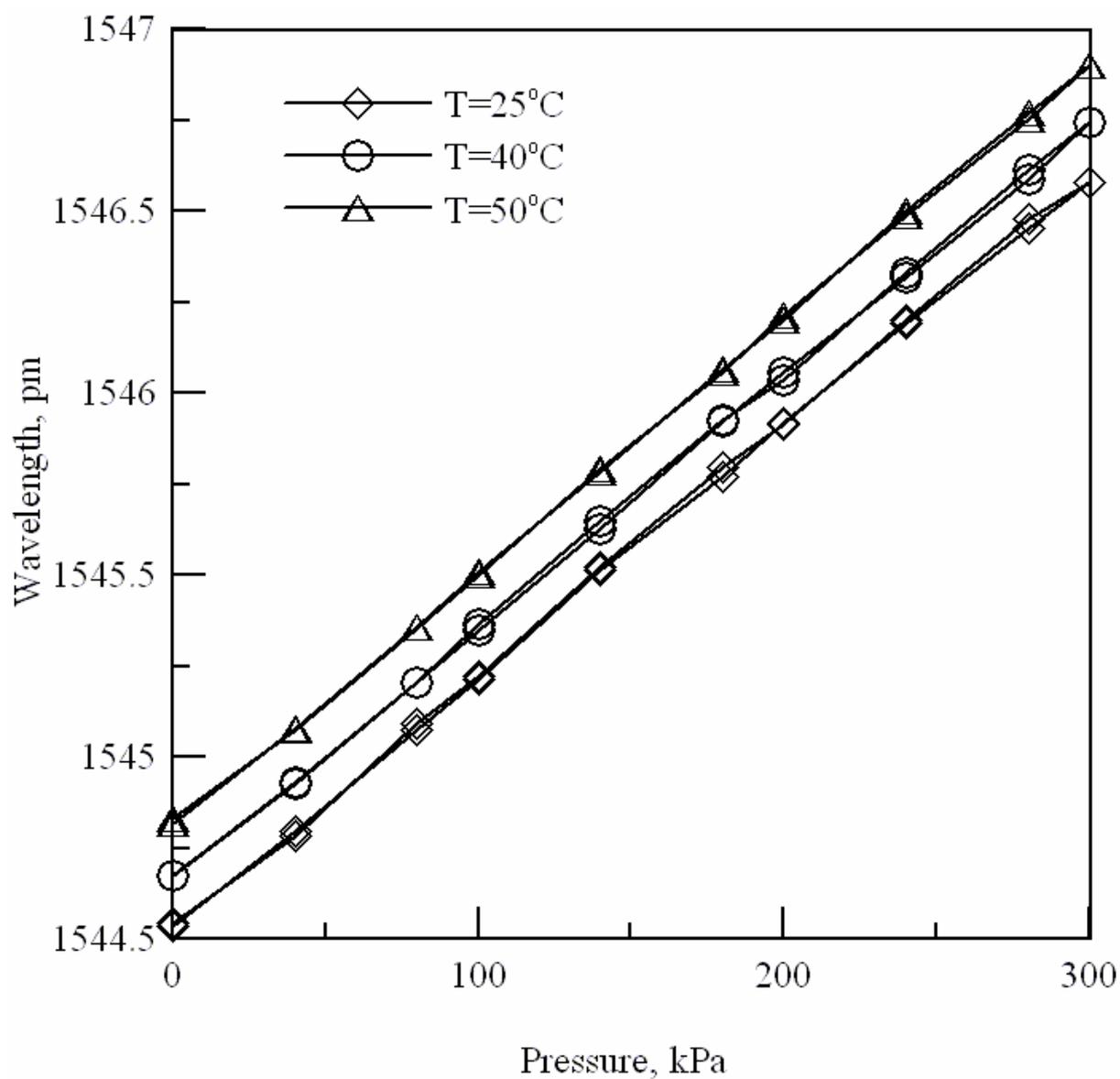


圖 4-27 拉伸式壓力感測器受溫度影響下波長變化圖

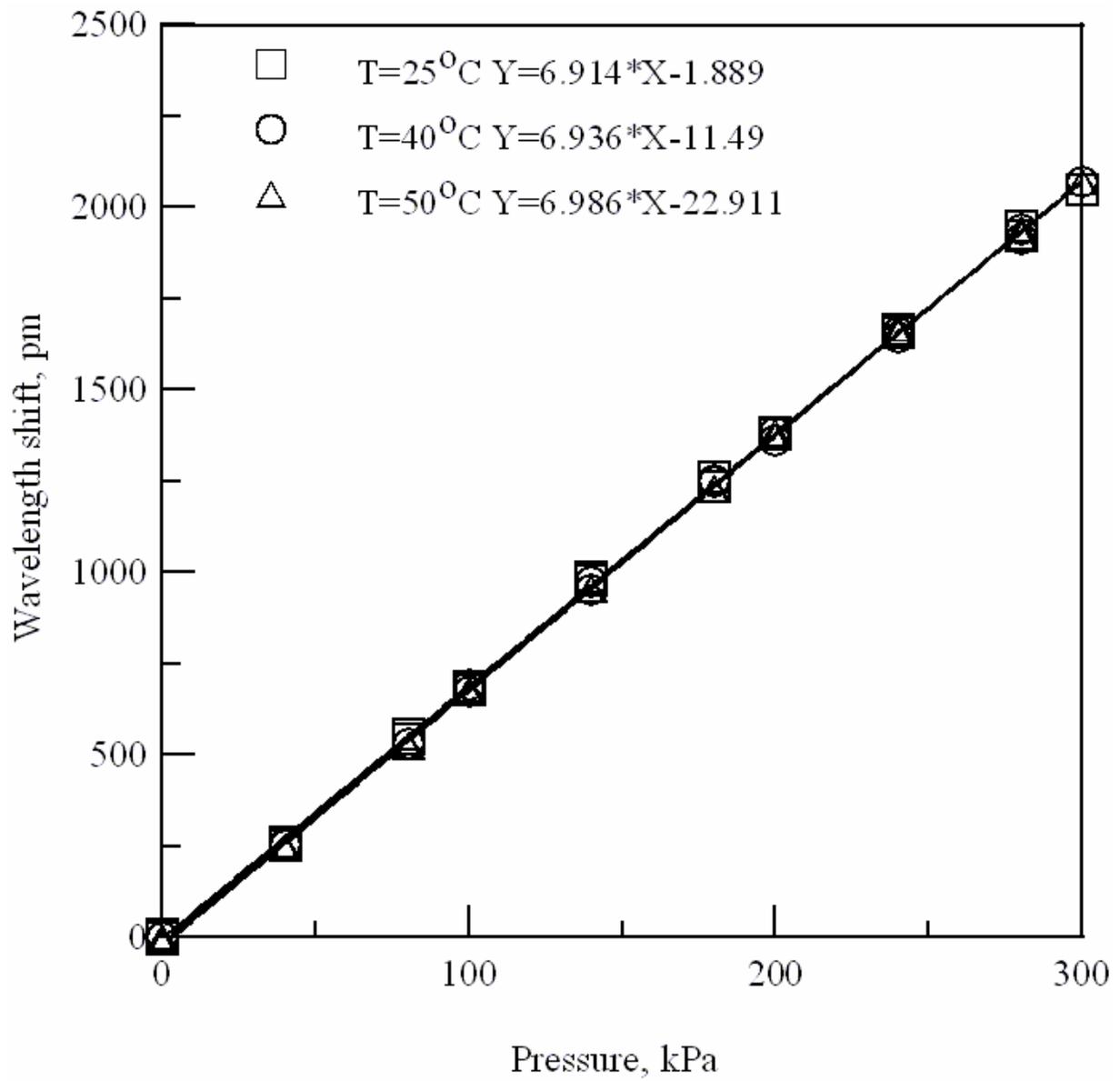


圖 4-28 拉伸式壓力感測器溫度標定圖

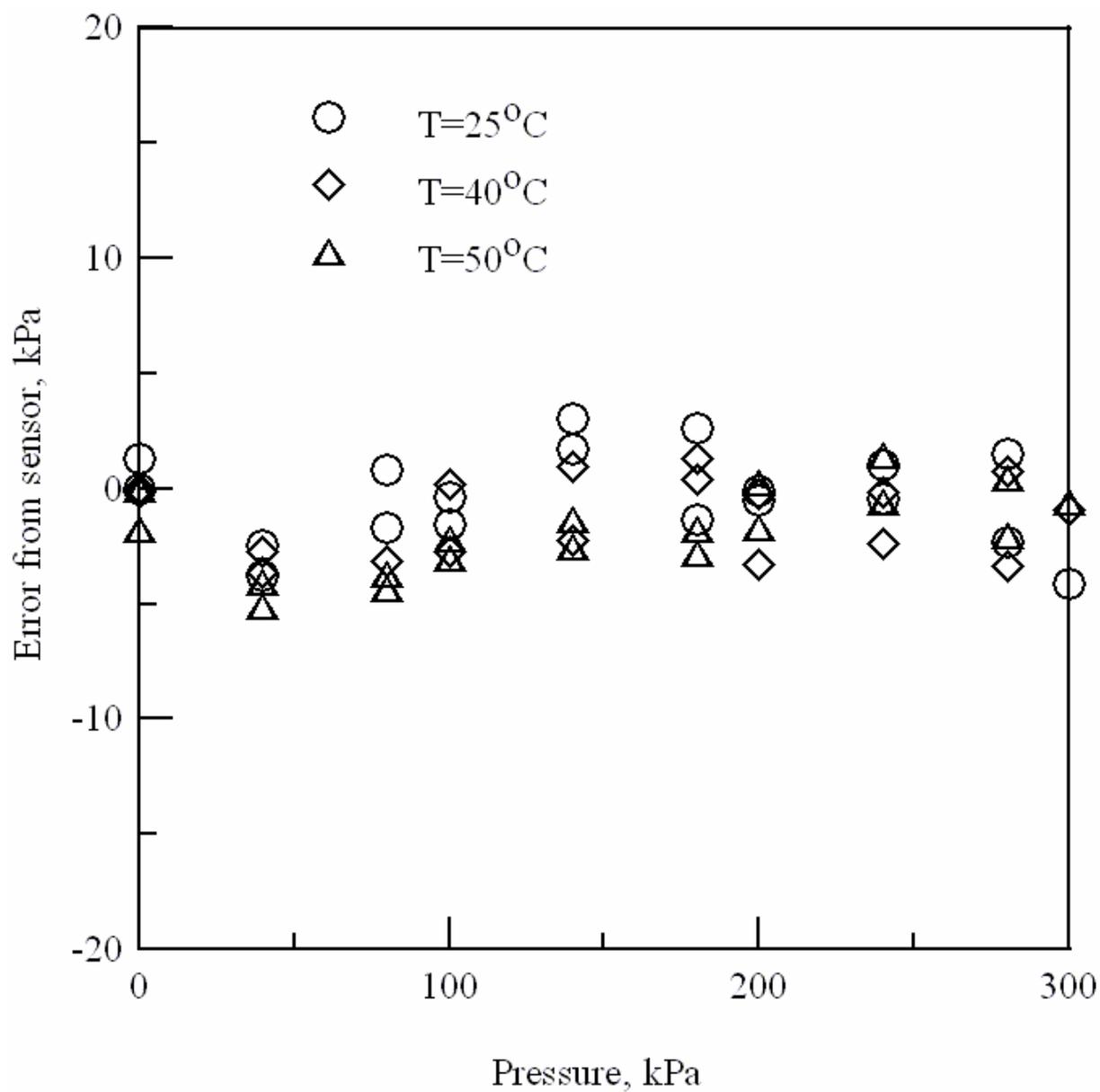


圖 4-29 漸變式壓力感測器溫度標定誤差圖

第五章 建議與結論

5.1 結論

本論文是以光纖光柵做為感測機制，發展出一個新的壓力感測機構；雖然已有一些研究也是利用光纖光柵做為壓力感測器，但目前的研究大部分是以光纖光柵軸向壓縮為主，所製造出來的感測器除了靈敏度不足外，更有可能因為壓縮光纖光柵，使得感測器的精度不佳。本研究所發產出的兩種壓力感測器，其工作特性在綜合實驗結果後可以歸納下列幾項結論：

- (1) 漸變式感測器與拉伸式感測器的解析度可分別為 0.162kPa 和 0.133kPa，其比較如表 5-1 所示，而拉伸式感測器的最大解析度更可以到 0.08kPa；一般的市售的壓力感測器規格如表 5-2 所示，本研究所研發的感測器其解析度與市售的壓力感測器相差無幾，唯誤差略大於市售的。
