

國立交通大學

光電工程學系碩士班

碩士論文

穩定且波長可調的光纖雷射之研究  
Studies of Stable and Wavelength Tunable  
Fiber Lasers

研究生：陸劭晟

指導教授：鄒志偉

中華民國一百零一年六月

# 穩定且波長可調的光纖雷射之研究

學生：陸劭晟

指導教授：鄒志偉 教授

國立交通大學光電工程研究所碩士班

## 摘要

本論文第一部分提出以半導體光放大器為基底之穩定且波長可調 Sagnac 迴路架構的光纖雷射，是以半導體光放大器(Semiconductor Optical Amplifier ; SOA) 為基底並以 Sagnac 迴路作為反射鏡達到單一頻率和節省耗能的環狀光纖雷射結構。在第二個部分我們將提出使用雙反射式結構單一縱模且波長可調的摻鉍光纖雷射，此乃利用一個雙反射式結構線性共振腔的摻鉍光纖雷射並運用一個被動式飽和吸收為基底(Saturated Absorber-Based ; SAB)的濾波器和帶通濾波器(Tunable Bandpass Filter ; TBF)來達到單一模態(SLM)的雷射輸出並且可以調變波長。第三部分提出利用 Sagnac 迴路並輸出穩定連續的連續波之光學注入波長可調半導體雷射架構，藉由使用以 Sagnac 迴路架構自行注入(Self-injected) Fabry-Perot 雷射二極體，並藉由調整 FP-LD 的溫度使得波長的平移以達到這個雷射架構中連續的波長調變。第四部分提出藉由光學注入 Fabry-Perot 雷射二極體和反射式半導體光放大器之單一頻率和穩定的波長可調雷射並可行長距離的光纖傳輸。此四種光纖雷射架構之輸出功率、可調變之波長範圍、旁模壓抑比(Side-Mode Suppression Ratio ; SMSR)和輸出穩定性皆被實驗展現和探討。

# Studies of Stable and Wavelength Tunable Fiber Lasers

Student : Shao-Sheng Lu

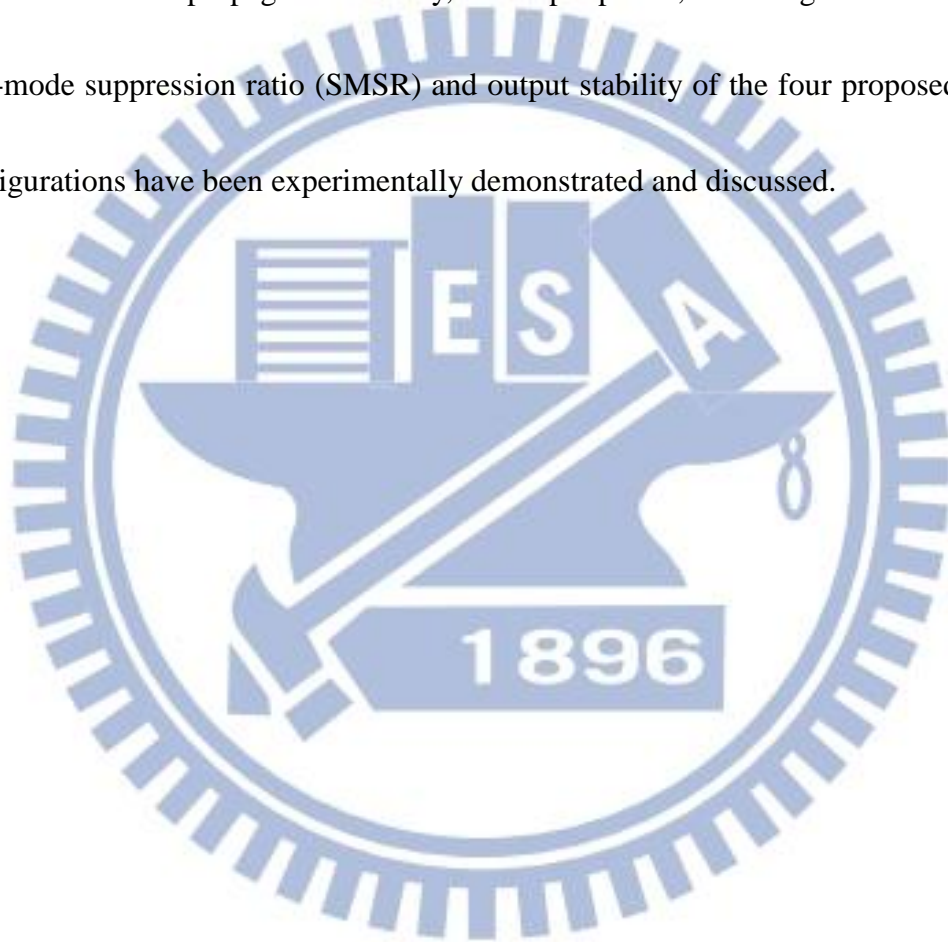
Advisor : Prof. Chi-Wai Chow

Institute of Electro-Optical Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

In the first part of this thesis, we proposed a stable and wavelength-tunable semiconductor optical amplifier SOA-based fiber laser with Sagnac ring configuration. Here, this fiber ring laser is SOA-based with Sagnac loop mirror to achieve single-frequency output and save energy power. In the second part, we proposed a dual reflected structure erbium-doped fiber (EDF) laser in single-longitudinal-mode (SLM) for wavelength-tuning. The dual reflected structure of EDF laser with a linear cavity employing a passive saturated absorber based (SAB) filter and tunable bandpass filter (TBF) for the SLM lasing and wavelength tuning. In the third part, we proposed a using Sagnac loop of optical-injected semiconductor laser scheme for stable and continuous wave (CW) wavelength-tuning. It is by using self-injected Fabry-Perot laser diode (FP-LD) with

Saganc loop scheme. And to achieve the continuous wavelength tuning, we can adjust the temperature of FP-LD for wavelength shifting in the laser scheme. In the fourth part, we proposed a stable wavelength-tuning laser in single-frequency by optical-injected FP-LD and reflective semiconductor optical amplifier (RSOA) for long fiber distance propagation. Finally, the output power, wavelength tunable range, side-mode suppression ratio (SMSR) and output stability of the four proposed laser configurations have been experimentally demonstrated and discussed.





## 致謝

兩年的研究生生涯很快的就要到了尾聲，首先感謝我的指導教授鄒志偉老師，從對光纖通訊領域的懵懂無知，慢慢成長到現在，對基礎知識的了解，還有對專業領域的認知，再來感謝工研院的葉建宏博士，一路帶領我做實驗，從最基本的架構開始，到種種較複雜的架構，以及各種不同的實驗元件的認識與著手，並且替我解決許多難題，非常感謝他們的指導與關心，讓我的研究進度能夠順利達成。

另外還要感謝一進來帶領著我們新生成長的王家軒學長，從光纖通訊的最基本開始教導我們，還有教會我們使用模擬軟體，還有指導我們如何操作實驗儀器，以及如何進行實驗的吳郁夫學長、施富元學長，在他們細心的指導之下，我們才有能夠獨立進行實驗的能力，並且當實驗不順利時，用他們親身經驗來告訴我們哪個環節可能出了差錯，讓我們能從錯誤中學習和成長，再來謝謝一路陪我學習和成長的同學黃博彥、林彥希，使得我在課業上能有個照應，不是孤軍奮戰，有人可以討論和相互砥礪，還有一直陪伴我們的實驗室學長楊凌岡，以及實驗室的夥伴們宋峻宇、劉育峯，還有後來一起加入的賴致維和王尹辰，很感謝你們的陪伴，為我的研究生生活增添色彩，希望大家畢業以後都能夠達到自己追求的梦想。

101 年 6 月

陸劭晟

僅誌於交大光通訊系統實驗室

# 目錄

|  |      |
|--|------|
| 中文摘要.....                                    | i    |
| 英文摘要.....                                    | ii   |
| 致謝.....                                      | iv   |
| 目錄.....                                      | v    |
| 圖目錄.....                                     | viii |
| 第一章 緒論                                       |      |
| 1.1 光纖雷射.....                                | 1    |
| 1.2 迴路型雷射.....                               | 4    |
| 第二章 實驗原理                                     |      |
| 2.1 光放大器原理與介紹.....                           | 5    |
| 2.2 摻鉍光纖放大器.....                             | 5    |
| 2.3 半導體光放大器.....                             | 8    |
| 2.4 Fabry-Perot 雷射二極體.....                   | 9    |
| 2.4.1 Fabry-Perot 雷射二極體原理.....               | 9    |
| 2.4.2 雷射二極體速率方程式的討論.....                     | 13   |
| 第三章 以半導體光放大器為基底之穩定且波長可調 Sagnac 迴路架<br>構的光纖雷射 |      |
| 3.1 實驗簡介.....                                | 20   |

|   |                |    |
|---|----------------|----|
| 3.2   | 實驗架構與操作原理..... | 20 |
| 3.3   | 實驗結果與分析.....   | 21 |
| 3.4   | 討論.....        | 23 |
| 第四章 使用雙反射式結構單一縱模且波長可調的摻鉍光纖雷射                                      |                |    |
| 4.1   | 實驗簡介.....      | 29 |
| 4.2   | 實驗架構與操作原理..... | 30 |
| 4.3   | 實驗結果與分析.....   | 31 |
| 4.4   | 討論.....        | 33 |
| 第五章 利用 Saganc 迴路並輸出穩定連續的連續波之光學注入波長可調半導體雷射架構                       |                |    |
| 5.1   | 實驗簡介.....      | 39 |
| 5.2   | 實驗架構與操作原理..... | 40 |
| 5.3   | 實驗結果與分析.....   | 41 |
| 5.4   | 討論.....        | 43 |
| 第六章 藉由光學注入 Fabry-Perot 雷射二極體和反射式半導體光放大器之單一頻率和穩定的波長可調雷射並可行長距離的光纖傳輸 |                |    |
| 6.1   | 實驗簡介.....      | 49 |
| 6.2   | 實驗架構與操作原理..... | 50 |

|                  |    |
|------------------|----|
| 6.3 實驗結果與分析..... | 51 |
| 6.4 討論.....      | 53 |
| 第七章 結論.....      | 60 |
| 參考文獻.....        | 62 |





# 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 2-1 摻鉕光纖雷射放大器(EDFA)架圖.....                 | 16 |
| 圖 2-2 鉕離子能帶圖.....                            | 17 |
| 圖 2-3 縱模的駐波.....                             | 18 |
| 圖 2-4 Fabry – Perot 雷射二極體.....               | 19 |
| 圖 3-1 SOA 為基底並以 Sagnac 迴路作為反射鏡的光纖環狀雷射架構..... | 24 |
| 圖 3-2 所提出之光纖雷射的輸出頻譜圖.....                    | 25 |
| 圖 3-3 輸出功率和 SMSR 在不同輸出波長下的關係圖.....           | 26 |
| 圖 3-4 所提出雷射在不同 SOA 驅動電流下的輸出功率圖.....          | 27 |
| 圖 3-5 所提出的雷射架構於輸出功率和輸出波長的穩定性.....            | 28 |
| 圖 4-1 雙反射式摻鉕光纖雷射實驗架構.....                    | 34 |
| 圖 4-2 雙反射式結構摻鉕光纖雷射的輸出光譜圖.....                | 35 |
| 圖 4-3 在不同波長下信噪比與輸出功率的趨勢圖.....                | 36 |
| 圖 4-4 輸出功率與信噪比(SNR)在不同的激發功率.....             | 37 |
| 圖 4-5 所提出的雷射架構於輸出功率和輸出波長的穩定性.....            | 38 |
| 圖 5-1 所提出的可調波長雷射實驗架構圖.....                   | 44 |
| 圖 5-2 FP-LD 和所提出的雷射架構的輸出光譜圖.....             | 45 |
| 圖 5-3 雷射架構在不同波長的輸出功率和邊模壓制比.....              | 46 |
| 圖 5-4 所提出的雷射架構於輸出功率和輸出波長的穩定性.....            | 47 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 圖 5-5 MLM FP-LD 輸出中心波長在不同溫度.....   | 48 |
| 圖 6-1 所提出的穩定波長可調的雷射實驗架構.....       | 54 |
| 圖 6-2 所提出雷射架構的輸出頻譜.....            | 55 |
| 圖 6-3 所量測到的 RSOA 輸出功率在不同的操作電流..... | 56 |
| 圖 6-4 雷射架構在不同波長的輸出功率和邊模壓制比.....    | 57 |
| 圖 6-5 所提出的雷射源的 BER 及眼圖.....        | 58 |
| 圖 6-6 所提出的雷射架構於輸出功率和輸出波長的穩定性.....  | 59 |



