

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

光纖光柵在輻射環境之應用研究 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-NU-7-002-002-
執行期間：95年01月01日至95年12月31日
執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：馬劍清
共同主持人：單秋成
計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：莊國志、黃寬明
碩士班研究生-兼任助理：陳柏廉、林柏睿

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 96年05月09日

光纖光柵在輻射環境之應用研究

The application of fiber grating sensor under radioactive environment

(計劃編號: NSC-95-NU-7-002-002)

馬劍清, 單秋成, 莊國志, 黃寬明, 陳柏廉
國立臺灣大學機械工程學系

期末報告摘要

核設施運轉安全在核能發電工程中是相當重要的一環,核反應器若老化而造成破壞會造成嚴重的幅射危害,此外,核廢料貯存桶長期使用下的結構完整性也有即時監測的必要性,傳統量測結構應變的應變規傳送的是電氣訊號,易受電磁干擾,在輻射及腐蝕性環境下,應變規也有快速劣化的問題,而光纖光柵感測器則由於光纖之成份主要為二氧化矽,此材料為電絕緣體,且能在輻射,腐蝕及高溫環境下作量測,不會有電磁干擾問題。因此在核反應器或核廢料貯存之特殊環境下光纖感測器是較佳的選擇。

光纖光柵感測器應用在輻射目前之應用有一系列之瓶頸亟待解決,其面對之問題包括:(1) 光纖本身之強度以及光纖光柵特性及固定光纖到結構之黏膠在輻射長期照射下之變異性尚不清楚。(2)解調系統複雜且昂貴,解調系統動態反應及解析度不足,(3)難以分辨溫度及應變之影響。除非突破以上之瓶頸,方能使內埋式光纖感測器在核能相關結構之應用奠定良好的基礎。

本計劃第一年針對光纖光柵之製造及應用建立技術能力,探討輻射照射對光纖本身之強度的影響,並以實驗室之模擬試片探討光纖光柵感測特性,在輻射照射其後以及在長期置放下的漂移及變異。

結果顯示裸光纖在輻射照射下,強度下降,輻射劑量越高,強度下降越多,

另一方面，如光纖先塗上 2% silane 塗層，則光纖的強度比裸光纖高，經過輻照，雖光纖的強度仍為下降，但強度仍較未受塗層保護但受同一輻射劑量的裸光纖為高，經過交叉比對，發現 silane 塗層其實並未提高光纖對抗輻照脆化的能力，其主要的保護是抵抗環境對玻璃光纖所造成的傷害。

至於光纖光柵的訊號，輻照後對於布拉格反射波長會有兩個影響：(1)對於輻照前的原始反射頻譜本來是相當飽和，即波峰平坦，難以界定最高的峰值的光纖光柵，輻照後則反射波峰變得相當尖銳；(2) 輻照後反射頻譜的強度會降低，但經過最高 60 Gy 的輻照，反射頻譜依然清晰可讀，因此，光纖光柵感測器在輻射環境的應用應為可行。

關鍵詞：光纖感測器，布拉格光柵，結構完整性監測，輻射效應。

Abstract

Safety is a critical issue in the nuclear power plant. Unexpected failure due to aging deterioration of nuclear power plant components may lead to serious consequences. On the other hand, in the disposal of nuclear waste, the containers for long term storage may also subject to degradation due to radiation and corrosion. If the integrity of these structures can be monitored reliably, the danger of catastrophic failure will be greatly reduced. Conventional sensors for structural integrity monitoring such as strain gage will undergo rapid degradation in a corrosive and/or radioactive environment. On the other hand, glass optical fiber, being made of silicon dioxide, is more resistant to corrosion and radiation. Fiber grating sensor can be used under high temperature, has a good long term stability and is immune to electromagnetic interferences.

Currently a series of problems still needed to be overcome for optical fiber sensors to

be practical for structural integrity monitoring. Current interrogation systems for optical fiber sensors are delicate, expensive and slow in response. Moreover, the signal from a fiber grating sensor will be affected both by a change in strain and a change in temperature. Differentiating the contribution from temperature and strain is not a straightforward business. Besides these technical issues, the long term effect of radiation on the fiber sensor is still unclear. The current project aims to tackle the latter problem with the intention to make the application of fiber grating sensors for nuclear structure integrity monitoring practical.

In the first year of the project, the ability to fabricate fiber grating sensor and to obtain sensible signal from it has been established. The effect of radiation on fiber strength and sensor responses has been studied. It has been found that the fiber strength falls with increasing amount of radiation. It was also found that fiber painted with a 2% silane solution was always stronger than the untreated fiber under the same amount of irradiation. Cross examination showed that silane did not protect the fiber from radiation damages. Rather, it shielded the fiber against environmental damage so that the treated fiber was always stronger than the untreated.

With respect to the Bragg reflection spectrum of the FBGs, it was found that irradiation (i) sharpened and (ii) reduced the intensity of the reflected spectra. After a irradiation dose of 60 Gy, the intensity of the reflected peak is still comfortably measurable and so it is highly likely that fiber Bragg grating sensors may be used for structural health monitoring in radioactive environments.

Keywords : optical fiber sensor, fiber Bragg grating, structural health monitoring, irradiation effects.

背景

國內三座核電廠使用最久的核一廠已有差不多二十年的歷史，核二，核三，亦已運轉多年，近年將陸續面臨換照時進行各種安全性評估之壓力；除為應付換照之外，與國外電廠相類似，電廠使用日久，構件因各種破壞機制持續進行下，亦無可避免地發生了各種構件劣化、龜裂的問題，嚴重者甚至可能造成輻射危害，此外，核廢料貯存桶長期使用下的結構完整性也有即時監測的必要性，傳統量測結構應變的應變規傳送的是電氣訊號，易受電磁干擾，在輻射及腐蝕性環境下，應變規也有快速劣化的問題，而光纖光柵感測器則由於光纖之成份主要為二氧化矽，此材料為電絕緣體，且能在輻射，腐蝕及高溫環境下作量測，不會有電磁干擾問題。因此在核反應器或核廢料貯存之特殊環境下光纖感測器是較佳的選擇。本研究的主旨在於建立並驗證光纖光柵感測器在核電廠及核廢料貯存環境下應用之可行性，並進一步開發適當的訊號擷取/解析系統，以及利用光纖光柵進行結構完整性之監測技術。最後，並希望配合核研所選擇適當構件進行實際監測之應用。計劃第一年針對光纖光柵之製造及應用建立技術能力，探討輻射照射對光纖本身之強度的影響，並以實驗室之模擬試片探討光纖光柵感測特性，在輻射照射其後以及在長期置放下的漂移及變異。

光纖感測器的發展

光纖感測器利用光纖做光訊號的傳輸介質，其基本原理乃光源所產生的光波經由光纖導引至待測區，待測區中應力/應變、溫度、折射率的變化將造成光波特性的變化，分析光波特性的改變即可推得待測區中物理量之變化。一般而言，光纖感測器可分為「本質型」(intrinsic)和「非本質型」(extrinsic)兩種。所謂「本質型」感測是指光波未離開光纖，而由外在環境的改變造成光纖內部特性的改變，從而影響光波的特性；而「非本質型」感測之光波被導引至待測區後，離開光纖而被外在環境調制後再耦合進光纖中。光波特性變化常用的調

變方式可分為：光強度調變、光相位調變、光波長(頻率)調變及光偏極化調變等方式，這些調變方式可單獨或交互應用。

光纖感測器較成熟的應用自 1990 年代開始，早期的光纖感測器，以光通過感測區後的相位或強度的改變[1-3]，來感測受測環境參數改變量，這種方式簡單而方便，但缺點是光的強度很容易因連接點而損失，必須以參考光源校正。另外，也有將一束光分離經過兩條長度相近的光纖，而後再將兩束光結合，其中一條為參考光纖，另一條光纖經過待測物後會改變光的速度或路徑，造成兩光束的光程差而產生干涉，利用此一原理來感測受測物區的物理量，可精密地測量微小的變形。但這種方法的缺點是，由於整條光纖都相當於是感測器，因此，可能會有許多非感測區所產生的訊號，造成量測的誤差，而且無法做到特定局部區域的量測。上述問題，隨著光纖布拉格光柵(Fiber Bragg Gratings, FBG)的研發與應用而得到顯著的改善。

