



國立勤益科技大學  
電子工程系研究所

碩士論文

利用布拉格光纖光柵設計與製作地震感測系統

**The Design and Implementation of Seismic  
Monitoring System with Fiber Bragg Grating**

研究生：嚴建昌

指導教授：林崧銘 博士

中華民國 一零一 年 七 月

利用布拉格光纖光柵設計與製作地震感測系統

**The Design and Implementation of Seismic  
Monitoring System with Fiber Bragg Grating**

研究生：嚴建昌

指導教授：林崧銘 博士

國立勤益科技大學

電子工程系研究所

碩士論文

Submitted in partial fulfillment of the requirements

For the degree of

Master of Engineering

In

Institute of Electronic Engineering

From National Chin-Yi University of Technology

July 2012

Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國 一零一 年 七 月

國立勤益科技大學  
研究所碩士班  
論文口試委員會審定書

本校 電子工程系碩士班 嚴建昌 君

所提論文 利用布拉格光纖光柵設計與製作地震感測系統  
合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

論文口試委員會：

召集人： 劉文豐

委員： 劉文豐

林新銘

何長培

指導教授： 林新銘

所 長： 

中華民國 一 零 一 年 七 月

# 利用布拉格光纖光柵設計與製作地震感測系統

學生：嚴建昌      指導教授：林崧銘 博士

國立勤益科技大學電子工程系研究所

## 摘 要

光纖光柵感測器的優點，包括：靈敏度高、體積小、抗腐蝕及抗電磁干擾、耐高溫、傳輸損耗低…等。近年來，光纖感測技術已蓬勃發展，目前光纖光柵感測器的技術，已逐漸運用到各種領域，例如：振動、溫度、加速度、聲音、電場、電流、壓力等領域，以及監測工程結構狀態的實例，使光纖愈來愈受到矚目。

光纖光柵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，待測區中物理變化，例如應力、溫度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。

在本篇研究中，利用布拉格光纖光柵作為感測器，把光纖光柵置於待測區中，當地震時，光纖光柵產生振動，因而改變光柵之反射波長，因波長的變化，在經過相同波長之光柵時，就可控制送到光調變

器中光波之強度，經由光調變器把警告信號，透過光纖網路送達目的地，因為光纖傳輸速度比一般聲波的傳輸速度快，故可提早幾秒的預警而有較多的避難時間。



# **The Design and Implementation of Seismic Monitoring System with Fiber Bragg Grating**

Student: Jian-Chang Yan    Advisor: Dr. Song-Ming Lin

Institute of Electronic Engineering  
National Chin-Yi University of Technology

## **Abstract**

**The advantages of Fiber Bragg Grating (FBG) sensors include high sensitivity, small size, anti-corrosion, anti-electromagnetic interference, and anti-high temperature, low transmission loss ... and so on. FBG sensor technology has been applied to various fields, such as: vibration, temperature, acceleration, sound, the electric field, current, pressure and other fields. FBG sensor use optic fiber as a transmission medium. The basic principle of FBG sensors is based on the grating wavelength shift due to the strain, temperature, etc. Putting FBG in test area, we can analyze characteristics of light waves to obtain the physical quantity of the light changes.**

**In this thesis, for a FBG as sensors. When the earthquake occurs to cause the FBG placed in the test area to be vibrated, and then to create the FBG wavelength shift. By means of changing grating wavelength, the strength of the light transmitted to the optical modulator can be controlled. The warning signal made by the optical modulator will pass through fiber optic network and optical amplifier then reach destination. Because the speed of optical fiber transmission is faster than the acoustic transmission, people can earn a few seconds of early warning to have more time to evacuate.**

## 誌 謝

首先，感謝指導教授林崧銘博士這兩年多來的諄諄教誨與指導，以及提供良好的研究資源及環境，使得本論文得以順利完成。並且感謝口試委員劉文豐博士與何岳璟博士給予本論文寶貴建議與指正，讓本論文更佳完善，由衷的感謝。

接著再次感謝逢甲大學電機系主任劉文豐博士與實驗室林桂如學姊及各位同學的幫忙，提供材料與建議使得研究可以更順利。

在兩年的碩士生涯中，也要特別感謝葉文揚、黃耀德、吳煒毅同儕共同砥礪，彼此互相關心近況，以及互相打氣。另外也要謝謝勤益科大電子工程系研究所全體同學彼此間的互相加油勉勵，一起走過兩年的碩士生涯。

最後，將此碩士學位及論文獻給我摯愛的雙親，感謝父母對我的養育及栽培之恩，也感謝哥哥們的支持與鼓勵；再次感謝所有關心我的家人及朋友，願與你們分享這份喜悅。

建昌 謹誌於

國立勤益科技大學電子工程系研究所

# 目 錄

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 中文摘要.....                | i    |
| 英文摘要.....                | iii  |
| 誌 謝.....                 | iv   |
| 目 錄.....                 | v    |
| 圖目錄.....                 | viii |
| 第一章 緒論.....              | 1    |
| 1.1 前言.....              | 1    |
| 1.2 研究動機與文獻.....         | 1    |
| 1.3 論文架構.....            | 2    |
| 第二章 光纖光柵感測器.....         | 3    |
| 2.1 光纖構造.....            | 3    |
| 2.2 光纖光柵構造.....          | 4    |
| 2.3 光柵(grating)基本原理..... | 5    |
| 2.3.1 短周期光纖光柵.....       | 7    |
| 2.3.2 長週期光纖光柵.....       | 12   |
| 2.4 布拉格光纖光柵特性.....       | 13   |
| 2.4.1 波長漂移量與應力的關係.....   | 16   |
| 2.4.2 波長漂移量與溫度的關係.....   | 17   |



|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 2.5 光纖感測器分類.....            | 18        |
| 2.5.1 光纖光柵多工感測器.....        | 20        |
| 2.6 光纖光柵之優點.....            | 21        |
| <b>第三章 地震感測系統元件介紹.....</b>  | <b>26</b> |
| 3.1 光纖光柵傳輸與反射.....          | 26        |
| 3.2 光隔離器.....               | 28        |
| 3.3 光循環器.....               | 31        |
| 3.4 光分波多工.....              | 33        |
| 3.5 光纖雷射(Fiber LASER).....  | 34        |
| <b>第四章 地震感測系統原理與分析.....</b> | <b>39</b> |
| 4.1 實驗架構.....               | 39        |
| 4.2 地震感測系統測試分析.....         | 43        |
| 4.3 成果與檢討.....              | 58        |
| <b>第五章 結論.....</b>          | <b>59</b> |
| <b>參考文獻.....</b>            | <b>60</b> |
| <b>附錄一 光纖光柵規格.....</b>      | <b>63</b> |
| <b>附錄二 光隔離器規格.....</b>      | <b>63</b> |
| <b>附錄三 光循環器規格.....</b>      | <b>64</b> |

|                  |    |
|------------------|----|
| 附錄四 雷射二極體規格..... | 65 |
| 附錄五 調變器規格.....   | 66 |
| 附錄六 解調變器規格.....  | 66 |
| 作者簡介.....        | 67 |



## 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 2.1 光纖基本構造 .....   | 3  |
| 圖 2.2 光纖光柵基本架構 .....   | 5  |
| 圖 2.3 光波經由光柵的繞射 .....  | 6  |
| 圖 2.4 短週期光纖光柵示意圖[13].....  | 9  |
| 圖 2.5 均勻布拉格光纖光柵在正規波長為 $\kappa L=2$ (虛線)和 $\kappa L=8$ (實線)<br>之反射頻譜[13]..... | 11 |
| 圖 2.6 長週期光纖光柵示意圖[13].....  | 13 |
| 圖 3.1 光纖光柵穿透光譜 .....   | 27 |
| 圖 3.2 光纖光柵反射光譜 .....   | 27 |
| 圖 3.3 光隔離器 .....   | 29 |
| 圖 3.4 光隔離器構造 .....   | 29 |
| 圖 3.5 光隔離器原理 .....   | 30 |
| 圖 3.6 光循環器 .....   | 32 |
| 圖 3.7 光循環器路徑圖 .....  | 32 |
| 圖 3.8 分波多工/解分波多工 .....   | 34 |
| 圖 3.9 鉅離子能階圖 .....   | 35 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 圖 3.10 雷射二極體模組實體圖 .....               | 36 |
| 圖 3.11 雷射二極體內部結構圖 .....               | 37 |
| 圖 3.12 980 nm Pump LD 輸出光譜 .....      | 37 |
| 圖 3.13 光纖雷射架構圖 .....                  | 38 |
| 圖 3.14 光纖雷射輸出光譜 .....                 | 38 |
| 圖 4.1 地震感測系統架構圖 .....                 | 39 |
| 圖 4.2 光纖光柵感測器 .....                   | 39 |
| 圖 4.3 光纖光柵加上木製架構 .....                | 40 |
| 圖 4.4 碰觸光纖光柵感測器 .....                 | 41 |
| 圖 4.5 感測用光纖光柵波長位移圖 .....              | 42 |
| 圖 4.6 FBG 的中心波長變化經反射後穿透 FBG 之頻譜 ..... | 43 |
| 圖 4.7 拉扯距離與中心波長之關係圖 .....             | 44 |
| 圖 4.8 光纖光柵拉扯距離相對於中心波長變化之關係 .....      | 44 |
| 圖 4.9 修改之地震感測器架構 .....                | 45 |
| 圖 4.10 ASE 光源 .....                   | 47 |
| 圖 4.11 光頻譜分析儀 .....                   | 47 |
| 圖 4.12 串接一個 FBG 架構圖 .....             | 48 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 圖 4.13 串一個 FBG 輸出光譜圖 .....     | 48 |
| 圖 4.14 串接二個 FBG 架構圖.....       | 49 |
| 圖 4.15 串二個 FBG 輸出光譜圖 .....     | 49 |
| 圖 4.16 串接三個 FBG 架構圖.....       | 50 |
| 圖 4.17 串三個 FBG 輸出光譜圖 .....     | 50 |
| 圖 4.18 串接四個 FBG 架構圖.....       | 51 |
| 圖 4.19 串四個 FBG 輸出光譜圖 .....     | 51 |
| 圖 4.20 串不同數量 FBG 比較圖 .....     | 52 |
| 圖 4.21 修改之地震感測系統架構圖 .....      | 53 |
| 圖 4.22 光纖雷射光在地震感測系統動作示意圖 ..... | 53 |
| 圖 4.23 調變器 .....               | 54 |
| 圖 4.24 解調變器 .....              | 54 |
| 圖 4.25 光纖雷射配線圖 .....           | 55 |
| 圖 4.26 四個光纖光柵配線圖 .....         | 55 |
| 圖 4.27 未受振動時輸出光譜圖 .....        | 56 |
| 圖 4.28 受振動時輸出光譜圖 .....         | 57 |
| 圖 4.29 當受到較大振動時輸出光譜圖 .....     | 57 |

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

隨著經濟的發展與繁榮，人們對於資訊交流的需求日與劇增，進而促進通信產業的發展。在通信方面，近年來由於光纖的發展與應用，加上其高頻寬與高速傳輸的特性，近年來已成為未來通信的主流。而光纖不但可以負責傳輸訊號，也具有感測功能，再加上光纖在通信上具有低損耗、低色散、抗電磁干擾等特性，在結構上具有直徑細、重量輕、抗高溫、耐腐蝕等優點，所以光纖感測器被視為很有潛力的感測技術。

## 1.2 研究動機與文獻

由於天然環境因素和人為的疏忽，往往可能造成不可彌補的災害，尤其在台灣的地理位置，時常伴隨著天災的襲擊，如地震、颱風等，所造成人民的傷亡和錢財的損失是很嚴重的，所以如果我們可以在事發前就能偵測到危機，並做出迅速正確的預防措施，就能減少傷亡和錢財損失，所以事發前的危機偵測是我們重要的課題，也是研究光纖感測器的目的。

隨著布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)的發明，以及雷射光源和許多光被動元件的發明，光纖即被證明具有很高的應用價值。近年來，光纖除應用在通信上，光纖感測器也被應用於各種物理訊號之量測，光纖感測原理即是利用光纖作為光訊號傳輸介質，光源所產生的光經光纖導引至待測區，待測區中物理量的變化將造成光波特性的改變，分析光波特性的變化，即可得到待測區中物理量之變化。而在應用方面，從參考文獻中我們知道光纖感測系統已可用來測量物理量的變動，例如聲音[1]、溫度[2]、加速度[3]、壓力[4]、電流[5]、電場[6]、應變[7]、振動[8]等。以布拉格光纖光柵做成的感測頭，具有高靈敏度及動態範圍，因此光纖感測器技術將是未來感測技術的主流。

### 1.3 論文架構

本論文主體架構共分為五個章節，第一章為緒論，簡單介紹研究動機和光纖感測應用在哪些方面；第二章探討光纖光柵感測器之結構與原理特性及其優點；第三章探討地震感測系統所使用的元件；第四章為本論文所提出的地震感測系統原理與分析之實驗結果；最後在第五章為本論文作一個總結。

## 第二章 光纖光柵感測器

### 2.1 光纖構造

光纖的基本構造如圖2.1所示。光纖本質上是一軸對稱圓柱結構的光波導(Optical wave-guide)，由軸心往外圍方向觀看，大致上可依折射率的不同分成纖核(Core)、纖殼(Cladding)及外面作為保護的纖衣( Coating)三層。其中纖核的直徑依光纖種類的不同約略為8~62.5 $\mu\text{m}$ ，而纖殼的範圍則在100~200 $\mu\text{m}$ 間。事實上纖核和纖殼由Snell's反射原理使光纖能夠傳遞光線。但光纖的應用往往處於各種不同嚴苛的環境中，故除了在纖殼外層塗佈上約200~1000 $\mu\text{m}$ 不等的聚合物(Polymer)材質作為保護外，最後再使用尼龍製成的外皮包覆做成商品用光纖，或是依使用的需求將八、十六甚至三十二蕊的光纖製成光纜[9]。

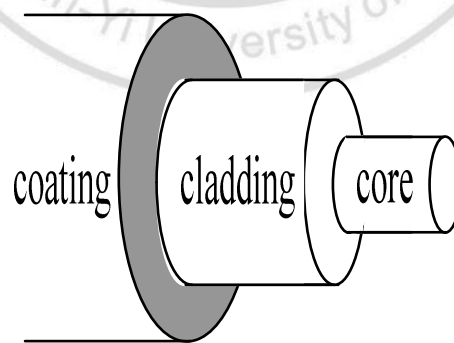


圖 2.1 光纖基本構造



## 2.2 光纖光柵構造

布拉格光纖光柵的發展是由 K.O.Hill 等人於 1978 所提出[10]，利用氬離子雷射為光源，耦合入含有鍍光纖時，因測量駐波，發現反射光強度有逐漸增加，直到入射光都從光纖中反射出來，其原因駐波在光纖核心導致折射率週期性的變化，而形成光纖光柵，為世上第一個寫製完成的光纖光柵。而以這個方式製作的光纖光柵因軸向孔徑較小，雷射光源未能完全進入光纖，所以折射率變化較小，且容易因外界干擾而影響光纖光柵品質，所以此方式並非十分理想。直到 1989 年由 G.Meltz 等人利用兩道雷射光[11]，使兩道雷射光交錯，以側照方式產生干涉條紋製作光纖光柵，並可藉由調整雷射光束的夾角改變光柵週期，但由於架構較複雜也必須注意系統的穩定避免外界干擾等缺點。直到 1993 年，K.O.Hill 等人再次改良製作的方式[12]，他們利用相位光罩取代了當初的方式，入射光會因為相位光罩分成兩道能量相同的光，並在光纖形成干涉條紋製作成光纖光柵，此方法製作過程較以往方便，並且具有極高的穩定性，而只要更換特定週期之光罩即可得到不同的光柵週期，此方法仍是普遍被使用。光纖光柵的基本結構如圖 2.2 所示。

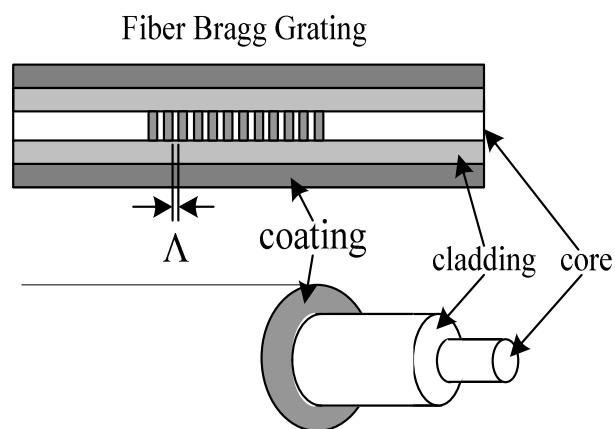


圖 2.2 光纖光柵基本架構

### 2.3 光柵(grating)基本原理

由幾何線性光學中的繞射(diffraction)原理可知，由光源端入射到具有狹縫的平面，將會因入射光的波長及狹縫的寬度，而在另一端產生不同間距的明暗相間繞射條紋。若將前述繞射原理中的單狹縫改成週期性的狹縫，將可獲得疊加的效果，此一週期性的結構便是所謂的光柵結構如圖 2.3 所示。光纖光柵是一種簡單的光繞射光柵，依週期可分為長週期光纖光柵和短週期光纖光柵，短週期光纖光柵又稱為布拉格光纖光柵[13][16]。