# 第一章

## 緒論

### 1.1 光纖雷射(Fiber Laser)

把光作為通訊的觀念可以追溯到較遠古的時代，當時是用火光來傳遞訊號作為警戒用途，後來則是在海上航行的船隻利用燈號來作為通訊用途，而第一項屬於「光通訊」的專利是在西元1880年由貝爾(Alexander Graham Bell)發明的「光話機(Photophone)」獲得，貝爾將太陽光聚成一道極為狹窄的光束，照射在很薄的鏡子上，當人們發出的「聲波」讓這面薄鏡產生振動時，反射光會產生變化，使得偵測器產生變動來改變「電阻值」，而接收端則利用變化的電阻值產生電流，來還原成原來的聲波。當貝爾測試光話機成功時，他寫下了「我聽到光線的笑聲、咳嗽聲和歌聲」。但這項發明只能傳播約200公尺，因為藉由空氣傳遞的光束，遇到的狀況都不盡相同，例如霧、雨或雪還有空氣都能阻擋光線。當時貝爾曾預測這項發明在科學世界裏，將遠比電話、留聲機和麥克風更有趣，但光線在空氣中的衰減速度很快，這使「光通訊」並不是很實用。之後在西元1870年，約翰道耳(John Tyndall)作了一個實驗，讓光波在由桶底流出的水柱中傳播，因為光是「電磁波」的一種，所以我們稱水柱那樣可以傳導光波的物質為「波導(waveguide)」。

這個理論則於西元1910年，由Hondros及Debye首先提出。而近代的「光纖通訊」開始於1960年代，但使「光纖」成為現在及未來通訊的趨勢是因兩個事件的激發，第一件是在西元1960年美國物理學家梅門(Theodore Harold Maiman)使紅寶石振

盪產生「雷射光」。第二件則是在西元1966，科學家高錕(Charles Kao)和George A.Hockham，他們預測所製作的光纖，能夠讓光波在其中傳輸一公里，仍有原來1%的光能量，這樣「光纖」就能像電纜一樣，作為傳輸工具。但是當時即使是最好的光纖，光波在其中傳輸20公尺就使光能量降低至原來能量的1%了。另外，在西元1970年，貝爾實驗室製造出可在常溫下連續振盪的「半導體雷射(Semi-Conductor-Laser)」還有康寧玻璃工廠製造出可以每公里衰減小於20分貝的低損失的「石英質光纖」後，使「光纖」的技術一日千里。今日，由於光電科技的發展，每公里的衰減可低於1分貝，傳輸頻寬高於800MHZ的光電纜已可大量生產，再配合「高階數位多工」技術的發展以及高性能「光電元件」的開發，使每秒傳播速度可高達九千萬，甚至每秒四億位元的高速大容量光通訊系統誕生[1]。

以光纖傳送半導體雷射所發出來的光訊號，已取代以電纜來傳送的電訊號。當然，光纖也組合成光纜，其通訊量、傳訊速度和通話清晰度等，都遠勝電子訊號產生器和電纜的組合。往日臺灣在淹水後電纜線路常會不通，改用光纜即可解決此問題。此外，光纖中的光訊號不會外洩，所以無法偷聽。雷射有線通訊是仍在發展中的科技，日漸多采多姿，當然，其目的在於提升通訊的品質和擴充通訊量[2]。

固態雷射或雷射放大器的光經由全反射於單模光纖(Single Mode Fiber ; SMF)中傳導稱為光纖雷射。光的傳導有很寬的增益區域且有很好的冷卻條件，且光纖



有較大的表面面積可以有效的散熱。除此之外，光纖的波導特性可以降低光束於溫度的干擾 [3] 。

最近，光纖雷射已經是越來越具吸引力的光源由於其可運用在很多方面，像是波長分割多工(Wavelength-division-multiplexing；WDM)光纖通訊系統、光纖偵測和光學測試等等[4-6]。通常一個光纖雷射包括雷射共振腔作為頻率選擇和增益介質去達到居量反轉(Population inversion)[7-8]。在過去的數年間，光纖雷射不同的共振腔的設計已經被提出，包括線性共振腔[9-10]、環狀共振腔[11-12]、環狀共振腔內含 Fabry-Perot etalon[13]、和環狀共振腔的組合[14-15]等等。通常波長選擇元件在共振腔內可以達到光纖雷射的可調性[16]。而摻鉕光纖放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier；EDFA)和半導體光放大器(Semiconductor Optical Amplifier；SOA)為光纖雷射最常使用的兩種增益介質[17-18]。

但光纖雷射有基本的限制就是在光纖內光的強度不能太高，會使得光學的非線性效應被本地電場強度誘發，進而會造成光纖材料的損害。這樣的效應稱為 Photodarkening。在雷射材料中，冷卻並不是那麼有效而且很難將溫度的效應和 Photodarkening 分開。光纖的非線性效應像是 stimulated Raman scattering、four-wave mixing 也可以提供增益用來當作光纖雷射的增益介質[3]。

## 1.2 迴路型雷射

光纖迴路型雷射的發展最早始於1961年[19]，當時所用的是摻釹光纖，核心直徑為 $300\mu\text{m}$ ，該雷射可以產生工作波長為 $0.92\mu\text{m}$ 、 $1.06\mu\text{m}$ 、 $1.35\mu\text{m}$ ，其中以 $1.06\mu\text{m}$ 的泵激效率最高。1973年當時問世不久的低損耗硅光纖被應用於光纖迴路雷射中，當時使用的泵激雷射為半導體雷射[20]；1989年開始，研究重點集中在摻鉺光纖迴路雷射上，因為此類光纖迴路雷射的工作波長集中在 $1.55\mu\text{m}$ 區段，以半導體多波長陣列的泵激雷射可以產生約10W的連續光，並藉由鎖模技術可產生飛秒等級的超短高速脈衝，在光纖通訊、光纖感測與超快速雷射的研究與應用上舉足輕重。

光纖迴路雷射的發展中，產生多種光纖迴路雷射腔的設計[21-22]，其中一種已被實用化的雷射共振腔形式為法布理-伯羅共振腔，其結構為將增益介質置於兩片高反射率的反射鏡間，在光纖迴路雷射中，反射鏡直接與光纖耦合可以避免掉散射造成的光損耗。為使泵激光源避免與反射介質接觸有以下幾種方法：一、在光纖中加入一個帶有光單向器的光耦合器，使大部分的泵激光源藉由耦合器進入光纖迴路雷射的共振腔中，帶有單向器的光耦合器後來被波長分光(WDM)耦合器所取代。二、利用光纖光柵取代反射介質鍍膜而使用在共振腔結構上，對於特定的雷射波長而言，布拉格光柵等同於高反射鏡，對於泵激光波長則可視為高度透明。利用布拉格光柵的另外一個優點，光柵具有高度的光頻率選擇性，兩端都使用光纖光柵將使輸出光能達到單縱模，並窄化輸出光線寬。三、利用光纖環形迴路共振腔，環形迴路共振腔能夠單方向輸出光，應用在光纖迴路雷射上，由於環形迴路沒有反射鏡，損耗將可降低。

## 第二章

### 實驗原理

#### 2.1 光放大器(Optical Amplifier)原理與介紹

光放大器是將光信號直接放到的一種儀器，不需要再將其轉換成電信號再放大，光放大器可以被想成是一個雷射但是沒有光學的共振腔或者是共振腔的回授被壓制住。光放大器在光學的通訊和雷射物理上扮演非常重要的腳色[23]。

在放大光信號這方面有許多不同的物理機制對應在不同主要幾種形式的光放大器。在摻雜光纖放大器(EDFA)和 Bulk 雷射中，受激發射(stimulated emission)發生在放大器的增益介質使得進入的光得到放大。在半導體光放大器中(SOAs)，電子與電洞的重組發生使得光信號放大。在拉曼放大器(Raman amplifiers)中，入射光之光子的拉曼散射在增益介質的晶格中產生與入射光同調的光子。以下將更詳細的介紹實驗所使用到的光放大器。

#### 2.2 摻鉕光纖放大器 (Erbium Doped Fiber Amplifier; EDFA)

摻鉕光纖放大器(EDFA 即在信號通過的纖蕊中摻入了鉕離子  $\text{Er}^{3+}$  的光信號放大器。)是 1985 年英國南安普頓大學首先研制成功的光放大器，它是光纖通信中最偉大的發明之一[24]。

摻鉕光纖是在石英光纖中摻入了少量的稀土元素鉕( $\text{Er}^{3+}$ )離子的光纖，它是摻鉕光纖放大器的核心。從 20 世紀 8 年代後期開始，摻鉕光纖放大器的研究工作不斷取得重大的突破。WDM 技術極大地增加了光纖通信的容量，成為當前光纖通信中應用最廣的光放大器件。



石英光纖摻稀士元素(如 Nd、Er、Pr、Tm 等)後可構成多能級的激光系統，在泵浦作用下使輸入信號光直接放大。提供合適的反饋後則構成光纖激光器。摻 Nd 光纖放大器的工作波長為 1060nm 及 1330nm，由於偏離光纖通信最佳窗口及其它一些原因，其發展及應用受到限制。EDFA 及 PDFA 的工作波長分別處於光纖通信的最低損耗(1550nm)及零色散波長(1300nm)窗口，TDFA 工作在 S 波段，都非常適合於光纖通信系統應用。尤其是 EDFA，發展最為迅速，已實用化。

EDFA 的優點為：具有高放大增益、高輸出光功率、低雜訊指數、增益不受極化方向影響、適用於各種傳輸速率、適用於各種調變型態信號(Time-division Multiplexing；TDM)、WDM、(Frequency-division Multiplexing；FDM)。

光纖放大器一般由五個基本部分組成，它們是摻鉕光纖(Erbium Doped Fiber; EDF)、泵浦鐳射器(PUMP-LD)、光無源器件、控制單元和監控介面(通信介面)。其中光無源器件包括：分波多工器(Wavelength-division Multiplexer; WDM)、光隔離器(Isolator)、光纖連接器(Connector)和光耦合器(Coupler)。WDM 作用是將信號光與泵浦光耦合起來進入摻鉕光纖，光隔離器是防止光路中反向光對 EDFA 的影響，光纖連接器使 EDFA 與通信系統和光纜線路的連接變得容易，光耦合器從輸入和輸出中分路出一部分光(5%左右)送到光偵測器，由控制單元對光纖放大器的工作進行不間斷地控制，監控介面向傳輸系統提供光纖放大器工作狀態資訊，確保光纖放大器作為傳輸系統的一個部件，納入到統一的網路監控之中。



EDFA 的基本結構如圖 2-1 所示，它主要有源媒質(幾十米左右長的摻鉕石英光纖，芯徑 3-5 $\mu\text{m}$ ，摻雜濃度 $(25-1000)\times 10^{-6}$ )、泵浦光源(980nmLD 或 1480nm LD)、光耦合器及光隔離器等組成。信號光與泵浦光在鉕光纖內可以在同一方向(同向泵浦)、相反方向(反向泵浦)或兩個方向(雙向泵浦)傳播。當信號光與泵浦光同時注入到鉕光纖中時，鉕離子在泵光作用下激發到高能階上，並很快衰變到亞穩態能階上，在入射信號光作用下回到基態能階時發射對應於信號光的光子，使信號得到放大。

如鉕離子能帶圖所示，與  $\text{Er}^{3+}$  離子產生光放大效應的能級有三個：激發態、亞穩態、基態。激發態與基態之間的能量差與泵浦光子能量相同，亞穩態與基態之間的能量差與 1550nm 的光子能量相同。

在摻鉕光纖中注入足夠強的泵浦光，就可以將大部分處於基態的  $\text{Er}^{3+}$  離子抽運到激發態上，處於激發態的  $\text{Er}^{3+}$  離子又迅速無輻射地轉移到亞穩態上。由於  $\text{Er}^{3+}$  離子在亞穩態上能級壽命較長，因此，很容易在亞穩態與基態之間形成粒子數反轉，即處於亞穩態的  $\text{Er}^{3+}$  粒子數比處於基態的  $\text{Er}^{3+}$  粒子數多。

當信號光子通過摻鉕光纖，與  $\text{Er}^{3+}$  離子相互作用發生受激輻射效應，產生大量與自身完全相同的光子，這時通過摻鉕光纖傳輸的信號光子迅速增多，產生信號放大作用；只有少數處於基態的  $\text{Er}^{3+}$  離子對信號光子產生受激吸收效應，吸收光子。 $\text{Er}^{3+}$  離子的亞穩態和基態具有一定的寬度，使 EDFA 的放大效應具有一定波長範圍，其典型值為 1530nm 到 1570nm。

Er<sup>3+</sup>離子處於亞穩態時，除了發生受激輻射和受激吸收以外，還要產生自發輻射，即 Er<sup>3+</sup>離子在亞穩態上短暫停留還沒有機會與光子相互作用，就會自發地從亞穩態躍遷到基態併發射出 1550nm 波段的光子，這種光子與信號光不同，它構成 EDFA 的噪聲。由於自發輻射光子在摻鉕光纖中傳輸時也會得到放大，因此在 EDFA 的輸入光功率較低時，會產生較大的噪聲。

### 2.3 半導體光放大器(Semiconductor Optical Amplifier; SOA)

半導體光放大器是以半導體作為增益介質的一種放大器。這種放大器的結構與 Fabry-Perot 雷射二極體類似但有抗反射的設計元件在末端的介面。最近的設計包括抗反射的包覆層、傾斜的波導和窗口區域去降低末端介面的反射率到小於 0.001%。因為這使得共振腔的功率損失大於增益，去避免放大器變作雷射[23]。