光纖布拉格光柵(FBG)之發展始於 1978 年，K. O. Hill 在利用氬離子雷射光耦合入光纖時，因量測駐波造成之相位光柵所發現。而直到 1989 年，Meltz 利用兩道同調紫外光($\lambda \sim 240\text{nm}$)，在光感含鍺光纖上以干涉方式側寫(side-writing)製成 FBG，使 FBG 進入實際應用階段。今天 FBG 的製作，乃是利用紫外光雷射經過相位光罩(Phase Mask)後產生干涉，投射到光纖上，使光纖核心(Core)折射率產生週期性的變化，而形成光柵結構，量來控制。當寬頻光源進入光纖，經過光柵結構時，滿足布拉格條件之特定布拉格波長(Bragg Wavelength)的光會反射，其餘波長的光則穿過光柵，相關之示意圖見圖 1。

布拉格波長(λ_b)與光柵柵距 Grating Pitch (Λ)及平均折射率 Average Refractive Index (n_e)之關係為：

$$\lambda_b = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

n_e 之大小在 1 至 2 之間，故 Λ 之量級與光波長相同，在微米之範圍。上式

中 n_e 受溫度影響而改變，而 Λ 在受到機械應變或因冷縮熱脹產生熱應變時也將發生改變， λ_b 即隨生 n_e 及 Λ 之變化而產生漂移(Shift)。而此漂移 $\Delta\lambda_b$ 為光柵所感應到的應變(ε) [4]及溫度(T) [5-7]的函數：

$$\Delta\lambda_b = F(\varepsilon, T) \quad (2)$$

一般光纖上之 FBG 受到 $1\mu\varepsilon$ 的應變約會造成 1pm 的波長漂移，而溫度改變 1°C 則約會造成 10pm 的波長漂移。

由於布拉格光柵(FBG) 開發成功，以及雷射光源和諸多光電被動元件的相繼發展，使光纖光柵感測器在結構量測之應用開始受到注意[8]。國外有嘗試應用至航太結構[1]，土木結構如橋樑及建築結構體[9-12]，核電廠管路[1,13]，海上鑽油台[14]，船桅[15]，軌道工程[16]，腐蝕感測[17]等。與傳統感測器如應變計、壓電材料相較，光纖感應器有以下幾項優點：(一) 較不受電磁雜訊及磁場干擾，適於嚴格的環境要求，如核電廠[18,19]。(二) 徑細質輕，且與高分子材料之相容性很好，不會造成脫層，適宜埋入高分子基複合材料中[1, 20]，以進行材料內部結構完整性及溫度等之監測與分析，這是應變計或壓電感測器所無法做到的。(三) 抗腐蝕，適於深海工程及化學腐蝕環境。(四) 耐高溫，一般電子應變計無法在高溫中進行。(五) 疲勞壽命長，長期穩定性佳，適於對長期監測材料。(六) 因光纖可用作長距離通訊，因此光纖感測器相關技術極有機會發展出長距離、多點量測的，目前也已有此方面之研究在開展[18,19,21,22]。

對於光纖感測器使用在有核能輻射的環境的探討，目前已有一些文獻的紀錄[23-27]，其結果主要說明輻照會使光纖導光能力衰減，所以靠光能量調變的非本質型光纖感測器並不適合使用在有核能輻射的環境，至於本質型的光纖感測器，探討得較為廣泛的為布拉格光纖光柵，在非常高的輻照劑量(如 kGy 以至數十 MGy 的 γ 射線)，則光纖光柵的布拉格反射波長有漂移的現象，漂移量與方向，與光纖材料與光柵製備的方法有關，不過，有關輻照對光纖光柵的影響，目前的探討，僅止於波長的漂移或作為溫度感測器的可能性，對於作為應

變感測器，因其結構上與使用上均較溫度感測複雜一些，除了感測器本身外，尚需考慮固定的方式是否會受輻射及環境的影響，又如內埋於結構內部的光纖光柵感測器，感測到內部破壞時除了波長漂移外，尚可牽涉頻譜形狀的變化，對於這幾方面的問題，目前文獻仍未有觸及。

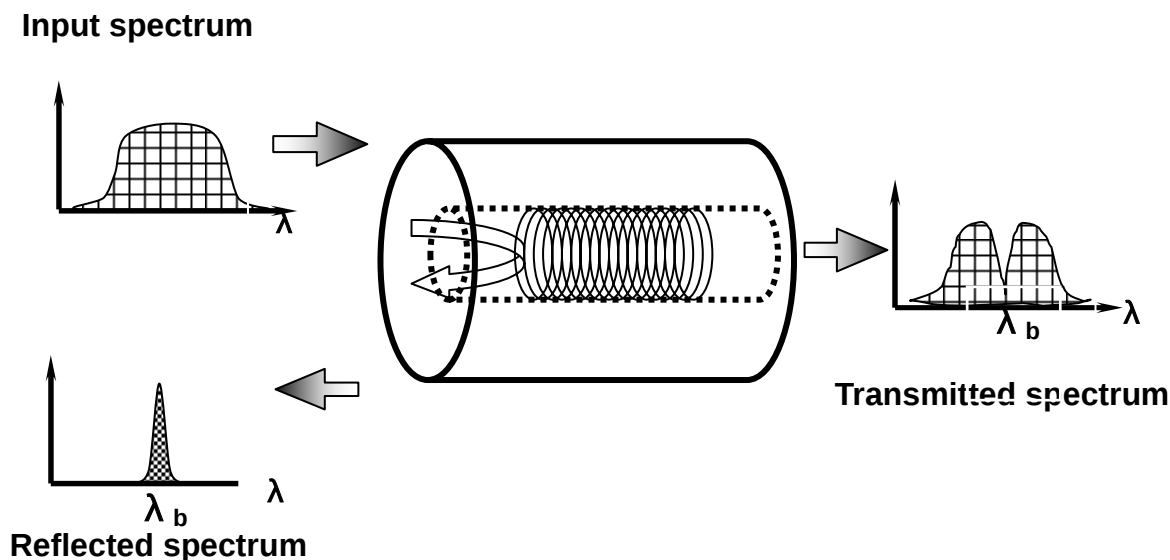


圖 1：寬頻光源經過光纖布拉格光柵之反射及穿透頻譜示意圖。

實驗步驟

一、輻照對光纖強度的影響

1. 試片材料及試片備製

- (1) 光纖：Dispersion Shift Fiber(DSF)，含纖衣層之直徑為 $209\ \mu\text{m}$ ，裸光纖直徑為 $119\ \mu\text{m}$ 。
- (2) 光纖試片：參考 ASTM D3379-75 將裸光纖製成如圖 2 之試片兩大組別，一組沒有表面保護處理，分別別置放在 $\text{RH}=65\%$ 的實驗室及 $\text{RH}=30\%$ 的乾燥箱中。另外一組光纖施以有機矽烷 Silane(2%)塗層，烘乾後置於 $\text{RH}=65\%$ 的實驗室。試片置放時間均為一天。本實驗所使用之 Silane 為

3Glycild-oxy-propyl-tri-methoxy-silane，能與 Epoxy 產生良好的鍵結。

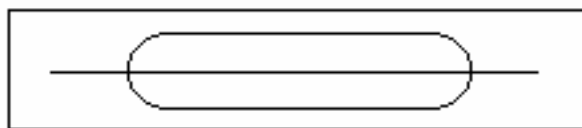


圖 2: 光纖拉伸試片示意圖。

(3)輻照實驗

上述沒有表面保護處理以及有經矽烷塗層處理之光纖，再各細分為四小組，分別施予 0mGy，1000mGy，10Gy 及 30Gy 的輻射照射，每一小組含 20 根試片，各組光纖於儲放及運輸過程中，均放在乾燥箱的環境中。

(4)光纖拉伸強度實驗

參考 ASTM D3379-75 以 500N load cell 的 Instron 材料試驗機，對光纖試片進行靜態拉伸測試，拉伸速率為：3mm/min.，測試情形見圖 3。



圖 3: 以 Instron 材料試驗機測試光纖試片的拉伸強度。

二、輻照對布拉格光纖光柵反射頻譜的影響

1. 試片材料及試片備製

將已製備布拉格光纖光柵之光纖每 3 根一組貼附在彈簧鋼片上如圖 4。彈簧鋼片底面正中央(即相對與光纖光柵感測器位置)並黏貼上應變計，以為日後量測光柵反射頻譜時校正彈簧鋼片變形用。



圖 4： 貼附在彈簧鋼片上的光纖光柵感測器。

2. 光纖頻譜校正

彈簧鋼片固定成一懸臂樑，並逐步施加重量漸增的砝碼如圖 5，過程中利用光學頻譜分析儀紀錄每根光纖光柵的反射頻譜(圖 6)，同時相應的彈簧鋼片應變一併紀錄。另光纖光柵在還沒有黏貼到彈簧鋼片前，也先平置於桌面，紀錄其原始的反射頻譜。



