

# 石油暨石化產業科技術合作

## 八十八年度期末報告

### 水下管線監測系統之研發

計劃編號：88CPCE009010

執行期間：87年8月1日至88年7月31日

委託單位：中國石油股份有限公司

計劃主持人：郭一羽

執行單位：國立交通大學土木系

中華民國 88 年 7 月 30 日

## 目錄

- 壹、 計劃目標
- 貳、 研究方法及步驟
- 參、 目前進度達成情形
- 肆、 實驗結果
- 伍、 結論
- 陸、 文獻

## 壹、計劃目標

國內中油油/氣管線常埋至於地下或海底。埋置在地上的管線可能因為地層下陷,地震或外力因素而腐蝕或破壞,在海底管線可能因為水流強度變化,導致管壁受力不均,及管壁因海水及附著生物而易產生腐蝕而破裂。管線破裂會造成輸送物外洩,污染周圍水域環境及生態,所以如何監測管線之安全應是相當重要的工作,也是監測管線管理者一個重要的應用工具。本研究擬以管線內水流在破裂時之壓力變化特性,研發出一套可行於水下管線檢測系統。

監測水下管線之破壞或變形,由結構之變形可研判管線是否破壞或龜裂。若發生破裂之前,有配合自動化之微觀應變檢測功能,則可精準的完成水下管線破裂之預警作業系統。應用布拉格式光纖之分布式網路分工系統之實驗配合檢測,為世界各國正積極投入研究且正邁入實用化的階段。

自 1993 年起,加拿大將 FBG 網路埋入橋樑,提供長期的結構監測,美國目前也將 FBG 網路埋入 F-16 戰鬥機及水壩及建築物中做長期性之結構監測。

本計劃及引進此 FBG 系統發展水下管線之監測,檢測更高難度之水下管線結構安全,並於未來能廣泛展應用於實際之水下管線檢

測及監測工作。

## 貳、研究方法及步驟

光纖光柵應變感應系統,它包含五大研究方法及步驟：

1. 光纖光柵應變感測器
2. 光源及光接收放大模組
3. 信號擷取處理模組
4. 分佈式網路多工模組
5. 應變顯示軟硬體
6. 探討光纖光柵應變感測器之溫度與膠合的效應。

大體而言,光纖光柵的反射波常會隨溫度升高而變長,但有些許的非線性,並且與膠的種類有關;膠合會使光纖光柵收縮,因而反射波長變短;但膠合後,溫度效應由黏貼材質的熱膨脹係數主導,而且膠的種類影響波長移動甚大;另一方面,溫度與應變兩者對反射波長的交互影響甚為微小。

## 參、目前進度達成情形

本計劃共三年,第一年預計完成基本理論研究及資料收集與基本之實驗設計;第二年預計完成基本實驗及實驗數據之資料建立;第三年預計完成實際佈放 FBG 於輸油管線之表面,以實際監測管線應力應變變化後各 FBG 中心波長檢測之偏移量與實際之偏移量做對照,以驗證其於水下管線監測之實用性。

目前第一年年期中進度以達成基本理論架構之研究及相關研究成果與進度之資料收集,並且進行了基本之實驗設計;期末結束,將完成基本之實驗以驗證基本理論。

目前期末之研究進度及結論將按以下各部份做一報告:

1. 光纖光柵之感測原理
2. FBG 發射光源反射中心波長之系統架構
3. 單一 FBG 在應力應變化下之中心波長偏移
4. FBG 多工系統架構之中心波長量測系統
5. 分佈式 FBG 網路多工的基本架構
6. 分佈式 FBG 網路多工的基本植入管線之設計
7. FBG 光柵以膠合植入管線之實驗設計

## 一、光纖光柵之感測原理

光纖光柵,它是利用含鍺量高的光纖(germanium doped silica fiber)對紫外光(UV)具有光敏感之特性,將此種光纖置於紫外光照射(UV exposure)的區域,經光干涉或透過光罩(mask),光的條紋被寫入光纖,其折射率產生變化,折射率隨空間變化的形式有許多種,例如呈線性變化的 Chirp 光纖光柵(fiber chirped grating),可作為光通訊用的光纖色散補償器(dispersion compensatory);長週期光纖光柵(long - period fiber grating),可使用於光纖放大器中之增益平坦(gain flattening)控制,近年來亦被用來作為光纖感測器。若折射之週期均勻佈變,就形成均勻布拉格光柵。

常用來製作光纖光柵的光纖有單模光纖(single mode fiber)和色散遷移光纖(dispersion shifted fiber)等,製作的方法也有幾種,基本上利用發自同一光源的兩道同調光以不同的角度照射光纖,當光源之光功率足夠大,且波長適宜,在光纖上所形成干涉圖樣會週期性改變該段光纖纖心之折射率。目前具量產能力的方式,系採用相位光罩(phase mask)法,利用波長為 248nm 之 KrF 準分子雷射(excimer laser)光,照射在週期性相位光罩上,產生的兩道繞射光,形成干涉圖樣,再照射到光纖上,形成纖心內部布拉格光柵(intracore Bragg

grating)。

圖 1 為布拉格式光纖(FBG)的基本構造及其透射與反射頻譜,寬頻光源入射後,反射光滿足布拉格條件(Bragg condition),其反射波長為

$$\lambda_B = 2 \times n \times \Lambda \quad (1)$$

$\lambda_B$  與光纖的有效折射率及光柵的週期成  $\Lambda$  正比,  $\Lambda$  由光罩(影響兩道繞射光的出射角度)及雷射的波長來決定:反射光的半高寬(FWHM)和反射率(reflectivity)與光柵的長度及有效反射率的改變量有關,後者由雷射的強度和照射時間來決定,目前 FBG 產品可達到反射率在 95%以上,半高寬在 0.3nm 以下。FBG 具有濾波及反射特定波長的功能,除了本文所提及的應變感測器應用外,尚可應用於光纖通訊,作為濾波器,或是應用在光纖雷射(fiber laser) 或二極體雷射外部共振腔(laser diode external cavity),當作特定波長的反射鏡。

若考慮光與應變之效應,則波長移動( $\Delta \lambda$ )與應變( $\varepsilon$ )之關係可寫成

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (1 - P_{eff}) \varepsilon \quad (2)$$



此處  $P_{\text{eff}}$  為光纖折射率加權應變一光係數(indexweighted strain-optic coefficient),與光纖之應變一光係數、折射率之平方及光纖之 Poisson's ratio 有關。由於布拉格式光纖光柵之波長移動與應變有線性關係( $\Delta \lambda$  正比於  $\varepsilon$ ),且為直接量測( $\lambda_B$  與應變為直接關係);量測信號資料為光譜編碼方式,天生具波長多工環境潛力;光纖光柵經適當之鍍膜處理後仍具有光纖高抗張強度性等優點,廣被應用於智慧型結構中。FBG 應變感測系統基本上包括光纖光柵應變感應器、光源及光接收放大模組、信號擷取處理模組、分佈式網路多工模組及應變顯示軟體。

光纖智慧型結構關鍵技術包括結構材料、感測器及多工技術、訊號處理技術、及系統架構之建立等。研發智慧型結構應變感測器應考慮埋入光纖對結構材料之影響,光纖感測器之置入結構物內,不可損及結構,此即感測器與主材質介面及性能壽命問題;另外,感測系統脆弱性及衰退問題、感測系統架構、多工方式、結構連接/介面亦應列入考慮。在感測靈敏度方面,感測器應忠實量測結構物受外力及環境之影響。

智慧型結構屬於高科技,故一直由學校或研究機構、實驗室領導,再走向商品化的過程中,目前所做的努力為發展自動化技術,應研製

廉價且容易操作之智慧型結構,發展容易操作之智慧型結構光纖感測,  
降低光纖感測器價格,以提昇纖智慧型結構之接受度,加速智慧型結  
構之採用。

# 光纖光柵感測系統

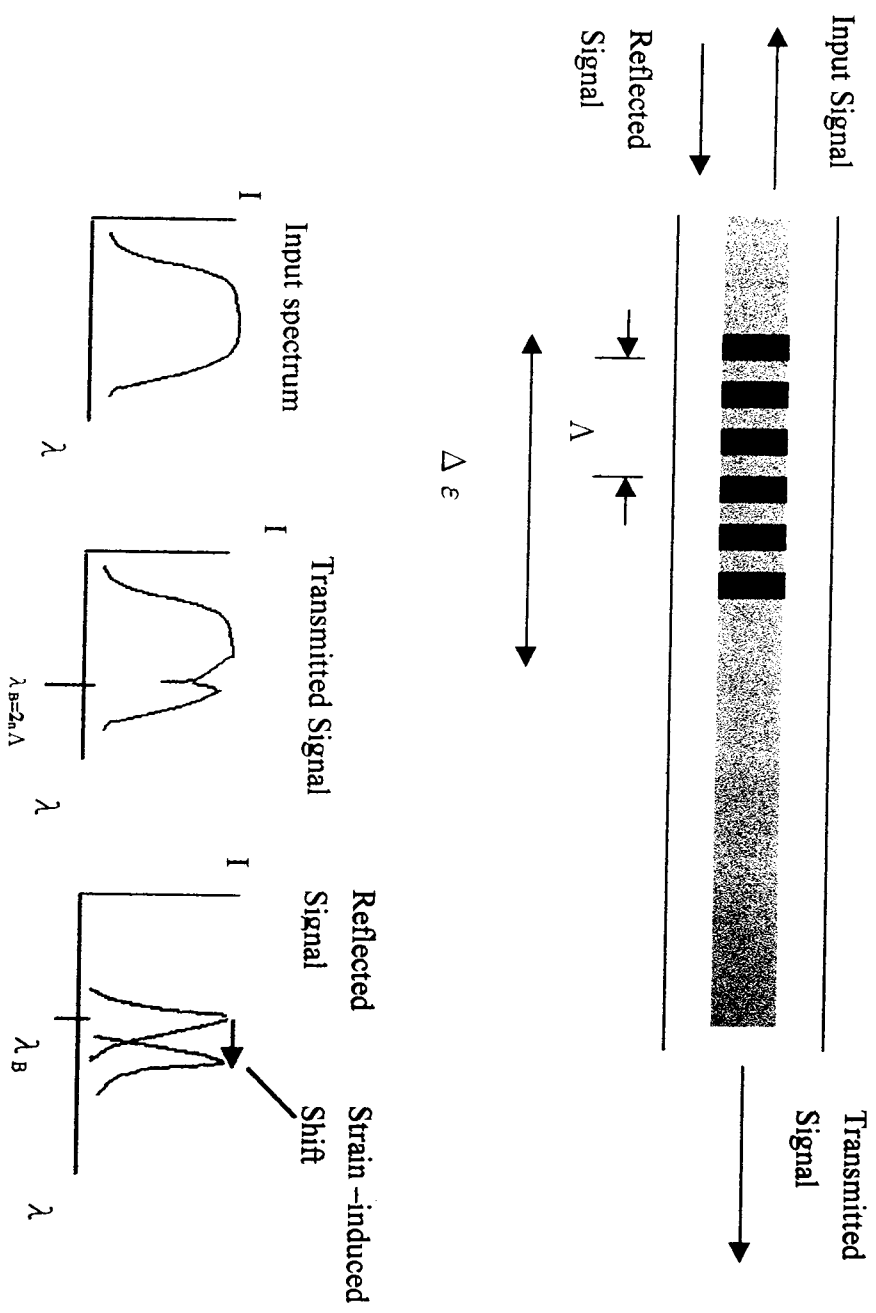


圖 1 光纖光柵 : Fiber Bragg Grating (FBG)