半導體光放大器典型的是由 III-V 族元素所構成的半導體像是 GaAs/AlGaAs、InP/InGaAs、InP/InGaAsP 和 InP/InAlGaAs，但是任何直接能隙的半導體像是 II-VI 足元素也是可以使用的。這樣的放大器經常使用在電信通訊系統的末端光纖上，操作的波長在 850nm 到 1600nm 之間，並產生增益最高可到 30dB。

半導體光放大器擁有小的體積且以電激發，具有比 EDFA 成本更低的潛力並且可以嵌入在半導體雷射模組上等等。但是 SOA 之成效仍無法與 EDFA 相比，SOA 有較高的雜訊、較低的增益、由於極化狀態的相依需要適當的調整、和較

高的非線性效應在快速的瞬時。SOA 主要的優勢在於其四種類型的非線性操作 (Cross gain modulation, Cross phase modulation, Wavelength conversion and Four wave mixing)。

而且 SOA 可以與低功率的雷射一起操作，此乃源自於超短的生存時間 (lifetime) 十億分之一秒 (nanosecond) 在高能階時，所以增益可以對激發功率或者信號的功率改變作出快速的反應，並且改變的增益會造成相位的改變進而干擾到信號。這樣的非線性效應表現在光纖通訊上的應用是很嚴重的問題，然而，這也使得 SOA 增益的波長範圍不同於 EDFA 變的可能。

光學上的高非線性效應使得半導體光放大器具有吸引力在所有光學信號的處理像是全光學的切換開關 (All-optical Switching) 和波長轉換 (Wavelength conversion)，在時脈的回復、信號的解多工和型式 (Pattern) 的辨認也已被深入研究。

## 2.4 Fabry-Perot 雷射二極體

Fabry-Perot 雷射二極體具有多模輸出的特性，且其中心波長的位置與其操作電流大小相關。

### 2.4.1 Fabry-Perot 雷射二極體原理

雷射本是「光放大」的抽象觀念。後來因受激而放大的光以反射鏡使放大光回至原半導體中，此回饋作用的光振盪器 (Light-wave Oscillator)，若未說明就



是指振盪器（已從 Laser 衍生出表示雷射振盪之動詞 lase，用於 Lasing diode 等）。雷射光的波長取決於雷射媒質的原子、分子等因素。但實際上因能階的擴展、能隙上能量差的擴展，可能以  $\lambda_0$  為中心，以某種幅度進行受激放出光，其幅度在氣體為 0.005 nm，在固體為 1nm 到 10 nm。半導體中電子發光的幅度達 40 nm。

雷射振盪器需要光回饋於共振器，通常使用兩個反射鏡相向的 Fabry-Perot 型共振器，如圖 2-3 所示，讓光在這些反射鏡中間來回形成駐波，以與駐波相位相同的相位產生受激放射出雷射光。

假設雷射因受激放出光且傳播 1cm 時，所受的增益為  $g$  ( $\text{cm}^{-1}$ )，反射鏡的反射率為  $R_1$ 、 $R_2$  且間隔為  $L$  (cm)，則往復後的光強度與原來一樣為振盪條件（如圖 2-3 所示），設此時的增益為  $g_{\text{th}}$ ，則

$$g_{\text{th}} = \hat{\alpha}_a + (1/2L) \ln(1/R_1 R_2) \quad (2.4-1)$$

半導體雷射會將自由電子吸收的光存在半導體媒質中，在 2.3-1 式中，半導體雷射的  $\hat{\alpha}_a$  約為  $10 \text{ cm}^{-1}$ 、共振器長度  $L$  為 0.03 cm、折射率約為 3.5 以及  $R_1$  與  $R_2$  為 0.3，則  $g_{\text{th}}$  為  $50 \text{ cm}^{-1}$ 。另一方面，光的放大等於全損失（吸收損失與反射損失之和），使雷射振盪的條件為當增益波長幅度內有共振波長的存在，而前述可發光的幅度會比雷射光的幅度大得很多，假設圖 2-3 共振器中的折射率為  $n$ ，因媒質內光半波長為  $\lambda/2n$  的整數  $q$  倍為共振器長度  $L$ ，則共振波長與



共振器長度關係式表成

$$\delta = 2nL/q \quad (2.4-2)$$

因為  $q$  值很大，所以  $\delta \gg |\delta|$ ，故(2.4-2) 可以近似為

$$|\delta| = \delta^2 / 2nL \quad (2.4-3)$$

相對於相差  $2\pi$  之波長的增益  $g$  若要振盪，所需的增益為  $g_{th}$ ，可能有很多波長在振盪，這一些波長形成不同的模稱為縱模（Longitudinal Mode）。雷射光的輸出受限於激發技術、半導體媒質受光破壞等，因各雷射特性而異。Fabry-Perot 雷射二極體 主要是由兩面反射鏡平行放置而形成的共振器，最早的紅寶石雷射也是用兩面平面鏡，後來有設計各種形狀的反射鏡的 Fabry-Perot 雷射二極體。

如圖 2-4 所示兩面反射鏡的長度為  $L$ ，光在端面反射，限制在反射鏡中，形成一種共振器。延  $z$  方向在此介質中傳播方程式為

$$\Phi_{pq}^+ = A_{pq}^+ u_p(x, w_{01}) u_q(y, w_{02}) \exp[-j\hat{a}_{pq}z] \quad (2.4-4)$$

延  $-z$  方向傳播方程式為 2.3-4 式的共軛波

$$\Phi_{pq}^- = A_{pq}^- u_p(x, w_{01}) u_q(y, w_{02}) \exp[+j\hat{a}_{pq}z] \quad (2.4-5)$$

存在共振器內的波為

$$\Phi(x, y, z) = \sum (\Phi_{pq}^+ + \Phi_{pq}^-)$$

p, q

$$= \sum_{p,q} (A_{pq}^+ \exp[-j \hat{a}_{pq} z] + A_{pq}^- \exp[+j \hat{a}_{pq} z]) u_p(x, w_{01}) u_q(y, w_{02}) \quad (2.4-6)$$

假設光在反射鏡  $z=0$  與  $z=L$  處完全反射，又其邊界條件為

$$\ddot{O}(x, y, 0) = \ddot{O}(x, y, L) = 0 \quad (2.4-7)$$

得

$$A_{pq}^+ + A_{pq}^- = 0 \quad (2.3-8)$$

$$\sin(\hat{a}_{pq} L) = 0 \quad (2.3-9)$$

由式 2.3.9 得

$$\hat{a}_{pq} L = n\pi \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

將式  $\hat{a}_{pq} L = k(p+1/2)g_1(p+1/2)g_2 L = n\pi$  帶入上式，整理得

$$kL(p+1/2)g_1 L(p+1/2)g_2 L = n\pi \quad (2.4-10)$$

因  $k=n_1(w/c)$ ， $w=2\pi f$ ，則  $f(n,p,q)$  為(2.3-10)之解，得

$$f(n, p, q) = \frac{c}{2n_1L} \left[ n + \frac{g_1 L(p+1/2)}{\pi} + g_2 \frac{g_1 L(p+1/2)}{\pi} \right] \quad (2.4-11)$$

因  $\lambda(n,p,q) = c/f(n,p,q)$ ，可得

$$\frac{\lambda(n,p,q)}{2n_1} = L / \left[ n + \frac{g_1 L \left( p + \frac{1}{2} \right)}{\pi} + g \frac{g_2 L \left( p + \frac{1}{2} \right)}{\pi} \right] \quad (2.4-12)$$

由式 (2.4-12) 中，因  $g_i L \ll 1$ ，所以  $n$  表示為共振腔長度  $L$  內的半波長數  $\lambda/(2n_1)$ ，因而， $n$  為縱模數， $p$ 、 $q$  分別為  $x$ 、 $y$  方向的縱模數。波長間格

$\Delta\lambda$  可由式(2.4-12) 得

$$\Delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial\lambda}{\partial p} \Delta p + \frac{\partial\lambda}{\partial q} \Delta q = \frac{c}{2n_1 L} (\Delta n) + \frac{cg_1}{2n_1 \pi} (\Delta p) + \frac{cg_2}{2n_1 \pi} (\Delta q) \quad (2.3-13)$$

又設波長間格  $\Delta n = 1$ ，得  $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{(2n_1 L)}$  (2.3-14)

則任兩波長間距為  $\Delta\lambda_i = \frac{g_i \lambda^2}{2 \partial n_1} \quad (i = 1, 2, 3 \dots)$  (2.3-15)

## 2.4.2 雷射二極體速率方程式的討論

半導體雷射的光譜控制與波長穩定，在 1980 年有人用外部注入光方法來鎖模[25-26]，一般的 Fabry-Perot 雷射二極體的波長穩定性不是很好，而且因為有很寬的光譜增益 (Spectral Gain) 所以是多模 (Multimode) 態分佈。外部注入光可以讓 Fabry-Perot 雷射二極體在快速調變電流下切換單模 (Single-Mode) 波長[27-29]。此外，半導體光譜增益可以使用單模注入鎖模 (Single-Mode Injection Locking) 方法[30-31]。載子的濃度計算跟半導體中的增益有關[32]，只有在雷射

二極體穩態時才考慮主動區中載子濃度與光子密度變化，否則一般情況下都忽略不列入載子濃度計算。

考慮兩個半導體雷射相互注入，一個是單模（Single-Mode）雷射，另一個是多模（Multiple-Mode）雷射，將單模雷射注入至多模雷射中，改變單模雷射輸出波長使其能與多模雷射中的其中一個波長相同，單模雷射波長選擇不一定為多模雷射中能量最強的波長，在單模雷射前加一個光隔離器（Isolator），讓光不會回至單模雷射。假設此半導體雷射為同質（Homogeneous）光譜增益且存在著單一橫模（Single Transverse Mode）與單一縱模（Single Lateral Mode），則多模雷射中第  $i$  個模的速率方程式（Rate Equation）表示為[33-34]

$$\frac{dN_m}{dt} = (G_m - \frac{1}{\tau_p})N_m + \frac{\beta_m n}{\tau_s} + fN_1\delta_{i,m} \quad (2.4-16)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_e} - \sum_m G_m N_m$$

其中  $N_m$  為第  $m$  個模的光密度、 $G_m$  為第  $m$  個模的暫存態增益（Temporal Modal Gain）、 $\tau_p$  是光子的生命期、 $\beta_m$  是第  $m$  個模的自發性放射係數、 $n$  為載子濃度、 $\tau_s$  為自發生命期（Spontaneous Lifetime）、 $f$  為模的頻率、 $N_1$  注入光子密度、 $\delta_{i,m}$  為 Kronecker 係數、 $J$  為注入電流密度、 $d$  為主動區的厚度以及  $\tau_e$  為載子生命期，載子與光子密度是平均密度，而且  $\tau_s$  與  $\tau_e$  一般是不同的，對單模雷射  $m$  為零，有多個短波長時  $m$  為正值以及有多個長波長時  $m$  為負值。

在數個模範圍中光譜增益與增益函數  $G_m$  以及自發性放射係數  $\beta_m$  有關，而且可以近似為[35-38]



$$G_m = an < 1 - \left[ \frac{2(\lambda_{\max} - \lambda_m)}{\Delta\lambda_g} \right]^2 > -an_0 \quad (2.4-17)$$

$$\beta_m = \frac{\beta_0}{1 + \left[ \frac{2(\lambda_s - \lambda_m)}{\Delta\lambda_s} \right]^2} \quad (2.4-18)$$