圖 5： 利用彈簧鋼片懸臂樑變形施予光纖光柵不同之變形量。



圖 6 利用光學頻譜分析儀紀錄每根光纖光柵的反射頻譜。

3. 輻照實驗

黏貼光纖光柵的彈簧鋼片分為四小組，分別施予 3mGy，30mGy，300mGy，3000mGy 的輻射照射，輻照後再量測其布拉格反射頻譜，然後再進行第二次照射，施加 7.5Gy，15Gy，30Gy 及 60Gy 的劑量，最後再重複上一步驟量測其布拉格反射頻譜。

結果與討論

一、輻照對光纖強度的影響

不管是否有經 2%Silane 塗層處理，受輻射照射後光纖的平均強度均有顯著的下降(見表一及表二)，輻射劑量在 10Gy 以下，輻射劑量越高，強度下降越多，但輻射劑量繼續增加，強度卻有回升的趨勢，經 30Gy 照射後，光纖的強度反而比經 10Gy 照射者為高，此一狀況的機轉尚未明瞭，因為照射時並沒有控制光纖所處環境的溫濕度，此一強度趨勢的反向，究竟是純粹輻射的影響還是因環境因素所致，還須進一步的實驗才能決定。表三比較在同一輻射劑量下，經塗層保護與未經處理的光纖強度的比較，前者強度均較後者為高，以未經處理的光纖強度的基準，此差異在 8-13%，然而假如我們比較受相同輻射劑量照射後，經塗層保護或未經處理的光纖，可發現其強度降幅十分類似，由此可以推論 Silane 塗層處理對強度的提升，應該不是針對輻射有所保護，可能祇是相傳統玻璃纖維使用 Silane 塗層的效果：保護玻璃表面免受環境濕度的侵蝕。

表一： 輻射劑量對未經塗層處理之光纖拉伸強度的影響。

輻射劑量	1000mGy	10Gy	30Gy	0mGy
平均強度(MPa)	305	285.3	291.9	351.5
與未受輻照的強度相比%	86.8	81.2	82.8	100

表二： 輻射劑量對經 2%Silane 塗層處理之光纖拉伸強度的影響。

輻射劑量	1000mGy	10Gy	30Gy	0mGy
平均強度(MPa)	330.5	317.3	327.7	397.8
與未受輻照的強度相比%	83.1	79.8	82.4	100

表三： 輻射劑量對經 2%Silane 塗層處理之光纖拉伸強度的影響。

輻射劑量	未受輻照		1000mGy		10Gy		30Gy	
試片組別	無塗層	2%Silane	無塗層	2%Silane	無塗層	2%Silane	無塗層	2%Silane
平均強度 (MPa)	351.5	397.8	305	330.5	285.3	317.3	291.9	327.7
強度 % 增加		13		8.3		11.2		12.3

雖然目前結果對於輻射照射對光纖強度改變的機制仍無法提供適當的解釋，但其對實務應用光纖到輻射環境下進行結構完整性監測，卻明白指出了在感測器製作與應用的過程中，必須對裸光纖的表面進行適當的保護，以提高光纖感測器的可靠度與耐用性。

二、輻照對布拉格光纖光柵反射頻譜的影響

圖 7a 及 b 顯示從 3mGy 到 60 Gy 不等的輻射劑量，對布拉格光纖光柵反射頻譜的影響，其中比較顯著的變化為反射能量隨輻照劑量的增加而減少，以編號 A7 的光纖為例，輻照前反射波的波峰強度比背景高 15 dB 左右，受了 3mGy 輻射後，波峰強度降為 12.5 dB，再經 7.5Gy 後，則波峰強度只剩下 5 dB 左右。