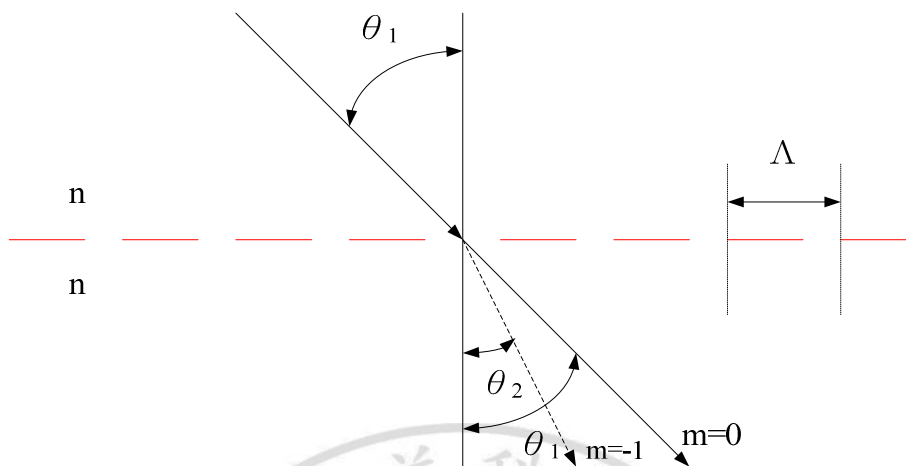


圖 2.3 光波經由光柵的繞射

光柵繞射的現象，由線性幾何光學的角度可以得到(2.1)式

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (2.1)$$

其中  $n$  為介質折射率， $\lambda$  為傳播之光波長， $\Lambda$  為光柵週期， $m$  表示繞射的階數，而  $\theta_1$  和  $\theta_2$  為光的入射角及  $-1$  階繞射角，此繞射角  $\theta_2$  產生建設性干擾(Constructive Interference)並決定兩模態間交連的波長。由圖 2.3 可以看出  $0$  階繞射( $m=0$ )的繞射光線是和沒有通過光柵一樣直進的光，而真正應用上扮演重要地位的是能量次高的  $-1$  階繞射( $m=-1$ )的

繞射光線。

若將光柵結構製作於光纖之中便可以得到光纖光柵，由於繞射現象會使得光在光纖裡面傳播的模態傳播常數( $\beta_1$ )受到擾動產生另一個模態傳播常數( $\beta_2$ )，此現象可由下式描述：

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.2)$$

其中  $\beta_1$  為受光纖光柵擾動前的模態傳播常數，而  $\beta_2$  為受光纖光柵擾動後產生的新模態常數， $\beta_2 = (2\pi/\lambda)n_{eff}$ ，其中  $n_{eff} = n_{co}\sin\theta$ 。

### 2.3.1 短周期光纖光柵

通常稱為布拉格光纖光柵又稱為反射式(reflection)光纖光柵如圖 2.4 所示，其週期為  $1\mu m$ 。從繞射階數為  $-1$  的情況下，令式(2.2)中的  $m = -1$  則可以得到(2.3)式

$$\beta_2 = \beta_1 - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.3)$$

由之前的敘述中可知光在光纖裡面傳播時若受到光纖光柵的擾動則會有部分的能量從原先的傳播模態( $\beta_1$ )轉移至另一個新的傳播模態( $\beta_2$ )，此現象稱為光傳播模態的耦合(Coupling)。圖 2.4 中，實心圓為核心模式(Core mode)( $n_{cl} < n_{eff} < n_{co}$ )，空心圓為包覆模式(Cladding mode)( $1 < n_{eff} < n_{cl}$ )，細線區域為連續的輻射模式(Radiation mode)。由之前光纖光柵原理的說明中我們可知當光纖光柵週期較短時，(2.2)式中模態耦合時模態傳播常數的偏移量的值也會愈大，使得入射光耦合至一反向前進的光上(模態傳播常數為負值； $\beta_2 < 0$ )，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的效果( $\theta_2 = -\theta_1$ )，由(2.2)式  $\beta_2 < 0$ ，發現反射模式的諧振波長是由折射率  $n_{eff,1}$ ，進入另一模態的折射率  $n_{eff,2}$  所決定，即  $\lambda = (n_{eff,1} + n_{eff,2})\Lambda$ ，假若兩模態相同，我們得到布拉格反射波長為  $\lambda = 2 n_{eff}\Lambda$ 。本論文即使用短週期光纖光柵為感測器。

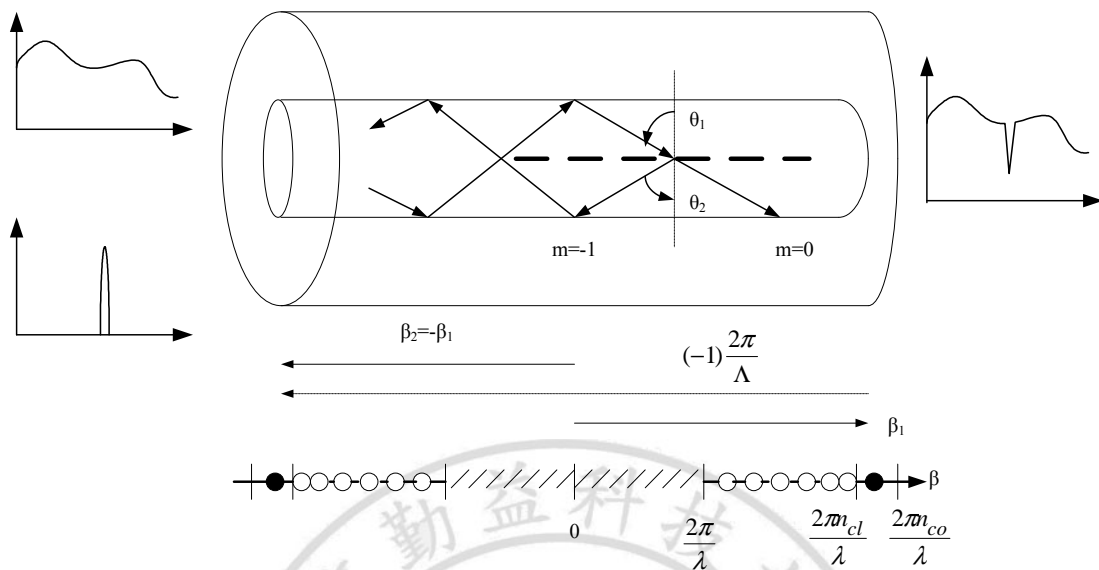


圖 2.4 短週期光纖光柵示意圖[13]

由耦合模式(Couple-mode)理論可以發現一個反射率均勻光纖光柵長度為  $L$ ，假設前向波從  $z = -\infty$  即  $[R(-L/2) = 1]$  入射，並要求對於  $z \geq L/2$  (即  $S(L/2) = 0$ ) 沒有反向波存在。振幅和功率反射係數分別為  $\rho = S(-L/2)/(-L/2)$  和  $r = |\rho|^2$ ，然後可以表示為：

$$\rho = \frac{-\kappa \sinh \left( \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right)}{\hat{\sigma} \sinh \left( \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right) + i \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh \left( \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right)} \quad (2.4)$$

和

$$r = \frac{\sinh^2 \left( \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right)}{\cosh^2 \left( \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \quad (2.5)$$

其中，

$\kappa$  是“AC”交流耦合係數  $\kappa_{kj} = \frac{V}{2} \sigma_{kj}(z)$  (在模態  $j$  和  $k$  之間的橫切耦合係數)。

$\sigma$  是“dc”直流(週期平均的)耦合係數。

$\hat{\sigma}$  是“dc”自耦合係數。

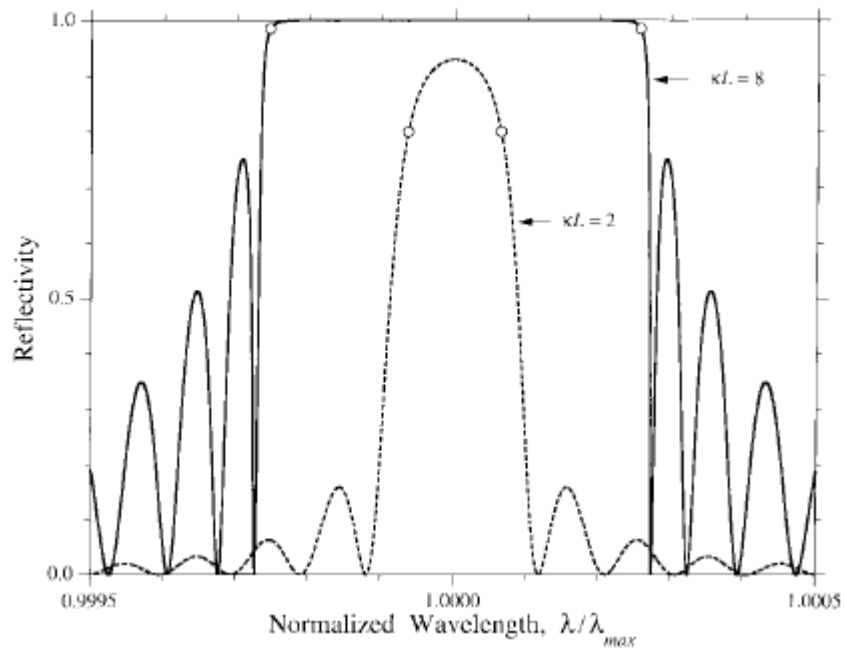


圖 2.5 均勻布拉格光纖光柵在正規波長為  $\kappa L=2$ (虛線)和  $\kappa L=8$ (實線) 之反射頻譜[13]

從這些結果中可以看出一些光纖光柵的特性。均勻光柵的功率反射率  $r$  典型的例子為  $\kappa L=2$  和  $\kappa L=8$  如圖 2.5 所示是以正歸波長對反射率的圖形

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma L}{\pi N}} \quad (2.6)$$



其中  $N$  是光柵週期的總數( $N=L/\Lambda$ )，這裡選擇的  $N=10000$ ， $\lambda_{\max}$  是在最大反射所產生波長。如果  $N$  變大或變小，反射頻寬即變窄或變寬，分別為給定一個  $\kappa L$  值。從 (2.5)，我們發現一個光柵最大的反射率  $r_{\max}$  為

$$r_{\max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (2.7)$$

且它是在  $\hat{\sigma} = 0$  或在波長  $\lambda_{\max} = \left(1 + \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{n_{eff}}\right) \lambda_D$  時發生。

### 2.3.2 長週期光纖光柵

其週期為  $100 \sim 1000 \mu m$  左右，又稱為穿透式(transmission)光纖光柵。由於其週期較長，在光纖中傳播的光，其特定波長的光，滿足下列條件的光：

$$\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.8)$$

$\beta_1$  為基本模態

$\beta_2$  為與  $\beta_1$  耦合的模態

$\Lambda$  為光柵週期

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的光上，也就是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 2.6 所示。

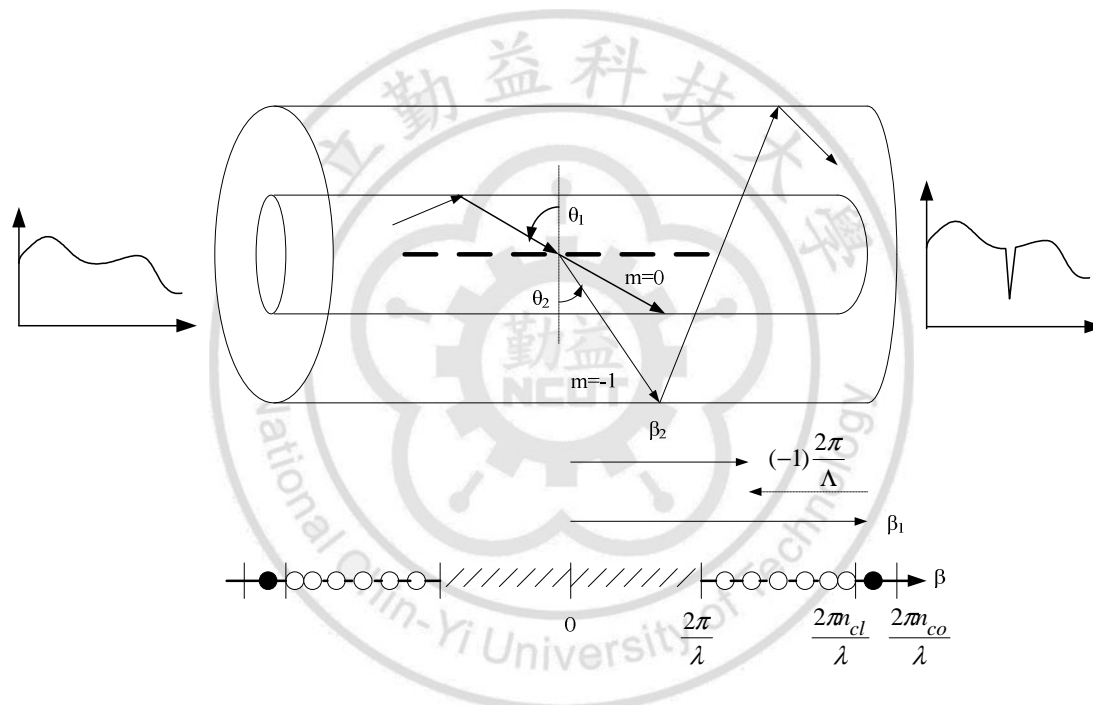


圖 2.6 長週期光纖光柵示意圖[13]

## 2.4 布拉格光纖光柵特性

當寬頻光源入射到光纖光柵時，會因折射率的改變而折射、透射或反射，其中反射要符合布拉格條件(Bragg condition)，根據文獻[14]，

布拉格條件是指光的反射波長需要滿足下列公式：

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (2.9)$$

$\lambda_B$  為布拉格反射波長

$n_{eff}$  為纖核有效折射率

$\Lambda$  為光纖光柵的週期

其餘不滿足的反射波長會因為相位差而互相抵消。 $\lambda_B$  布拉格光纖光柵之中心波長在頻譜上的反應主要是受到應力及溫度的影響，也就是說只要我們變動應力或溫度，便會使操作波長產生改變，如果能利用此變動量，便可以達到感測的功能。根據布拉格反射波長的偏移量，我們可以將應力和溫度變動所形成的變化量分離出來。

根據文獻中[15]，可知布拉格光纖光柵反射波長的偏移量  $\Delta\lambda_B$ ，所受的應變及溫度的變化量有關，其關係式如下：

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \left( \left\{ 1 - \left( \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right) \right\} \epsilon + \left[ \alpha + \frac{\left( \frac{dn_{eff}}{dT} \right)}{n_{eff}} \right] \Delta T \right) \quad (2.10)$$

其中，

$P_{11}$  與  $P_{12}$  為光纖的應變張量

$\nu$  為光纖的波松比(Poisson's ratio)

$\varepsilon$  為所受的應變量

$\alpha$  為光纖的熱膨脹係數(thermal expansion coefficient, CTE)

$\Delta T$  為所受的溫度變化量

根據文獻[17]，將(2.10 式)化簡為：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] = \lambda_B [K_\varepsilon \varepsilon + K_T T] \quad (2.11)$$

其中，

$$P_e = \left( \frac{n_{eff}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \text{ 為光彈常數(photo-elastic constant)}$$

$$\xi = \frac{\left( \frac{dn_{eff}}{dT} \right)}{n_{eff}} \text{ 為光纖的熱光係數(thermal optical coefficient)}$$

$K_\varepsilon$  為所受應變的敏感係數

$K_T$  為所受溫度變化量的敏感係數

由於同時考慮應變( $\varepsilon$ )和溫度變化量( $\Delta T$ )，會無法掌握布拉格光纖光柵

的反射波長偏移量( $\Delta\lambda_B$ )，所以在一般的研究上往往是分開討論的，以下就分別為應力和溫度的變化討論其影響的情形。

#### 2.4.1 波長漂移量與應力的關係

首先將(2.10 式)中的  $\Delta T$  設為 0，也就是說把系統放在恆溫的狀態下，只單純討論應力與波長偏移量的關係，簡化後可得到下式：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - P_e)\epsilon] = \lambda_B [K_e \epsilon] \quad (2.12)$$

其中，

$$P_e = \left( \frac{n_{eff}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$$

為光彈常數(photo-elastic constant)

$\epsilon$  為所受的應變量

$K_e$  為所受應變的敏感係數

一般物質在平常狀態下，原子晶格間會維持一定的排列方式，彼此間有固定的引力相互作用，也就是原子之間的排列是呈現同向性(isotropic)。而當受到外來應力時，物體的形狀會隨之改變，也就是原子間的排列是呈現非同向性(anisotropic)，而造成折射率的改變。一般典型的光纖中  $P_{11} = 0.113$ 、 $P_{12} = 0.252$ 、 $\nu = 0.16$ 、 $n_{eff} = 1.448$  [18]。由

此可利用上述的數值及公式，可以計算出：

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_B &= 1550 \times 10^{-9} \times \left( 1 - \frac{1.448^2}{2} [0.252 - 0.16(0.113 + 0.252)] \right) \times (1 \times 10^{-6}) \\ &\cong 1.2354 \text{ pm}/\mu\text{s}\end{aligned}$$

表示在中心波長 1550 nm 左右的布拉格光纖光柵，受到 1 $\mu$ Strain 的應力時，反射的布拉格中心波長約漂移 1.2354 pm。

#### 2.4.2 波長漂移量與溫度的關係

當應力效應忽略時，改變環境的溫度會造成布拉格波長的移動，其波長漂移量可由(2.10)式化簡得之：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T] = \lambda_B K_T \Delta T \quad (2.13)$$