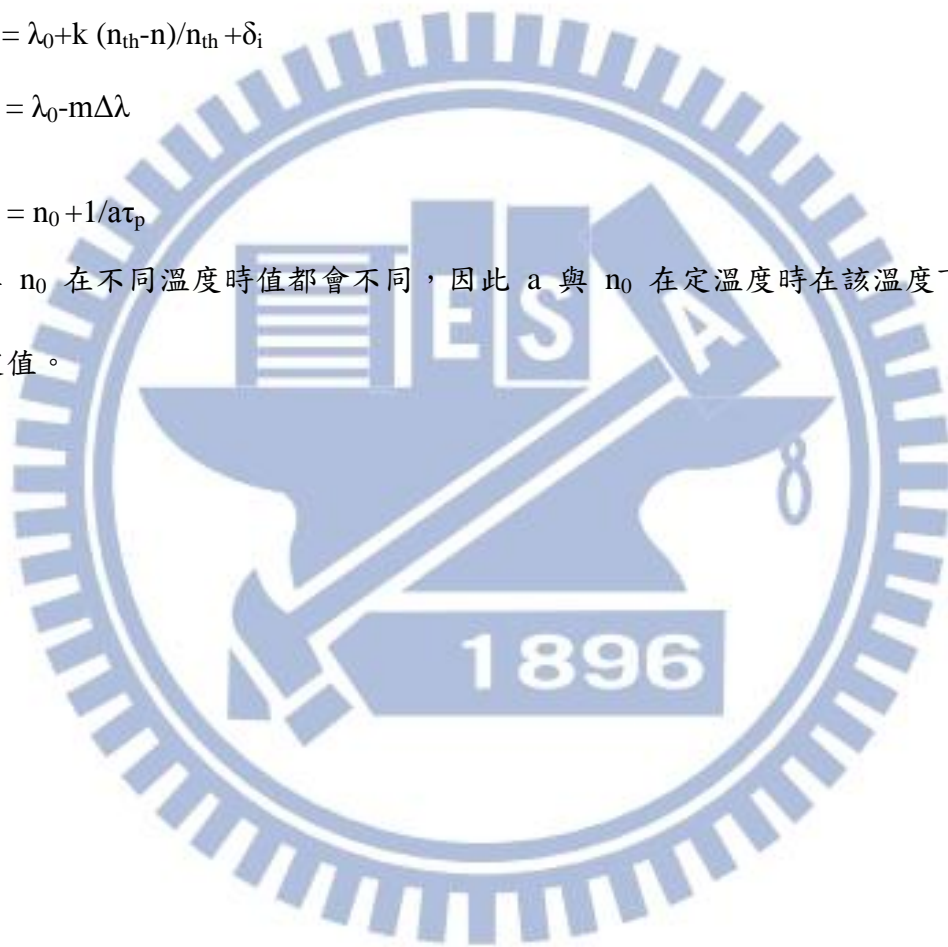
其中

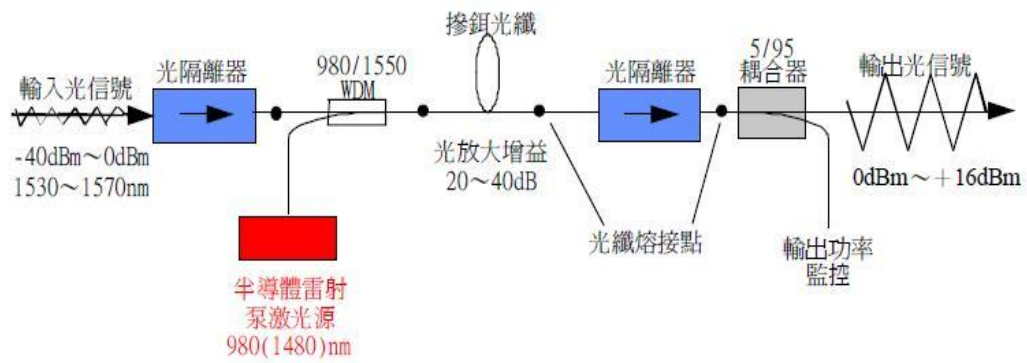
$$\lambda_{\max} = \lambda_0 + k(n_{th} - n) / n_{th} + \delta_i$$

$$\lambda_m = \lambda_0 - m\Delta\lambda$$

$$n_{th} = n_0 + 1/a\tau_p$$

a 與  $n_0$  在不同溫度時值都會不同，因此 a 與  $n_0$  在定溫度時在該溫度下為定值。





資料來源：PIDA 整理



圖 2-1 摻鉕光纖雷射放大器(EDFA)架構圖

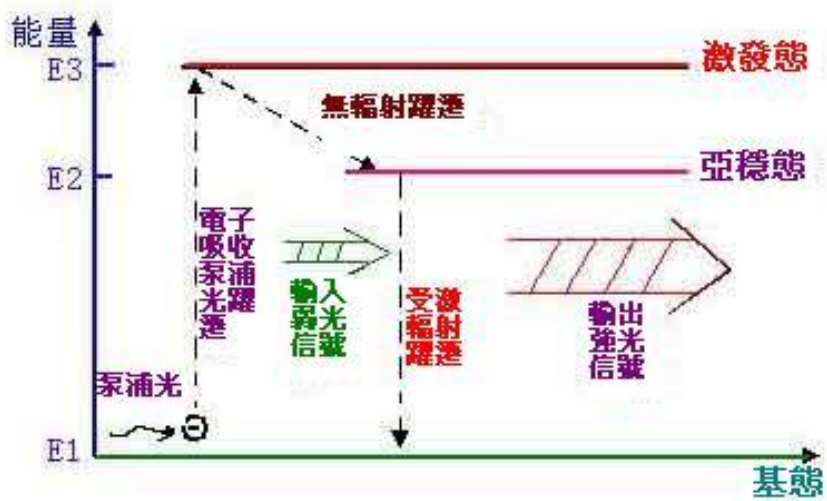


圖 2-2 鉕離子能帶圖

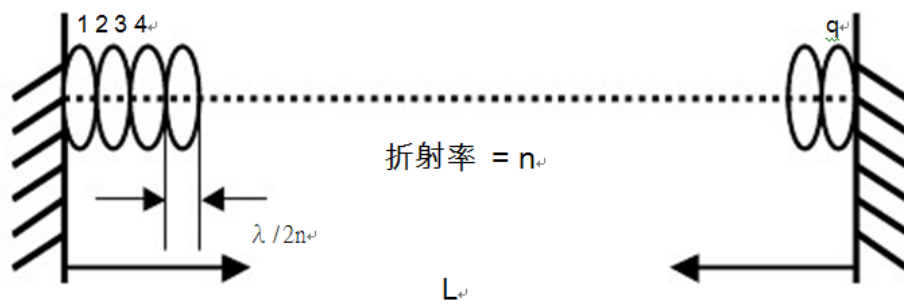


圖2-3 縱模的駐波





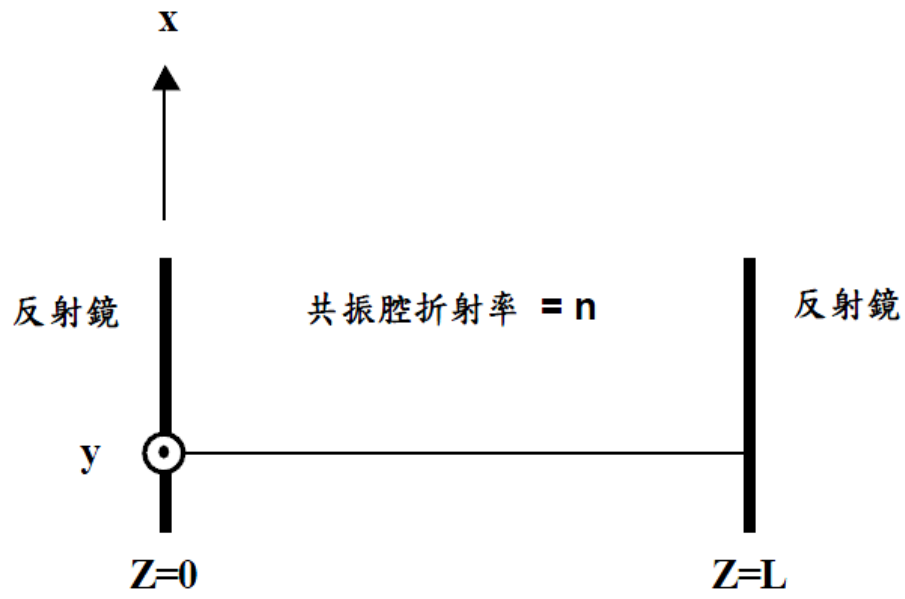


圖2-4 Fabry - Perot 雷射二極體

## 第三章

### 以半導體光放大器為基底之穩定且波長可調 Sagnac 迴路架構的光纖雷射

#### 3.1 實驗簡介

在此實驗中，我們提出和研究一個以半導體光放大器為基底之穩定且波長可調 Sagnac 迴路架構的光纖雷射。所提出的光纖雷射波長的可調範圍在 1521.0nm 和 1563nm 之間，並且超過二十分鐘的觀測其輸出穩定度表現在雷射輸出波長和輸出功率的變化。

#### 3.2 實驗架構與操作原理

實驗的架構包含一個半導體光放大器(Semiconductor Optical Amplifier; SOA)、兩個極化狀態控制器(Polarization Controllers; PCs)、一個可調的帶通濾波器(Tunable Bandpass Filter; TBF)和 2×2、1×2 50:50 光耦合器(Coupler; CP)各一個。並顯示於圖 3-1。

半導體光放大器用來當作所提出雷射共振腔迴路的增益介質。除此之外，兩個極化狀態控制器(PC)用來調整極化狀態以達到輸出功率最大值的穩定。可調式帶通濾波器(TBF)在增益共振腔迴路內用來作波長選擇器並達到雷射架構的波長可調特性。在這實驗中，半導體放大器(SOA)的偏壓電流為 80mA 且操作的溫度在 25 °C 以產生有效的增益，而 SOA 的臨界電流和最大電流分別為 50mA 和

250mA。輸出波長由光學頻譜分析儀(Optical Spectrum Analyzer；OSA)以 0.01nm 解析度觀察，輸出功率則由功率測量儀觀察(Power Meter；PM)。

### 3.3 實驗結果與分析

圖 3-2 彩色的線顯示所提出的 SOA 環狀雷射的輸出頻譜，其中波長的調變範圍在 1521nm 到 1563nm 之間，以 2nm 為一個調變步階。圖 3-2 中黑色的線為 SOA 的放大自發輻射(Amplified Spontaneous Emission；ASE)頻譜圖，當操作電流在 80mA 時。ASE 的功率等級大約被量測到在 -35dBm 到 -45dBm 之間，當波長的範圍從 1520nm 到 1570nm。

圖 3-3 顯示在不同調變的波長範圍從 1521 到 1563nm 下相對應的輸出功率與邊模壓制比(Side-mode Suppression Ratio; SMSR)。我們可以得到最小的輸出功率和 SMSR 分別為 -1.1dBm 和 36.8dB 在波長為 1521nm 時。最大的輸出功率和最大的 SMSR 分別是 4.8dBm 和 49dB 在波長為 1560nm 時。因此輸出功率的差異為 5.9dB 在調變的範圍內。當輸出的波長逐漸增加，觀察到的輸出功率也隨著增加。除此之外，我們觀察到較高的 ASE 雜訊當雷射波長在 1545.0nm 的時候，顯示於圖 3-2，同時圖 3-3 也顯示出下降點在 1545.0nm 時由於較高的背景雜訊。

圖 3-4 顯示所提出的環狀光纖雷射輸出功率與不同的 SOA 驅動電流的關係，當我們將雷射波長設定在 1551nm。在量測中，我們將 SOA 的操作電流從 0mA 到 80mA 作調整。顯而易見，當 SOA 的驅動電流逐漸增加，所提出的環狀光纖雷射量測到的輸出功率也隨之增加。當 SOA 的驅動電流在 80mA 的時候，所量測到的輸出功率可達 4.8dBm。所提出之光纖雷射架構的操作臨界電流為 30mA，然而原本 SOA 的臨界電流為 50mA，因此我們可以達到節能使得 SOA 臨界電流減少 20mA 在使用我們提出的 Sagnac 迴路雷射架構下。

在此我們展示和分析所提出光纖雷射輸出的穩定性在功率和波長上，我們將量測的波長選擇在 1551nm 和輸出功率約為 4.8dBm 為初始。一段短期的觀察顯示於圖 3-5，我們可以看見波長的變化在觀測時間內可以被忽略，趨近 0nm，並且輸出功率的變化也小於 1dB 在 20 分鐘的觀測時間內。更進一步，經過一小時候的觀察，所提出雷射輸出的穩定性仍然維持。因此所提出的環狀光纖雷射以 Sagnac 迴路架構不只可以穩定的輸出，並且可以節省功率的損耗並加強輸出的表現。



### 3.4 討論

我們提出並在實驗上的展示一個半導體光放大器(SOA)為基底並以 Sagnac 迴路作為反射鏡的環狀光纖雷射結構，此雷射可以達到單一頻率的輸出和節省功率。當一個可調的帶通濾波器在增益的共振腔內，雷射的波長可以被調變在 SOA 的有效放大的增益區域內。當 SOA 以 80mA 的電流驅動，所提出的雷射可調變的範圍在 1521.0 nm 和 1563.0 nm 之間，並分別有最大和最小的輸出功率 4.8dBm 和 -1.1dBm，並且 SMSR 可以被觀察到在 36.8dB 到 49.0dB 之間在調變範圍間。我們也實驗和分析了此架構的輸出穩定性在功率和波長上面。