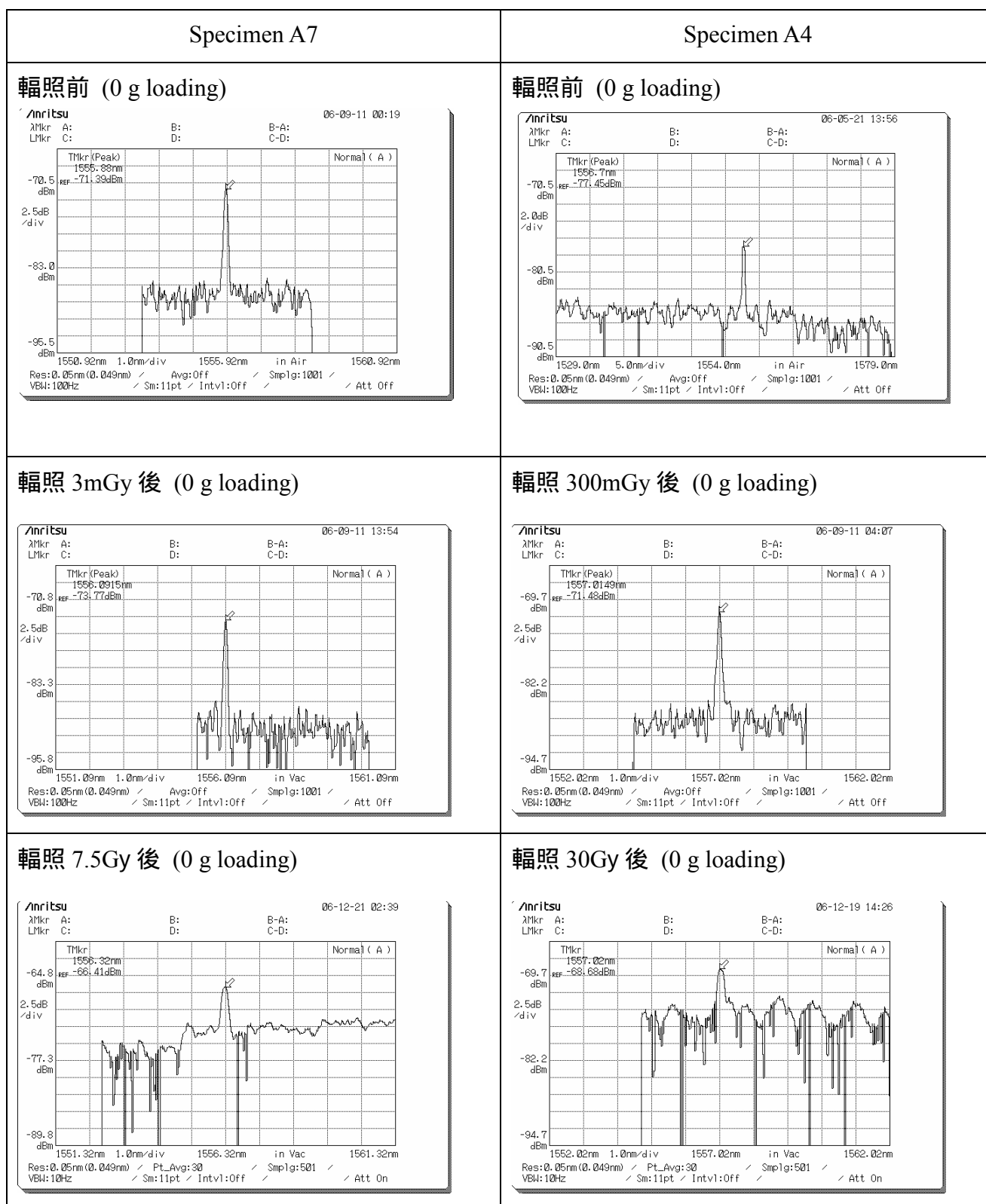


圖 7a: 不同輻射劑量對布拉格反射頻譜的影響。

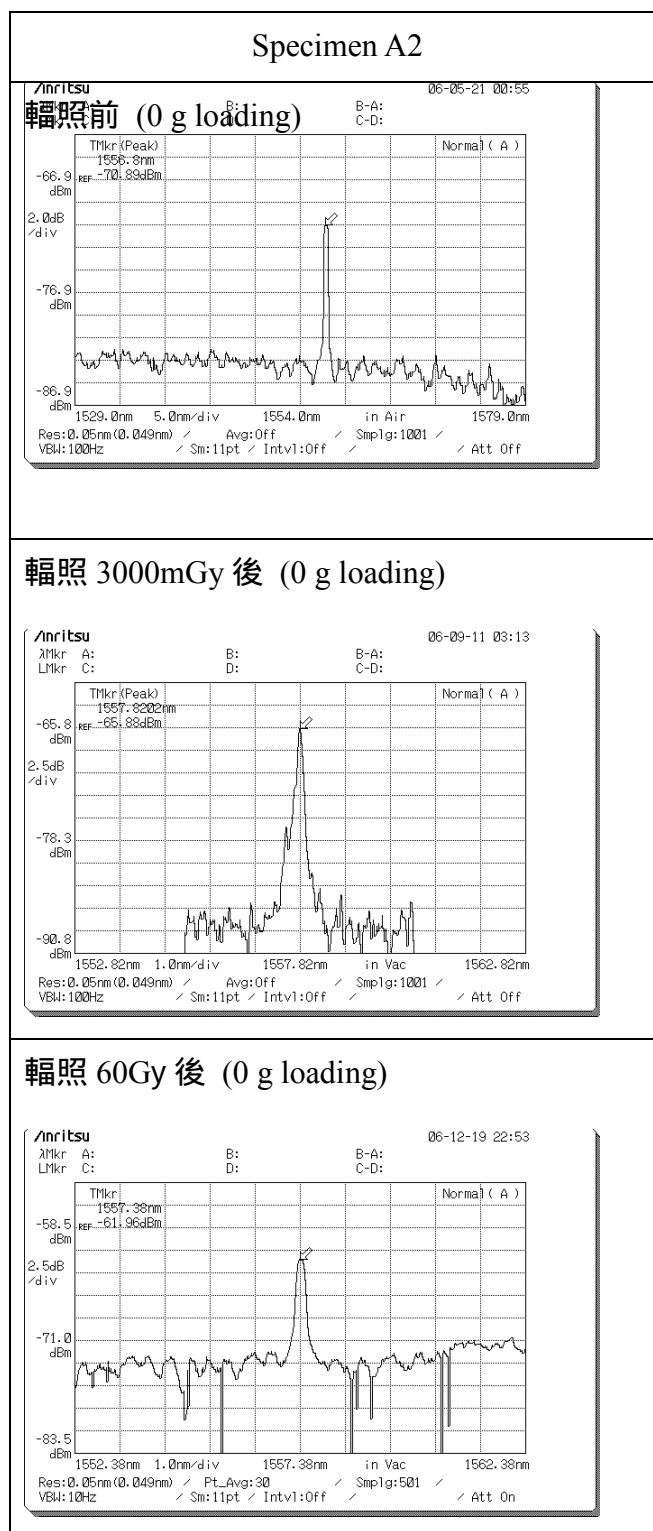


圖 7b: 不同輻射劑量對布拉格反射頻譜的影響。

以光纖光柵作為感測器，其中一個常用的量測參數為反射波峰的波長，圖 8 為此波長與變形量的關係，圖中的橫軸是砝碼重量，因光纖是貼附在彈簧鋼片上，彈簧鋼片固定成一懸臂樑，並施加不同重量的砝碼以產生不同的變形量如實驗方法所述，故砝碼重量相應於光纖感測器所感受的變形量。

布拉格反射波長與光纖光柵的變形量基本呈線性關係，圖中各線偶有偏離直線的情形，主要原因推測有二：(一)光纖感測器採兩端浮貼在彈簧鋼片的方式，此黏貼涵蓋數 mm 範圍，黏膠的變形不完全線性，在高應變下可能有局部脫落的情形，使彈簧鋼片的變形不能全部傳送到光纖去；(二) 光頻譜分析儀在擷取反射波長時不是波峰的中間值為峰值，而是以能量最高的波長為擷取對象，對於反射波峰較為飽和的頻譜，可能會擷取到波峰中間值兩旁為波長值，而每次變形後能量分佈稍有差異，即又擷取到另一位置上，使圖 8 的曲線偏離純粹直線。

比較經不同輻照劑量後的波長-變形量關係，可以看到相關線段的斜率基本沒有隨輻照劑量改變，但未變形前反射波長已略有產生漂移，其中漂移量較大的是在沒有輻照與第一次輻照之間，文獻上雖有提到高量的輻射會使光纖光柵波長漂移，但文獻提及的輻射劑量動輒數百 kGy 甚至數十 MGy，而所引起的波長漂移量僅在數十至數百 pm，目前的結果波長漂移量在 0.5nm 的量級，比較多根光纖光柵的結果，發現漂移量與第一次輻射劑量並沒有關係，此等漂移，推測是與黏膠與環境間複雜的相互作用所引起，例如黏膠吸收水汽導致膨脹或局部脫落。

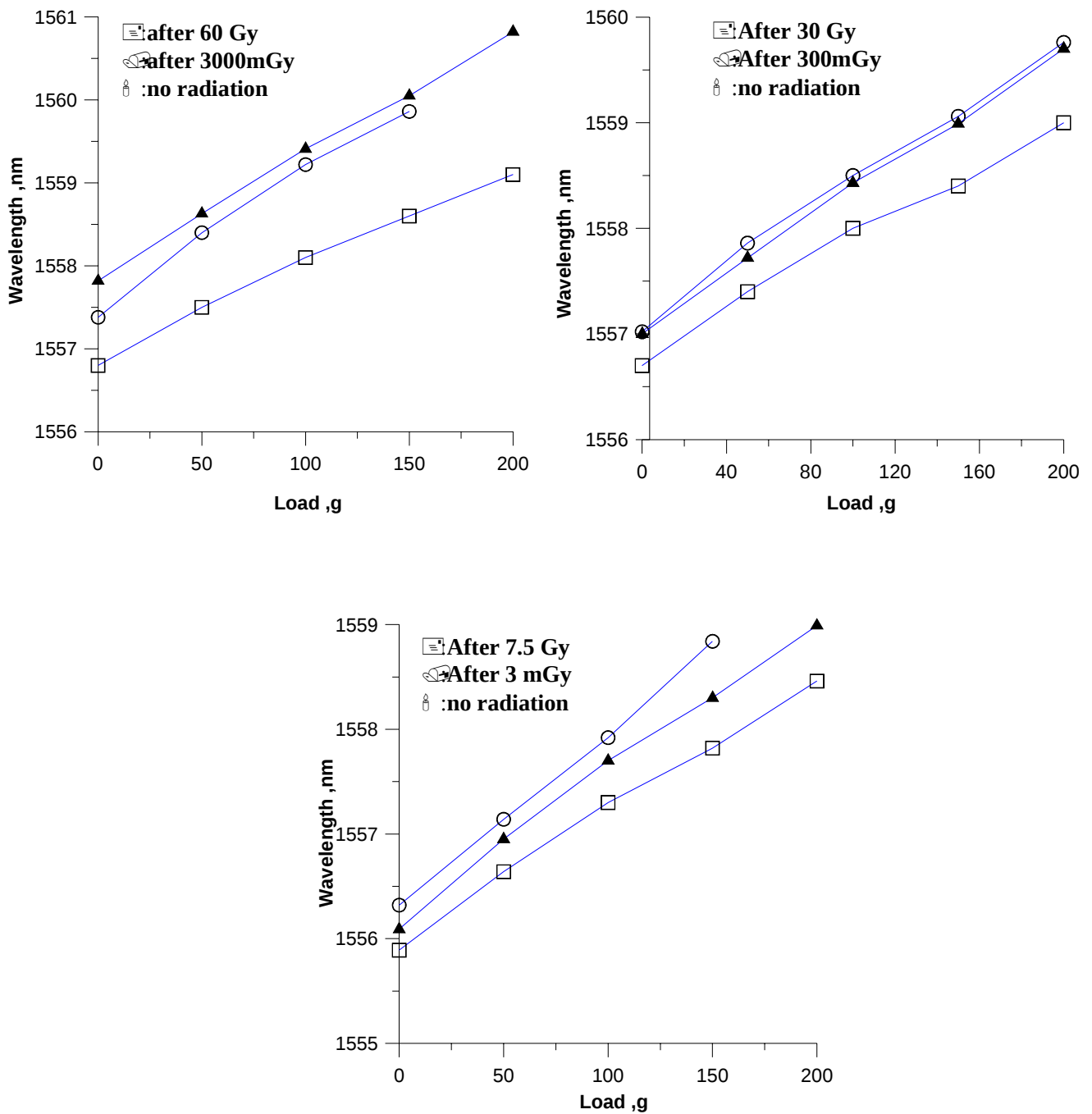


圖 8: 不同輻射劑量對布拉格反射波長的影響。

歸納上述觀察，可見光纖光柵感測器在輻射劑量 60Gy 以內，仍可保有感測的能力，但有關固定黏貼的方法與黏膠材料，黏膠與環境以及輻射的相互作用，

仍有待進一步探討，在實務使用上，如何透過封裝或選擇適當黏膠材料及黏貼方法來排除漂移，或設計上預留可供線上校正的機制，都是需要考量的。

結論

- (一) 輻射照射會降低光纖強度，但適當的隔絕外界環境，例如對光纖表面以有機矽烷塗層進行適當的保護，雖不能使光纖強度免受輻射傷害而衰減，但因可以提高光纖本身的強度，等於可間接抵銷部份輻射傷害所造成的衰減，有效提高感測器的可靠度與耐用性。
- (二) 60Gy 以下的輻射照射劑量對於布拉格光纖光柵波長與變形量的關係沒有明顯，至於更高的劑量，則仍有待探討。
- (三) 有關固定黏貼的方法與黏膠材料，黏膠與環境以及輻射的相互作用，仍有待進一步探討，在實務使用上，可以透過封裝或選擇適當黏膠材料及黏貼方法，或設計上預留可供線上校正的機制，來排除感測器長期漂移的問題。