$\alpha$  為光纖的熱膨脹係數(thermal expansion coefficient, CTE)

$\xi = \frac{\left( \frac{dn_{eff}}{dT} \right)}{n_{eff}}$  為光纖的熱光係數(thermal optical coefficient)

$\Delta T$  為所受的溫度變化量

$K_T$  為所受溫度變化量的敏感係數

當加入熱源時，布拉格波長的漂移主要有兩個原因：光纖光柵週期以及折射率的改變。根據文獻[17]，對於溫度變化量的感測得知，當  $\alpha$  值約為  $0.55\sim 1.1\times 10^{-6}$  時， $\xi$  值會從  $6.9\times 10^{-6}(\Delta T=150^{\circ}\text{C})$  變成  $9.6\times 10^{-6}(\Delta T=450^{\circ}\text{C})$ ，顯示出布拉格光纖光柵反射波長的偏移量，和溫度變化有些許非線性關係，意思在高溫時布拉格光纖光柵反射波長的偏移會更明顯。而另一文獻表示[19]，在一般環境下，溫度升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，布拉格光纖光柵反射波長的偏移量大約是  $0.012\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.5 光纖感測器分類

光纖感測器幾乎是應用在物理量的測定，如壓力、溫度、電場、電流、距離、轉速、速度、加速度、振動、液面、磁場等物理量變化。光纖感測的基本原理是利用光纖作為光訊號的傳輸介質，光源所產生的光波經由光纖導引至待測區，待測區中環境變化將造成光波特性改變，分析光波特性之變化即可量測物理量之變化[20]、[21]。

1.以感測元件一般可分為

a.非本質性(Extrinsic)

此感測系統光纖僅負責訊號傳輸的功用，作為感測元件間傳輸的

介質，系統中光纖並非連續，感測段須藉由其它元件配合，主要使用多模光纖。

#### b.本質性(Intrinsic)

利用光纖本身為感測元件，光不僅負責訊號傳輸功能，當光在光纖傳輸經過感測段時，外界感測參數與進入感測段的光相互作用，光的特性如強度、相位、頻率等發生變化，轉換為光的訊號，經由光探測器、解調器而得到感測參數變化，此感測系統光纖是連續的，多使用單模光纖。

### 2.依解調方式可分為

#### a.光強度(Intensity)調變

光強度調變主要原理是光波受外界環境調變產生光強度變化，如光的吸收、反射、發光、繞射等造成，由光強度的變化量可以量測外界環境的參數改變量。由於需外接光源，光強度可能會因擾動使其靈敏度受到限制，為了提高量測的精準度，光源調變的電路必須相當的精密穩定，如此才能對光源的輸出光強度做精密的控制。

#### b.光相位(Phase)調變

應用光會因光傳輸路徑長度改變導致光相位不同的特性。當同調



光行經兩條路程相近的光纖，分別為感測光纖和作為參考比較用的標準光纖。當感測光纖受到外界環境調變而改變其光程長度時，輸出端的相位跟著改變，而標準光纖並未受到外界環境所影響，使得兩根光纖的輸出端相位差異隨之變動，將可達到感測目的。此類感測器有極高的靈敏度。

#### c.波長(Wavelength)調變

經特殊處理的光纖可對外界訊息具有感測能力，外界環境會影響反射光或穿透光的波長分布，當發光二極體或雷射二極體所產生的光源，由光纖導引至待測區，經外界物質影響，而造成光波長偏移，藉由分析光譜分佈改變情形來研判其所受之外界影響。波長調變不僅具有相位調變之優點，並可直接達到輕易測量之目的。

#### d.光偏極化(Polarization)調變

原理是根據光的偏極化狀態受外界環境影響而改變的現象。

### 2.5.1 光纖光柵多工感測器

光纖感測器可以做單點物理測量，而跟傳統電子式感測器比較起來，較大的優點之一是可以利用分佈式的架構來達到多工的感測，所以

光纖光柵的感測器有多工測量的優點，文獻中[15]，將常見的分波多工 (Wavelength-Division Multiplexing, WDM)和分時多工 (Time-Division Multiplexing, TDM)光纖光柵做簡單的敘述：

### 1.分波多工光纖光柵感測器

原理是將不同反射波長的光纖光柵做串列式的分佈，不同的反射波長對應變和溫度的變化量有不同的偏移量，所以依此特性可以同時進行多點的感測。

### 2.分時多工光纖光柵感測器

在光纖中製作的感測點，當感測點感受到應力時，光源通過感測點就會反射部分光強度，而各個反射回來訊號的時間和強度也不同，就可以判斷應力發生的位置與大小。

## 2.6 光纖光柵之優點

利用光纖與光纖光柵所架構的感測網路還有下列優點[21]、[22]。

1.低損耗：光纖的傳輸損耗比電話電纜、同軸電纜和雙絞線等任一種傳輸損耗都低，一般光纖在波長 1.0~1.7 $\mu\text{m}$  範圍(波長 1.4 $\mu\text{m}$  附近除外)都可達到 1dB/km 的低損耗值。光纖的低損耗可延長中繼站的間隔距

離，由於中繼站的建立、安裝與維護皆相當昂貴，因此，光纖如果需要較少的中繼站，即表示系統成本較低，且可做長距離傳輸。

2.高頻寬：光的頻率比無線電波還要高好幾個位階，光的頻帶寬遠超過同軸電纜的頻帶寬，而且同軸電纜的技術已發展至極限，光纖的應用已漸漸起步，並且發展潛力無限。即使僅考慮目前的技術水準，光纖通訊的傳輸訊息容量，仍比各種的傳輸線路大。較高的光纖頻寬容許較高的位元率，因而每個光纜也有更多聲音頻道，光纖高頻的結果，允許傳輸通道要求比聲音頻寬更寬的頻帶寬，以容許訊號、聲音、資料、視訊等，經由光纖多工同時傳送。這些服務的需求，使得光纖從以前的單純長程傳輸，到現今資訊時代實際傳送至住家及商家。

3.直徑細：一根光纖通常可以取代好幾根銅線，即使光纜的粗細僅有同軸電纜的 1/10(僅約一根頭髮的粗細)，容量卻遠大於它。光纖的直徑細，使它在各種載具上具的應用具有很大的誘因，光纖不僅可減少浪費寶貴的空間，使得空間更有效利用。由於光纜可以在較小的空間提供較大的容量，因此，未來利用原來電纜線的城市地下管線空間，以光纖取代同軸纜線是絕對可行之事。

4.重量輕：一根光纖的重量遠小於銅導線，一條光纜的重量則更遠小於具有相同資訊載送容量的同軸電纜。例如，一條典型的單線路光纜重量約為每一千英呎 9 磅，但是同軸電纜則約為每一千英呎 80 磅。事實上，在各種載具的應用上，減輕重量是非常重要的。光纜比任何一種電纜都輕，所以在架設上非常方便。

5.可撓性佳：光纖外層有披覆層保護，柔軟度及應變性均佳，目前光纖設計及製造技術均相當成熟，外層的材料也不斷改進，使得脆弱的玻璃纖維經披覆層保護後，其可撓性相當好。電腦機房裡，兩個設備間的電纜會從地板凸起，這些電纜一般都是非常硬且不易安裝，要加入新的電纜也困難；然而對於線徑細和可撓性佳的光纖，就不會發生這樣的問題。

6. 電磁屏蔽 (Electromagnetic Immunity)：電磁干擾 (Electromagnetic Interference) 是一種環境污染的形式，其影響範圍是很嚴重的。由於資訊時代的來臨，電子設備密度成長，電磁干擾的問題也潛在劇增。光纖材料不導電，所以沒有外部感應、電波干擾、接地點間電位差的問題，對實用而言是極好的優點；因光纖不輻射或吸收電磁能量，可以

作為理想的傳輸介質，不必擔心光纖內部光波相互間的串音 (Crosstalk)。因為沒有能量從高壓線耦合到光纖，所以光纖線路可在高壓電旁卻不受到影響。光纖的電磁屏蔽信號不會因電磁干擾而失真。數位傳輸要求信號傳輸無誤，但是電磁干擾可能造成電子導線傳輸系統錯誤，因為一個突發的電磁干擾，可能出現脈衝；若使用光纖傳輸則沒有脈衝發生，使用光纖通訊傳送重要資料時，不必擔心資料遭受破壞，提供非常高的傳輸品質。

7. 可靠性高：光纖感測器使用波長或頻率檢測來獲取資訊，長期使用準確性佳，並且重複性高，偵測光訊號的元件，不會因為長時間的使用而產生變化。

8. 抵抗環境能力佳：由於光纖的材質為石英玻璃，其熔點相當高，因此在高溫環境之下並不會影響通訊的品質，也不會有短路的情形發生，非常適合某些高溫的工廠環境，即可避免一些意外發生。除了耐高溫的特性，光纖還可以耐酸鹼之侵蝕，更可以耐惡劣天候之影響，因此非常適合應用於各種惡劣環境之下。

9.安全：光纖是電介質(Dielectric)不導電，不會產生火花的危險，所以不可能像同軸纜線那樣造成燃燒或爆炸。因此，光纜可以通過禁止電線通過的危險區域，例如油箱、煤礦或輸氣管道內等場所。

10.隱密性高：由於傳統使用的金屬傳輸線本身就像大天線，電波訊號在此傳輸線中傳播，極易輻射外漏，這些外漏的電波容易被利用來竊取通信的重要資訊，因此對於保密性要求較高的通信網路，應避免使用傳統的電線電纜傳輸網路系統，為了避免重要資訊被竊取，改用光纖通信系統可克服此問題。即使高靈敏度的天線接近，亦非常困難接收到或解析光纖的信號。

11.原料豐富：光纖的主要成分是石英，其原料在地球上儲存量極為豐富，比銅資源枯竭問題發生的可能性低許多，而且使用很少的石英原料就能製造很長的光纖。

## 第三章 地震感測系統元件介紹

### 3.1 光纖光柵傳輸與反射

本研究採用布拉格光纖光柵反射波長介於 1550 nm，反射波長線寬小於 0.25nm、反射率大於 90%之光纖光柵。圖 3.1 為一布拉格光纖光柵穿透反應圖(transmissive response)，代表寬頻光源通過光纖光柵後，在末端所接收到的頻譜，圖中凹陷處代表被光纖光柵所反射回發射端的波長；圖 3.2 為反射反應圖(reflective response)，就是光纖光柵所反射回發射端的頻譜圖，圖中有一明顯的峰值，此峰值就是光纖光柵中心波長。從圖 3.1 中我們可看出穿透率約為 16dB，由(3.1)式經過換算之後可求出反射率約為 97.5%。本實驗用的光纖光柵由逢甲大學劉文豐教授的實驗室所製作，在此先感謝劉教授及實驗室同學的幫忙。

$$-10 \log(1 - \text{反射率}) = \text{穿透率} \quad (3.1)$$

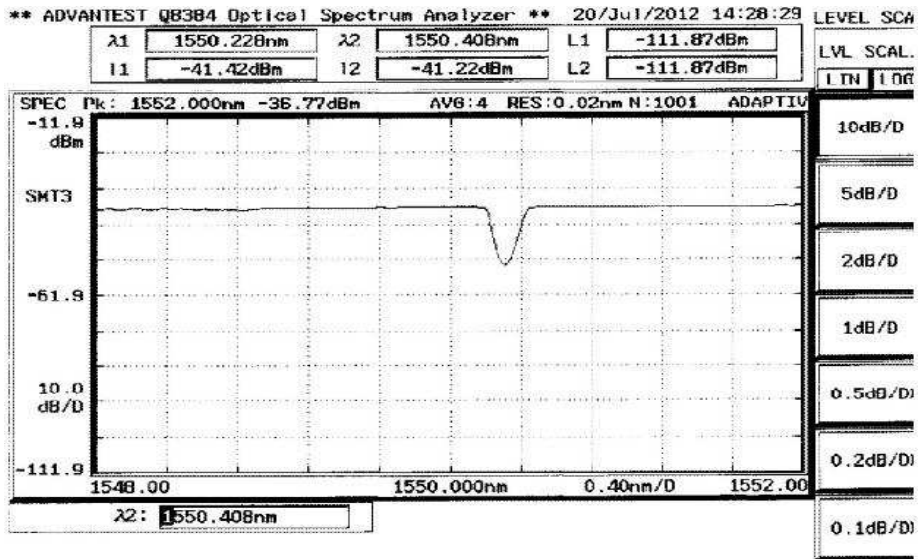


圖 3.1 光纖光柵穿透光譜

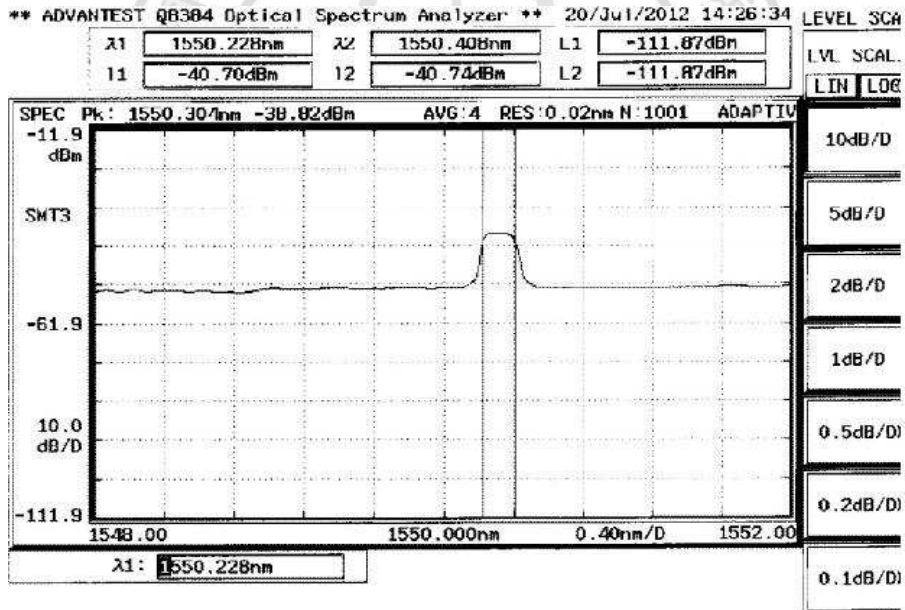


圖 3.2 光纖光柵反射光譜



## 3.2 光隔離器

光隔離器(Isolator)如圖 3.3 所示，目的是隔絕從光纖傳輸路徑反射回來的光。主要由輸入偏振板、輸出偏振板與法拉第旋轉器組成(Faraday Rotator)，由圖 3.4 所示。其工作原理如圖 3.5(a)所示，當由輸入偏振板輸入的垂直極化光，經過法拉第旋轉器旋轉  $45^\circ$  後，成  $45^\circ$  極化光，順利通過輸出偏振板  $45^\circ$  透光軸。圖 3.5(b)所示，當由輸出偏振板輸入  $45^\circ$  極化光，經由法拉第旋轉器旋轉  $45^\circ$  後，成水平極化光，因此無法通過輸入偏振板的垂直透光軸，因此沒有光線能夠經由隔離器的右側至左側傳送。而將光隔離器設置在半導體雷射具有保護作用，它可以防止反射光和散射光進入半導體雷射二極體內，因為雷射需要穩定的光共振現象，此逆向回來的反射光和散射光將搞亂共振，導致頻率劣化及雜訊增加。