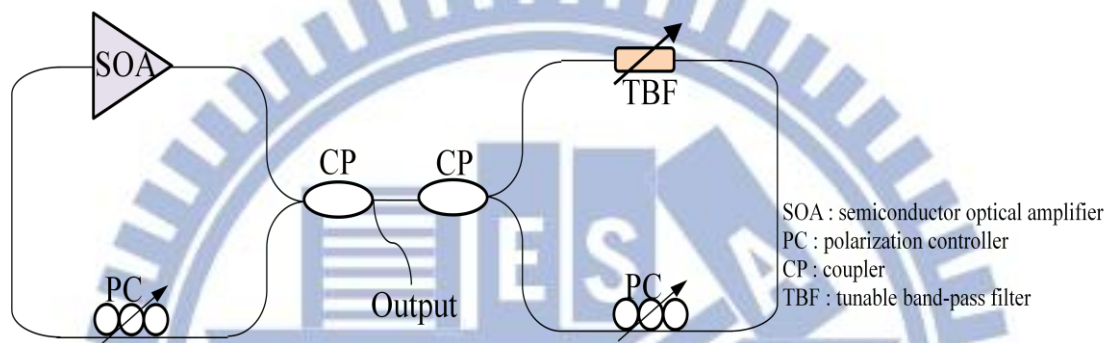


圖 3-1 SOA 為基底並以 Sagnac 迴路作為反射鏡的光纖環狀雷射架構

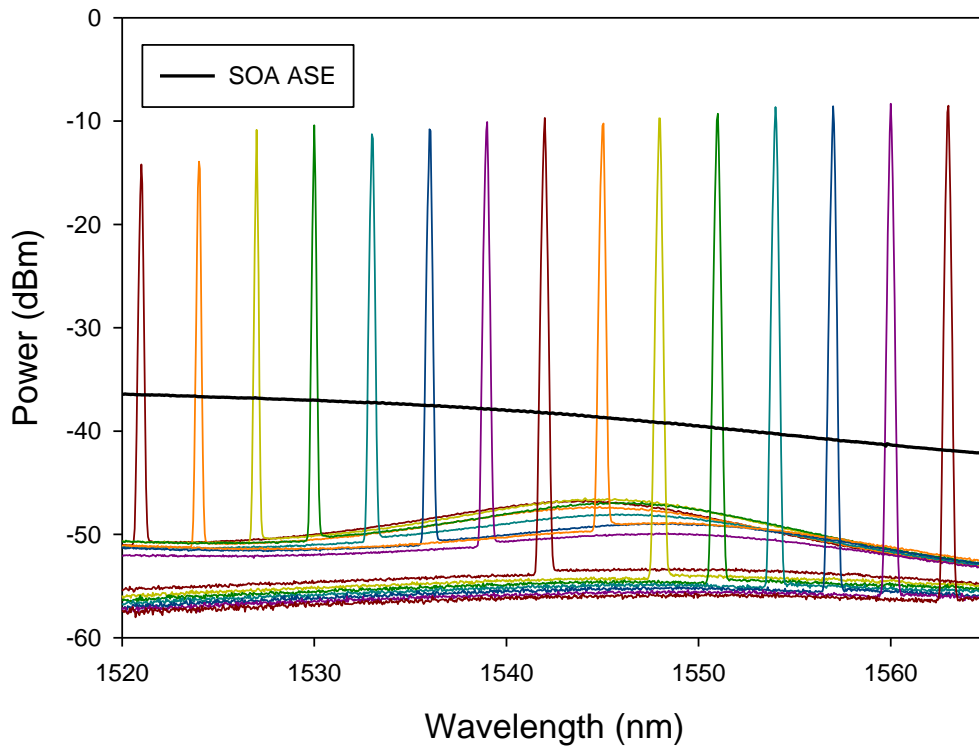


圖 3-2 彩色的線為所提出的光纖雷射輸出頻譜當波長的調變範圍從 1521nm 到 1563nm，黑色的線是 SOA 的 ASE 頻譜圖。

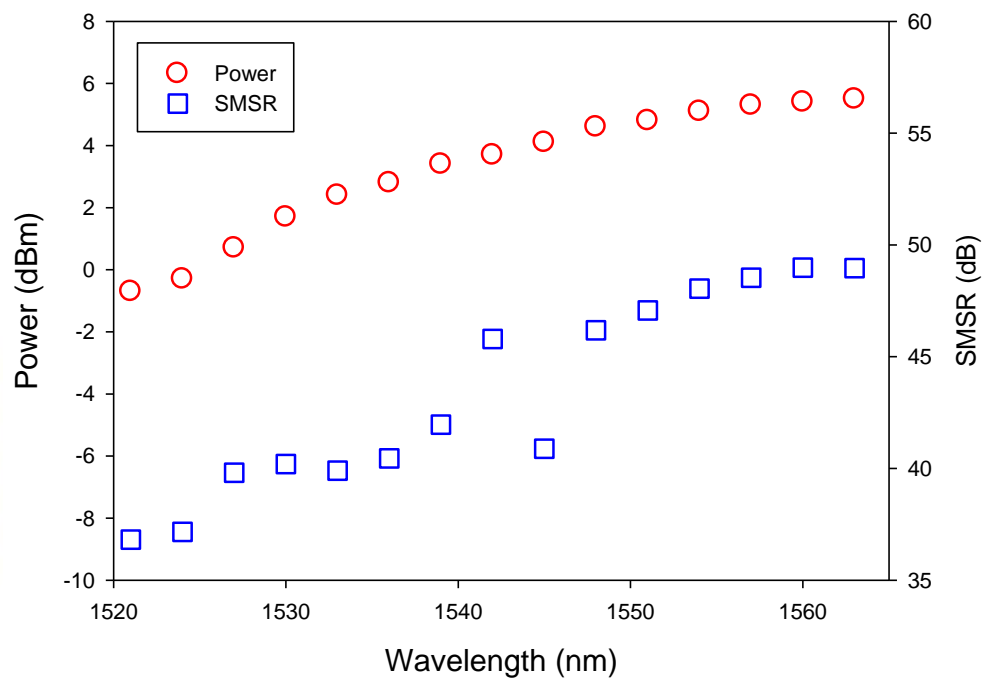


圖 3-3 輸出功率和 SMSR 在不同輸出波長下的關係圖



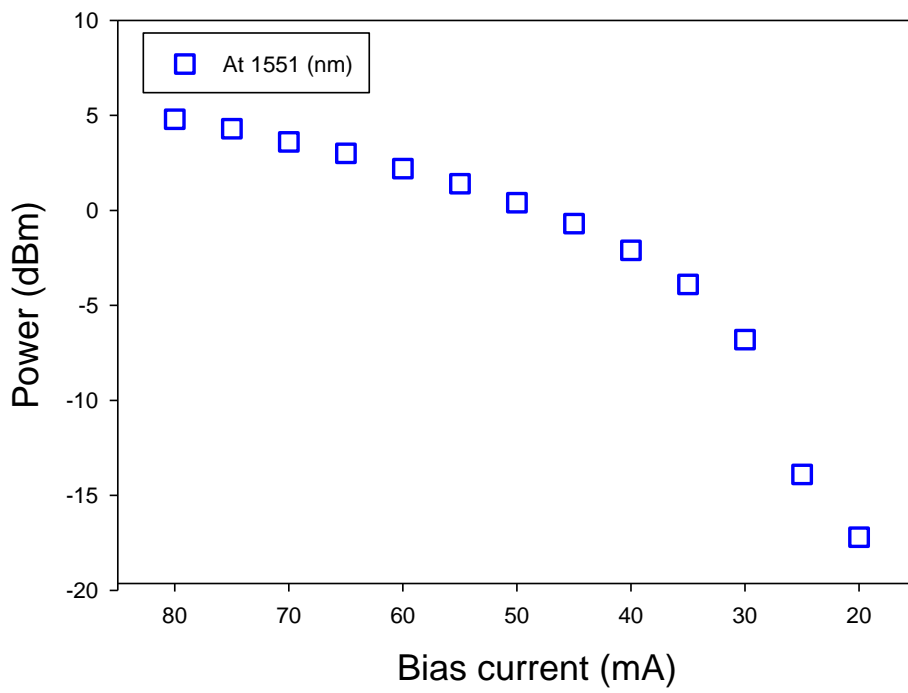


圖 3-4 所提出雷射在不同 SOA 驅動電流下的輸出功率，當輸出波長設定在 1551nm。

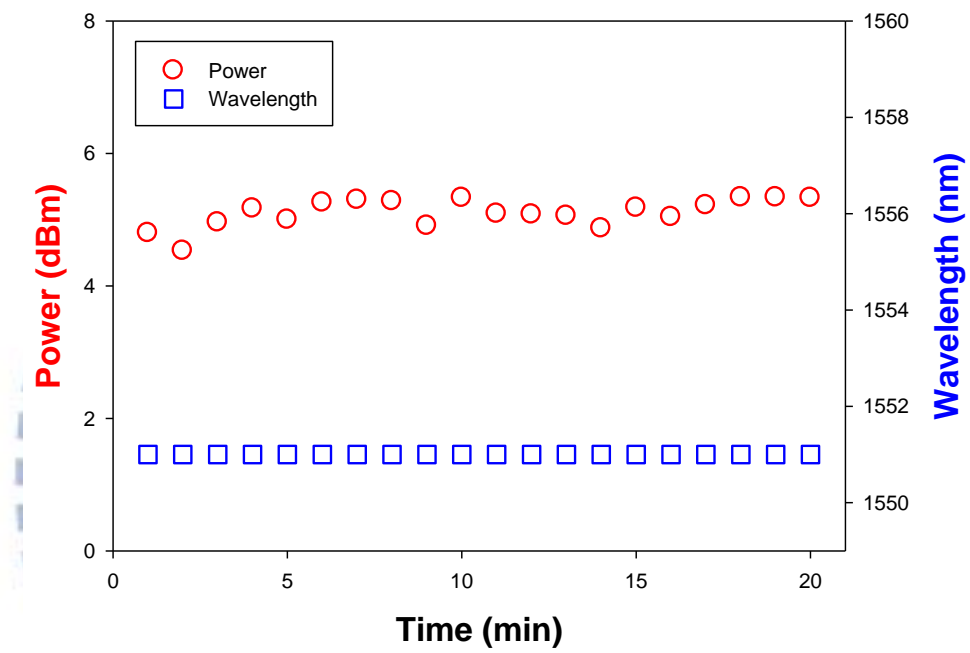


圖 3-5 所提出的雷射架構於 20 分鐘在輸出功率(紅色空心圓)和輸出波長(藍色矩形)的穩定性。

## 第四章

### 使用雙反射式結構單一縱模且波長可調的摻鉕光纖雷射

#### 4.1 實驗簡介

在這實驗中，我們提出並顯示一個雙反射式結構的線性共振腔摻鉕光纖 (Erbium-doped Fiber ; EDF) 雷射藉由使用可飽和吸收為基底的濾波 (Saturable-absorber-based ; SAB) 以達到單一縱模的雷射輸出。

穩定輸出和寬的可調波長範圍單一縱模的光纖雷射是具有吸引力的光源在波長分割多工的通訊、光學的測試和光纖偵測等等的系統應用上。通常使用可調式的帶通濾波器(TBF)、光纖 Fabry-Perot 可調濾波器(FFP-TF)，和光纖布拉格光柵(Fiber Bragg Grating ; FBG)在環狀的雷射共振腔內去產生可調波長的雷射輸出已經被討論和提出[39-41]。但是由於模態的跳躍(Mode-hopping)和增益競爭(Gain competition)的效應使得環狀摻鉕光纖雷射的雷射波長的穩定性較不足。為了克服這個議題，這種不同的方法被提出去達到穩定的單一縱模(SLM)的輸出。運用一個較短的不給予偏壓電流的摻鉕光纖放大器在光纖迴圈內當作可飽和吸收為基底的濾波器(SAB)去達成單一縱模輸出已經被研究並討論[42-46]。

在這個實驗中，我們提出和展示一個雙反射式結構的摻鉕光纖雷射以線性共振腔加上被動式的 SAB 濾波器和可調的帶通濾波器(TBF)去達到可調波長的單一縱模的雷射輸出。

## 4.2 實驗架構與操作原理

圖 4-1 顯示雙反射式結構摻鉍光纖雷射的實驗架構。此架構包含一個摻鉍光纖放大器(EDFA)、一個可調式帶通濾波器(TBF)、一個 1×2 且 50:50 光學耦合器(OCP)、一個光纖反射鏡(Fiber Mirror ; FM)(在 C-band 有 99.1 % 的反射率)、一個極化狀態控制器(PC)、一個光學循環器(Optical Circulator ; OC)和一個 1.5m 長度不以偏壓電流激發的摻鉍光纖。在這裡，光纖反射鏡和光循環器的環狀結構用來當作摻鉍光纖雷射的兩個反射鏡。摻鉍光纖放大器，內部由一個光學的隔離器(Optical Isolator ; ISO)、一個 980nm 激發雷射二極體和一段 10m 長的摻鉍光纖(Fibercore DC-1550F 生產)被運用來當作摻鉍光纖雷射的增益介質。此摻鉍光纖雷射共振腔量測起來的總長度大約有 18m 長。

未被偏壓電流激發的摻鉍雷射被當作 SAB 濾波器來使用去濾出單一縱模的雷射波長。極化狀態控制器(PC)用來控制極化的狀態去維持最大的輸出功率。可調式帶通濾波器(TBF)的 3dB 頻寬和可調範圍分別是 0.4nm 和 30nm (1530.0nm 到 1560nm)。帶通式濾波器(TBF)在此摻鉍光纖雷射共振腔內用以壓制放大的自發性輻射(Amplified Spontaneous Emission ; ASE)和波長的調變。在量測方面，輸出波長用光譜分析儀 (OSA)量測，解析度設定在 0.05nm，輸出功率由光學功率量測儀(PM)量測。