穩態實驗量測與結果探討

本節為應用光纖光柵量測系統量測固定頻率的穩態振動，由於壓電材料為一優良的致動器，給予週期性定值的電壓，便會有規律的穩態振動，故先量測壓電材料的動態特性，並與 LDV 的量測結果作比較。

本計畫所使用的壓電材料，為積層式壓電塊（見圖 9），主要是由多層的壓電片堆積而成，每層中間並有電極夾層，外面再用隔絕層保護，並用導線連接電極，我們應用電源供應器提供電壓驅動積層式壓電塊。這樣堆疊壓電材料的方式，可讓壓電材料的產生較大的振動量。圖 10 為實際的穩態實驗架設示意圖，可見光纖光柵感測器以 AB 膠的黏著，垂直的固定在積層式壓電塊的頂端，需注意的是，由於要讓 LDV 作同步的量測，但是積層式壓電塊頂端空間並不大，所以要妥善

設定光纖光柵的黏著位置，應避免 LDV 的量測光點被 AB 膠凝固塊阻擋，造成 LDV 量測失效。

接著介紹波長調整機制，見圖 11。左上角為 TFBG / FBG 光纖光柵，其反射波長稱之 λ_1 ，右上角則為光纖光柵感測器，其反射波長稱之 λ_2 。如圖所示，TFBG / FBG 為濾波元件，光纖的兩端被黏持在一可水平拉伸平台上，當旋轉水平拉伸平台旁邊的旋鈕時，TFBG / FBG 便會受拉伸或壓縮，而反射波長便會飄移，同理，感測光纖也架設在垂直位移平台上，光纖的一端被牢牢黏著在待測物上，另一端則被固定在平台上，當轉動垂直位移平台的旋鈕時，感測光纖的波長也會飄移，換言之，兩邊的光纖光柵之反射波長都是可調式的，根據這樣的調整機制，便能夠調整兩邊的反射波長，達到一個量測的最佳範圍，感測光纖的反射波長若超出濾波器的範圍（ $\lambda_2 > \lambda_1$ ），便會造成量測結果波形失真，若感測光纖的反射波長過於偏左（ $\lambda_2 \ll \lambda_1$ ），也會造成能量過低，SNR 值會變差，甚至量不到訊號。在剛開始量測時，會先預拉光纖感測器，使其呈現繃緊狀態，如此量得的波形才不失真。本計畫使用兩種光纖光柵濾波器（TFBG / FBG）來作實際的量測，並搭配 LDV，來比較兩者的實驗結果。因為 TFBG 與 FBG 用來當作前置調整更改，而驅動 PZT 的電壓也要有所變動，譬如說，對於 FBG 濾波器而言，驅動電壓便不能太高，否則 PZT 振幅會超出其動態範圍，而導致量測失真。

圖 12、13、14、15 為 PZT 驅動頻率分別為 50Hz、1kHz、10kHz、20kHz、30kHz 時，LDV 與 FBG 感測器量得的 PZT 振動波形。左邊的縱軸為位移量，單位是（nm）。光纖感測器所量得的訊號單位為伏特（V），而 LDV 的訊號單位為對於（nm），兩者之間的峰對峰值有一常數可供轉換，將光纖光柵感測器之訊號乘上此常數後，便可作定量，而繪成圖 12、13、14 與 15。TFBG 與 FBG 濾波器而言，PZT 驅動的頻率都相同，唯一不同點在驅動電壓。就圖 12 而言，給予 TFBG 濾波器的位移量為 4940.38 nm，相對應於 LDV 的結果可看出在 FBG sensor 量測下的波形略有失真，給予 FBG 的位移量則是 1860.2 nm，波形與 LDV 相比便相似許多。圖 13 為 1kHz 的 PZT 驅動頻率，給予 TFBG 濾波器的位移為 1094.85 nm，而

FBG 則是 789.71 nm ，兩者與 LDV 的量測結果也很相近。圖 14 為 10kHz 的 PZT 驅動頻率，TFBG 濾波器的量測位移為 902.26 nm ，FBG 濾波器的量測位移為 560.24 nm 與 LDV 量測結果相較起來，也很類似。圖 15 為 20kHz 的 PZT 驅動頻率，TFBG 濾波器的量測位移為 552.27 nm ，FBG 濾波器的量測位移為 161.95 nm ，相較於 LDV 的結果，FBG sensor 量到的波形略有相位延遲的現象。圖 16 為 30kHz 的 PZT 驅動頻率，TFBG 濾波器的量測位移為 627 nm ，FBG 濾波器的量測位移為 396.86 nm ，與 LDV 相比，雖然波形依然相似，但相位延遲更嚴重。從這幾個量測實驗結果可以歸納出幾個結論：

- (一) TFBG 與 FBG 濾波器都有其最佳的動態量測範圍，如圖 12，TFBG 量測位移為 4940.38 nm ，很明顯的已超過其動態範圍，造成波形失真。
- (二) 當量測越高頻的振動時，就會產生波形延遲的現象，LDV 所量得的訊號相位領先於 FBG sensor，這是因為 LDV 為非接觸式的量測，而光纖光柵為接觸式，當量測高頻訊號時，波動傳遞至光纖光柵段所需的時間便顯示出來，換言之，光纖光柵本身的波傳機械特性會使得 FBG sensor 跟不上高頻的訊號，不過相位延遲的現象可藉由縮短光纖光柵段到待測物表面的距離，在垂直位移台上屢空的裸光纖如果越短，則能改善之。
- (三) 就實驗結果來看，TFBG 濾波器在大振動(見圖 12)時， V_{mean} 為 1.1248 V ， V_{pkpk} 為 1.781 V ，在較小的振動(見圖 15)，其 V_{mean} 為 1.3375 V ， V_{pkpk} 為 768 mV ，在使用上，當量測較大振動時，會將 V_{mean} 稍稍調低(將濾波器與感測光纖兩者的峰值距離增加)，如此便能提高動態範圍，當量測較小振動時，則將 V_{mean} 調高(將濾波器與感測光纖兩者的峰值距離縮小)，以提升 SNR 值。
- (四) 就數據而言(見上述第 3 點)，FBG 的 V_{mean} 值高於 TFBG，但是動態範圍則小於 TFBG，就小振動而言，TFBG 量得的峰對峰值偏低，可能已經到雜訊的範圍，但是 FBG 依然能夠與雜訊獨立。在經歷眾多的實驗量測後，

我們可歸納出兩者的使用範圍，TFBG 適於量測 4000nm ~ 500nm 左右的振動量，在這樣的範圍當中，波形不會失真，且 SNR 值也能維持的很好，而 FBG 則適用在 2000nm ~ 200nm 左右的振動量，換言之，TFBG 大約適用在較大的振幅，而 FBG 可應用在較小振幅上。