## 二、發射光源反射中心波長之系統架構

邊射形發光二極體(edge emitting light emitting diode , ELED),它發出的寬頻光經由  $2 \times 2$  光纖耦合器入射到黏附在鋁片上的 FBG, 它的反射光(波長與所受的應變有關)再經由耦合器入射到光纖法布里-珀羅可調濾波器(fiber Fabry-perot tunable filter , FFP)讀取波長,光信號由累增崩潰光二極體(avalanche photodiode,APD)接收放大,經由軟硬體信號處理後,把鋁片的應變值顯示在電腦螢幕。

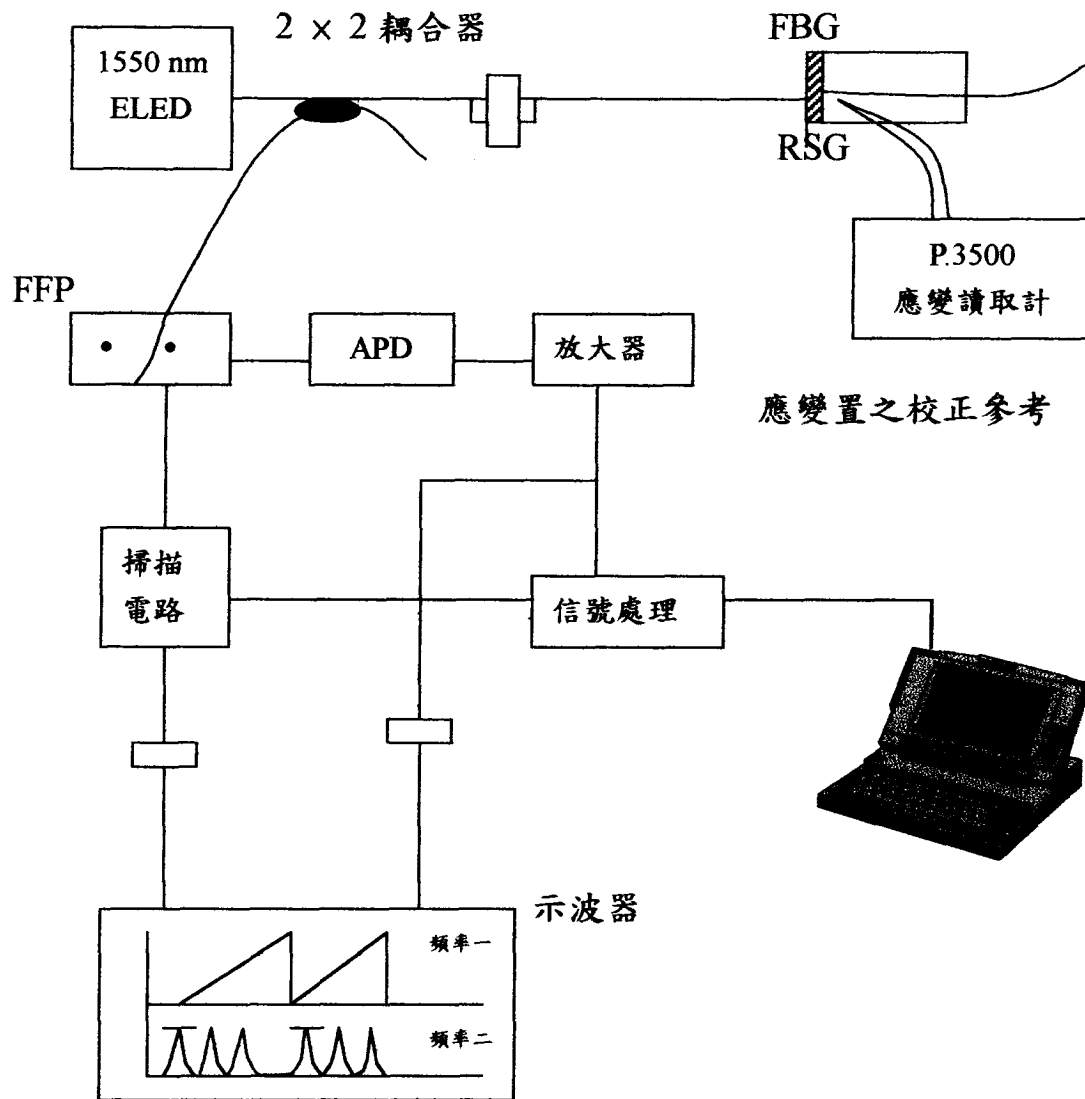
一般較採用寬頻光源有纖雷射、超高亮度發光二極體(super luminescent diode,SLD)以及 ELED。ELED 的中心波長約為 1550 nm, 半高寬(FWHM)約為 60 nm,輸出功率約為  $20 \mu\text{W}$ 。採用的原因是因為它體積小、成本較低級規格符合要求,而 APD 比一般的光二極體更適合接收微弱的光信號。

信號擷取處理模組包括 FFP、驅動掃描電路及信號處理電路,FFP 具有一窄頻的穿透光譜(半高寬 FWHM 等於 0.4 nm),而他的穿透中心波長由外加電壓來控制因此可以輸入鋸齒波來掃描,範圍約為 60 nm,當其穿透光譜的波峰與 FBG 的反射波長重合時,讀取電壓值當作應變的指標。

其他已應用或正在研發的信號擷取方式有許多種,例如干涉

式、光柵式、聲光可調慮波器(acousto-optic tunable filter,AOTF)式等,因為 FFP 與光纖相容性高,且成本較低,所以我們採用此方式。

電阻式應變感應器 (resistive strain gauge , RSG)黏附於 FBG 旁邊當作比對的標準,由 P-3500 讀取其應變值;示波器是用來作為研發設計的輔助 ,不包含於實際的應用系統中。



ELED：邊射型發光二極體      FBG：光纖光柵  
 RSD：電阻式應變感測器      FFP：光纖法布理-伯賀可調濾波器  
 APD：累增崩潰光二極體

圖 2 光纖光柵智能結構應變監測雛形系統示意圖

### 三、單一 FBG 在應力應變化下之中心波長偏移

由圖 3 之應力應變實驗可知,利用一試驗鋼片(15 mm 寬、150 mm 長、1.3 mm 厚)。以三點施力取其彎曲變形(Beading)產生之表面應變測試。由寬頻之 EDF 光源經由光耦合器由光纖傳至貼附應變表面的 FBG,其應變由 0~700  $\mu$  strain 之連續變化造成之 FBG 反射光柵之波長偏移可知滿足其線性變化。

由圖 4 針對單一油管管線之水下監測,可考慮採用單一序列多點監測(Multiplexed FBG sensor array with a scanning FFP filter)由單一 Fiber 在各選取之管線監測點,佈置 FBG,各 FBG 頻譜上之波長偏移  $R_{1-4}$ ,在可監測之解析度分別顯示各反射波長之偏移訊號,可避免不同 FBG 中心波長偏移之交叉反應(Crossing Effect)。

由圖 5 可知 FFP 掃描模式(Scanning Mode),得到 3 個連續 FBG 之 Bragg 中心 1538.6、1544.2 及 1566.0 nm 但第 3 個中心波長為 1548.2 nm 之 FBG 發生應變時之反射波長頻譜可以很明顯看出反射中心波長偏移的變化,並且可得到清楚的解析度。由圖 6 放大之中心波長偏移變化可知其結構之應變可清楚的偵測到,由 0→25→50→75  $\mu$  strain 的應力應變變化。