### 4.3 實驗結果與分析

圖 4-2 顯示次雙反射式結構摻鉕光纖雷射的輸出光譜，波長的範圍在 1530nm 到 1562nm 之間，980nm 雷射二極體的激發功率設定在 42 mW。此外，圖 4-2 也顯示摻鉕光纖放大的自發輻射(ASE)輸出光譜，在沒有使用我們提出的雷射實驗架構之前，用點線表示。且我們可以觀察到 ASE 的功率的高度大於-30dBm 在 1528nm 和 1560nm 之間。更進一步，有效的增益放大也分佈在波長範圍之間。如圖 4-2 所示，當雷射波長被漸漸的調到較高的波長時，我們可以得到較佳的壓制在 ASE 的雜訊上，且我們可以觀察到較大的輸出功率當將輸出波長調整到較高的波長範圍。

圖 4-3 顯示了輸出功率與量測到的信噪比(Signal to Noise Ratio ;SNR)針對不同雷射波長在可調的範圍 1530nm 到 1562nm 之間，當激發的功率在 42mW。如圖 4-3 所示，觀測到的輸出功率在-13.7dBm 和-7.6dBm 之間，信噪比則在 35.4dB 和 47.9dB 之間。值得注意的是，當我們將波長漸漸的往較高的波長調動，可得到輸出功率和信噪比的增加在整個 C-band 間(1530.0nm 到 1560.0 nm)。事實上，根據過去對於摻鉕光纖放大器 EDFA 設計的研究，增益的數值再放大的頻寬可以被加強在(double-pass)的傳輸上。在這裡，由於摻鉕射光纖雷射架構雙通的設計在線性共振腔中， $\text{Er}^{+}$  鉕離子的增益可以被壓制而平移到較高的波長上。因此，觀察到的輸出功率將隨著輸出波長往更高的地方漸漸移動而相應增加。此外，由於帶通濾波器 TBF 頻寬的限制，在這個實驗中輸出波長大於 1562nm 無法量測。

然而，我們相信在波長可調的範圍在我們所提出的摻鉕光纖雷射可以被擴展到 L-band 之上。

在此，我們也研究不同輸出功率與不同的 EDFA 激發功率在此摻鉕光纖雷射架構下的關係，如圖 4-4 所示，雷射波長設定在 1550.0nm。在此量測實驗中，我們將激發功率在 19mW 到 42mW 間作變化。發現到我們所提出的雷射架構有 22mW 的臨界激發功率，如同圖 4-4 所示。當我們以 22mW、32mW 和 42mW 的激發功率去激發，可以觀察到雷射的輸出功率分別為-16.2dBm, -11.7dBm 和-9.6 dBm。

摻鉕光纖雷射輸出的穩定度也是相當重要的議題。為了達到輸出波長和輸出功率的穩定度，所提出摻鉕光纖雷射的一段短期觀察的表現表示在圖 4-5，且觀測時間超過三十分鐘，在此的雷射波長設定在 1550nm 並且一開始的輸出功率為 -9.6dBm。如圖 4-5 所示，所提出的架構可以降低波長的變化(Wavelength variation ; $\Delta\lambda$ )並控制在 0.05nm 以內並且功率的擾動(Power fluctuation ; $\Delta P$ )也控制在 0.3dB 以內。更甚的是，經過兩小時的觀察以後，所提出的摻鉕光纖雷射仍維持穩定的輸出。

此外，圖 4-5 的插圖是所提出的摻鉕光纖雷射延遲的自零差(Self-homodyne) 頻譜圖，以被動 SAB 濾波器在波長 1550nm 當輸出功率在-9.6dBm。所以，量測此光學的迴路由 1GHz 的 3dB 頻寬光偵測器(Photodetector ; PD)和一個 Mach-Zehnder 干涉儀以 25km 長的標準單模光纖(Single-mode Fiber ; SMF)所組成。

可以清楚的看見沒有拍打噪音(Beating Noise)在相對強度與噪音比(Relative Intensity to Noise; RIN)的頻譜在提出的摻鉕光纖雷射上。因此，所提出的光纖雷射表現出單一的頻率震盪可以被達成在觀測的頻寬為 500 MHz 時，顯示於圖 4-5 的插圖。

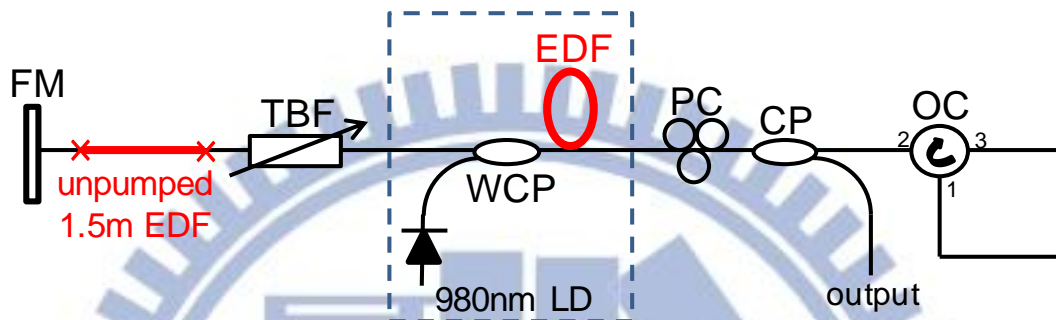
#### 4.4 討論

我們已經提出並實驗展示出一個雙反射式結構線性共振腔的摻鉕光纖雷射並運用一個被動式飽和吸收為基底(SAB)的濾波器和帶通濾波器(TBF)來達到單一模態(SLM)的雷射輸出並且可以調變波長。

我們可以得到波長的調變範圍從 1530nm 到 1562nm 之間，並且輸出功率在 -13.7dBm 到 -7.6dBm 之間，SNR 分別為 35.4dB 和 47.9dB/0.05nm。並且當我們將雷射波長往上逐步調整，可得到輸出功率和 OSNR 的增加在整個 C-band(1530nm 到 1560 nm)，

由於雙通的設計在此摻鉕光纖雷射架構中，鉕離子  $\text{Er}^+$  增益被壓制並往較高波長平移。

此外，輸出功率與波長的變化可以被量測到分在 0.3dB 和 0.05nm 之內在所提出的摻鉕光纖雷射架構中。



- |                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| <b>CP</b> : 1×2 optical coupler | <b>PC</b> : polarization controller  |
| <b>FM</b> : fiber mirror        | <b>WCP</b> : 980/1550nm WDM coupler  |
| <b>LD</b> : laser diode         | <b>EDF</b> : erbium-doped fiber      |
| <b>OC</b> : optical circulator  | <b>TBF</b> : tunable bandpass filter |

圖 4-1 雙反射式摻鉕光纖雷射實驗架構



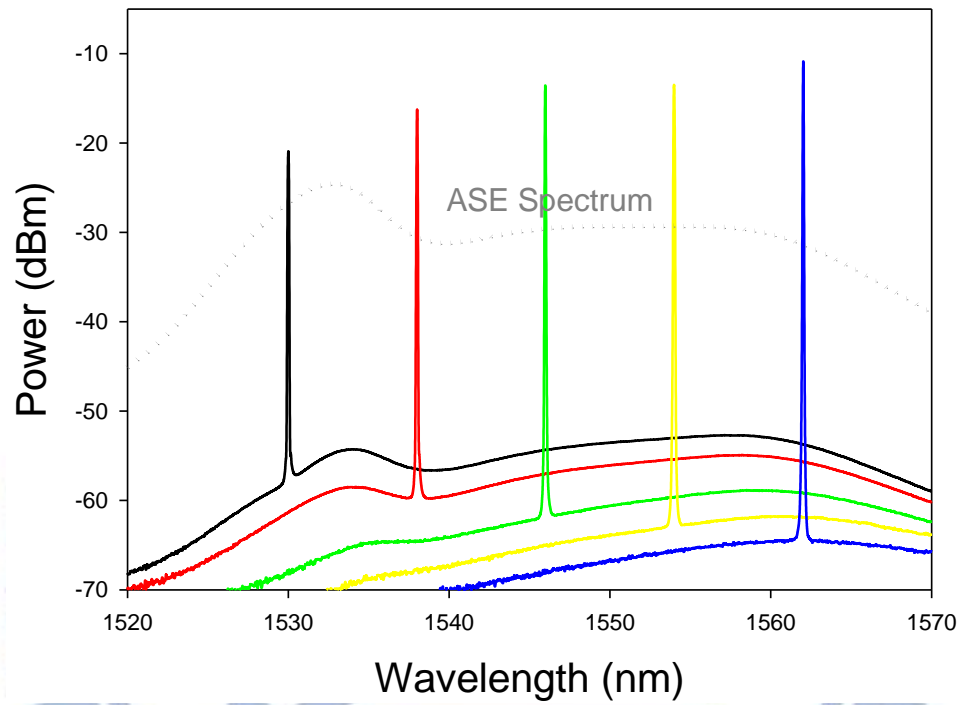


圖 4-2 雙反射式結構摻鉕光纖雷射的輸出光譜在波長範圍從 1530nm 到 1562nm 之間，當 980nm 雷射二極體激發功率為 42mw。點線為放大的自發輻射(ASE)的光譜在原本的摻鉕光纖放大器 EDFA 在還未使用所提出的雷射架構之前。