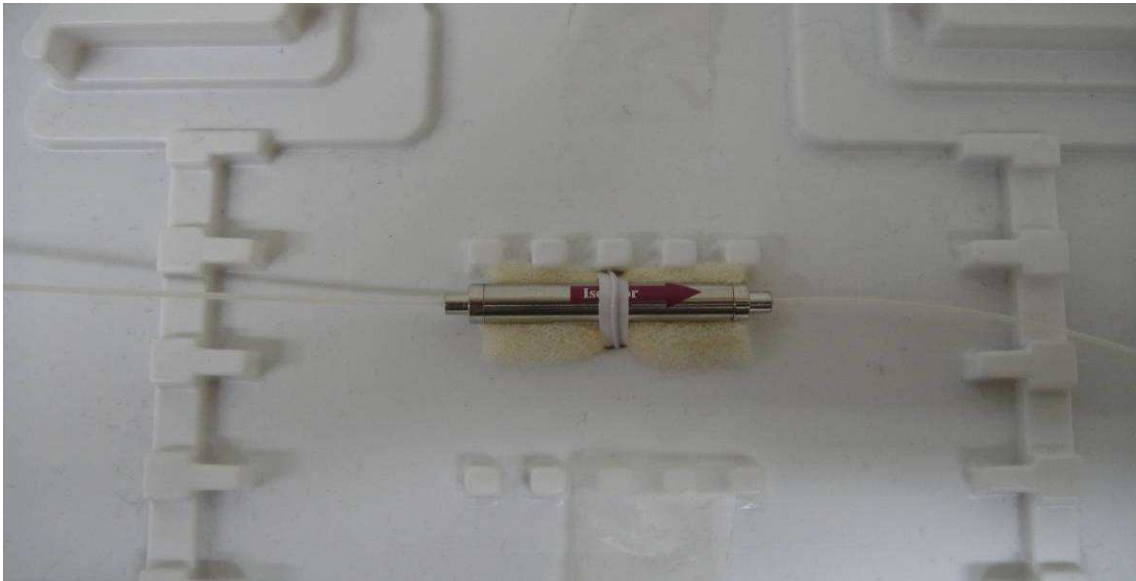


圖 3.3 光隔離器

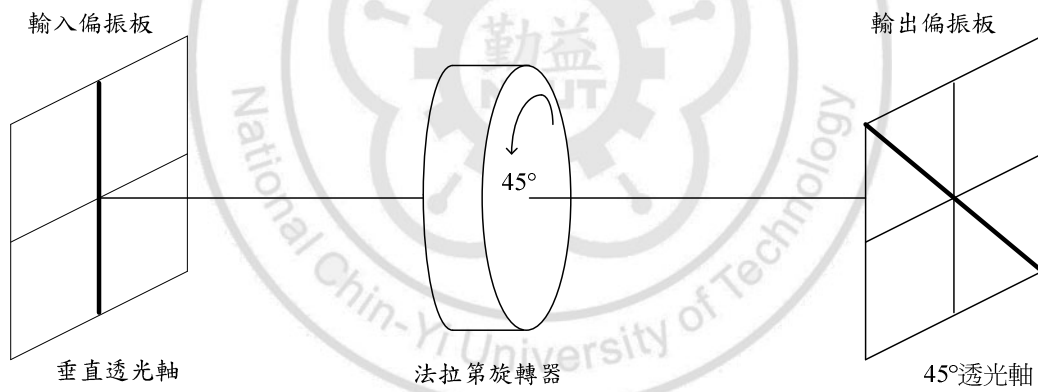
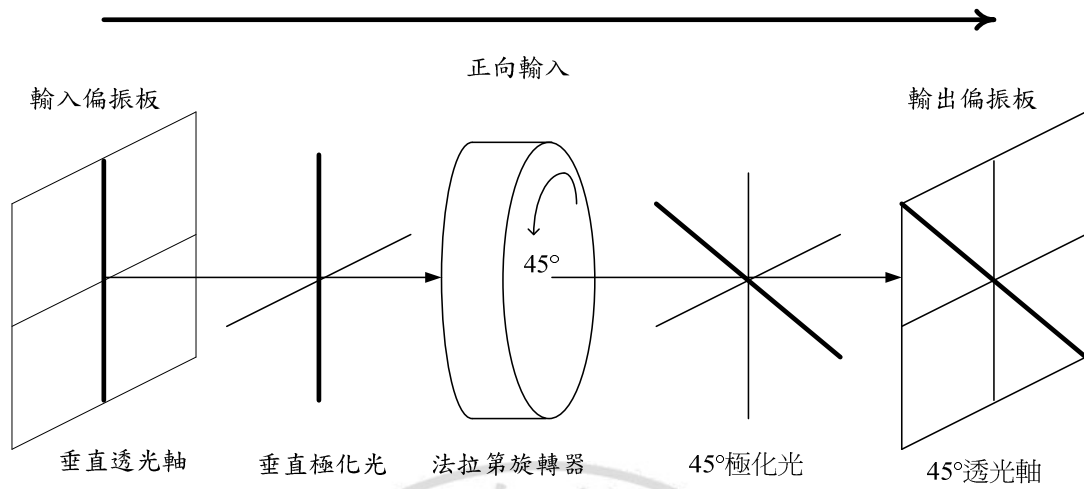
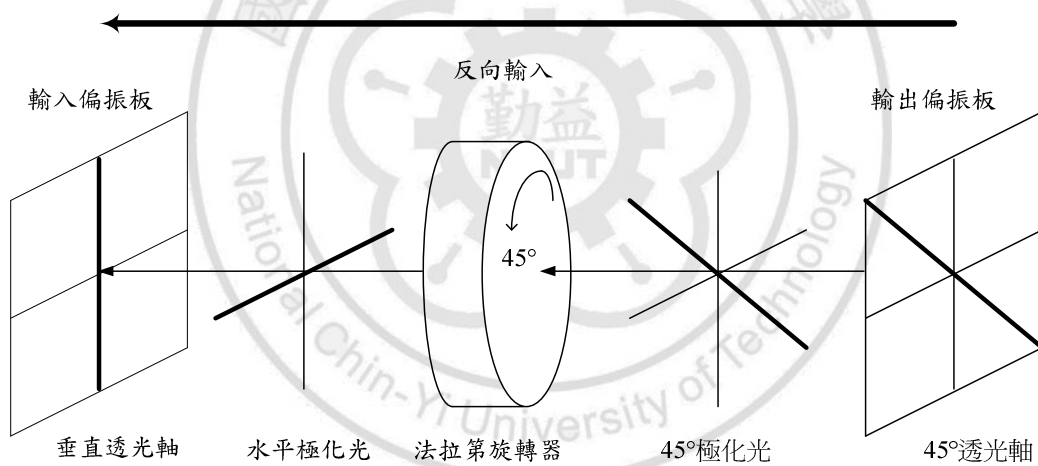


圖 3.4 光隔離器構造



(a) 正向輸入



(b) 反向輸入

圖 3.5 光隔離器原理

光隔離器主要的特性參數：

Insertion Loss(插入損失)：正向輸入端到正向輸出端之間的光功率損耗

$$I.L = -10\log \frac{\text{正向輸出}}{\text{正向輸入}} \quad (3.2)$$

Isolation(隔絕度)：由反向輸入端到反向輸出端之間的光功率損耗

$$Isolation = -10\log \frac{\text{反向輸出}}{\text{反向輸入}} \quad (3.3)$$

### 3.3 光循環器

光循環器如圖 3.6 所示，路徑圖如圖 3.7 所示。光循環器主要由耦合器與隔離器組成，若由 1 輸入訊號光源可正向經隔離器傳到 2，而不受到隔離器阻擋。由 2 輸入訊號光源可正像經隔離器傳到 3，不受到隔離器阻擋。若由 2 輸入訊號光源反向經隔離器傳到 1，將會受到隔離器阻擋。若由 3 輸入訊號光源反向經隔離器傳到 2，將會受到隔離器阻擋。

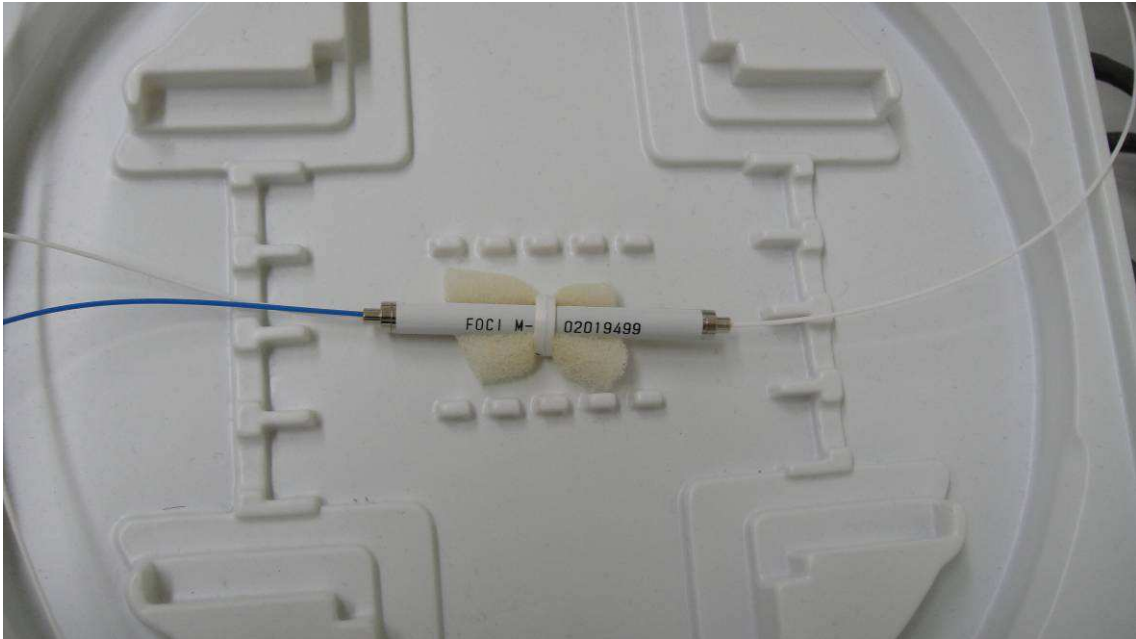


圖 3.6 光循環器

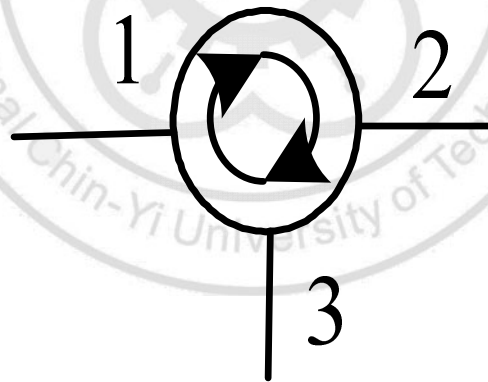


圖 3.7 光循環器路徑圖

光循環器主要特性參數：

Insertion Loss(插入損失)：正向輸入端到正向輸出端之間的光功率損耗

$$I.L_{1-2} = -10\log\frac{2}{1} \quad (3.4)$$

$$I.L_{2-3} = -10\log\frac{3}{2} \quad (3.5)$$

Isolation(隔絕度)：反向輸入端到反向輸出端之間的光功率損耗

$$Isolation_{2-1} = -10\log\frac{1}{2} \quad (3.6)$$

$$Isolation_{3-2} = -10\log\frac{2}{3} \quad (3.7)$$

### 3.4 光分波多工

光分波多工(Wavelength Division Multiplex, WDM)可在一條光纖中同時傳送不同光波長，提升光纖的使用效率。分波多工提高了光纖的傳輸能力，並且不需以複雜的終端電路設備，就可以完成。圖 3.8 所示為分波多工與解分波多工[23]。

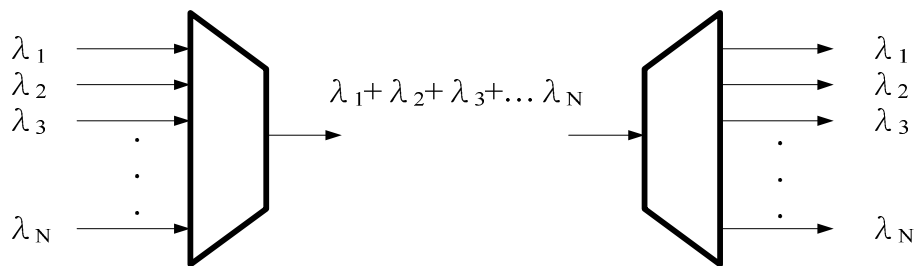


圖 3.8 分波多工/解分波多工

### 3.5 光纖雷射(Fiber LASER)

在光纖通信系統中，所使用的光源主要是雷射二極體，雷射二極體所放出來的雷射光有很強的單色性，線寬很小，也有很高的方向性。

雷射形成要素：

增益介質(Gain Medium)：摻鉕光纖

共振腔(Resonance Cavity)：光纖光柵

泵浦光源(Pump Source)：980 nm Laser Diode

利用光纖光柵加上摻鉕光纖，兩光柵之間相當於諧振腔，用 980 nm 或 1480 nm 泵浦雷射激發，鉕離子就會增益放大。由於光柵的選頻作用，諧振腔只能反饋某一特定波長的光，輸出單頻雷射，再經過光隔離器即能輸出線寬窄、功率高和雜訊低的雷射。

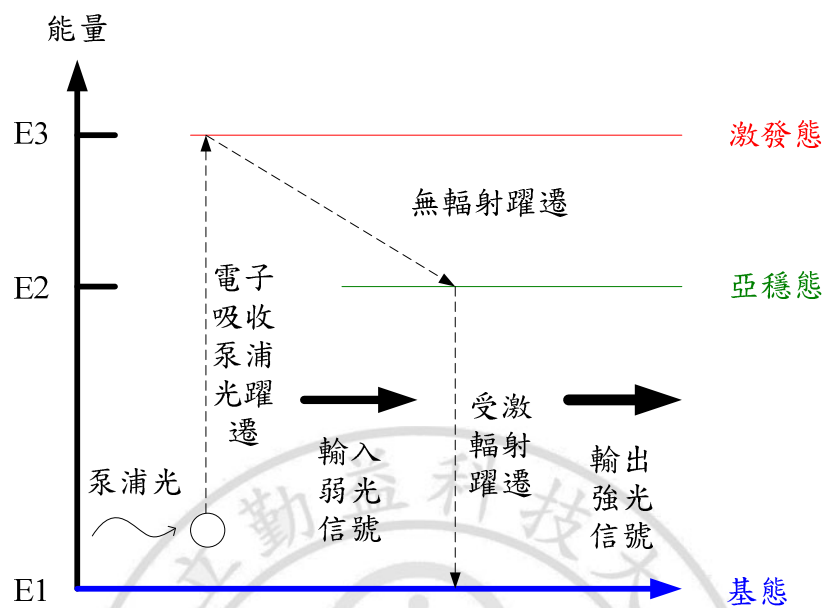


圖 3.9 鉕離子能階圖

圖 3.9 為鉕離子能帶圖。當泵浦光源為 980 nm 時，可將其視為三能階系統，當泵浦光源注入摻鉕光纖時，基態(Ground State)能階的鉕離子會躍遷到較高能階的激發態(Excited State)，激發態因非發光衰減(Non-radiative Decay)的影響使生命週期變短，很快的就掉到亞穩態能階(Metastable State)。由於鉕離子在亞穩態能階生命週期較長，所以鉕離子會在此能階累積而形成居量反轉(Population Inversion)。當波長為 1530 nm ~ 1550 nm 的信號光入射摻鉕光纖時，信號光將激發亞穩態的離子，引起激發性輻射(Stimulated Emission)的發生，產生與信號光相



同波長、相位及方向的光子，達成光信號放大的作用。若無信號光入射時，在亞穩態的鉅離子經過一段時間會以自發性輻射(Spontaneous Emission)的方式會到基態能階而放出光子，這些相位與方向隨機的自發性輻射光會再受到放大，稱為增幅自發放射(ASE：Amplified Spontaneous Emission)。當 ASE 在由光纖光柵所組成的共振腔中來回反射共振時，若增益大於共振腔損失，且波長符合雷射共振條件，光纖雷射便可產生而輸出[24]。圖 3.10 為實驗用 980 nm 的半導體雷射，圖 3.11 為內部結構圖，圖 3.12 為 980 nm Pump LD 輸出，圖 3.13 為我們本實驗所使用的光纖雷射結構圖，3.14 為光纖雷射輸出光譜。