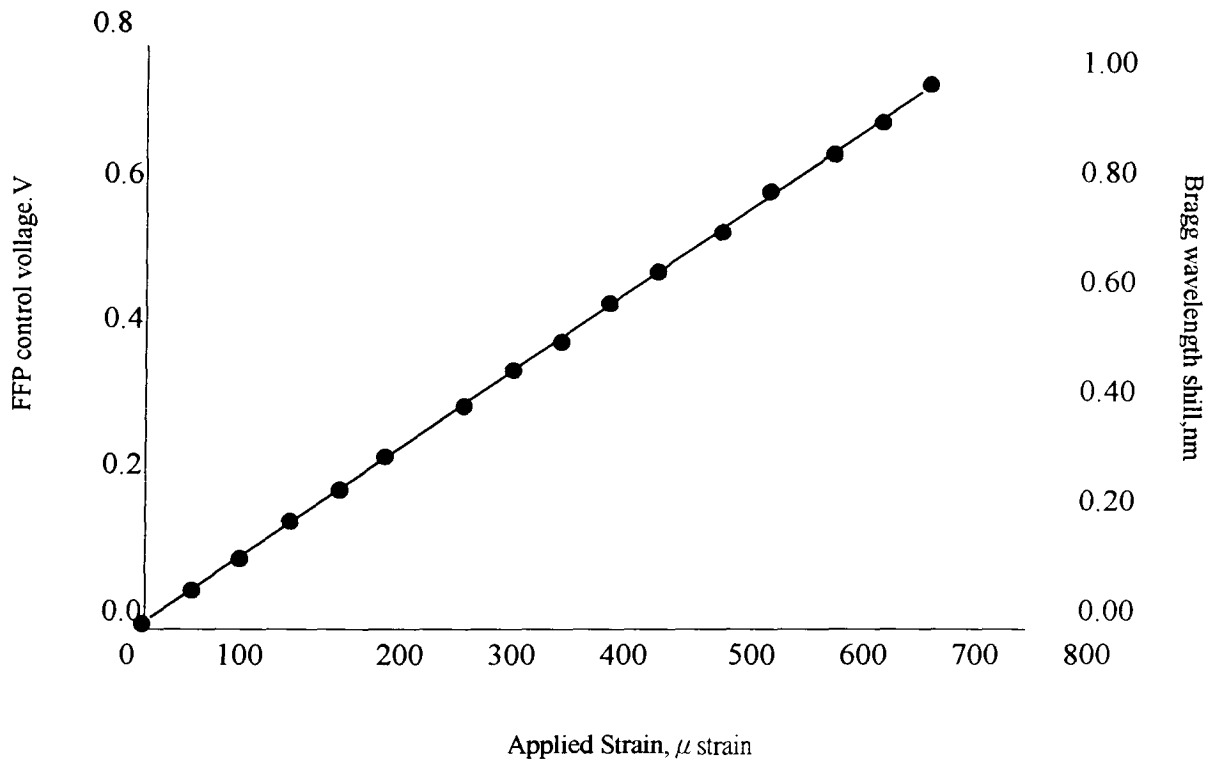


圖 3 由 FFP 控制電壓調變之反射波長與應力應變成線性變化

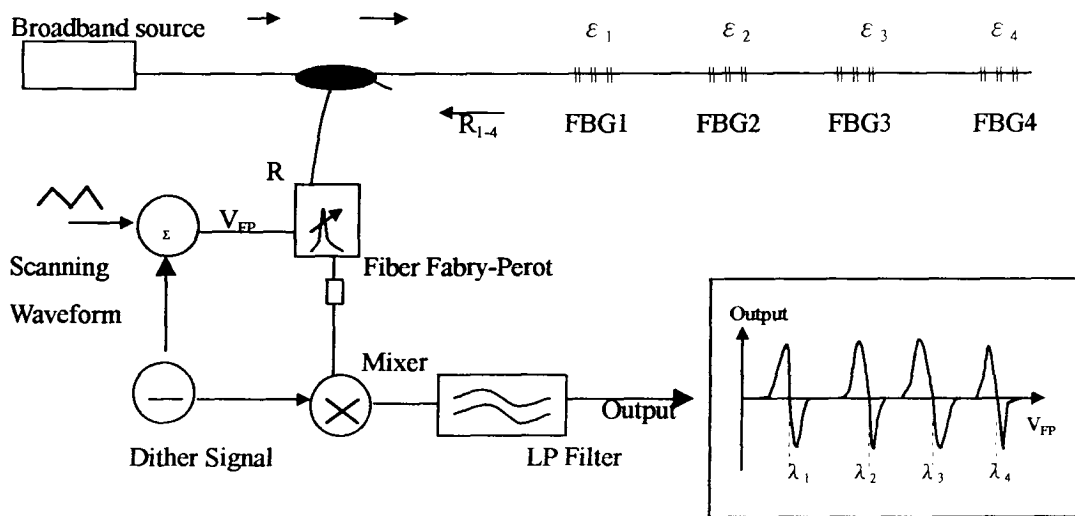


圖 4 由 FFP 濾波調度由數個多工 FBG 感測器之反射中心波長架構



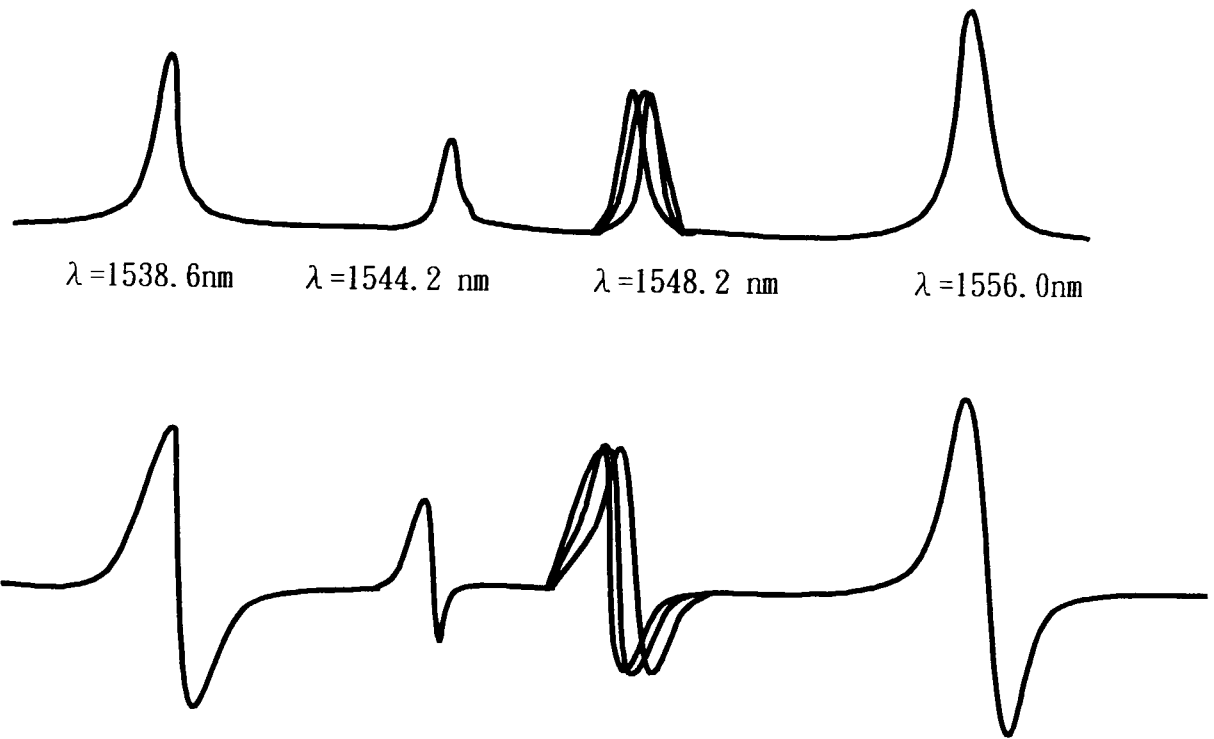


圖 5 由圖 3 之多工架構之反射中心波長之分佈

1548.2 nm FBG

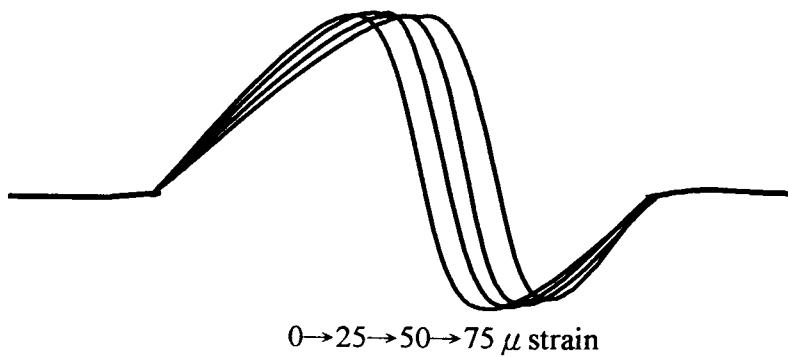


圖 6 FBG 多工感測器地三個中心波常因應力應變產生之波長變化因無法交叉反映(Zero-crossing),故其變化為可解析的。

#### 四、FBG 多工系統架構之中心波長量測系統

同理,在同一個監測站裡,可以同時監測不同管線之反射多光纖光柵之不同中心波長,建立光纖光柵應用的多工架構,如圖 6 所示,在反射之各光纖光柵中心波長中,即可解析不同管線及其各監測點之應力應變的變化,以建立水下管線之監測預警系統。