- (2) 漸變式壓力感測器，有其體積大小的限制，且在受溫度影響下表現較不佳產生較大的誤差，但若改善黏著的問題，必定有極大的發展性。
- (3) 拉伸式壓力感測器，具有構造簡單和體積小的優點，可以使用於空間受限制的環境，而且溫度對感測器的影響也較低，可以使用於溫度變動大的環境。
- (4) 兩種感測器僅需要更改彈簧鋼片的厚度就可以調整量測範圍，當然感測器的解析度必定有所改變。

5.2 建議

- (1) 漸變式壓力感測器雖然在表現上沒有拉伸式壓力感測器如此出色，但具有多工的特性，因為其感測方式並不僅侷限於單一方向的受力，所以可以做為差壓計或是其他以壓力、位移為量測值的構件。
- (2) 因為壓力感測器有長時間使用的可能性存在，因此應該進行長時間加壓的實驗，以驗證感測器的耐用性。



表 5-1 漸變式與拉伸式 FBG 壓力感測器比較表

	漸變式感測器	拉伸式感測器
量測範圍	0-240kPa	0-300kPa
解析度	0.067%FSR	0.044%FSR
準確度	±0.586% FSR	±0.55% FSR
感測器圓板尺寸(厚度)	0.3mm	0.3mm

解析度=1pm 對應的壓力值 p

準確度=全量測範圍之誤差

表 5-2 傳統壓力感測器比較表

(修改自 ACE INSTRUMENT,三聯科技)

	壓力式	振弦式	應變規式
量測範圍	300kPa	300kPa	300kPa
解析度	0.001%FSR	0.025%FSR	0.025%FSR
準確度	0.05%FSR	±0.1% FSR	±0.1% FSR

參考文獻

吳曜東，1997，”光纖原理與應用”，一版，全球科技圖書股份有限公司，臺北。

山下真司，2003，”光纖通訊原理與最新應用技術”，一版，白中和，建興文化事業有限公司，臺北。

葉天傑，2002，”外力式長週期與傳統式短週期光纖光柵的特性分析與實驗量測”，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文。

簡旭君，2002，”光纖光柵應變管之研發”，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。

蔡孟璋，2003，”光纖光柵色散特性量測及光柵結構之反推”，國立交通大學光電工程研究所碩士論文。

陳俊仲，2003，”光纖布拉格光柵於結構感測器之研發與應用”，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。

李雨青，2003，”光纖光柵在板波波傳量測上的應用”，國立交通大學機械工程學系碩士班碩士論文。

申浩然，2003，”以光纖光柵為骨幹之壓力感測器研究”，國防大學中正理工學院電子工程研究所碩士論文。

溫谷琳，2003，”應用 SCM 於圓板之分析”，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。

陳建成，2003，” 布拉格光纖光柵振動感測器設計” ，國立中山大學機械工程研究所碩士論文。

林詠斌、王倫，2004，” 光纖原理、製作與封裝測試” ，光纖監測之應用與發展研討會論文集，國家地震研究中心，pp.23-66。

Dunnicliff, J., 1993, “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, John Wiley & Sons, Inc, 577p.