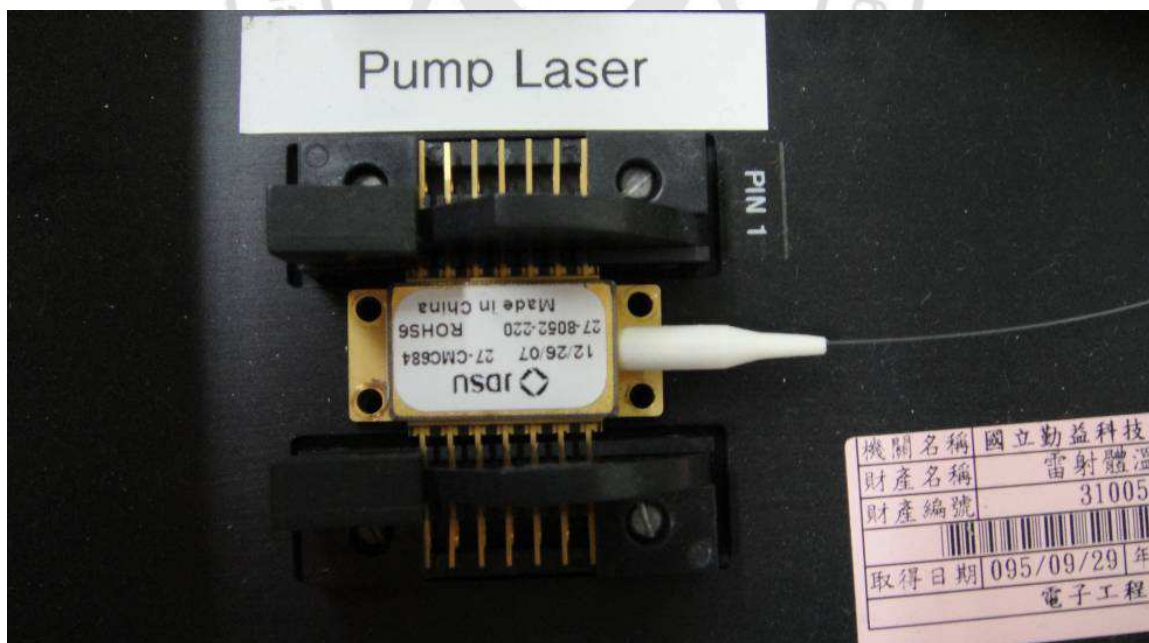


圖 3.10 雷射二極體模組實體圖

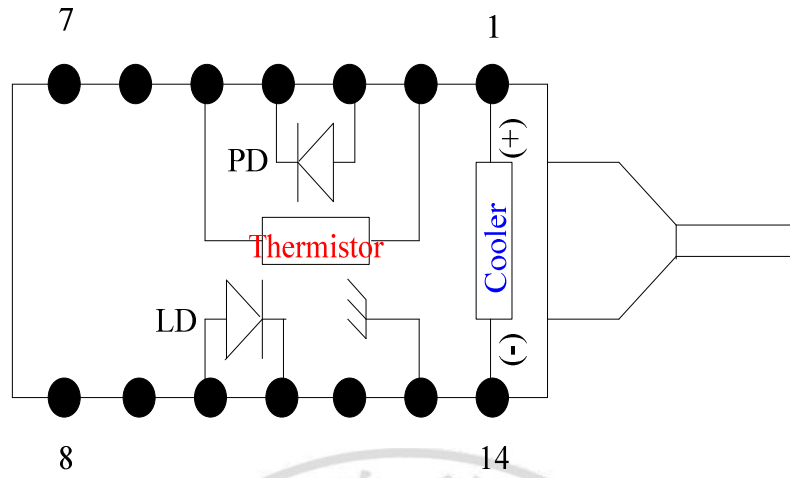


圖 3.11 雷射二極體內部結構圖

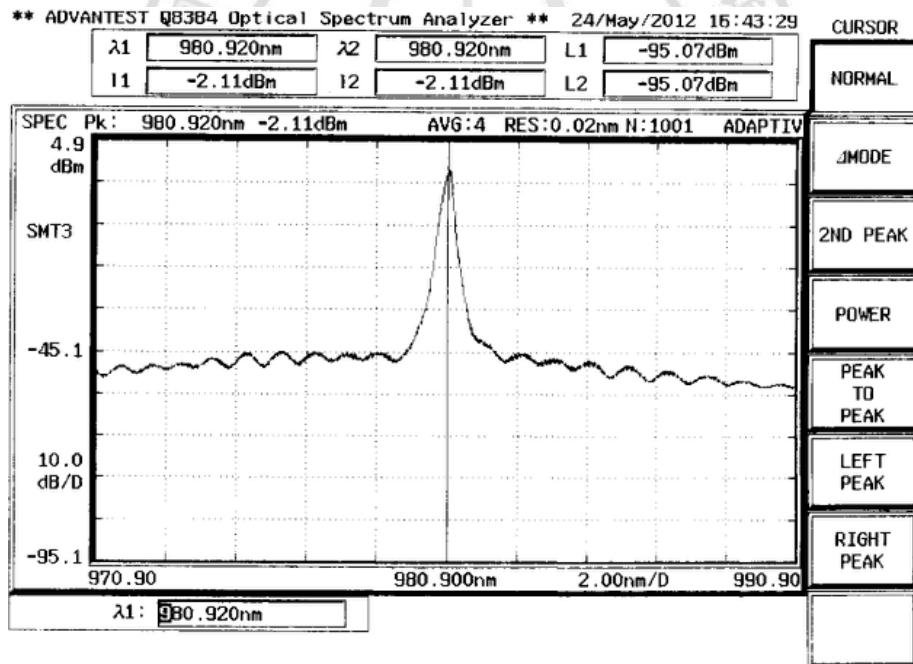


圖 3.12 980 nm Pump LD 輸出光譜

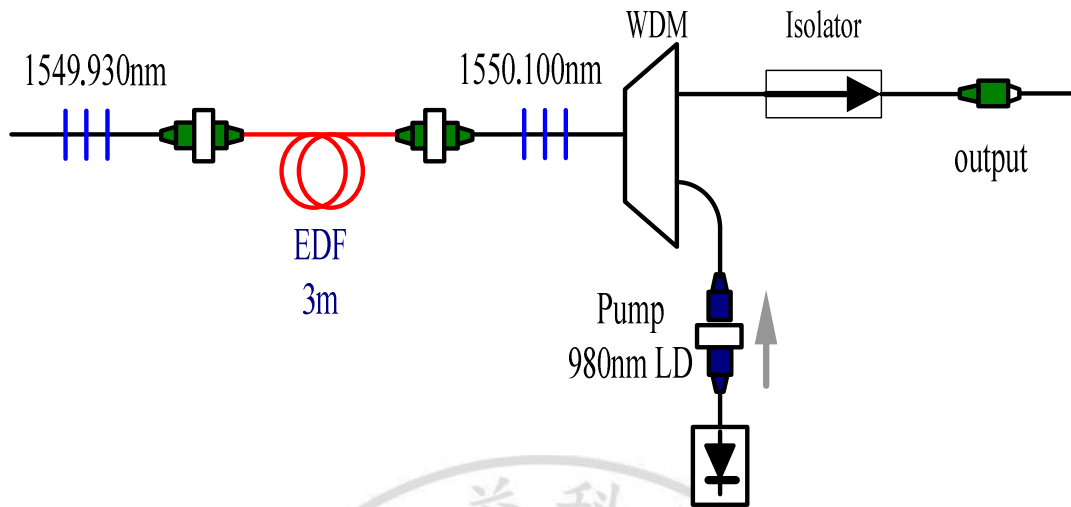


圖 3.13 光纖雷射架構圖

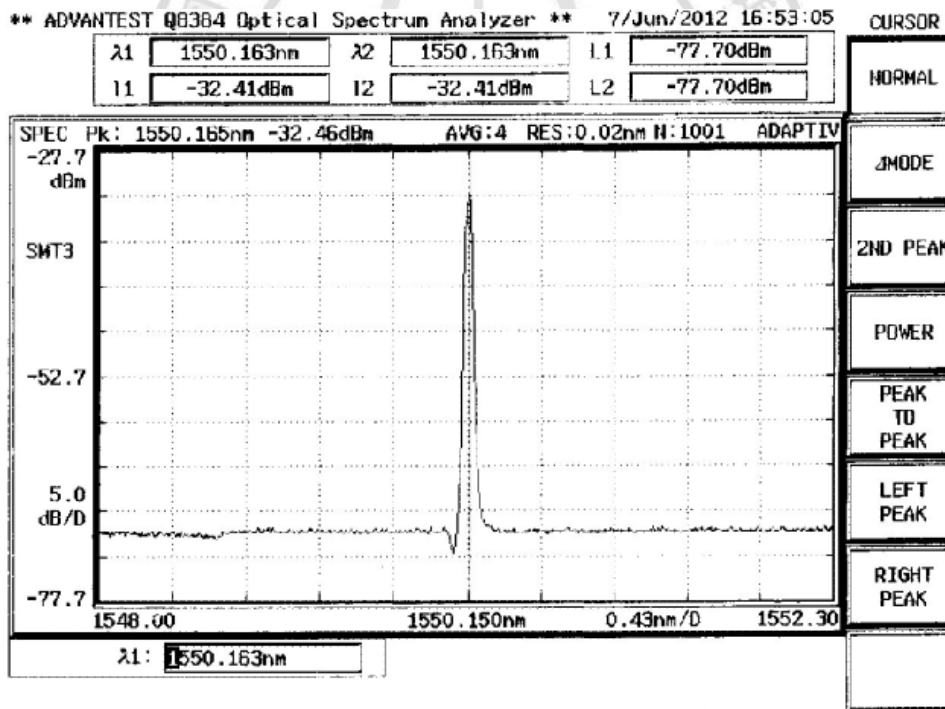


圖 3.14 光纖雷射輸出光譜

## 第四章 地震感測系統原理與分析

### 4.1 實驗架構

完整的地震感測系統如圖 4.1 所示，為我們一開始所提的架構。

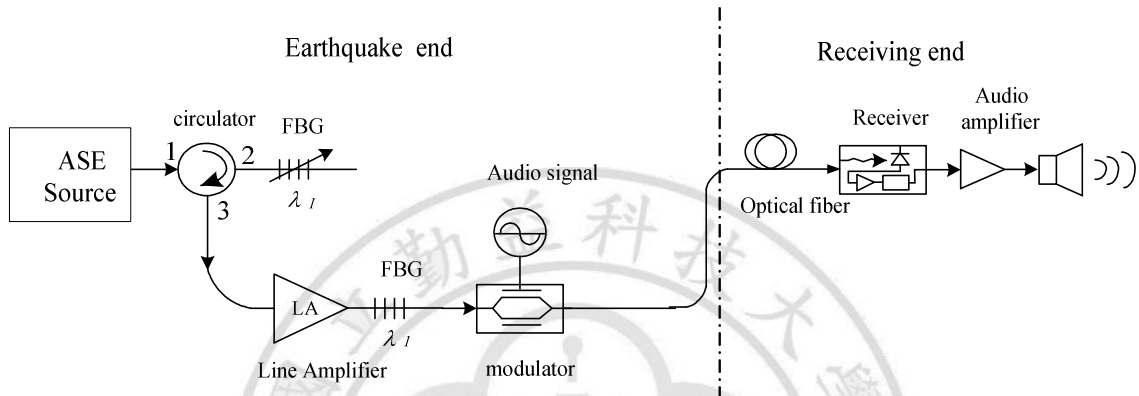


圖 4.1 地震感測系統架構圖

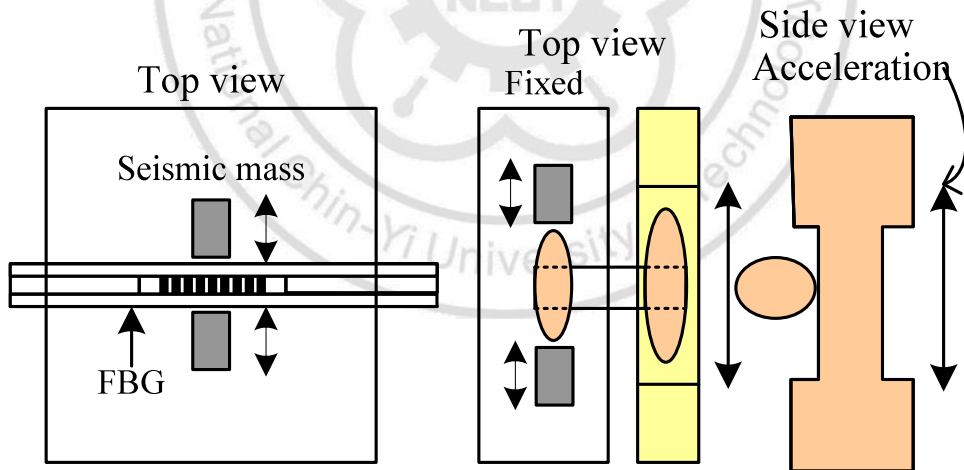


圖 4.2 光纖光柵感測器

圖 4.1 分為地震端和接收端，我們利用兩個相同波長的光纖光柵分別接到光循環器的埠 2 及埠 3，圖 4.2 為本實驗所使用的光纖光柵感測

器，把光纖光柵用矽膠封住，並且再外加木製的架構，如圖 4.3 所示；只要木製結構前面的木塊左右移動並且帶動木製結構上的轉動軸，讓結構裡的兩根木塊發生動作，使其碰觸在光纖光柵感測器上，如圖 4.4 所示，光纖光柵中心波長就會位移，從 1550.380 nm 位移至 1550.536，如圖 4.5 所示。



圖 4.3 光纖光柵加上木製架構



(a)



(b)

圖 4.4 碰觸光纖光柵感測器

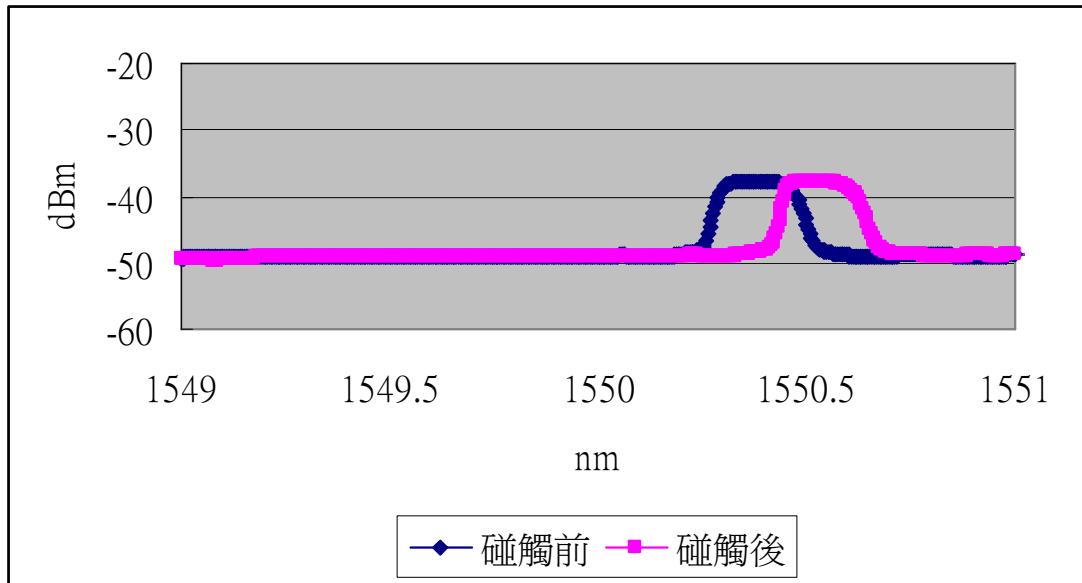


圖 4.5 感測用光纖光柵波長位移圖

當 ASE 光源進入光循環器之 1 埠到 2 埠時，在光纖光柵產生反射波，此反射波依序到達循環器之 3 埠，但因反射波位準較低，故加一級線上放大器(inline amplifier)，才送到相同波長的光柵，然後到光調變的光輸入端，此調變器調變警告之音頻信號，經光纖網路傳送到光接收機，光接收機解調出音頻信號，經音頻放大器放大後送到喇叭。當待測區中光柵沒有受到震動時，喇叭不會發出聲音；待測區中的光纖光柵受到震動時，經應變拉扯，產生中心波長位移才會有警告聲音。亦即，在平時，循環器 3 埠產生的反射光無法穿過光循環器 3 埠之光柵，因為該光柵其波長相同，會產生陷波，阻止傳送；但震動時，在

光循環器 2 埠之光柵產生波長位移，光功率即可穿過光循環器 3 埠之光柵，將音頻信號由光纖送到目的地，喇叭將會發出聲音，達到預警的效果。如圖 4.6 所示，平時中心波長  $\lambda_1$  被循環器 3 埠之光柵阻止，當 2 埠之光柵感測到振動，即刻產生波長偏移，波長變成  $\lambda_n$  時，在 3 埠之光波即可被傳送，其大小依曲線斜率而定，感測到振動幅度愈大，中心波長  $\lambda_n$  愈大，光波輸出功率愈大。

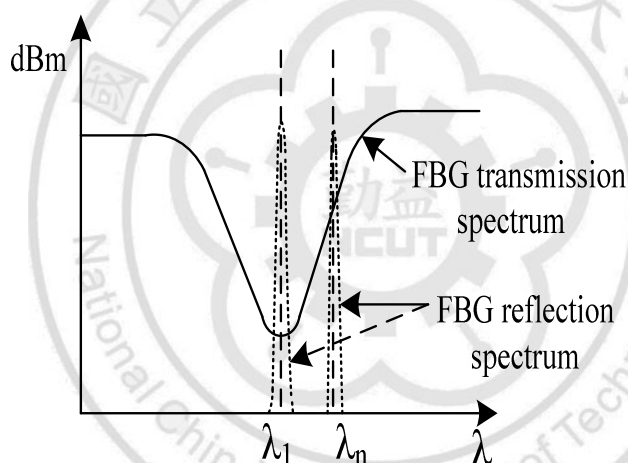


圖 4.6 FBG 的中心波長變化經反射後穿透 FBG 之頻譜

## 4.2 地震感測系統測試分析

首先將光纖光柵受到應力時所產生的中心波長位移表示出來，就是以光纖光柵此特性來達到本實驗要求，圖 4.7 就是以移動平台所做的實驗，當轉動平台時，拉力愈大拉長的距離(cm)愈長，中心波長會往