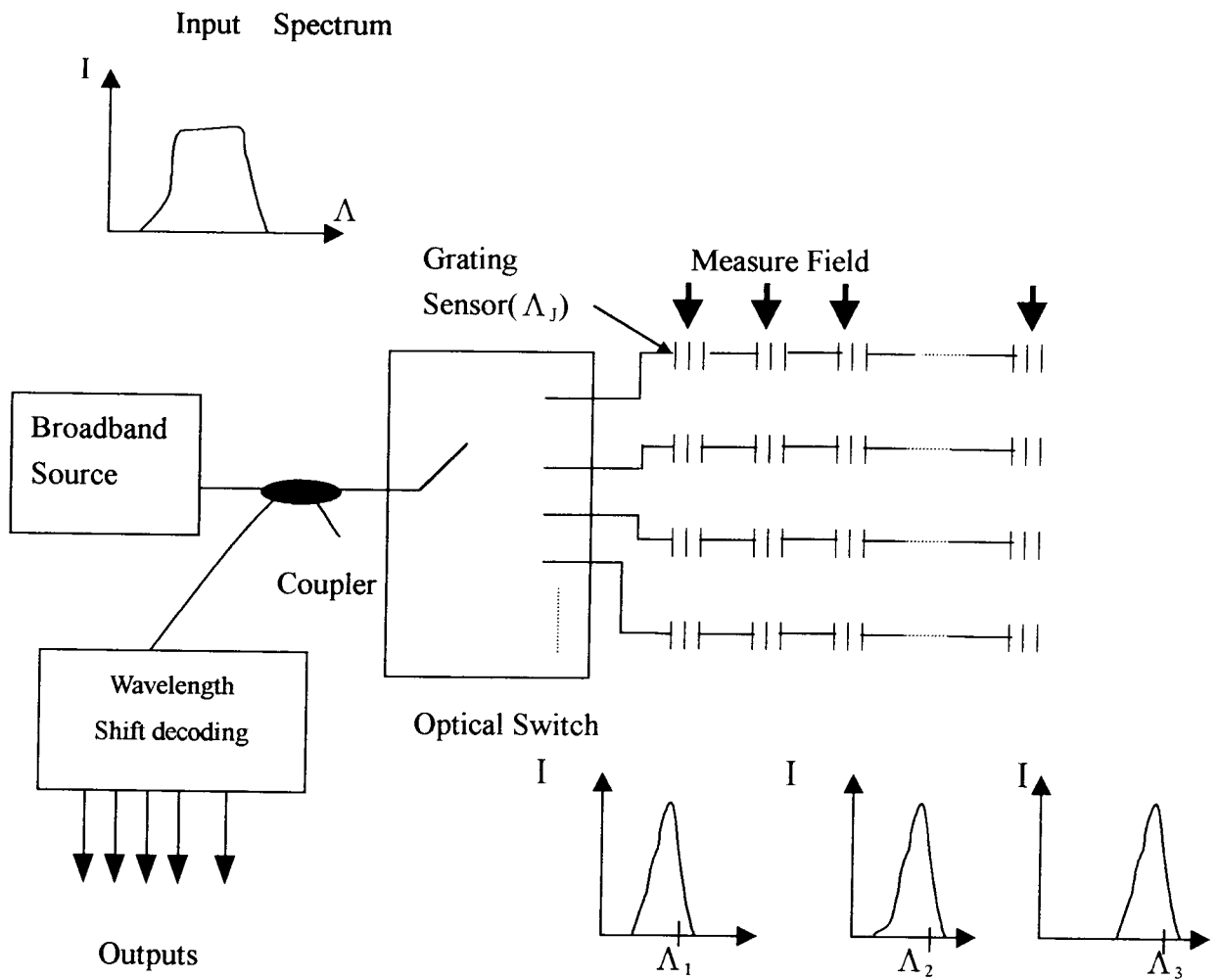


圖 7 可同時監測不同管線及其監測點之光纖光柵多工架構

## 五、分佈式 FBG 網路多工的基本架構

圖 7 分佈式網路多工的基本架構,它結合了波長多工(wavelength division multiplexing, WDM)和空間多工(spatial division multiplexing, SDM)。波長多工是指在同一光纖上串接光纖光柵感測器來量測結構物在不同位置應變,串接的數目由光源和信號擷取模組的頻寬及每個感測器欲測的應變範圍來決定;空間多工是藉由  $1 \times N$  光切換器(optical switch)將網路設計成放射狀,  $N$  代表通道(channel)數,每個通道可連接一條包含具許多波長多工的感測器。目前實驗室具備技術能力製作通道數大於 30,整體多工感測器數目大於 120 的網路感測系統。如果實際應用時需要提高多工的數目時,則是加上時間多工(time division multiplexing, TDM)的技術,使信號擷取模組在不同的時間掃描到不同位置,但反射波長在同一波段的感測器。

因為系統的目的是監測結構物的應變分佈,所以感測器必須黏附或表面埋入結構中,圖 8 為表面黏附的示意圖。由於土木上的量測需求是針對不同待測材質來測量不同長度的平均應變(例如水泥材質約為 10 公分),所以光纖光柵必須黏貼於待測材料匹配的套管中(如圖 8 所示),由圖中可知,待測材料的應變需經由材料/膠/套管,

套管/膠/光纖光柵兩個介面傳遞後才能被感測,所以膠與套管材質的選擇非常重要。

將光纖光柵應變感測系統實際應用於水下管線之前,必須先從事實驗室的模擬測試及建立資料庫軟體,例如針對特定型式的模擬水下管線作測試,配合介面技術,以傳統電阻應變感測器為比對標準,做靜態應變測試和動態的震動模態分析測試。另一方面,則要應用有限元素分析(finite element analysis)理論,設計鋪設位置及破壞分析等模擬軟體,結合測試數據並建立資料庫。

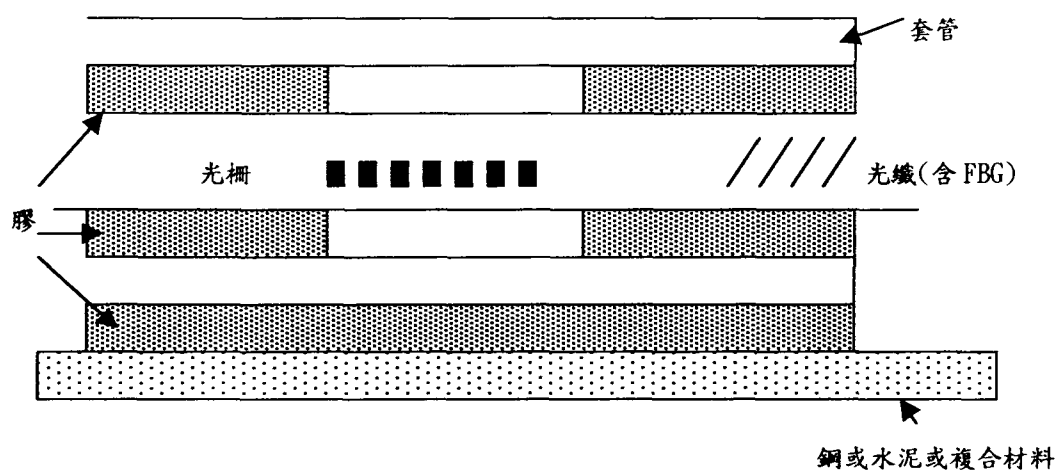


圖 8 FBG 應變感測器與待測材料黏貼示意圖

## 六、分佈式 FBG 網路多工的基本植入管線之設計

水下管線之偵測,即可採用光纖光柵分佈式網路多工架構,在一個監測站中,同時監測不同的管線及各管線之光纖貼附之 FBG 光纖監測點,如圖 9 所示,所示圖 10 表示以光調度電壓反射之不同中心波長,即可擷取各監測點之應力應變變化。