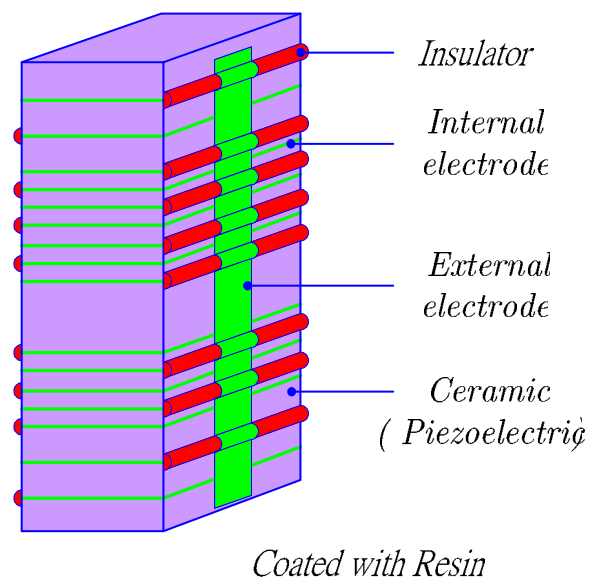


圖 9 積層式壓電片示意圖

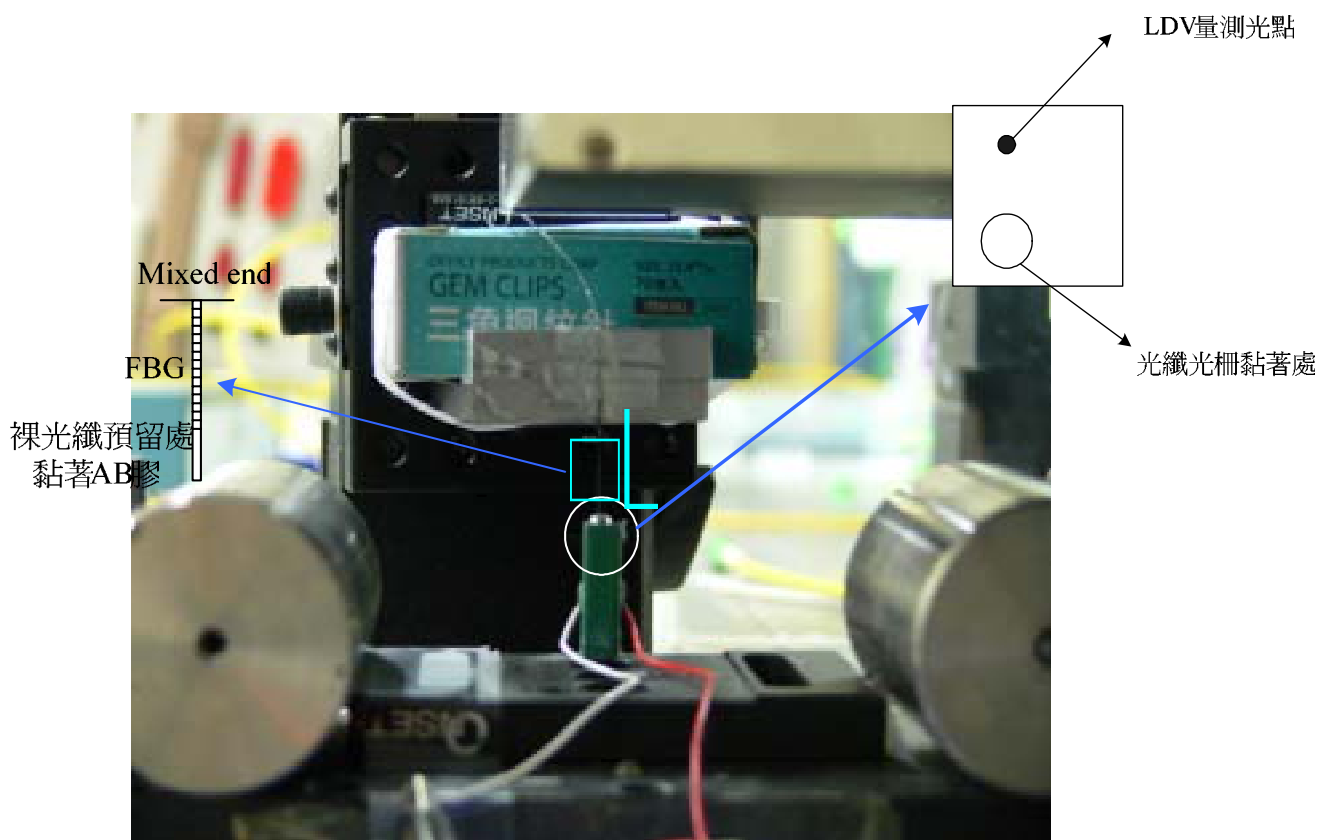


圖10 穩態實驗架設示意圖

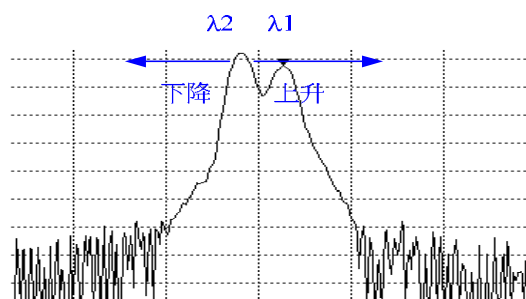
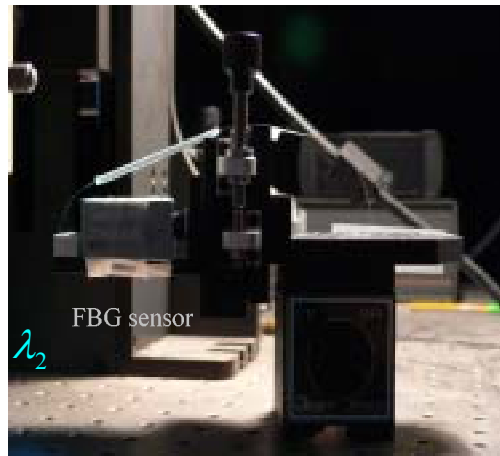


圖 11 波長調整機制

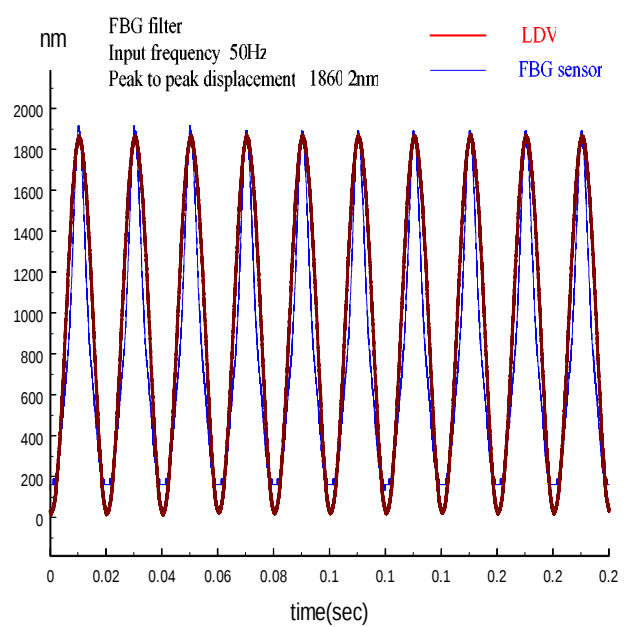
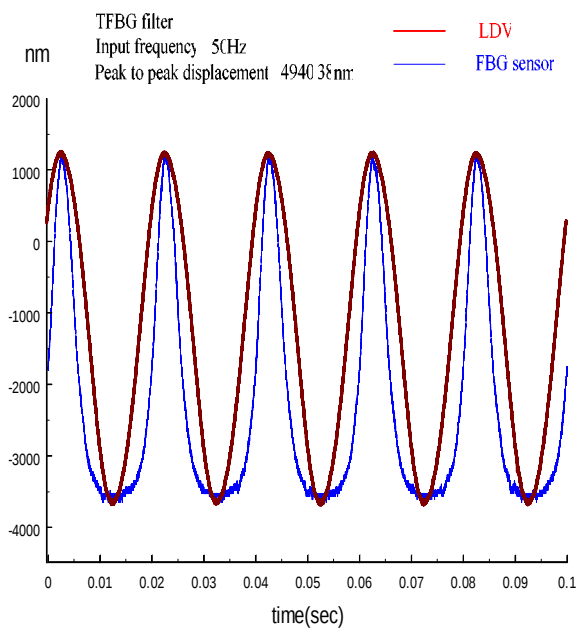