Dong, X., Guan, B. O., Yuan, S., Dong, X., and Tam, H. Y., 2002, “Strain gradient chirp of uniform fiber Bragg grating without shift of central Bragg wavelength”, Optics Communications, Vol. 202, Issue. 1-3, pp. 91-95.

Dong, X., Meng, H., Liu, Z., Kai, G., and Dong, X., 2001, “Bend measurement with chirp of fiber Bragg grating”, Smart materials and structures, Vol. 10, pp.1111-1113.

Dong, X., Shum, P., Yang, X., Lim, M. F., and Chan, C. C., 2005, ” Bandwidth-tunable filter and spacing-tunable comb filter with chirped-fiber Bragg gratings”, Optics Communications, Vol. 259, Issue. 2, pp. 645-648.

Heo, J. S., Chung, J. H., and Lee, J. J., 1, “Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors”, Sensors & actuators. Part A, Physical, Vol. 126, Issue. 2, pp. 312-327.

Kojima, S., Hishida, Y., Fukuchi, K., and Hongo, A., 2003, “Optical Fiber Sensor Using Fiber Bragg Grating for River Management”, 16th International Conference on Optical Fiber Sensor, Nara, Japan, pp. 112-115.

- Liu, Y. Q., Guo, Z. Y., Zhang, Y., Liu, Z. G., and Dong, X. Y., 2000, “Research on the simultaneous measurement of pressure and temperature using one fiber grating ” , Chin J Lasers A, Vol. 27, pp. 1002–6.
- Liu, Y., Guo, Z., Zhang, Y., Chiang, K. S. and Dong, X., 2000, “Simultaneous Pressure and Temperature Measurement with Polymer-Coated Fiber Bragg Grating ” , Electron Lett. , Vol. 36, pp. 564-566.
- Raman, K., 1999, “Fiber Bragg Gratings,” Academic Press, 458p.
- Rao, Y. J., Jackson, D. A., Jones, R., and Shannon, C., 1994, ”Development of prototype fiber-optic-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation and signal recovery by coherence reading “ , Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, Issue 9, pp. 1685 – 1695.
- Wilson, S. D., and P. E. Mikkelsen, 1978,”Field Instrumentation,” in Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board, Special Rep. 179, Chap.5.
- Xu, M. G., Geiger, H., and Dakin, J. P., 1996, “Fiber Grating Pressure Sensor with Enhanced Sensitivity Using a Glass-bubble Housing” , Electron Lett. , Vol. 32, pp. 128-129.
- Xu, M. G., Reekie, L., Chow, Y. T. and Dakin, J. P., 1993, “Optical in-Fiber Grating High Pressure Sensor” , Electron Lett., Vol. 29, pp. 398-399.
- Zhang, Y., Feng, D., Liu, Z., Guo, Z., Dong, X., Chiang, K. S. and Chu, Beatrice C. B., 2001, “High-Sensitivity Pressure Sensor Using a Shielded Polymer-Coated Fiber Grating”, Photon. Technol. Lett., Vol. 13, pp. 618-619.
- Zhao, Y., and Liao, Y., 2004,”Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors”, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 41, pp. 1–18.

Zhao, Y., Yu, C., and Liao, Y., 2004, “Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure (or displacement) measurement”, *Optics & Laser Technology*, Vol. 36, pp. 39 – 42.