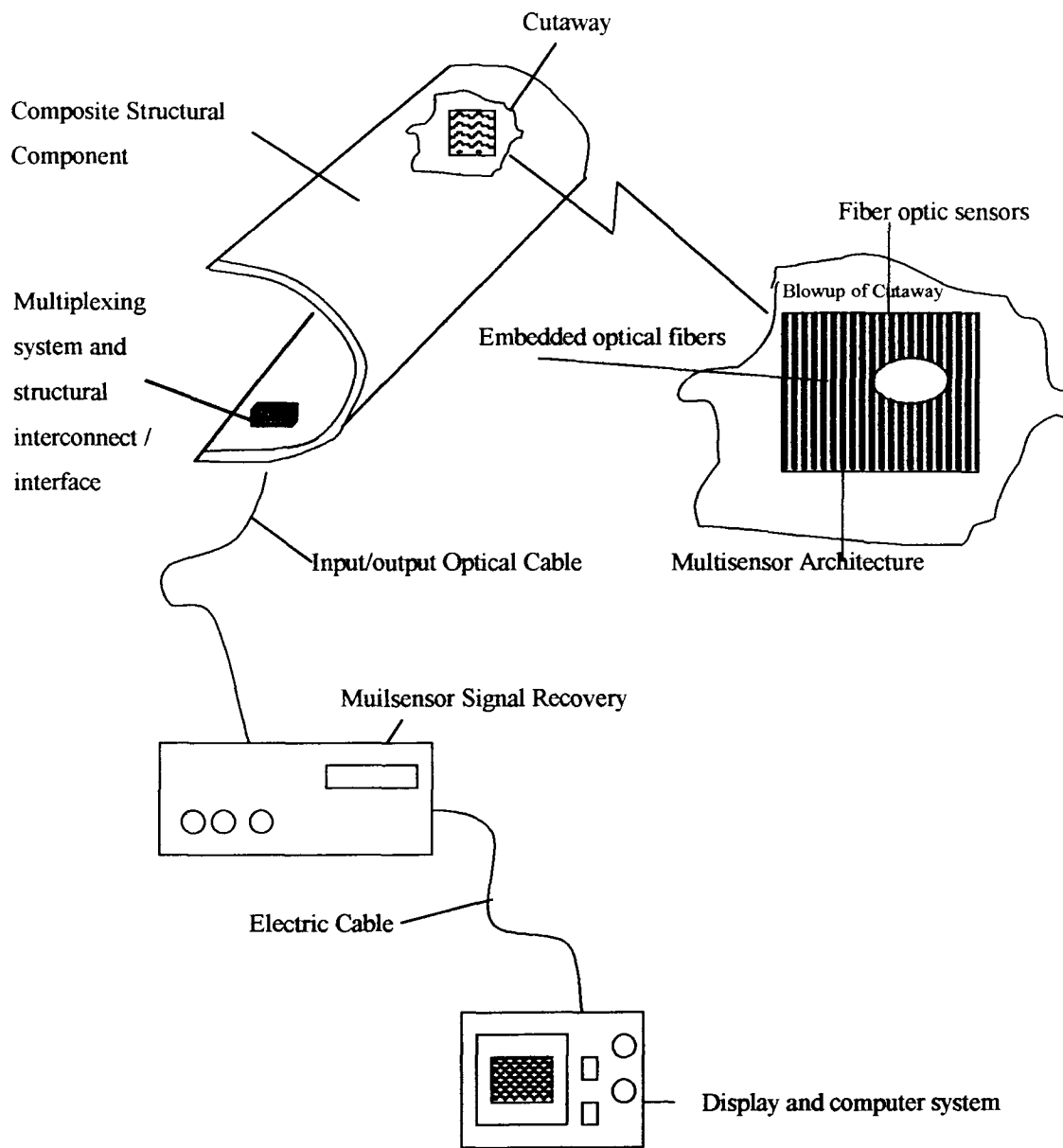


圖 9 應用光纖光柵方分佈式網路多工架構植入管線之示意圖

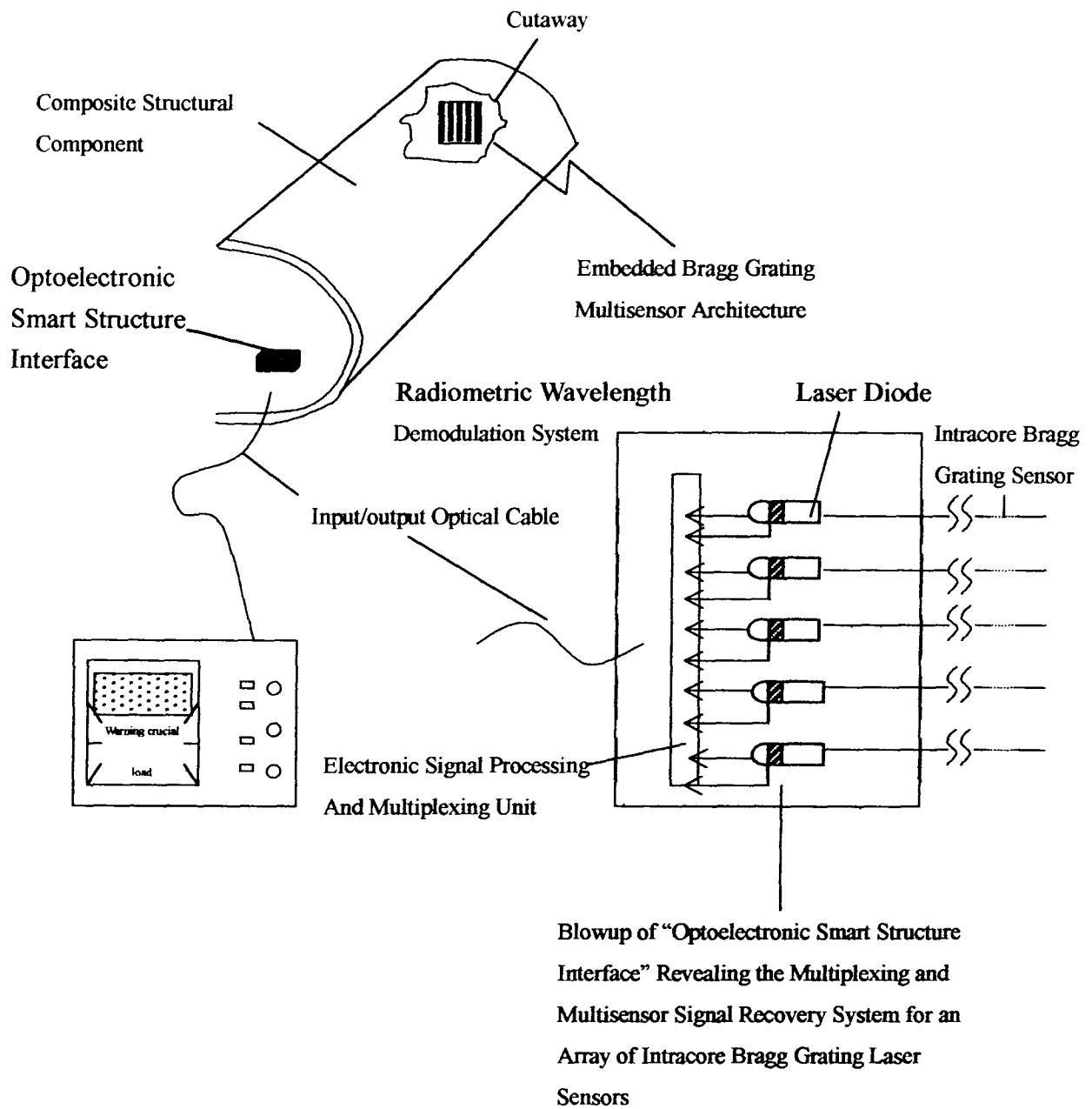


圖 10 圖 9 之應用光纖光柵管線多工架構植入後讀取監測點之中心波長訊號



## 七、FBG 光柵以膠合植入管線之實驗設計

實驗所用的 12 根 FBG 是由自製而成,光纖採用 Corning 公司之單模光纖(single mode fiber),其纖心(core)直徑  $9\ \mu\text{m}$ ,纖衣(cladding)直徑為  $125\ \mu\text{m}$ ,外層被覆(coating)直徑為  $250\ \mu\text{m}$ ;光柵(grating)部份剝除被覆約 2.5 公分,實際的光柵長度約為 1 公分,其室溫下的反射波長大致在 1541 nm 和 1542 nm 之間,反射波長的半高寬約為 0.27 nm,反射率約為 95%。

另外,由於管線、膠合材料與光纖光柵三者之材料在不同的溫度及材料下,量測出不同溫度下之反射中心波長之變化,可供日後應力應變量測時作為修正之參考。

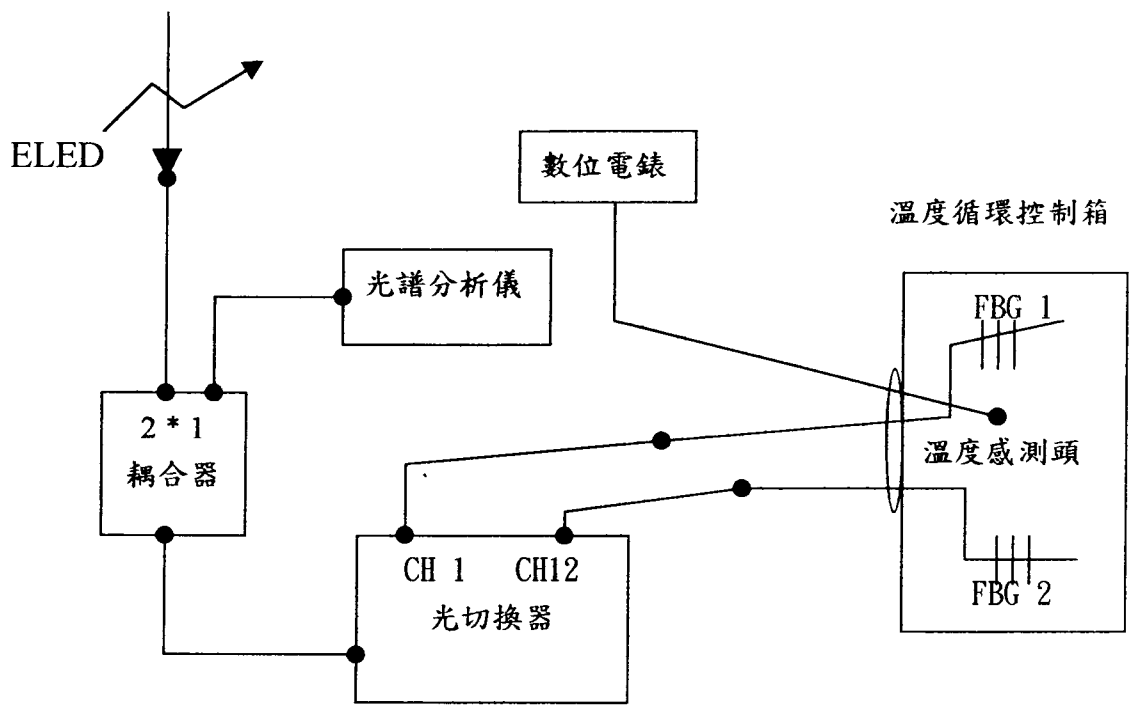


圖 11 FBG 溫度特性實驗架構示意圖

#### 肆、實驗結果

當溫度變化時,波長變化的理論公式：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha) \times \Delta T = K_t \times \Delta T \quad (2)$$

$\lambda$ : FBG 的反射波長

$\Delta\lambda$ : FBG 反射波長變化量

$\xi$ : 光纖的熱光係數(thermal optical coefficient)

$\alpha$ : 光纖的熱膨脹係數(thermal expansion coefficient)

$\Delta T$ : 溫度變化量

$K_t$ : FBG 的溫度敏感係數

圖 11 為實驗架構示意圖, EKED 的輸出光經由  $2 \times 1$  光纖耦合器(fiber coupler)入射到光切換器, 12 根 FBG 分別放置於溫度控制箱(temperature controlled chamber)內, 並且與切換器的 12 個通道之光纖熔接(fusion splice), 當預定溫度平衡後, 依序改變切換器的通道, 使入射光輪流由不同的 FBG 反射, 反射光經由耦合器入射到光譜分析儀(optical spectrum analyzer), 由光譜分析儀讀取 FBG 的反射波長。

因為光譜分析儀的最好精確解析度為 0.1 nm, 而 FBG 的反射波長隨溫度的變化, 每  $10^\circ\text{C}$  可能小於 0.1 nm, 所以本實驗採用每間

隔 20°C 讀取一個數據,從 -40°C 到 80°C 總共七個數據。因為平衡溫度是由溫度感測器(temperature sensor)讀取,而由數位電表所顯示,所以與溫度控制箱設定溫度值(20°C 的整倍數)有些微的差異。

從圖 12 中可知,雖然個 FBG 的室溫反射波長不同,但是反射波長隨溫度而增加的趨勢大致相同,實驗數據依公式(3)來計算  $K_t$  值 :

$$K_t = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \times \frac{1}{\Delta T} (1/^\circ\text{C}) \quad (3)$$

把 12 根 FBG 在各溫度區段計算所得的  $K_t$  值加以平均得到表 1 及圖 13,在圖中可以發現  $K_t$  值並不是一個常數,它隨著溫度上升而緩慢增加,也就是說到高溫時,波長的變化量較大。大體而言,在 -40°C 到 0°C 的低溫範圍內  $K_t$  的平均值為  $6.31 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ,從另一個比較方便的觀點來看,從(1)是可知 :

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \lambda \times K_t \quad (4)$$

由於  $\lambda$  在整個溫度範圍內變化不大,所以用  $\lambda$  近似等於 1541 nm 代入計算得到  $\Delta\lambda/\Delta T$  的平均值,在 -40°C 到 0°C 的低溫範圍之  $\Delta\lambda/\Delta T$  大約是 0.077 nm / 10°C,在 0°C 到 80°C 的範圍之  $\Delta\lambda/\Delta T$  大約是 0.097 nm / 10°C。