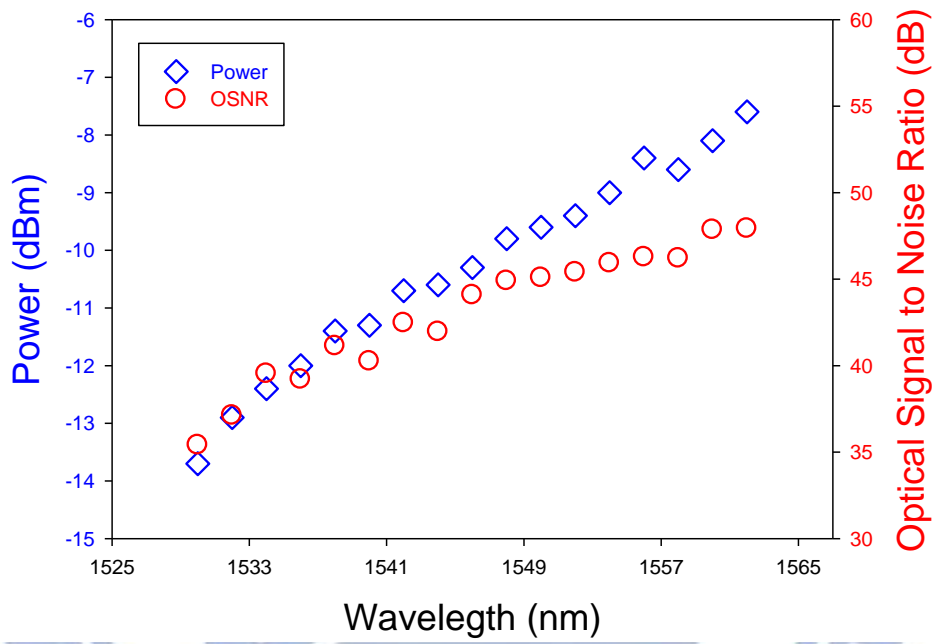


圖 4-3 在不同波長下信噪比與輸出功率的趨勢圖，當波長調變的範圍在 1530nm 到 1562nm 之間，並維持 42mW 的 EDFA 激發功率。

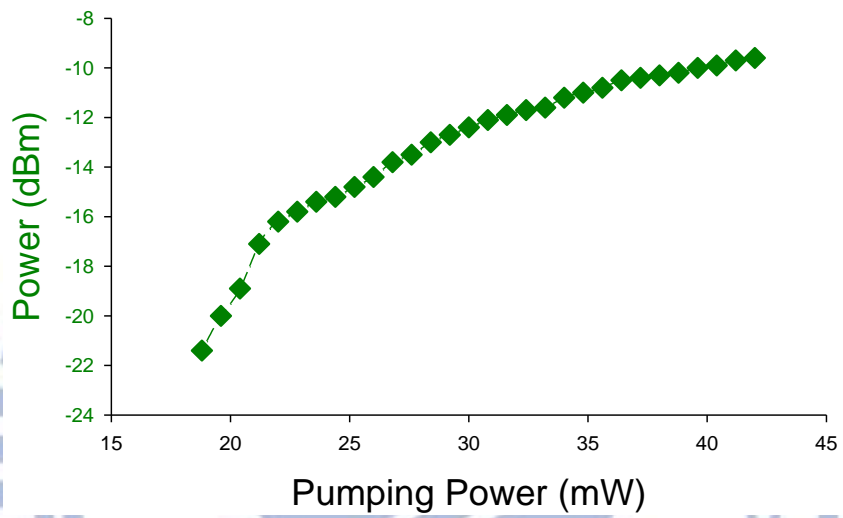


圖 4-4 輸出功率與信噪比(SNR)在不同的激發功率在所提出的摻鉕光纖雷射的量測，當雷射波長設定在 1550nm。

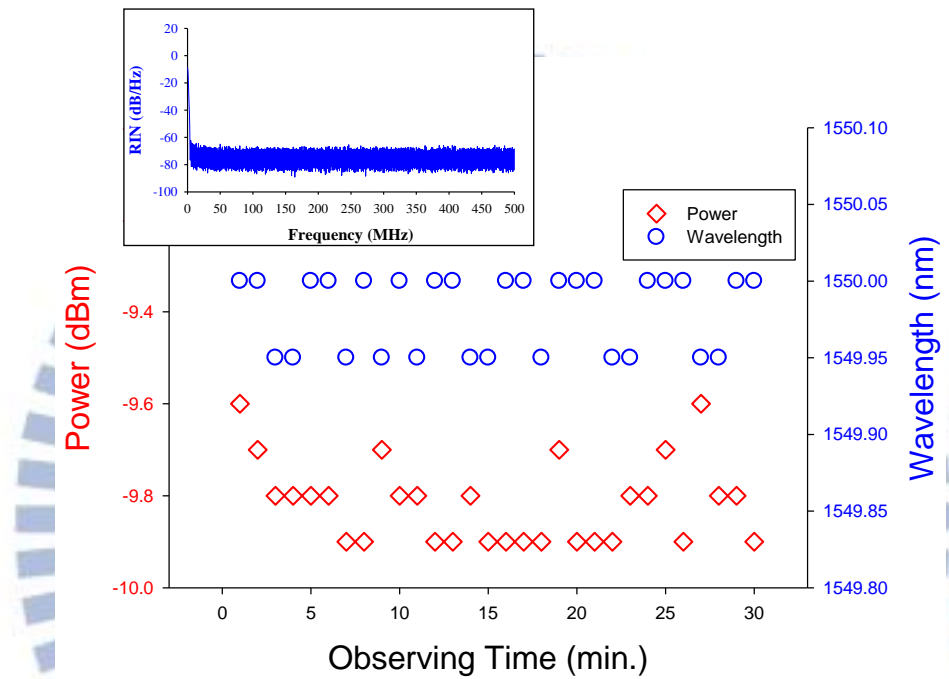


圖 4-5 功率與波長輸出的穩定度在觀測時間超過 30 分鐘，當雷射波長在 1550.0nm 且功率-9.6dBm 為初始。插圖是所提出摻鉕光纖雷射以被動 SAB 濾波器構成的延遲自零差頻譜圖。



## 第五章

利用Saganc迴路並輸出穩定連續的連續波之光學注入波長可

### 調半導體雷射架構

#### 5.1 實驗簡介

我們提出和實驗上研究出穩定與連續且波長可調的光纖雷射架構，藉由使用自行注入(Self-injected) Fabry-Perot 雷射二極體(FP-LD)和 Saganc 迴路的方法。現今光纖通訊普遍來說操作波長區域大約在 1530nm 到 1560nm(C-band)之間。實際上光纖放大器在此波長區域大多使用摻鉕光纖放大器(Erbium-doped Fiber amplifiers; EDFAs)。但是由於不斷增加的資訊頻寬的需求造成 C-band 在波長分割多工(Wavelength Division Multiplexing ; WDM)系統的飽和[47-48]。摻鉕光纖增益頻寬的限制使得新的放大器元件的發展以提供需求。

在這實驗中，我們提出並實驗研究出一個穩定且連續的波長可調的雷射架構以 Saganc 迴路並藉由使用自行注入(Self-injected) Fabry-Perot 雷射二極體(FP-LD)。所提出的雷射架構波長可以在 1526.0nm 到 1549.75nm 間以 1.30nm 為一調整步階來調變並以單一模態(Single-Longitudinal-Mode ; SLM)輸出。

## 5.2 實驗架構與操作原理

圖 5-1 顯示了我們所提出的穩定的單一模態(SLM)波長可調的半導體雷射實驗架構。此光纖雷射架構由一個 Fabry-Perot 雷射二極體(FP-LD)、一個可調的帶通濾波器(TBF)、極化狀態控制器(PC)和一個 2×2 且 50:50 光耦合器(CP)所組成。

其中 2×2 光耦合器(CP)和極化狀態控制器(PC)構成一個 Sagnac 迴路反射鏡，如圖 5-1 所示。在此所使用的多重模態(Multi-Longitudinal-Mode; MLM) FP-LD 模態間距和臨界電流分別是 1.30nm 和 9.1mA。帶通濾波器(TBF)的波長可調範圍為 30nm(從 1530nm 到 1560nm)，而嵌入損耗(Insertion Loss)為 6dB。而此實驗結果的量測運用光譜儀(OSA)以 0.05nm 的解析度和功率儀(PM)來量測。

在這實驗中，這個 FP-LD 被操作在 28mA 且溫度 25 °C 時。圖 5-2 的灰色線條顯示 FP-LD 輸出光譜在未使用此架構前。FP-LD 輸出的中心波長在 1539.10 nm 且峰值功率為 0.24dBm。在提出雷射的架構中，帶通濾波器(TBF)用來濾出多重模態 FP-LD 相對應的輸出模態。且從 FP-LD 濾出的輸出模態再被提出的 Sagnac 迴路反射鏡所反射回去，如圖 5-1 所示。接著反射的模態在發射進入 FP-LD 作為自行注入(Self-injecting)的操作。因此，每一個雷射的波長可以被調整藉由帶通濾波器(TBF)經由自行注入機制在所提出的雷射實驗架構中。除此之外，Sagnac 迴路中的極化狀態控制器(PC)在此實驗中運用來維持極化狀態以利量測並且可以補償最大的輸出功率。

由於光學注入的操作，FP-LD 注入的模態可以獲得較大的增益並有效的壓制

住邊模(Side-modes)的產生以達成單一頻率的輸出。

### 5.3 實驗結果與分析

所提出的雷射架構的輸出光譜也被顯示在圖 5-2。觀測點為圖 5-1 中的”a”點在波長的調變範圍 1526.20 nm 到 1549.75nm 中，以波長的調整步階為 1.3nm 的單一模態輸出。所提出之雷射的波長範圍與所使用的 FP-LD 有效的增益放大相關。

圖 5-3 表示此雷射架構在不同雷射波長從 1526.20nm 到 1549.75 nm 之間輸出功率和邊模壓制比(Side-Mode Suppression Ratios ; SMSRs)的輸出曲線。在此，被觀察到最大與最小的輸出功率為 -7.4 dBm 和 -17.0 dBm 分別在波長 1540.50nm 和 1526.20 nm，且相對應的 SMSR 分別為 52.0 dB 和 52.8 dB/0.05 nm。

如圖 5-3 所示，我們可以觀察到一個功率的掉落在 -16.7 dBm 的輸出功率在 1537.90 nm 的時候。而且我們得到一個 SMSR 曲線的掉落點在 1535.25nm 時。這是因為 FL-LD 的較大的增益在 1537.90 nm 附近(由圖 5-2 可見)，且邊模在 1535.25 nm 附近的時候不容易被壓制。除此之外，最大和最小的 SMSRs 為 57.7dB 和 40.1 dB/0.05 nm 被測量到分別在波長 1547.05nm 和 1535.25 nm 的時候。

在這實驗中，為了瞭解和研究輸出功率和波長的穩定性在所提出的波長可調雷射，進行在一段短期時間的觀察。在此雷射波長被設定在 1540.50 nm 的時候且輸出功率為 -7.4 dBm 為初始的輸出穩定度的量測。在經過 20 分鐘的觀察後，

最大的輸出功率變化和波長的擾動在所提出的雷射被量測到分別在 0.7 dB 和 0.02 nm 以內，如圖 5-4 所示。更進一步，經過一小時候的觀察時間，量測到的輸出的穩定度在功率和波長上仍然維持。根據量測的結果，所提出的雷射顯示出一個好的輸出表現。

為了去達到連續的波長調變，我們可以控制和調整 FP-LD 在這架構下不同溫度下的波長平移。因此，圖 5-5 顯示原本的 MLM FP-LD 輸出中心波長對不同溫度下從 15 °C 到 25 °C 輸出中心波長的變化，當我們將 FP-LD 操作的電流設定在 28mA。我們可以觀察到最大的波長平移有 1.1nm 當溫度的差異達到 10°C 時。因此，我們可以藉由調整 FP-LD 的溫到來達到連續波長的調變。





## 5.4 討論

總結來說，我們可以在實驗上研究一個穩定且連續的波長可調變的雷射架構藉由使用以 Saganc 迴路架構自行注入(Self-injected)的 FP-LD。在這個提出的架構中，單一模態(SLM)雷射波長的調整範圍在 1526.20nm 到 1549.75nm 之間，以 1.30nm 為一個調整步階。在此，最大和最小的輸出功率是-7.4 和 -17dBm，相對應的邊模壓制比(SMSR)分別為 52dB 和 52.8dB/0.05nm。在這實驗中，去達到連續的波長調變，我們可以藉由調整 FP-LD 的溫度使得波長的平移在這個雷射架構中。更進一步，SLM 輸出功率和波長的穩定度在此波長可調的雷射架構中，已經被研究和探討。



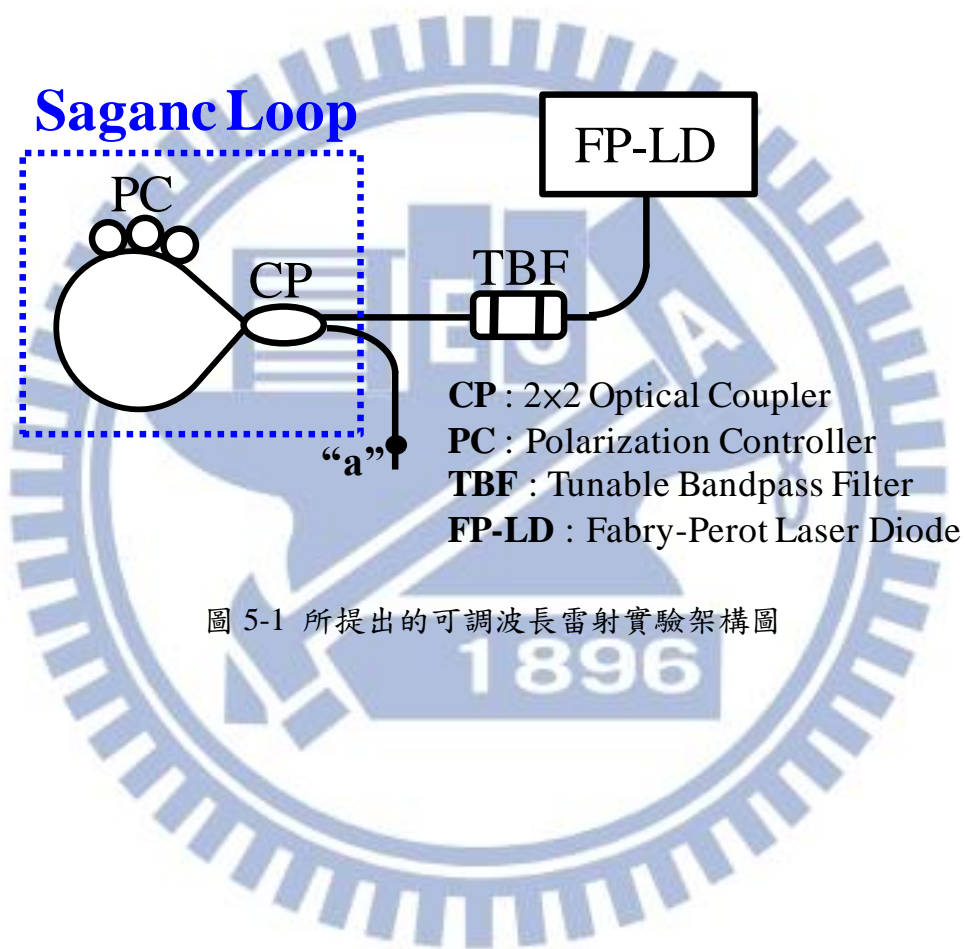


圖 5-1 所提出的可調波長雷射實驗架構圖

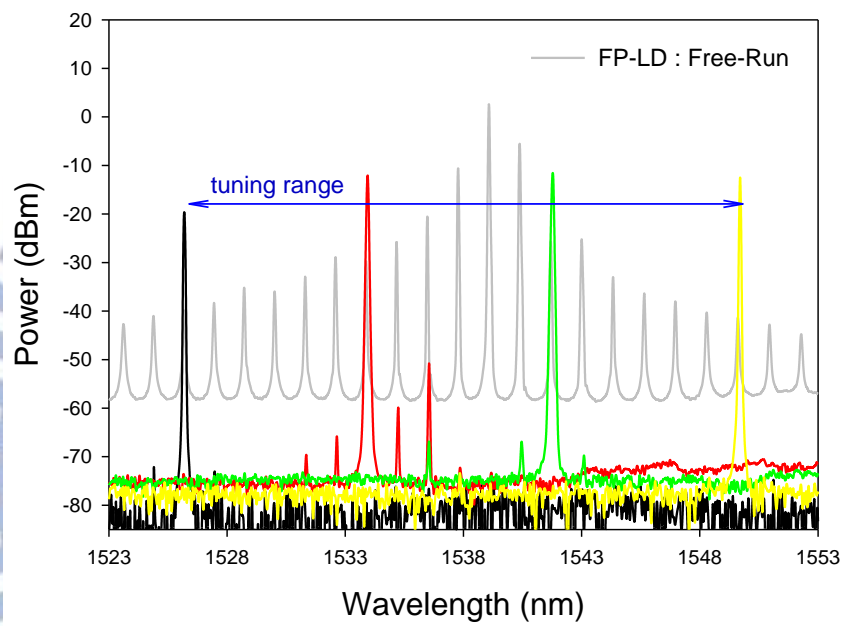


圖 5-2 純粹 FP-LD 的輸出光譜(灰線) 和所提出的雷射架構的輸出光譜圖在波長範圍從 1526.20 到 1549.75 nm 以 1.30nm 為一個調整的步階。