右移動，以及對應的曲線如圖 4.8 所示。

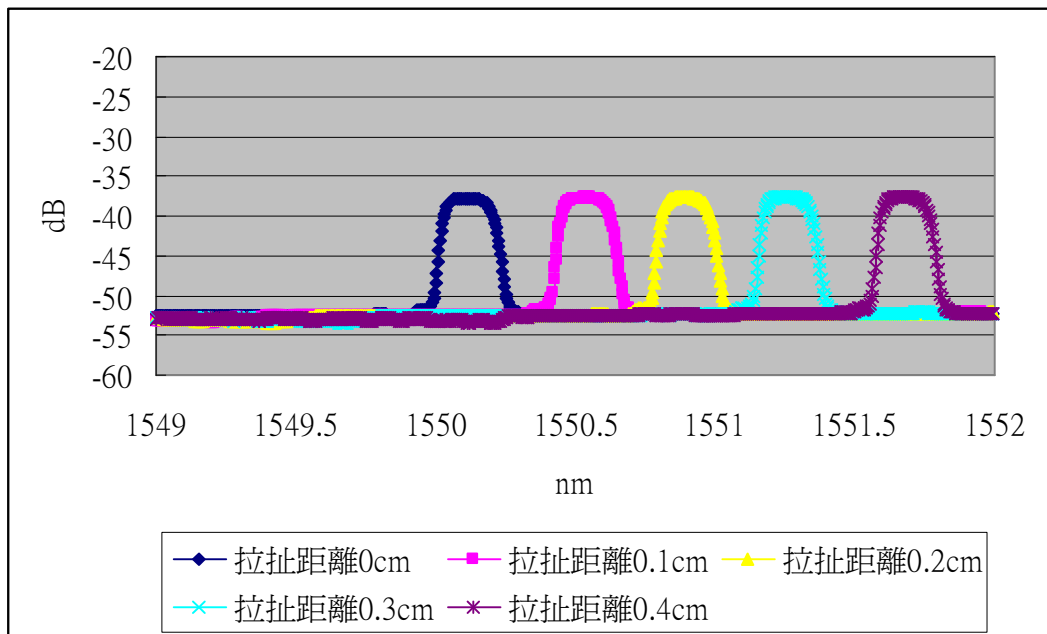


圖 4.7 拉扯距離與中心波長之關係圖

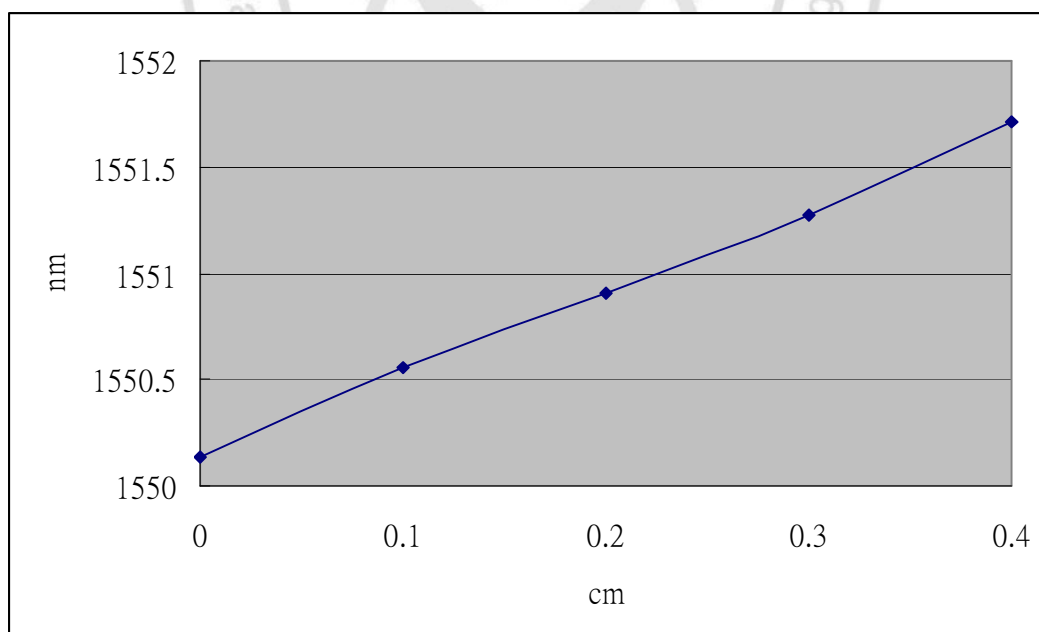


圖 4.8 光纖光柵拉扯距離相對於中心波長變化之關係

當我們以這個架構做實驗時，我們使用 ASE 作為光源時，結果從光循環器埠 2 作感測用的光纖，反射到埠 3 所輸出的中心波長的線寬較寬，所以我們在修改架構，把 ASE 光源改為使用光纖雷射(Fiber LASER)，如圖 4.9 為修改之地震感測器架構。

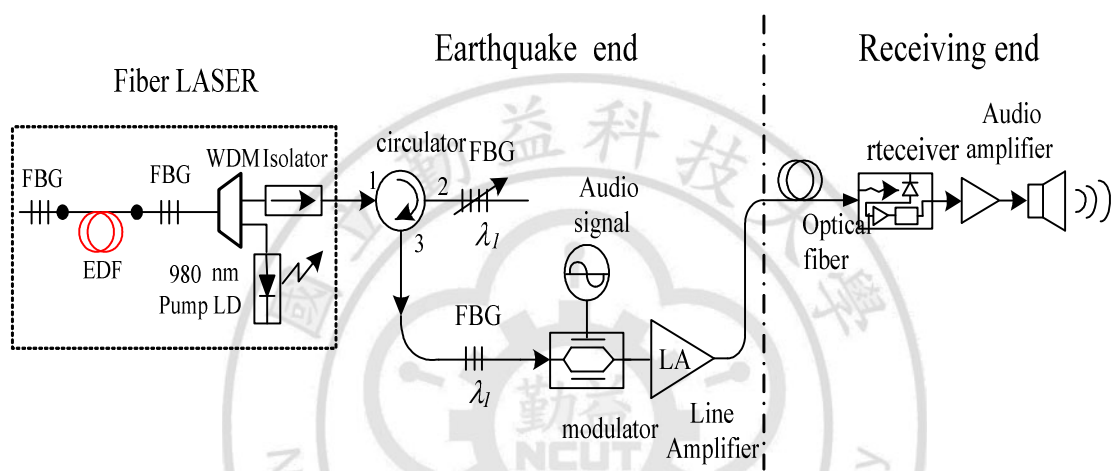


圖 4.9 修改之地震感測器架構

當我們以這個架構在做實驗時，又發現一個問題，所發生的問題就是光循環器埠 3 光纖光柵所輸出陷波(穿透)的深度不足，進而造成濾波不盡理想，所以接下來，我們將進行改善深度不足的工作。

一開始的實驗架構為光循環器埠 3 接一個光纖光柵，我們將 ASE 光源(圖 4.10)加上光譜儀(圖 4.11)觀察輸出的結果。圖 4.12 為本來的架

構，輸出的光譜如圖 4.13 所示，然後選擇波長相近的光纖光柵接著依序比較串接二個、三個、四個光纖光柵所輸出光譜圖的不同。接下來由圖去比較，我們可以比較出串接不同數量之光纖光柵，其輸出的陷波會不同，當接一個光纖光柵時為  $-68.6$  dBm，接二個光纖光柵為  $-72.82$  dBm，接三個光纖光柵為  $-83.1$  dBm，而接到四個光纖光柵時為  $-96.62$  dBm，最後再合併為圖 4.20 比較更為清楚，因此得知當光循環器埠 3 串接多個光纖光柵時，產生更深的陷波，進而較能達到較好的濾波要求。