圖 12 為編號 FBG10 及 FBG12 的 FBG 在(a)、(b)兩次不同測試日期下反射波長與溫度關係,兩次測試的數據大致重合,顯示重複性

良好。

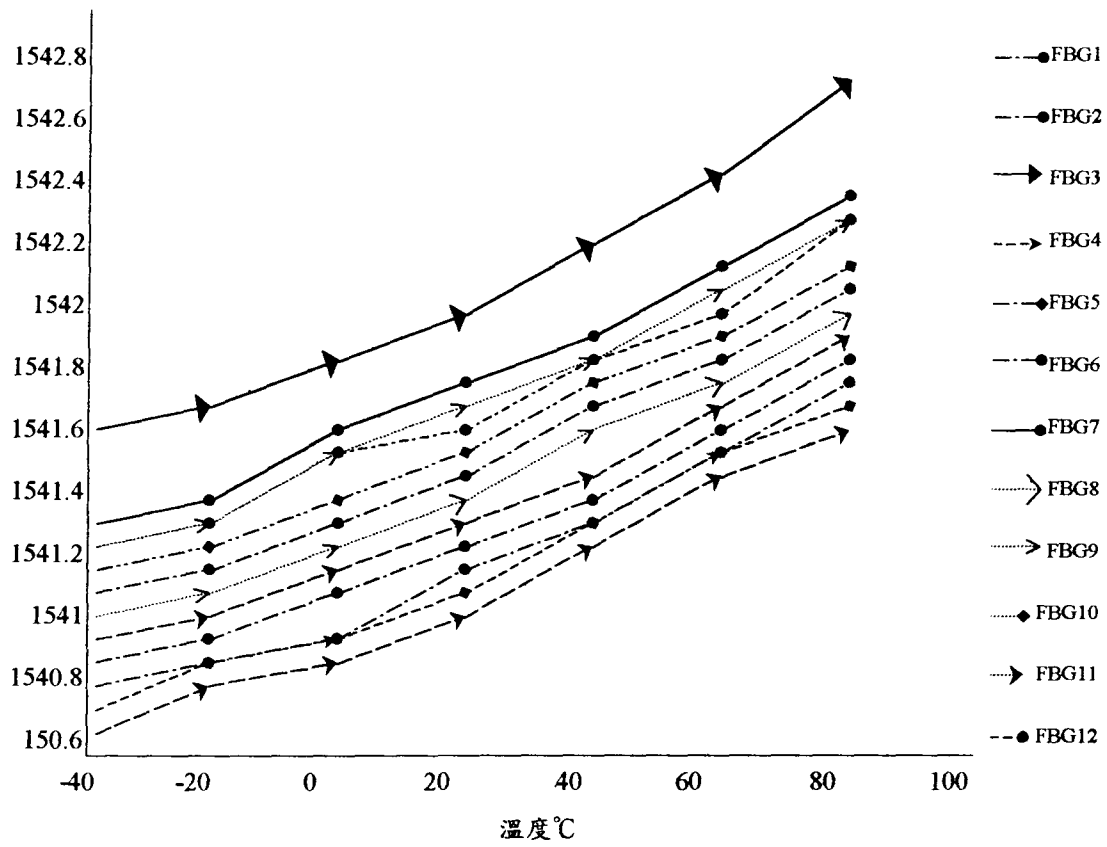


圖 12 FBG 反射波長與溫度的關係

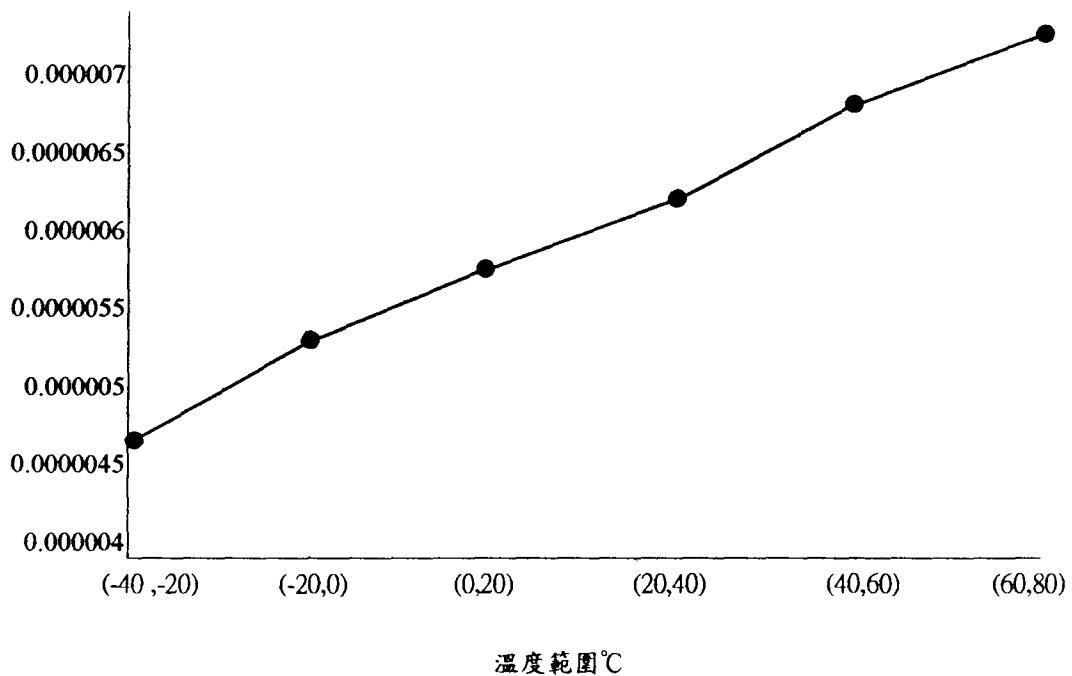


圖 13  $K_1$  與溫度的關係

溫度範圍(°C)	(-40,-20)	(-20,0)	(0,20)	(20,40)	(40,60)	(60,80)	(-40,0) 平均	(0,80) 平均
$K_i(1^\circ\text{C})$	$4.66 \times 10^{-6}$	$5.35 \times 10^{-6}$	$5.84 \times 10^{-6}$	$6.16 \times 10^{-6}$	$6.48 \times 10^{-6}$	$6.76 \times 10^{-6}$	$5.01 \times 10^{-6}$	$6.31 \times 10^{-6}$

表 1 FBG 之  $K_i$  與溫度的關係

## 二、FBG 膠固後溫度效應

當 FBG 直接膠固於待測材料時,其反射波長的理論公式為 :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = [\delta + \beta - P_e \times (\beta - \alpha) \times \Delta T + (1 - P_e) \times \varepsilon] = K_1 \times \Delta T + K_\varepsilon \times \varepsilon \quad (5)$$

$\Delta\lambda$ 、 $\lambda$ 、 $\zeta$ 、 $\alpha$ 、 $\Delta T$ 、 $K_1$ :同公式(1)的定義

$P_e$ : 光纖的 index weighted strain-optic coefficient 或稱為光彈常數(photoelastic constant)

$\beta$ : FBG 膠固後整體的膨脹係數(thermal expansion coefficient)

$\varepsilon$ : FBG 所在之處待測材料所受的軸向應變(axial strain)

$K_\varepsilon$ :FBG 的應變敏感係數

溫度改變對 FBG 反射波長的影響分成三項 :

$\xi \times \Delta T$  代表 FBG 的折射率百分變化量

$\beta \times \Delta T$  代表整體的熱膨脹

$-P_e \times (\beta - \alpha) \times \Delta T$  代表由於 FBG 與待測材料的熱膨脹係數不同所引起的熱/機械應變(thermal induced mechanical strain)。

當 FBG 膠固於材料當作應變感應器時,它的要求是必須精確反應出材料的伸張與收縮,所以 FBG 必須是膠合良好,而且 FBG 和膠必須很輕薄短小而不致造成材料型變時的負載。當然,實際上負載

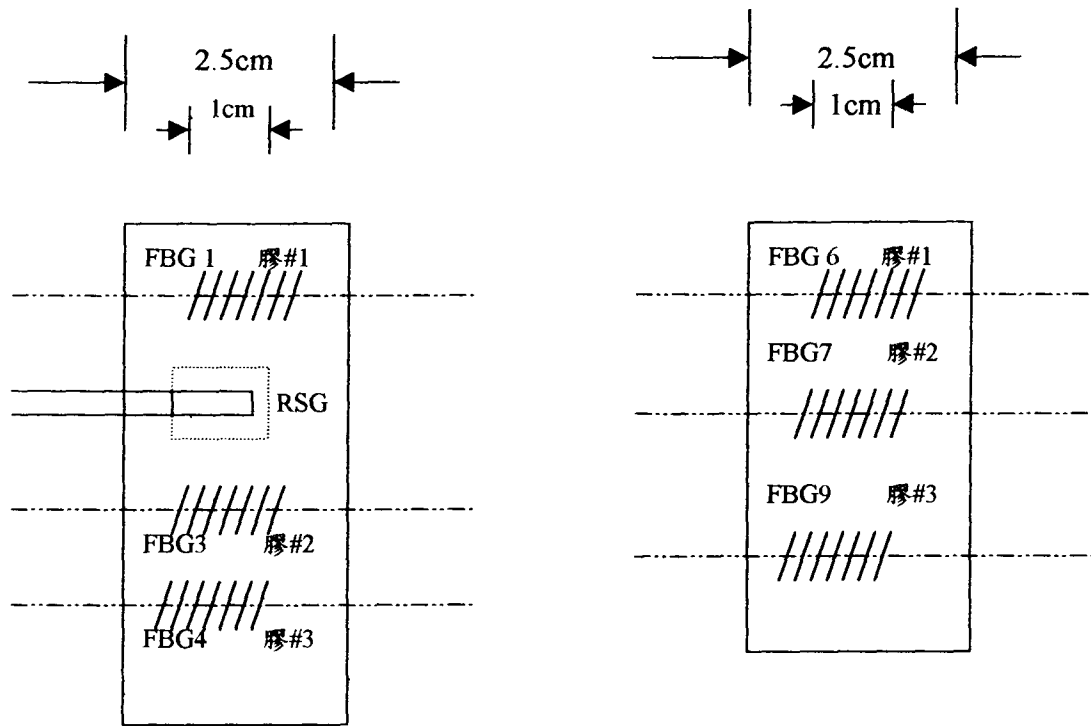


效應無法完全避免,就溫度影響而言,因為 FBG、膠和待測材料三種的熱膨脹係數不同,所以膠固後的熱膨脹係數應該是三者的折衷平衡。由於 FBG 很輕薄短小且膠很薄,所以理論上最後的熱膨脹係數應是接近材料的熱膨脹係數。

如上述,膠會引響 FBG 膠固後的表現,所以本文採用三種光學系統常用的膠來比較,它們是膠#1、膠#2、膠#3、其中只有膠#2 列出熱膨脹係數的規格為  $54 \times 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$ 。當然這只是參考,因為它與欲膠合的兩種材料和膠的用量有關。

實驗的配置圖如圖 14 所示,鋁片(a)、(b)的型號是 6061,大小為  $250 \times 45 \times 1 \text{ mm}$ ,熱膨脹係數約為  $23.6 \times 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$ 。因 FBG 的被覆剝除長度約為 2.5cm,所以上膠時盡量均勻且薄地塗佈此一部份。六根 FBG 已於 2.1 中測過膠固前的  $K_f$  值,RSG 是傳統電阻式應變感測器(resistive strain gage),它是用來測量鋁片(a)的機械應變。

首先,因為膠在固化過程中會收縮,所以 FBG 的反射波長在膠固後會變短。表 2 列出各 FBG 的波長變化,從表中可以看出膠#2 造成的波長改變最多,而膠#3 造成的改變最少。



鋁片(a)

鋁片(b)

----- : FBG

////////// : 膠

RSG : 電阻式應變感應器

圖 14 FBG 上膠配置示意圖

FBG#	膠	$\lambda$ (nm)	$\lambda$ (nm)	$\Delta \lambda$ (nm)	平均 $\lambda$ (nm)
FBG1	膠#1	1541.41	1539.93	-1.48	
FBG6	膠#1	1541.65	1540.02	-1.63	-1.555
FBG3	膠#2	1542.09	1539.10	-2.99	
FBG7	膠#2	1541.81	1538.81	-3.00	-2.995
FBG4	膠#3	1541.24	1540.90	-0.34	
FBG9	膠#3	1541.53	1541.11	-0.42	-0.38