圖 12 以 TFBG 與 FBG 為濾波元件量測 PZT 穩態振動於 50Hz 下之結果

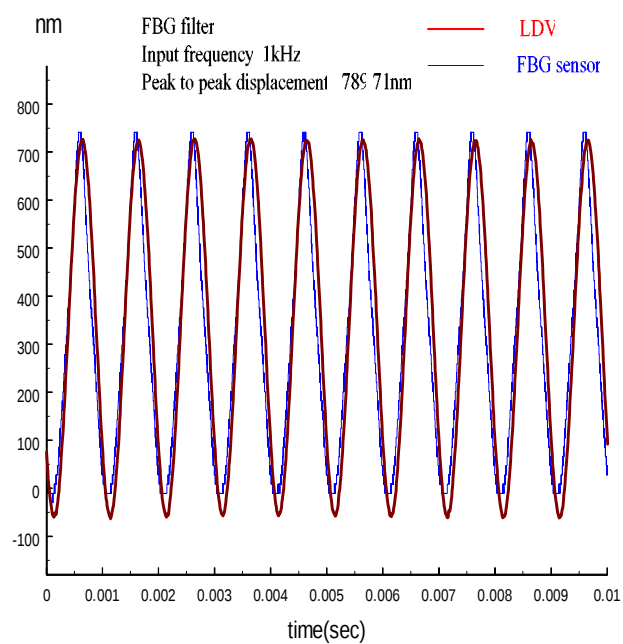
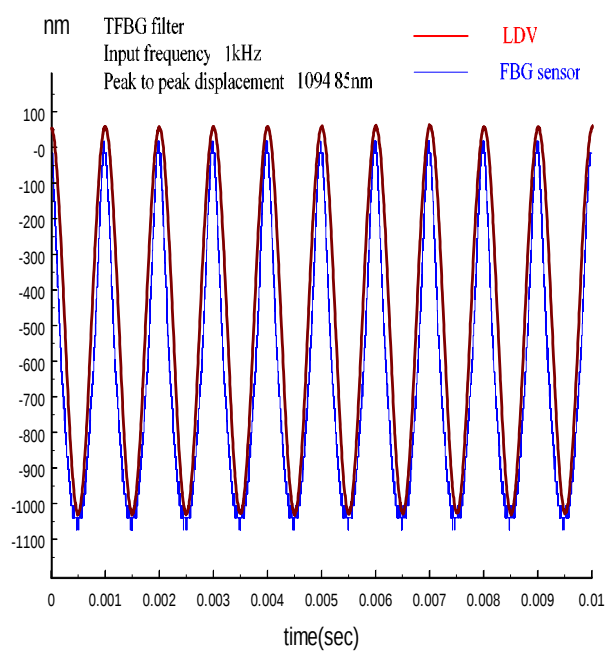


圖 13 以 TFBG 與 FBG 為濾波元件量測 PZT 穩態振動於 1kHz 下之結果

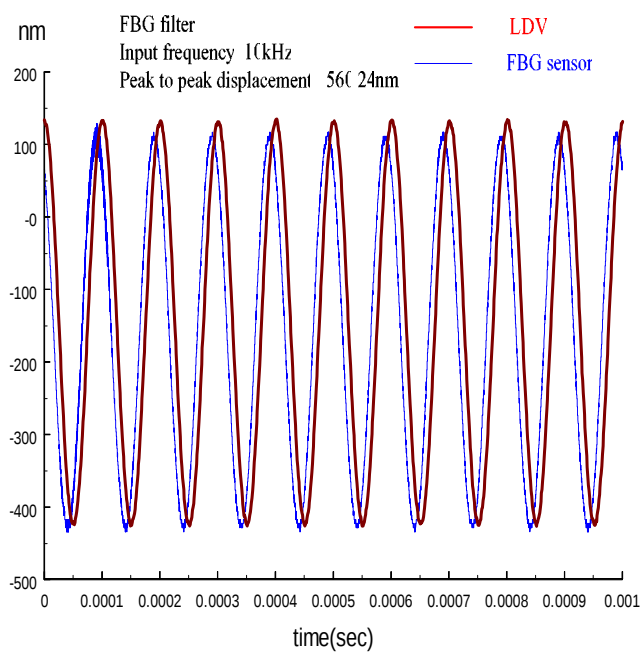
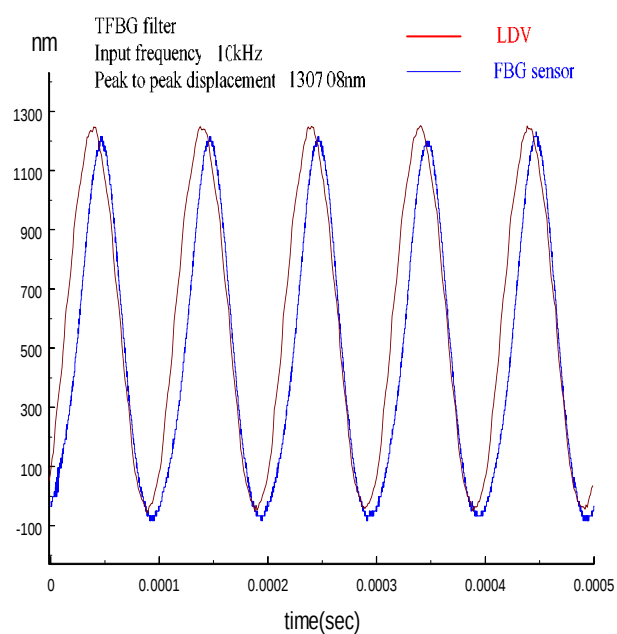