圖 4.10 ASE 光源

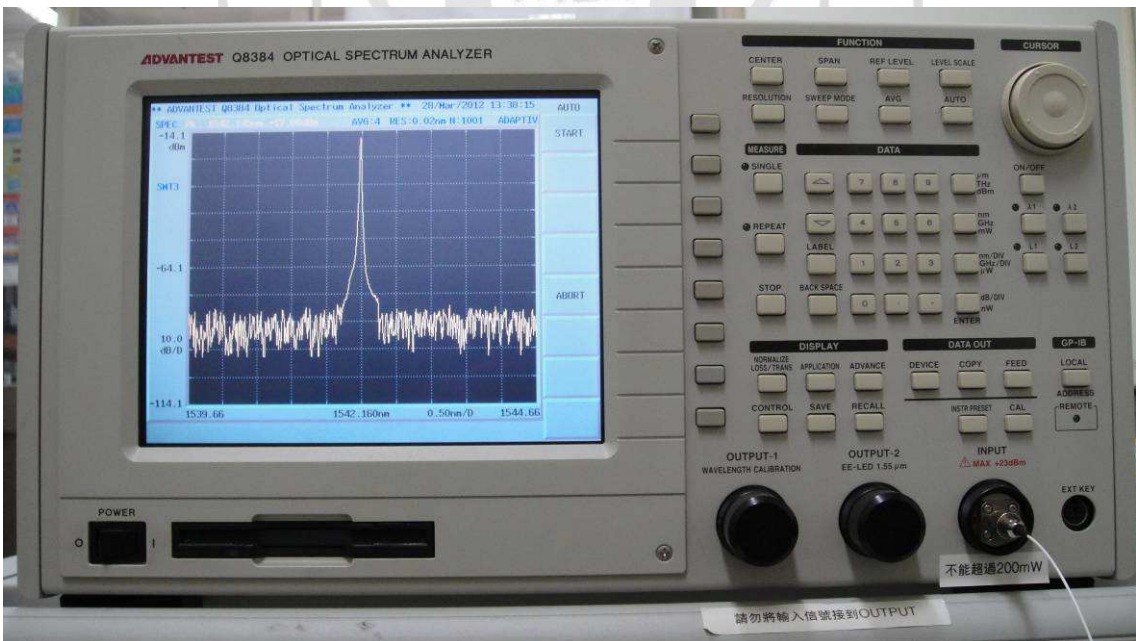


圖 4.11 光頻譜分析儀

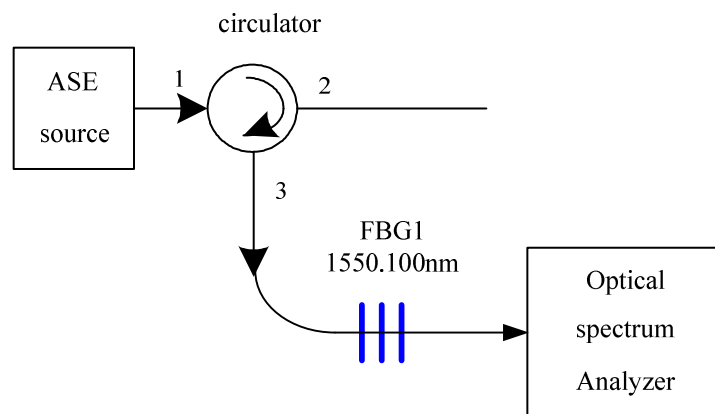


圖 4.12 串接一個 FBG 架構圖

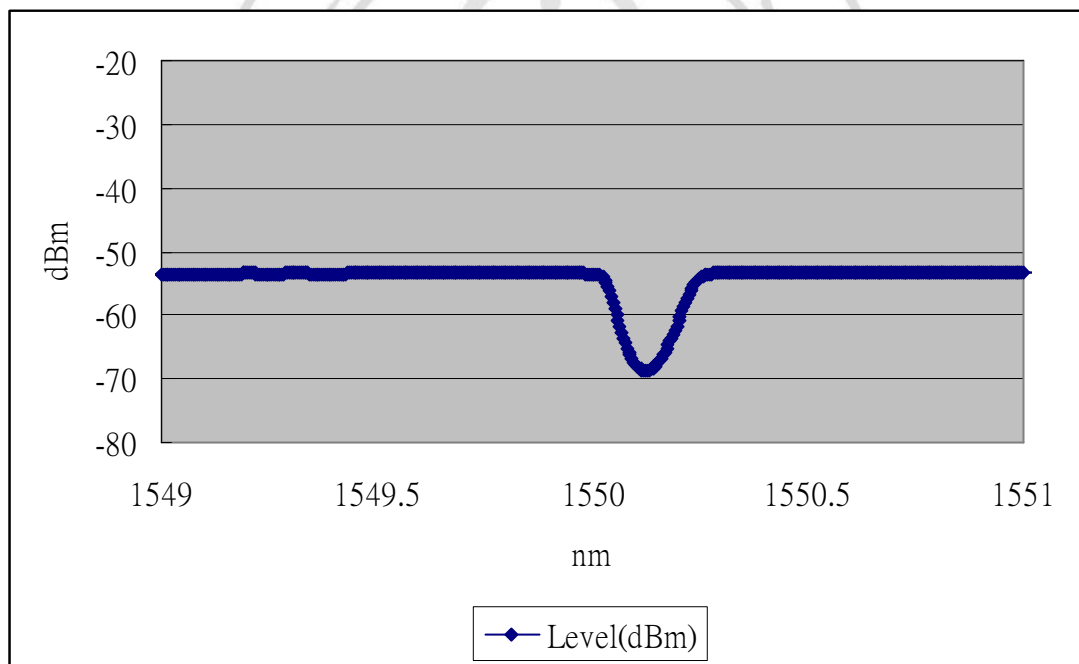


圖 4.13 串一個 FBG 輸出光譜圖

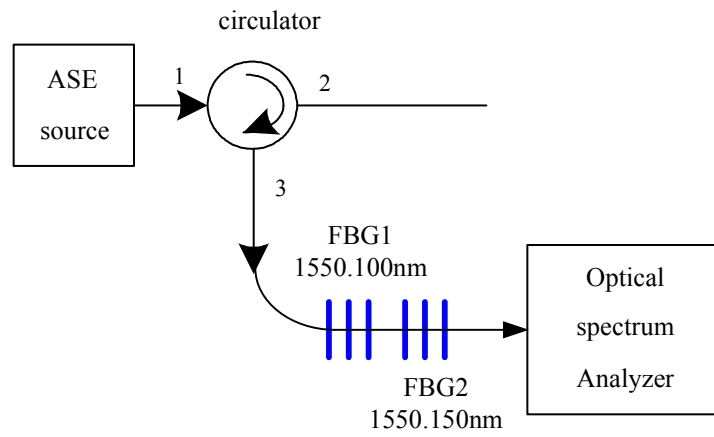


圖 4.14 串接二個 FBG 架構圖

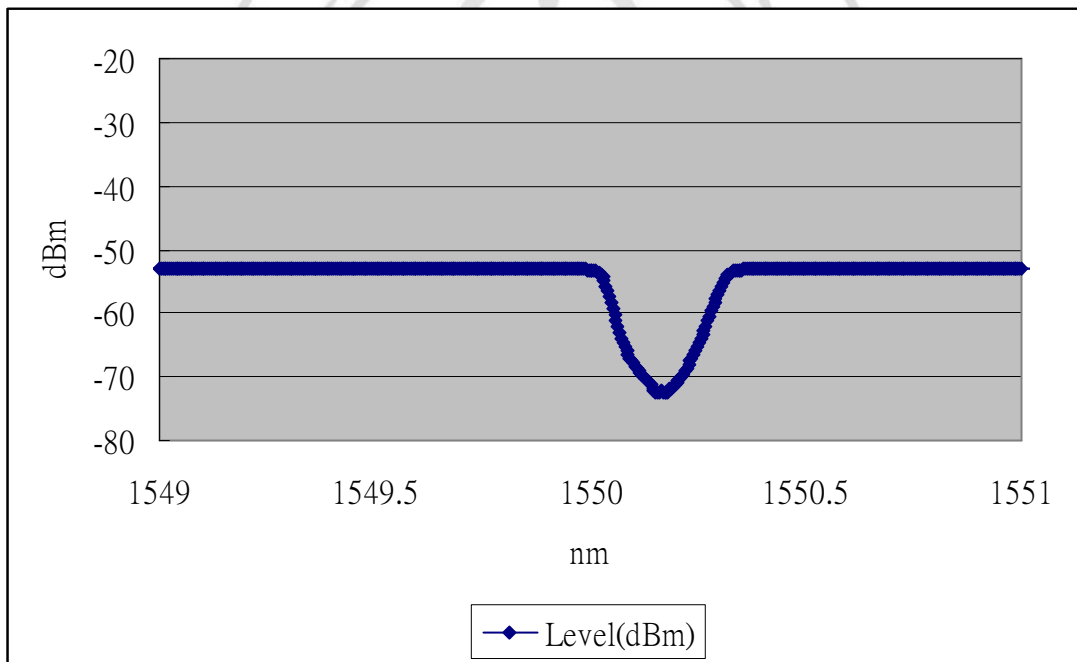


圖 4.15 串二個 FBG 輸出光譜圖

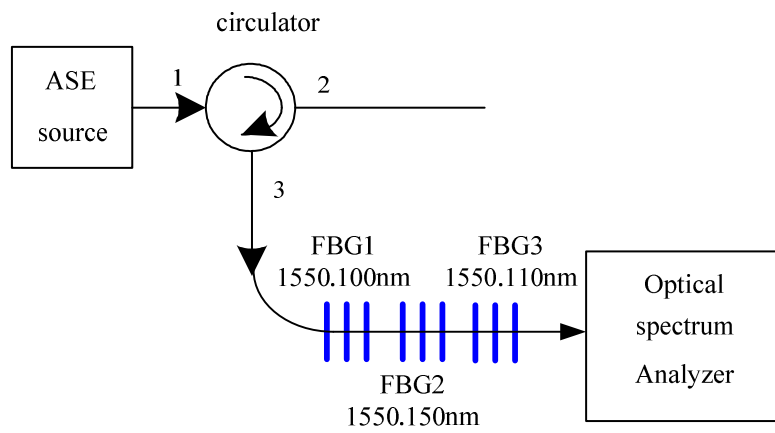


圖 4.16 串接三個 FBG 架構圖

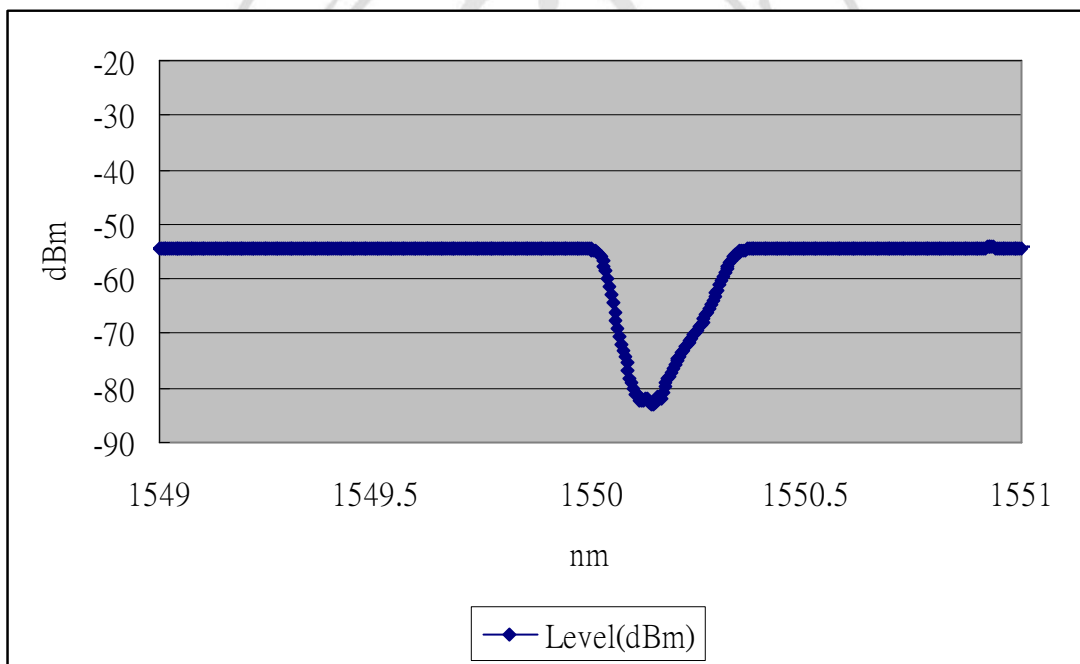


圖 4.17 串三個 FBG 輸出光譜圖

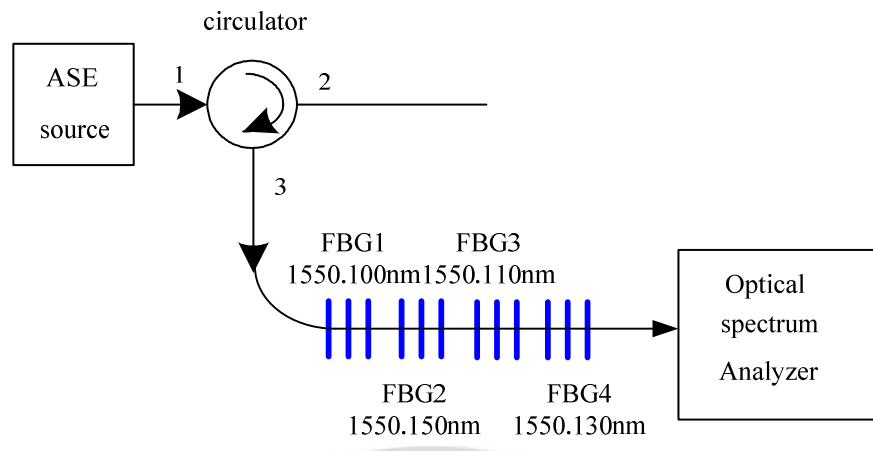


圖 4.18 串接四個 FBG 架構圖

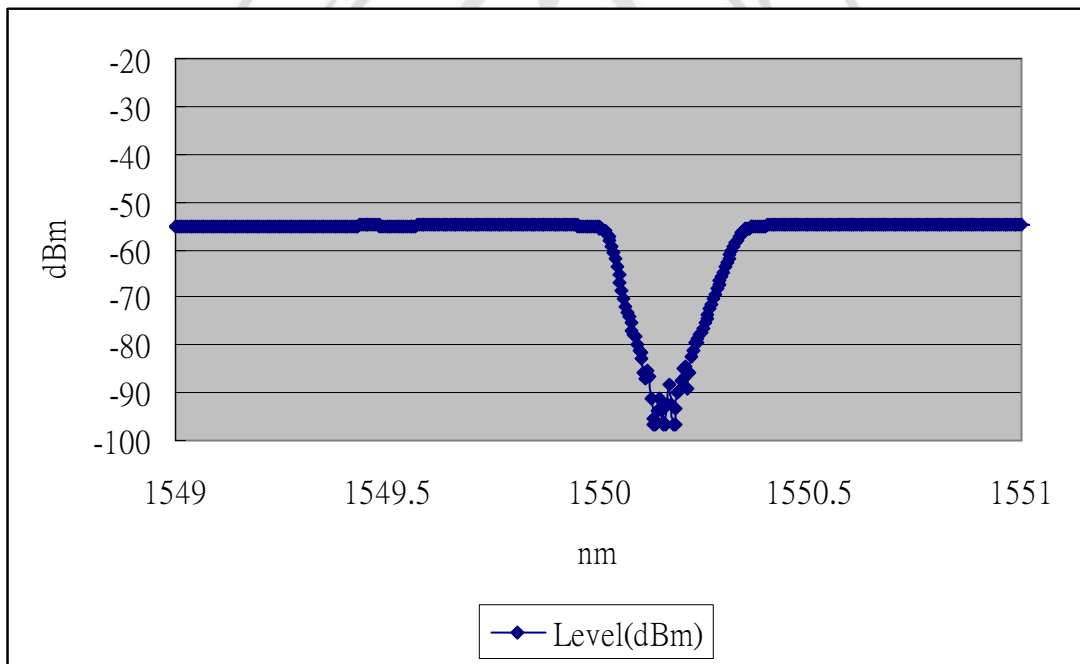


圖 4.19 串四個 FBG 輸出光譜圖



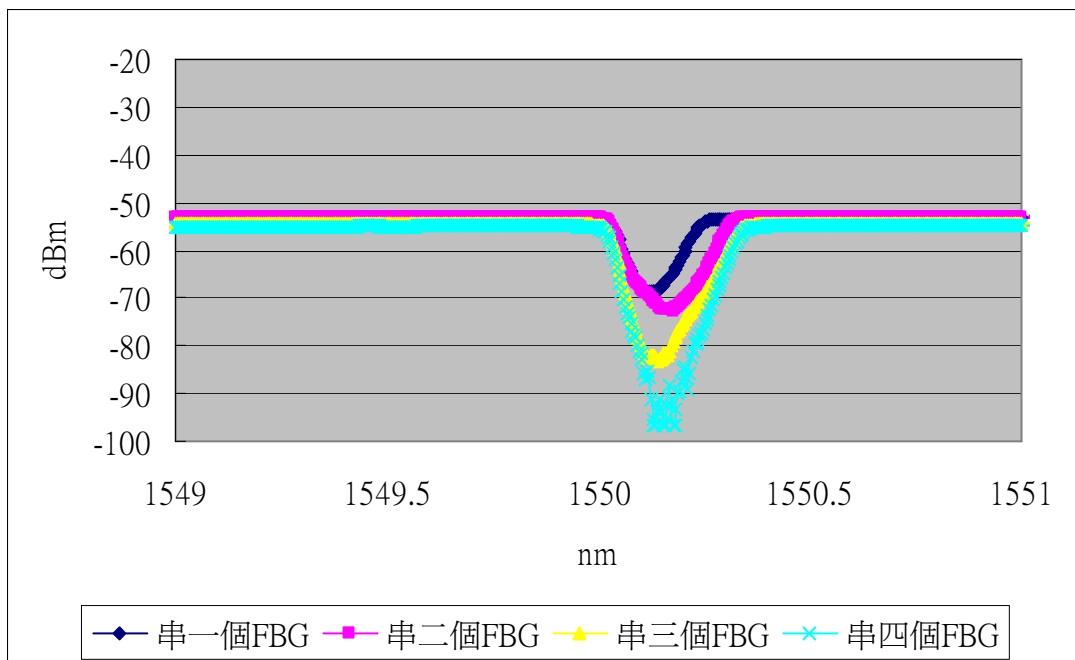


圖 4.20 串不同數量 FBG 比較圖

最後我們將整體的地震感測器再次修改為如圖 4.21 所示，我們將光循環器埠 3 串接上四個波長相近的光纖光柵，圖 4.22 為地震感測系統光譜變化圖，圖 4.23 與圖 4.24 為本實驗所使用的調變器與解調變的實體圖，圖 4.25 為光纖雷射實體配線圖，圖 4.26 為四個光纖光柵串接配線圖。

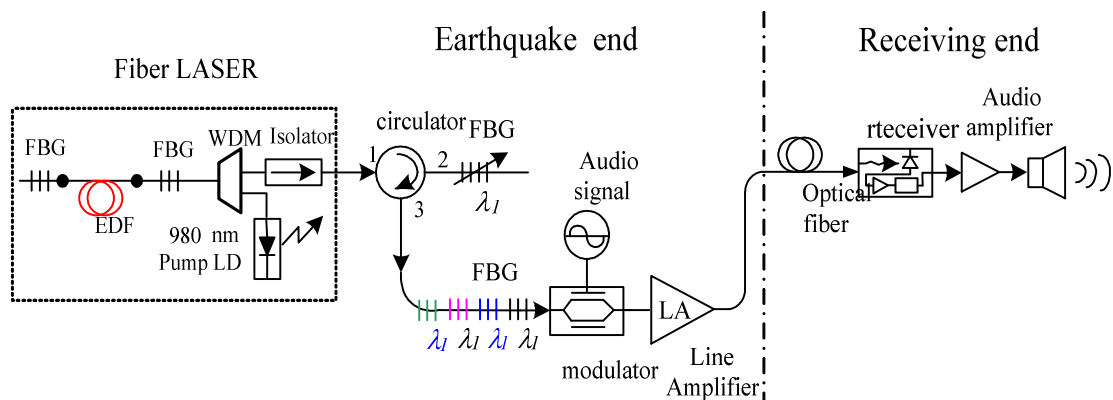


圖 4.21 修改之地震感測系統架構圖

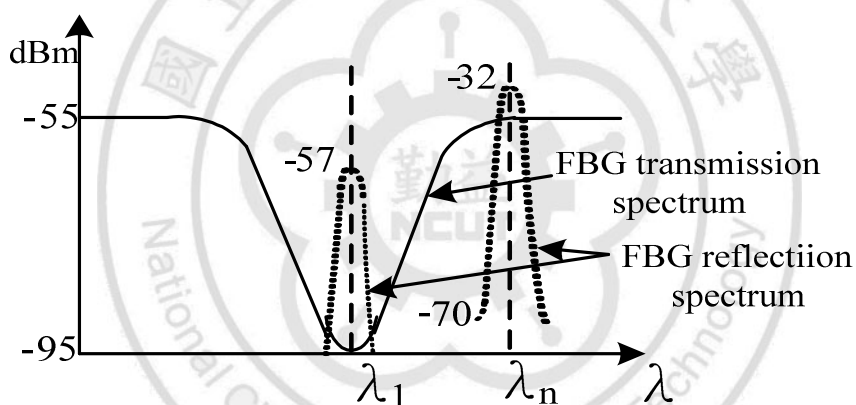


圖 4.22 光纖雷射光在地震感測系統動作示意圖

圖 4.22 所示為地震感測系統光譜變化圖，當沒有地震時，光纖雷射的光會被所串接的光纖光柵所濾除如圖  $\lambda_1$  波形所示，雷射光無法到達調變器，沒有警告聲音產生；而當地震發生時，光循環器埠 2 所接的感測用光纖光柵受到震動，反射光譜就會變成  $\lambda_n$ ，雷射光就會送達