表 2 FBG 膠固後的波長漂移

其次,把鋁片(a)和鋁片(b)放到溫度控制箱中,依 3.1 中所述的相同步驟來測試溫室效應,結果是於圖 15。6 根 FBG 的反射波長均隨著溫度增加而變長,膠#2 最為線性,膠#1 變化最大。以相同的膠來計算其在各溫度的區段的  $K_t$  平均值,結果是表於表 3 及圖 16。 $K_t$  並不是一個常數而且其變化也沒有一定規則,在 $-40^{\circ}\text{C}$ 到  $80^{\circ}\text{C}$ 的範圍內,膠#1 的最小值是  $1.71 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ ,最大值是  $2.35 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ ;膠#2 的最小值是  $2.27 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ ,最大值是  $2.78 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ ;膠#3 的最小值是  $2.02 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ ,最大值是  $2.42 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ 。所以膠#3 的變化最小,膠#1 的變化最大。若以溫度範圍來看,膠#2 和膠#3 在低溫時  $K_t$  值遞增且甚為相近,而大於  $0^{\circ}\text{C}$  時,膠#1 與膠#3 的  $K_t$  值有相同的先變小在變大的趨勢。

由公式(5)可知,因為  $\zeta/\alpha$  大於或等於 15,所以  $K_t$  可看成是  $\zeta$  和  $(1-P_e) \times \beta$  兩部份相加而得, $\zeta$  約等於在 3.1 中所得到的  $K_t$  值,低溫時約為  $5 \times 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$ , 高溫時約為  $6.3 \times 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$ 。而從表 3 可知  $K_t$  的數量級約為  $2 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ ,所以顯然是  $(1-P_e) \times \beta$  這一項在主導溫度效應。在文獻中記載的  $P_e$  值約為 0.15。而鋁片的熱膨脹係數比 FBG 大 50 倍以上,如果以  $\beta$  近似於鋁的熱膨脹係數  $23.6 \times 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$  代入計算來預估  $(1-P_e) \times \beta$ ,其值約等於  $2 \times 10^{-5}(1/^{\circ}\text{C})$ ,因此可以

說,FBG 上膠於鋁片後整體的熱膨脹係數與鋁片的熱膨脹係數相近,與預測相符,然而由前面的分析可知,種類不同的膠確實也使整體的熱膨脹係數在各溫度區段有明顯的差異。

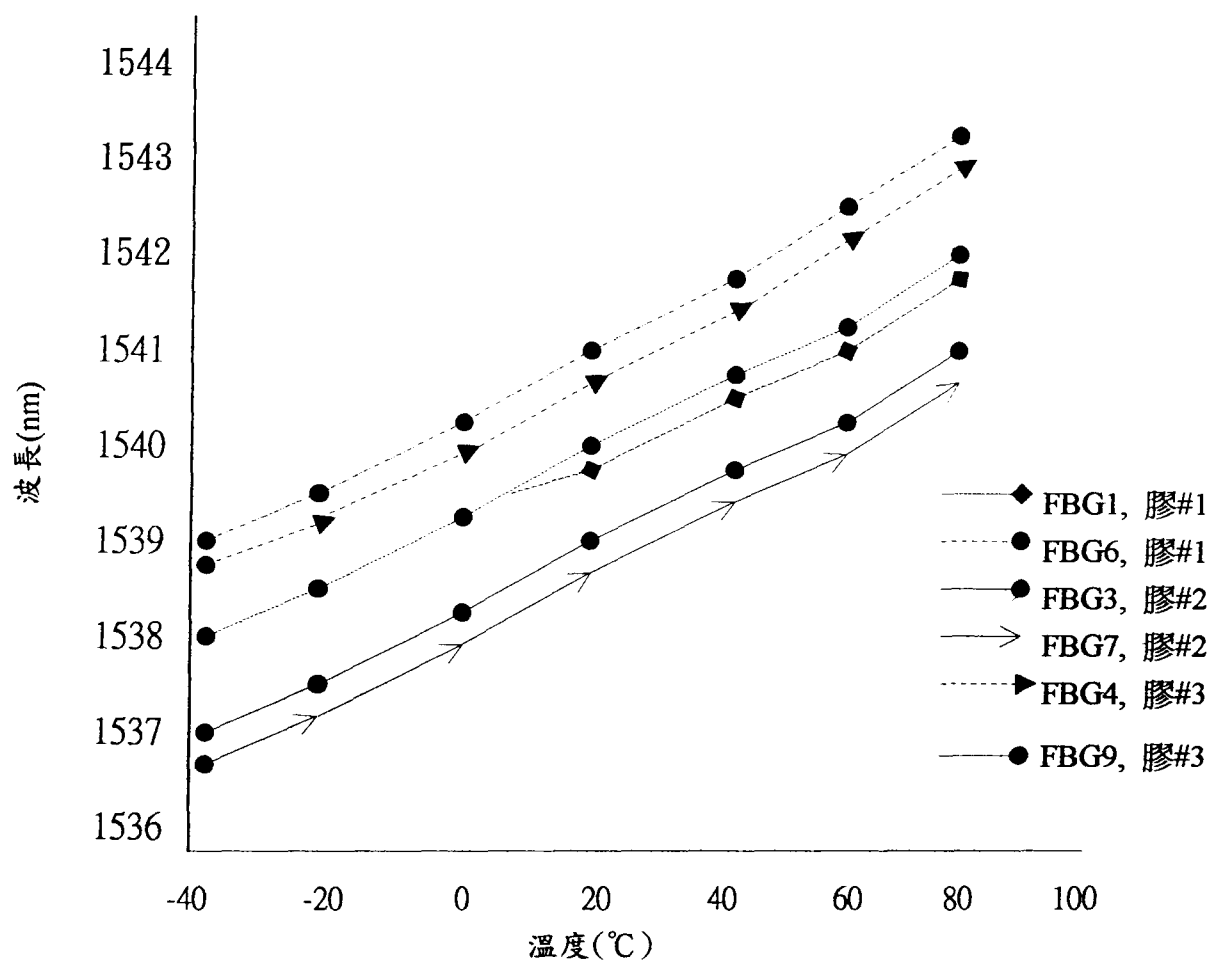


圖 15 FBG 膠固後反射波長與溫度的關係

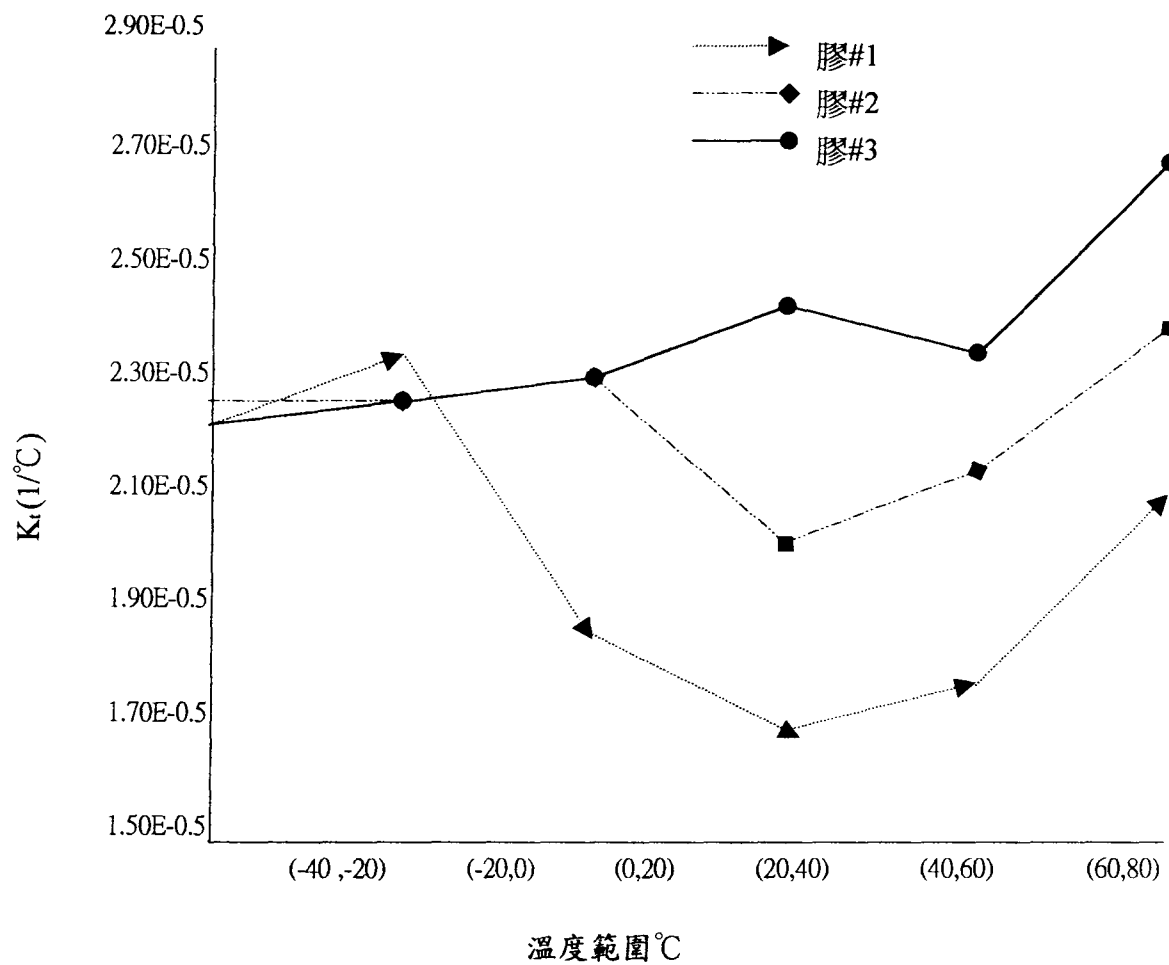


圖 16 FBG 膠固後,  $K_t$  與溫度的關係

膠	$K_t(1^\circ\text{C})$ 溫度範圍						$K_t(1^\circ\text{C})$	
	-40,-20	-20,0	0,20	20,40	40,60	60,80	-40,0 (平均)	0,80 (平均)
膠#1	$2.21 \times 10^{-5}$	$2.35 \times 10^{-5}$	$1.85 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^{-5}$	$2.07 \times 10^{-5}$	$2.28 \times 10^{-5}$	$1.86 \times 10^{-5}$
膠#2	$2.27 \times 10^{-5}$	$2.29 \times 10^{-5}$	$2.33 \times 10^{-5}$	$2.45 \times 10^{-5}$	$2.39 \times 10^{-5}$	$2.78 \times 10^{-5}$	$2.28 \times 10^{-5}$	$2.49 \times 10^{-5}$
膠#3	$2.23 \times 10^{-5}$	$2.27 \times 10^{-5}$	$2.32 \times 10^{-5}$	$2.02 \times 10^{-5}$	$2.12 \times 10^{-5}$	$2.42 \times 10^{-5}$	$2.25 \times 10^{-5}$	$2.22 \times 10^{-5}$