圖 14 以 TFBG 與 FBG 為濾波元件量測 PZT 穩態振動於 10kHz 下之結果

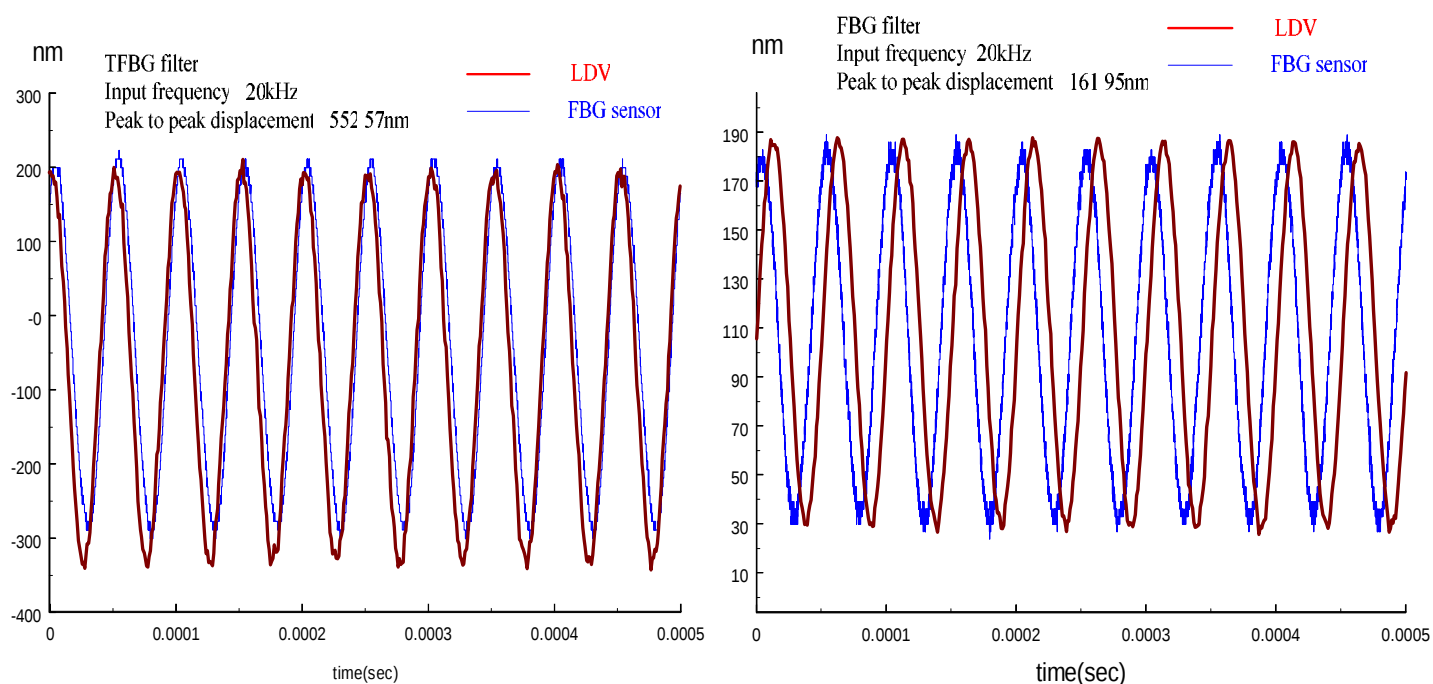


圖 15 以 TFBG 與 FBG 為濾波元件量測 PZT 穩態振動於 20kHz 下之結果

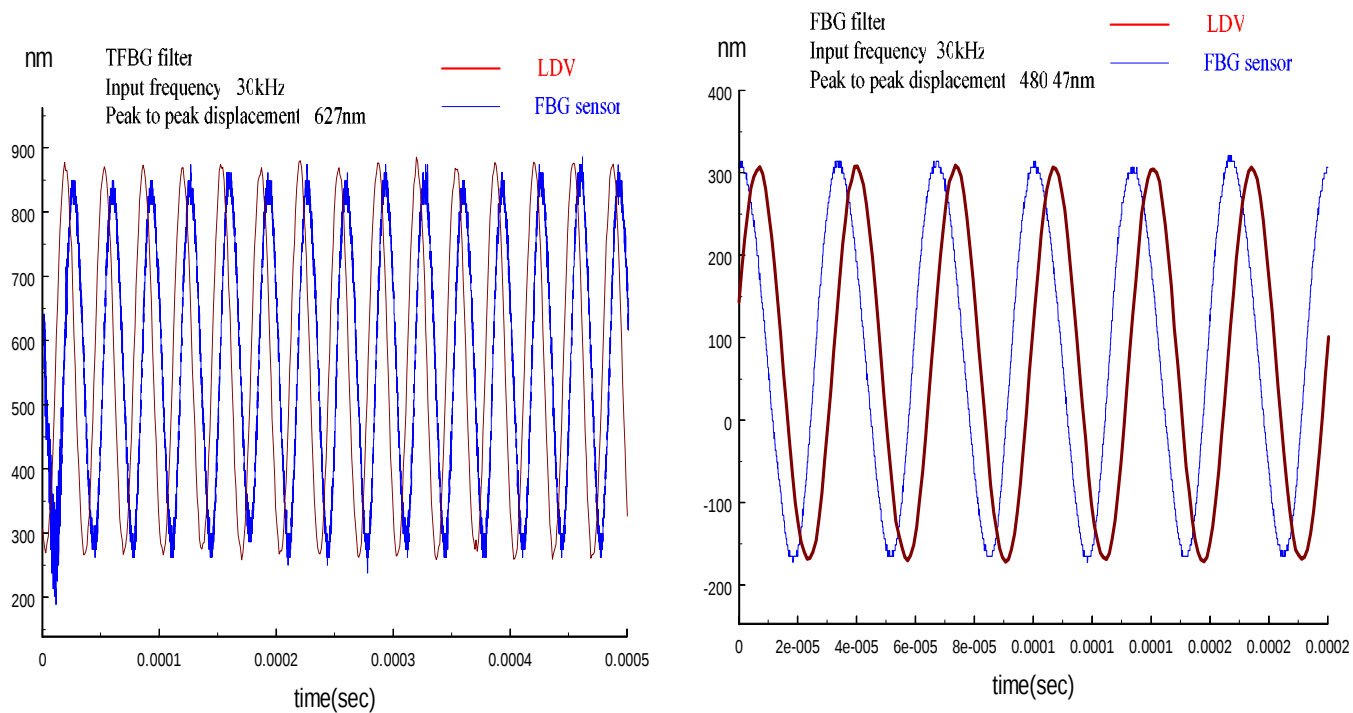


圖 16 以 TFBG 與 FBG 為濾波元件量測 PZT 穩態振動於 30kHz 下之結果

後續建議工作

目前所使用的輻射劑量與反應器內部的劑量有相當距離，如應用範圍在低劑量輻射，則目前的結果具一定的參考性，但如欲應用到較高劑量的環境，則需作長期、高劑量的模擬，另一方面，本計劃工作反映出黏膠及光纖保護也是應用的瓶頸，因此後續工作建議應選擇不同的黏合劑，除高分子外，尚可考慮陶瓷基的黏合劑，或混合金屬粉末作為輻射屏障功能的黏合劑等，此等黏合劑除了作為固定光纖感測器外，其作為感測器保護層的作用也值得一併探討。此外，如能在輻照期間作線上的測量，將可獲得更靠近實務使用的資訊。

參考文獻

1. R. M. Measures, "Progress towards fiber optic smart structures at UTIAS," SPIE, Vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III, pp. 46-102, 1990.
2. C. T. Mathews, J. S. Sirkis, "The Interaction of Interferometric Optical fiber sensors embedded in a monolithic structure," SPIE, Vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III, pp.46-102, 1990.
3. J. S. Sirkis, A. Dasgupta, H. W. Haslach, Jr. I. Chopra, H. Singh, Y. Wan, C. Mathews, and K. Whipple, "Smart Structure mechanics Research at The University of Maryland," SPIE, Vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III, pp. 88-101, 1990.
4. Kin-tak Lau, Libo Yuan, Li-min Zhou, Jingshen Wu, Chung-ho Woo, "Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors," Composite Structures, Vol. 51, 2000, pp. 9-20.
5. Yun-Jiang Rao; Webb, D.J.; Jackson, D.A.; Lin Zhang; Bennion, I., "In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications", Journal of Lightwave Technology , Vol.15, Issue.5 ,1997 ,pp779 –785
6. Hirayama, Noritomo; Sano, Yasukazu "Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use," ISA Transactions Volume: 39, Issue: 2, April, 2000, pp.

7. Fernandez, A.F.; Brichard, B.; Borgermans, P.; Berghmans, F.; Decreton, M.; Megret, P.; Blondel, M.; Delchambre, A. "Fibre Bragg grating temperature sensors for harsh nuclear environments", Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. OFS 2002, 15th , vol.1, 2002,pp.63-66
8. Y. J. Rao, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors," Optics and Lasers Engineering, Vol. 31, pp. 297-324, 1999.
9. <http://www.smartfibres.com/SmartPages/Smarthome.htm>
10. http://www.cranfield.ac.uk/sims/quality/dt_group/completed_projects/smart.htm
11. <http://www.smartfibres.com/SmartPages/ucitests.html>
12. <http://www.isiscanada.com/programs/sensing/press.htm>
13. R. D. Townsend, N. H. Taylor, "Fibre optic monitoring of temperature and strain along insulated pipework at high temperature," Proceedings of Euromaintenance'96, 1996.
14. <http://www.smartfibres.com/SmartPages/off.html>
15. <http://www.smartfibres.com/SmartPages/appmar.html>
16. http://www.globaltechnoscan.com/7thFeb_13thFeb01/fiber.htm
17. Y. L. Lo, F. Y. Xiao, "Measurement of corrosion and temperature using a single-pitch Bragg grating fiber sensor," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 9, No. 10, pp. 800-807, 1999.
18. A.D. Kersey, T.A. Berkoff and W.W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry - Perot wavelength filter", Opt. Lett.,18, 1993, p1370.
19. Fallon, R.W.; Zhang, L.; Bennion, I. "Multiplexed identical broad-band-chirped grating interrogation system for large-strain sensing applications " IEEE Photonics Technology Letters , Volume: 9 Issue: 12 , Dec. 1997, P1616 –1618
20. J. R. Dunphy, G. Meltz, F. P. Lamm, W. W. Morey," Multi-function, distribution optical-fibre sensor for composite cure and response monitoring," Proceedings of SPIE, Vol. 1370, pp.116-118, 1990.
21. Y.J. Rao, K. Kalli, G. Brady, D.J. Webb, D.A. Jackson, L. Zhang and I.

- Bennion, "Spatially-multiplexed fibre-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection" *Electron. Lett.*, 31, 1995, p1009-1010.
22. M.G. Xu, H. Geiger, J.L. Archambault, L. Reekie and J.P. Dakin, "Novel interrogating system for fibre Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter ", *Electron. Lett.*, 29, 1993, p1510-1511.
 23. P. Ferdinand, S. Magne, V. Marty, S. Rougeault, P. Bernage, M. Douay, E. Fertein, F. Lahoreau, et al., "Optical fiber Bragg gratings sensors for structure monitoring within nuclear power plants", in: *Optical Fibre Sensing and Systems in Nuclear Environment*, F. Berghmans and M. Decreton, eds. SPIE, Vol.2425, p. 11-20, Mol, Belgium, 1994.
 24. A. Gusarov, F. Berghmans, O. Deparis, A. Fernandez Fernandez, Y. Defosse, P. M'egret, M. D'ecreton, and M. Blondel, "High total dose radiation temperature effects on temperature sensing fibre Bragg gratings," *IEEE Photonics Technology letters* 11(9), pp. 1159–1161, 1999.
 25. A. Fernandez Fernandez, B. Brichard, P. Borgermans, F. Berghmans, M. D'ecreton, P. M'egret, M. Blondel, and A. Delchambre, "Fiber bragg grating temperature sensors for harsh nuclear environments," in *Proc. 15th Int. Conf. on Optical Fibre Sensors*, pp. 63–66, 2002.
 26. A Fernandez Fernandez, AGusarov, B Brichard, M Decreton, F Berghmans , P Megret and A Delchambre, "Long-term radiation effects on fibre Bragg grating temperature sensors in a low flux nuclear reactor", *Meas. Sci. Technol.*15(2004) 1506–1511.
 27. A. Gusarov, D. Starodubov, F. Berghmans, O. Deparis, A. Fernandez Fernandez, Y. Defosse, M. D'ecreton, P. M'egret, and M. Blondel, "Behaviour of fibre bragg gratings under high total dose gamma radiation," *IEEE Trans. on Nuclear Science* 47, pp. 868–691, 2000.

致謝

本研究中輻射照射部分承蒙核研所同位素組林彬先生及陳家杰博士，工程組郭鴻達先生協助，郭先生並在其他實驗工作上給予很多幫忙，謹此致謝。