調變器，然後產生警告的聲響。

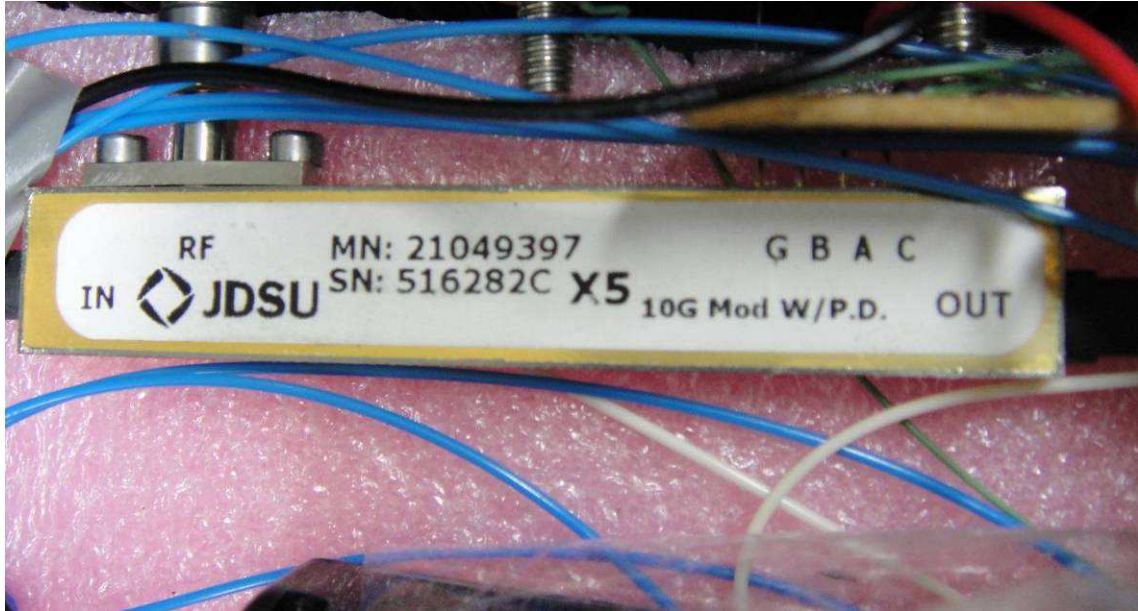


圖 4.23 調變器



圖 4.24 解調變器



圖 4.25 光纖雷射配線圖

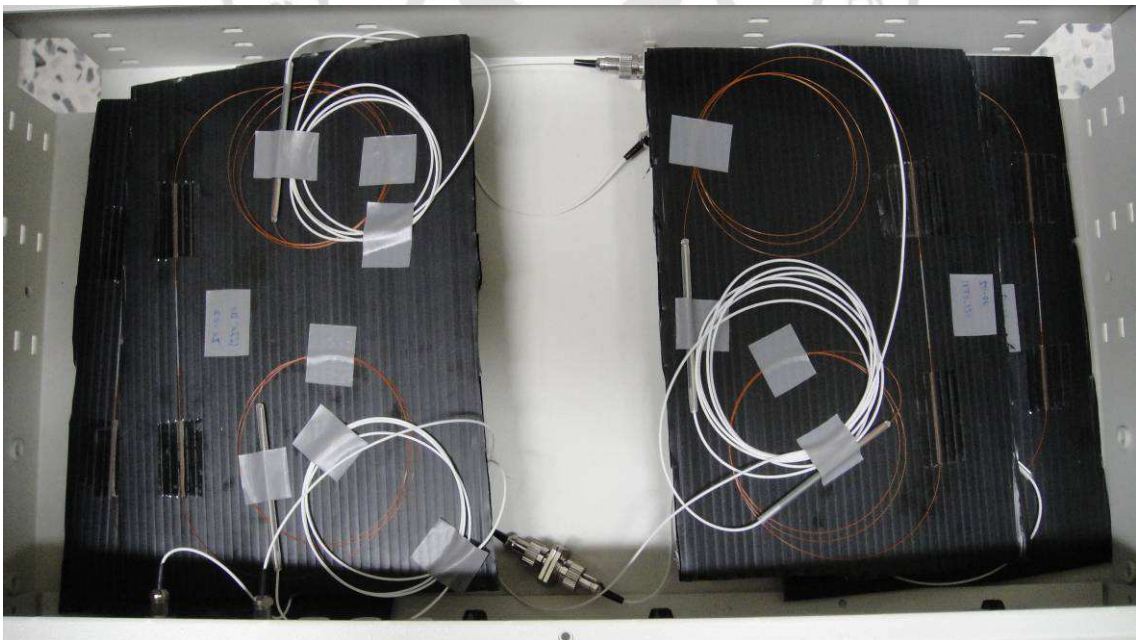


圖 4.26 四個光纖光柵配線圖

當地震感測系統中光循環器埠二感測用的光纖光柵受到振動時，從光循環器埠 3 所反射輸出再經過四個光纖光柵時所輸出的光譜如圖 4.27 至圖 4.29 所示。

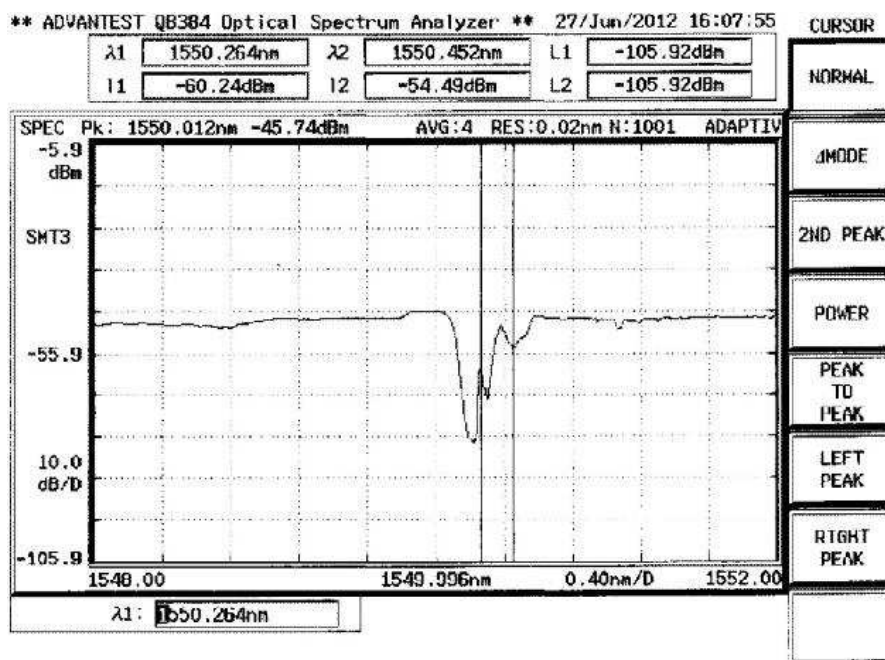


圖 4.27 未受振動時輸出光譜圖

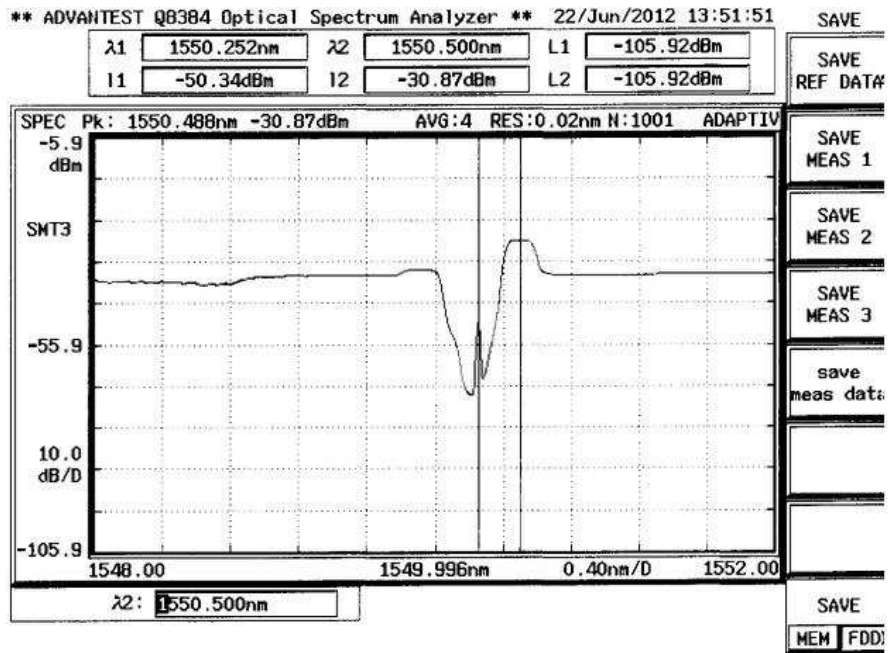


圖 4.28 受振動時輸出光譜圖

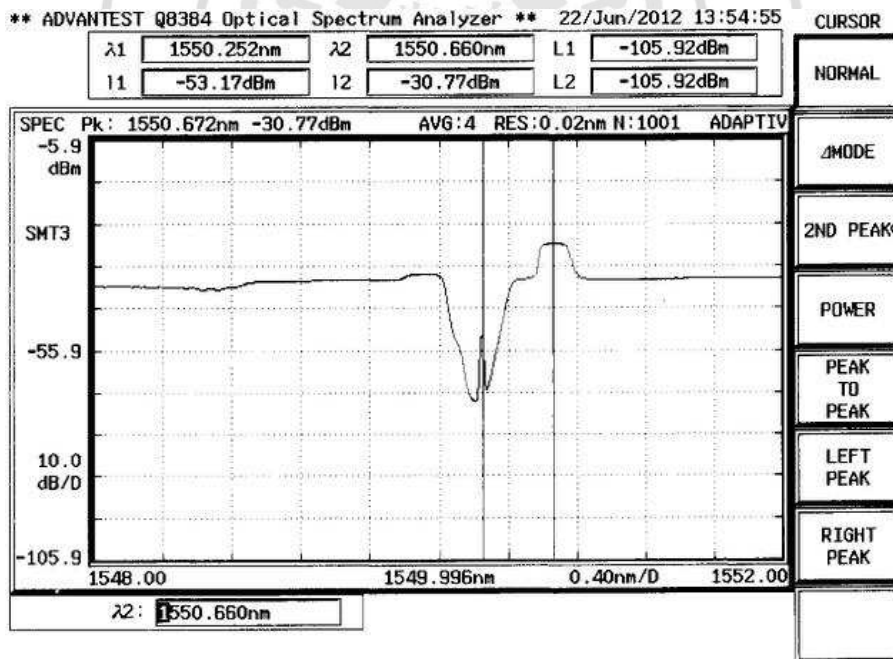


圖 4.29 當受到較大振動時輸出光譜圖

### 4.3 成果與檢討

本實驗中所預期的效果已初步達成，當光循環器埠 2 的光纖光柵感測器受到應力時，所產生的反射波長經過光循環器埠 3 再傳送至整個光纖網路到接收端再經喇叭輸出，進而達到預警的效果。實驗中遇到較大的問題為實驗中所使用的光纖光柵中心波長要相近是比較困難的；實驗當中，無論是光纖雷射中的光纖光柵，還是光循環器埠 2 感測用的光柵以及光循環器埠 3 的光柵，只要中心波長較不能相近的話，所呈現出的實驗結果就會較不理想，這也是實驗中需要花較多的時間解決的問題，因為每一條光纖光柵寫製出來的中心波長多少還是有差異，所以只能儘量選擇相近的中心波長做實驗。假如中心波長還是有點差異的話，就必須拉扯光纖光柵產生應力，然後固定住，使中心波長稍微位移，讓每一條的中心波長比較相近，這樣子實驗才能得到較理想的結果。在光循環器埠 2 用於感測的光纖光柵做實驗時必須小心，因為感測器很靈敏但也較容易斷裂，只要有一點點應力就能產生中心波長的位移，所以實驗時要小心謹慎防止此光纖光柵斷裂。

## 第五章 結論

隨著科技的發展與進步，光纖的技術已經愈來愈成熟，光纖光柵做為感測器已廣泛地應用在各種領域中。而光纖光柵感測器具有直徑細、重量輕、低損耗、靈敏度高、抗電磁干擾、可靠性佳、環境抵抗能力佳等優點，使光纖光柵受到更廣泛的注意。在本篇中，我們使用布拉格光纖光柵的特性架構出地震感測系統，並且達到預警的效果。而一開始所提出的架構，所呈現出來的動作較不符合預期，接下來修改感測器架構，進而達成我們較預期的動作。而本實驗中還有最重要的一點就是當光源的光纖雷射輸出波長以及光循環器埠2作感測用的光纖光柵中心波長以及埠3所串接的光纖光柵中心波長，要盡量選擇中心波長相近的，所實驗出來的效果才能更完善，輸出的聲音也能更有大小聲之區別，如果當光纖光柵的中心波長不相近時，光就會直接穿透光纖光柵輸出產生聲音，就達不到我們想要預警的結果。

本文成功作出一維震動之感測，依實際需要可作上下與左右震動之二維感測，而警告信號可改良為較清晰悅耳之音調，並且期望可以再做出架構更好的布拉格光纖光柵感測器，靈敏度可以再提高，進而再多增加避難的時間。



## 參考文獻

- [1] V. S. Sudarashnam and k. Srinivasan, "Static Phase Change in Fiber Optic Coil Hydrophone," Applied Optics, Vol.29, No.6,pp 855-863, 1990.
- [2] R. Aashia, K. V. Madhav, B. Srinivasan, and S. Asokan , "Strain-Temperature Discrimination Using a Single Fiber Bragg Grating," Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 22, pp778-780, 2010.
- [3] T. A. Berkoff and A. D. Kersey, "Experimental Demonstration of a Fiber Bragg Grating Accelerometer," IEEE Photo.Technol.Lett., Vol. 8, pp.1677-1679, Dec.1996.
- [4] H. J. Sheng, M. Y. Fu, T. C. Chen, W. F. Liu, and S. S. Bor, "A Lateral Pressure Sensor Using a Fiber Bragg Grating," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, pp. 1146-1148, 2004.
- [5] H. I. Zhao, Y. L. Xiong, J. Zhang and S. R. Wang, "Measurement of Power Frequency AC Current Using FBG and GMM," Electrical Insulating Materials, Vol. 3, pp. 741-743, 2005.
- [6] J. Mora, A. Diez, J. L. and M. V. Andres, "A Magnetostrictive Sensor Interrogated by Fiber Gratings for DC-Current and Temperature Discrimination," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No, 12, 2000.
- [7] A. Mita and I. Yokoi, "Fiber Bragg Grating Accelerometer for Structural Health Monitoring," Fifth International Conference on

- Montion and Vibration Control (MOVIC 2000), pp. 4-8 Dec. 2000, Sydney, Australia.
- [8] Jack Wu, Vlastimil Masek , and Michael Cada. “The Possible Use of Fiber Bragg Grating based Accelerometers for Seismic Measurements,” Electrical and Computer Engineering, CCECE '09. Canadian Conference on, pp890-863, 2009.
- [9] Y. L. Chen, Q. C. Shan, “Investigation on the Applications of Fiber Reinforced Composite and Optical Fiber Sensors,” Taipei, Taiwan, 2005.
- [10] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides : Application to Reflection Filter Fabrication,” Applied Physics Letters, Volume 32, pp. 647-649, 1978
- [11] G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” Opt. Lett., Vol. 14, pp. 823-825, 1989.
- [12] K. O. Hill, G. Meltz, “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview,” Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, pp. 1263-1276, 1997
- [13] Turan Erdogan, “Fiber Grating Spectra,” Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, August 1997.
- [14] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, “Fiber Optic Bragg Grating Sensor,” in Proc. SPIE Fiber Optic & Laser Sensors VII, Vol. 1169, pp. 98-107, 1989.

- [15] Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick, Michel LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askin, M. A. Putnam, and E. Joseph Friebele, "Fiber Grating Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, 1997.
- [16] 陳建成, "布拉格光纖光柵振動感測器設計," 國立中山大學電機工程學系碩士論文, 高雄市, 2003.
- [17] 邱宗炫、黃裕文、夏中和, "光纖光柵應變感測器之溫度與膠合效應之研究," *科儀新知*第19卷1期, pp. 21-23, 1997.
- [18] 鐘明志, "長距離溫度無感光纖感測器研究," 國立清華大學光電研究所碩士班論文, 2008.
- [19] 林詠彬, "光纖光柵感測器於土木結構應用之研究," 國立台灣大學土木工程系碩士論文, 2000.
- [20] Chun-Nan Chen, Joseph C. Palais, "光纖通信與應用," 新文京開發出版有限公司, 民國93年.
- [21] 吳曜東, "光纖原理與應用," 全華科技圖書股份有限公司, 民國86年.
- [22] 張安華, "光纖通訊與實習," 新文京開發出版有限公司, 民國94年.
- [23] 原榮, "光纖通訊系統-原理與應用," 新文京開發出版有限公司, 民國93年.
- [24] 黃胤年, "簡易光纖通信," 五南圖書出版有限公司, 民國90年.

### 附錄一 光纖光柵規格

| 名稱          | 中心波長<br>(nm) | 頻寬<br>(nm) | Side-lobe<br>(dBm) | Transmission<br>(dB) |
|-------------|--------------|------------|--------------------|----------------------|
| $\lambda_1$ | 1550.114     | 0.210      | 23.56              | 16.24                |
| FBG1        | 1550.058     | 0.194      | 23.77              | 15.44                |
| FBG2        | 1550.140     | 0.202      | 22.27              | 16.16                |
| FBG3        | 1550.084     | 0.192      | 23.42              | 14.96                |
| FBG4        | 1550.108     | 0.193      | 20.29              | 14.96                |
| Fiber LD1   | 1550.109     | 0.198      | 23.46              | 15.08                |
| Fiber LD2   | 1549.930     | 0.210      | 22.45              | 16.65                |

### 附錄二 光隔離器規格

|                                   |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Product code                      | M-II-2-15-H-L-L-E-1-FC/FC |
| Serial number                     | 00026724                  |
| Fiber type                        | SMF-28                    |
| Operating wavelength (nm)         | 1550 nm                   |
| Insertion loss (dB)               | 0.35 dB                   |
| Isolation (dB)                    | > 43dB                    |
| Polarization dependent loss (dB)  | 0.02 dB                   |
| Polarization mode dispersion (ps) | < 0.07 ps                 |
| Return loss (dB)                  | > 55/50 dB                |

### 附錄三 光循環器規格

|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Product code               | M-CN-5A-L-E-1-FC/FC |
| Serial number              | 02019499            |
| Fiber type                 | SMF-28              |
| Insertion loss (dB)<br>1→2 | 0.83                |
| Insertion loss (dB)<br>2→3 | 0.94                |
| Isolation (dB)<br>2→1      | $\geq 40$           |
| Isolation (dB)<br>3→2      | $\geq 40$           |
| Return loss (dB)           | $\geq 50$           |
| Directivity                | $\geq 50$           |
| PDL (dB)                   | $\leq 0.15$         |
| PMD (dB)                   | $\leq 0.1$          |

## 附錄四 雷射二極體規格

| Parameter                        | Symbol        | Test Conditions                                   | Minimum | Maximum    |
|----------------------------------|---------------|---|---------|------------|
| Operating case temperature       | $T_{op}$      | -   | -5°C    | 75°C       |
| Storage temperature              | $T_{stg}$     | 2000 hours  | -40°C   | 85°C       |
| Laser operating temperature      | $T_{LD}$      | -   | -5°C    | 50°C       |
| LD reverse voltage               | $V_r$         | -   | -       | 2.5 V      |
| LD forward current               | $I_{f\_max}$  | 48 hours maximum                                  | -       | 1200 mA    |
| LD reverse current               |               | -   | -       | 10 $\mu$ A |
| PD reverse voltage               | $V_{PD}$      | -   | -       | 20 V       |
| PD forward current               | $I_{PF}$      | -   | -       | 10 mA      |
| LD electrostatic discharge (ESD) | $V_{ESD\ LD}$ | C = 100 pF, R = 1.5 k $\Omega$ , human body model | -       | 1000 V     |
|                                  | $V_{ESD\ PD}$ | C = 100 pF, R = 1.5 k $\Omega$ , human body model | -       | 700 V      |
| TEC current                      | $I_{TEC}$     | -   | -0.75 A | 1.5 A      |
| TEC voltage                      | $V_{TEC}$     | -   | -       | 2.5 V      |
| Axial pull force                 |               | 3 x 10 seconds                                    | -       | 5 N        |
| Side pull force                  |               | 3 x 10 seconds                                    | -       | 2.5 N      |
| Fiber bend radius                |               | -   | 16 mm   | -          |
| Relative humidity                | RH            | Non-condensing                                    | 5%      | 95%        |
| Lead soldering time              |               | 300°C   | -       | 10 seconds |

詳細規格請參考：<http://www.jdsu.com/en-us/Pages/Home.aspx>

## 附錄五 調變器規格

| Parameter  | X5            | Z5          |
|--|---------------|-------------|
| Chirp (alpha parameter)                                  | Typical 0     | ±0.7        |
| Optical insertion loss (BOL) <sup>1</sup>                | Typical       | 4.5 dB      |
| Optical return loss (input and output ports)             | Typical       | 40 dB       |
| Optical on/off extinction ratio                          |               |             |
| Low frequency  | Typical       | 27 dB       |
| PRBS <sup>2</sup>  | Typical       | 15 dB       |
| E/O bandwidth (-3 dB electrical, linear fit 2 to 15 GHz) | Typical       | 12 GHz      |
| S11 (130 MHz to 10 GHz)                                  | Typical       | 10 dB       |
| Drive voltage (RF port) <sup>3</sup>                     | Typical 5.5 V | 4.5 V       |
| V <sub>π</sub> bias port at 40 kHz                       | Typical 4 V   | 2.5 V       |
| Bias voltage range <sup>4</sup>                          | Typical       | -15 to 15 V |
| RF port resistance (DC)                                  | Typical       | 40 Ω        |
| Bias port resistance (DC)                                | Typical       | 1 MΩ        |
| Photodetector extinction ratio <sup>5</sup>              | Typical       | 6 dB        |
| Photodetector O/E bandwidth                              | Typical       | 100 kHz     |
| Photodetector responsivity (referenced to output power)  | Typical       | 20 mA/W     |
| Photodetector phase tracking error <sup>6</sup>          | Typical       | -5 to 5°    |
| Photodetector dark current (at -5 V, room temperature)   | Typical       | 5 nA        |
| ΔR/ΔT <sup>7</sup>                                       | Typical       | ±0.2 dB     |
| ΔR/Δλ <sup>8</sup>                                       | Typical       | ±0.3 dB     |

詳細規格請參考：<http://www.jdsu.com/en-us/Pages/Home.aspx>

## 附錄六 解調變器規格

| General Specifications             |                            |                            |                       |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Detector:                          | InGaAs PIN                 | Gain Switch:               | 8-Pos Rotary          |
| Active Area:                       | Ø1mm (0.8mm <sup>2</sup> ) | On / Off Switch:           | Slide                 |
| Surface Depth:                     | 0.07" (1.9mm)              | Output:                    | BNC                   |
| Wavelength Range:                  | 700-1800nm                 | Optical Head Size:         | 2.76" x 2.06" x 0.88" |
| Peak Wavelength (λ <sub>p</sub> ): | 1550nm                     |                            | 70.1 x 52.3 x 22.4 mm |
| Peak Response:                     | 0.95 A/W @ λ <sub>p</sub>  | Weight <sup>3</sup> :      | 0.15 / 2.1lbs         |
| Output Voltage <sup>1</sup> (50Ω): | 0-5V                       | Accessories:               | SM1T1, SM1RR          |
| (Hi-Z):                            | 0-10V                      | AC Power Supply:           | AC-DC Converter       |
| Output Impedance:                  | 50Ω                        | Power Supply               | 31W                   |
| Max Output Current:                | 100mA                      | Input Power <sup>4</sup> : | 100-120VAC, 50-60Hz   |
| Load Impedance:                    | 50Ω – Hi-Z                 |                            | (220-240VAC -EC)      |
| Gain Adj. Range:                   | 70dB                       | Storage Temp:              | -55 to 125 °C         |
| Gain Steps:                        | 8x 10dB steps              | Operating Temp:            | 0 to 40 °C            |

詳細規格請參考：<http://www.thorlabs.com/index.cfm>

## 作者簡介

姓 名：嚴 建 昌 (Jian-Chang Yan)

出生日期：1987 年 11 月 29 日

籍 貫：台灣省台中市

學 歷：

2003/9~2006/6 嶺東高級中學 資訊科

2006/9~2010/6 國立勤益科技大學 電子工程系 四技部

2010/9~2012/7 國立勤益科技大學 電子工程系研究所 電子組