表 3 FBG 膠固後,  $K_t$  與溫度的關係

圖 17 比較 FBG6、FBG7、FBG8 在不同的測試日期其反射波長與溫度的關係,可看出膠#2 和膠#3 的重複性極佳,而膠#1 的特性略差。

如公式(5)所示,理論上溫度敏感係數  $K_t$  與應變敏感係數  $K_\epsilon$  兩者之間應該沒有交互影響,所以用鋁片(a)做了一個實驗來驗證,方式是把鋁片彎曲來施加應力,由應變所引起的波長變化  $\Delta \lambda$ ,分別是 FBG1(膠#1):0.64 nm, FBG3(膠#2):0.99 nm, FBG4(膠#3):0.93 nm。三者間的差異可能是由於它們膠和在鋁片上的位置不同,所以應變不同;也可能是就像溫度實驗一樣,不同的膠造成不同的負載效應,詳細的比較必須做進一步的實驗。由傳統電阻式應變感測器讀出鋁片中心的軸向應變約為  $700 \mu \epsilon$ ,再經由相同的程式得到反射波長與溫度的關係,結果是於圖 18 其中預測曲線是由未受應力時的數據加上應變所引起的波長變化而得。由圖可以看出膠#2 的實驗和預測曲線幾乎完全重合,而膠#1 則較差,因此以這實驗來看, $K_t$  與  $K_\epsilon$  的交互影響應該不大。當然,若要得到精確的結果,則要更多的實驗。

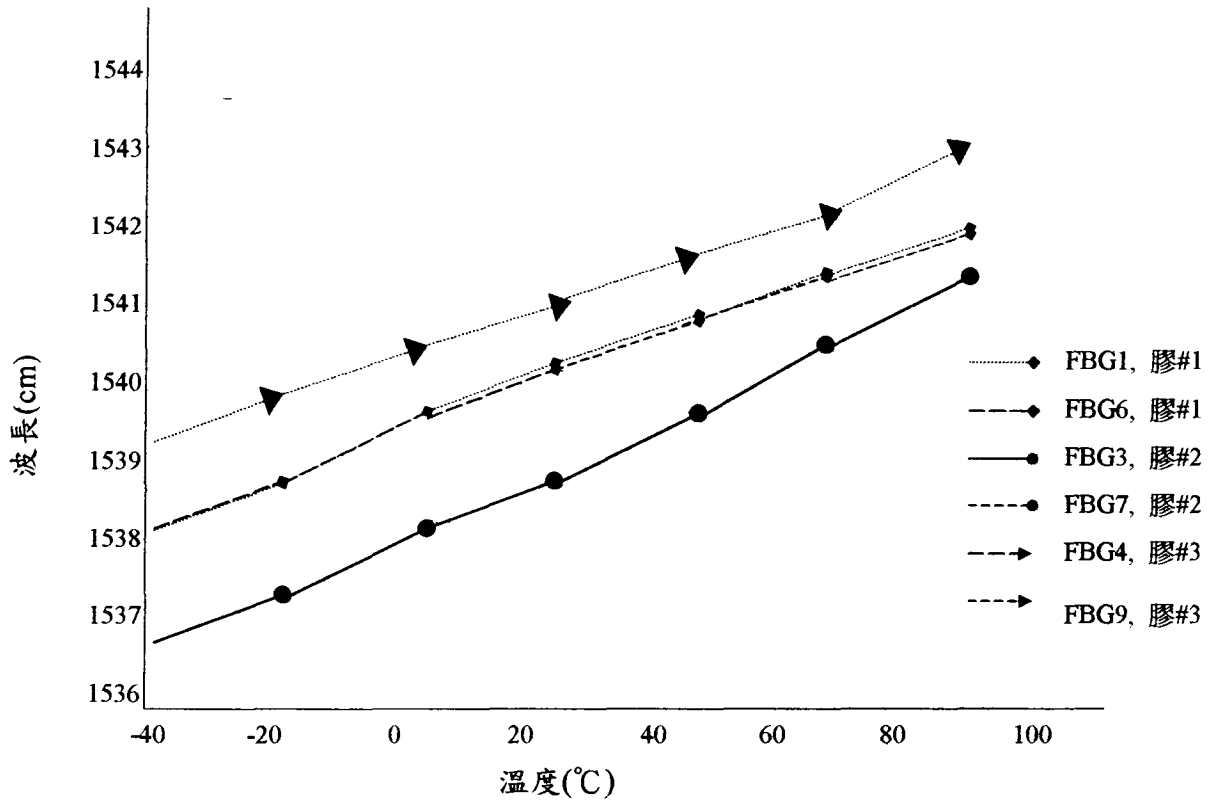


圖 17 FBG 膠固後反射波長與溫度的重覆性

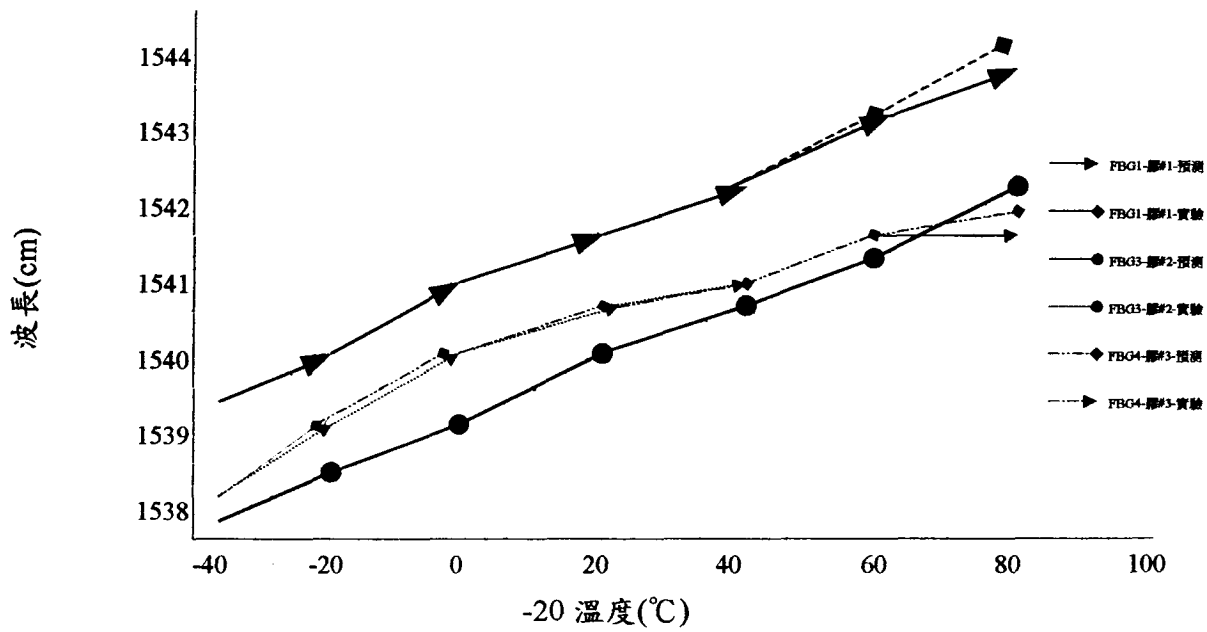


圖 18 FBG 膠固後在機械應變存在時,反射波長與溫度的重覆性



## 伍、結論

本文針對 FBG 應變感測器在不同溫度與使用不同形式膠的情況下之特性及其對性能的影響作了初步探究,作為進一步研發與設計參考。

大體而言,當 FBG 膠固於鋁片上時,整體的熱膨脹係數與鋁片相近,但是並非一個常數,它會隨溫度變化而變化,而膠對其相變化的型式影響甚鉅且隨膠的種類度同而差異甚大。

在實際設計 FBG 感測器時,FBG 被剝除的被覆(coating)應重新裝上(recoating),並且要加上套管後再將套管表面膠合或埋入待測材料。如果 FBG 與套管是緊配,要注意膠固過程會使 FBG 收縮及反射波長變短,所以要選用波長漂移量固定的膠,套管最好選用與待測材料匹配的材質,而且如文中所述,待測材料的機械應變和熱脹冷縮都會改變 FBG 的反射波長,所以不能單由 FBG 的反射波長來測得材料的應變,因此,必須作「成對 FBG 感測器」設計成另外配置溫度感應器。無論如何,膠的選用都非常重要,最號選用能使  $K_t$  與  $K_e$  在使用範圍內為一個固定常數的膠,並且  $K_t$  與  $K_e$  之間沒有交互影響。

另外,雖然溫度效應是由待測材質主導,FBG 的熱光係數 $\zeta$ 也有一些影響。從圖 13 中知道 $\zeta$ 隨著溫度升高而變大,如果要使  $K_1$  保持常數,則必須設計其他不同結構的 FBG,使 $\zeta$ 與溫度無關。

誠如前言所述,歐、美、日等先進國家在 FBG 應變感測系統的研發工作方面進展快速,所提出之應用領域非常廣泛,本文研發區分成感測器主體、硬體電路、波長多工和信號處理等方面,同時進行研發工作,並且已初步整合驗證系統的功能,使之廣泛應用於輸油管線、儲油槽、儲氣槽等需要高度之安全保障之監測作業,但目前仍有許多技術亟需突破。因此,除了繼續努力提高系統的量測範圍和精確度之外,並積極配合相關單位共同努力,爭取實際應用的機會,使之早日實用化,以提升台灣公共工程品質及工業安全。

## 參考文獻

1. R.A.Measures et al..Proc.of the SPIE.2294.53(1994).
2. R.A.Measures et al..Proceedings of the SPIE.1798.155(1992).
3. P.L. Fuhr. Sensors.18(1995).
4. P.L.Fuhr. Smart Materials and Structures 1.63(1992).
5. 朱國棟.工業材料.114 期.86(1996).
6. J.S.Sirkis. Optical Engineering.32.Iss.4.752.
7. A.T.Alavie et al..SPIE.2444.528.San Diego (1995).
8. Akira Inoue et al.. Optoelectronics.10 (1). 119.March (1995).
9. A.D.Kersey and T.A. Berkoff. Optics Letters.18(1).72 (1993)