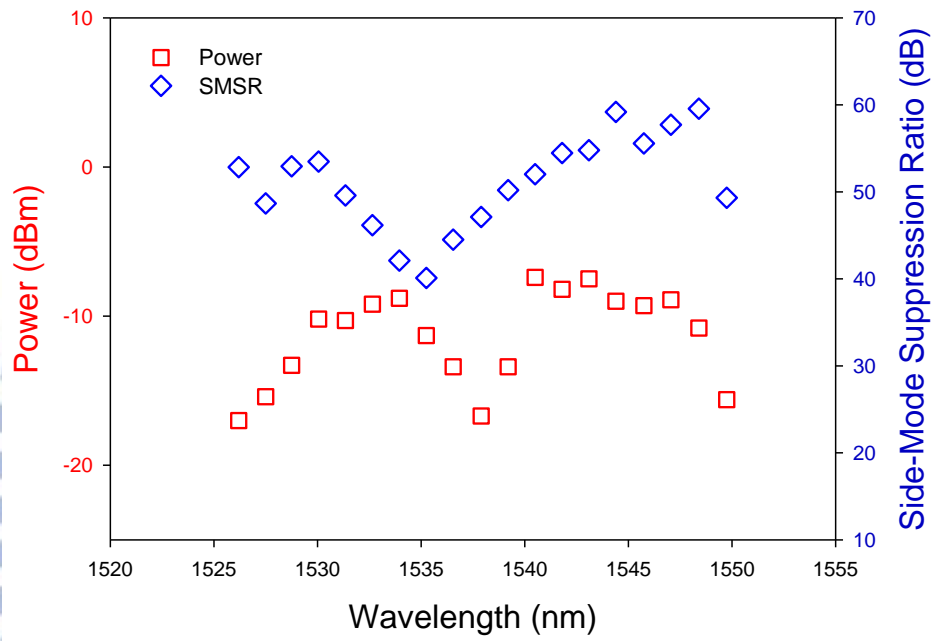


圖 5-3 雷射架構在不同雷射波長在 1526.20nm 到 1549.75 nm 範圍之間的輸出功率和邊模壓制比(SMSRs)的輸出曲線。

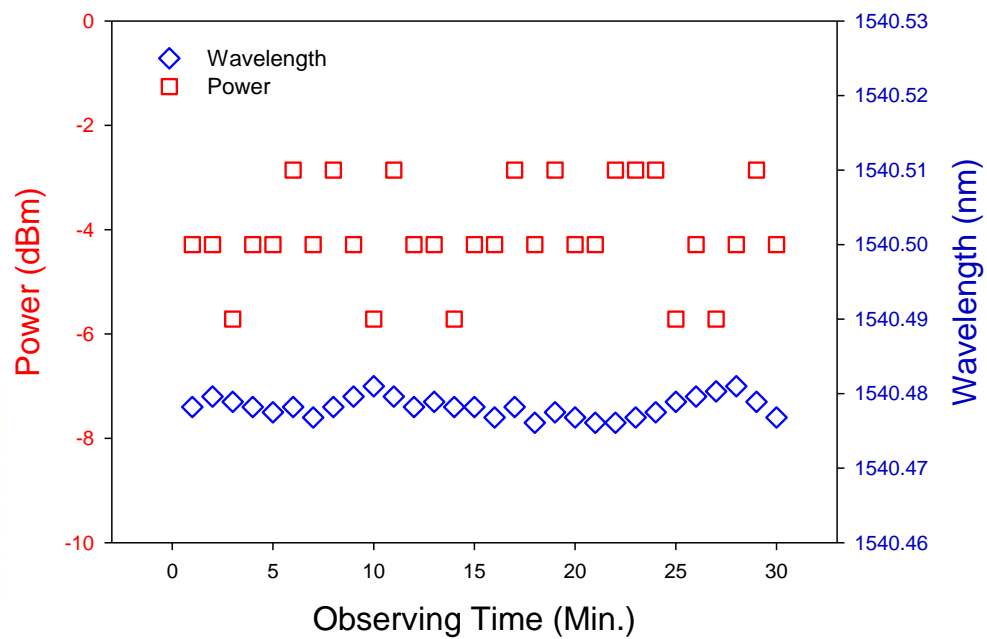


圖 5-4 輸出功率和波長的穩定度在所提出的波長可調雷射架構超過 20 分鐘的觀察時間，當雷射波長設定在 1540.50 nm 和輸出功率為 -7.4 dBm 為初始。



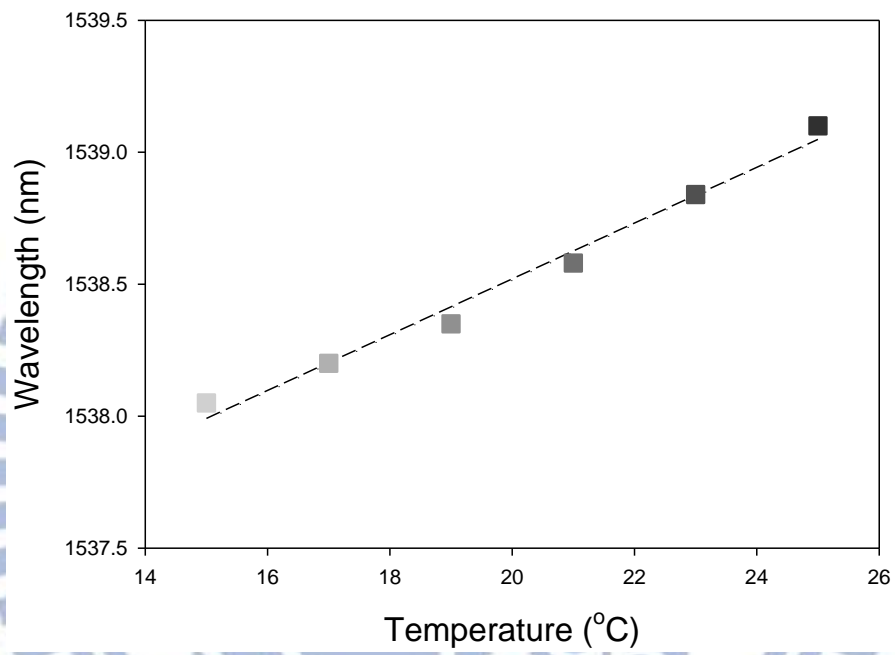


圖 5-5 原本的 MLM FP-LD 輸出中心波長對不同溫度從 15 °C 到 25 °C，並將 FP-LD 的操作電流設定在 28mA。

## 第六章

# 藉由光學注入Fabry-Perot雷射二極體和反射式半導體光放大器之單一頻率和穩定的波長可調雷射並可行長距離的光纖傳輸

### 6.1 實驗簡介

穩定波長可調的摻鉍光纖環狀雷射在波長分割多工(Wavelength Division Multiplexing ; WDM)通訊系統、光學測試和光纖偵測等等應用。通常包括增益媒介和頻率選擇在共振腔內。通常摻鉍光纖雷射放大器(EDFA)和半導體光放大器(SOA)用來當作光纖環狀雷射的增益媒介[49-50]。如果不使用光放大器以降低成本,使用波長可調的外注入和內注入的半導體雷射也已經被研究和表現[51-52]。

我們提出實驗上的研究在波長穩定可調的雷射架構藉由使用內注入(Self-seeded) Fabry-Perot 雷射二極體和外注入(External-injected)反射式半導體光放大器(Reflective Semiconductor Optical Amplifier; RSOA)。所提出的雷射可以在1534.05nm 到 1553.00 nm 的波長範圍之間調變,以 1.1nm 為一個調整步階。所提出的雷射可以直接調變在 2.5Gb/s on-off keying (OOK)調變格式和經過 75km 單模光纖(Single-mode Fiber ; SMF)在沒有光放大器和色散補償的情況。

## 6.2 實驗架構與操作原理

所提出穩定波長調變半導體雷射實驗架構顯示於圖 6-1，所提出的雷射架構由 FP-LD、反射式半導體光放大器(Reflective Semiconductor Optical Amplifier; RSOA)、帶通濾波器(Tunable Bandpass Filter; TBF)、光學循環器(Optical Circulator; OC)、極化控制器(PC)、1×2 且 50:50 光學耦合器(Optical Coupler; CP)和一個反射鏡(Reflected Mirror; RM)所組成。波長的調變範圍和帶通濾波器的嵌入式阻抗分別是 30 nm (1530 nm 到 1560 nm)和 6dB。反射鏡的總反射率為 99.5 % 在 C-band 操作。所提出的雷射輸出波長和輸出功率利用光學頻譜分析儀(OSA)以 0.05nm 解析度和功率量測儀(PM)來進行量測。

首先，我們以內注入操作在 FP-LD 的實驗如圖 6-1 所示，這裡的模態間隔和多重模態(Multi-Longitudinal-Mode; MLM)的臨界電流分別是 1.1nm 和 9.5mA。在這實驗中，FP-LD 的操作電流是 30mA 在溫度為 20 °C 時。FP-LD 純粹的輸出頻譜在位於圖 6-1 的量測點”a”的位置顯示在圖 6-2 的灰線上。

除此之外，我們可以觀測到輸出功率較大的地方位於波長 1544.00nm 到 1548.64 nm 之間。如圖 6-1 所示，我們可以調整 TBF 去配合 MLM FL-LD 相對應的模態去濾出作為模態的選擇。所以，所濾出的輸出模態藉由 1×2 CP 和 RM 去產生自行內注入(Self-seeding)的操作。極化狀態控制器(PC)被運用來得到最大的功率輸出和維持穩定的極化狀態。在這實驗的量測中，我們調整 TBF 的中心波長在 1546.20 nm 作為雷射輸出波長。由於光學注入的操作，FP-LD 的注入模

態可以得到更高的增益和壓制住邊模去產生單一頻率的輸出。雷射的波長在 1546.25 nm 有 -7.0 dBm 輸出功率可以被量測在圖 6-1 的“b”點的位置，輸出頻譜顯示在圖 6-2 的紅線。接著，雷射波長可以藉由調整 TBF 去配合 FL-LD 的縱模 (Longitudinal-mode) 在有效的放大增益範圍。

更進一步，各個雷射波長可以注入經由 OC 進入 RSOA 作為此波長的放大和調整。所以 RSOA 輸出的頻譜可以被量測到在 1546.25 nm 的時候有 3.8 dBm 輸出功率，顯示在圖 6-2 的藍線上，當 RSOA 被操作在 50mA 的電流時。

### 6.3 實驗結果與分析

我們研究和分析調變信號的表現在 RSOA 不同操作電流時。RSOA 輸出功率在不同的操作電流顯示於圖 6-3，當注入的波長被選擇在 1546.25 nm 為初始。在這個實驗中，RSOA 可以被直接調變在 2.5 Gb/s 以 Non-Return-to-Zero (NRZ) 為調變格式的偽隨機訊號 (Pseudorandom Binary Sequence ; PRBS) 並有  $2^{31}-1$  的訊號長度。在這裡我們可以觀察到在 RSOA 的臨界電流為接近 10mA 如圖 6-3 所示。所得到的輸出功率在 -11.0 dBm 到 7.8 dBm 之間當操作電流在 20 mA 到 80 mA 之間時。圖 6-3 嵌入的插圖為相對應的眼圖在不同的操作電流下，當位元錯誤率 (Bit Error Rate ; BER) 為  $10^{-9}$  以 2.5 Gb/s OOK (On-off Keying) 的調變率。所量測的眼圖是相對較封閉和不清楚的在 30mA 的時候。當電流逐漸的增加，眼圖將變得更開闊和清楚的。



然而，ROSA 較大的輸出功率也將產生較嚴重的非線性效應當偏壓電流大於 70mA 以後。因此，我們可以將 RSOA 的操作電流設定在 50mA 在所提出的雷射架構中作為最佳化的操作。

圖 6-4 表示輸出功率和邊模壓制比(Side-mode Suppression Ratio; SMSR)在不同的雷射波長當波長的操作範圍在 1534.05 到 1553.00 nm 之間以 1.1nm 作為一個調變的步階根據 MLM FP-LD 的有效輸出波長(顯示於圖 6-2)。在此，輸出的功率和邊模壓制比分別被觀察到在 -5.3dBm 到 4.6 dBm 之間和 31.2dB 到 50.1 dB/0.05 nm 之間。此外，最大的 SMSR 在 50.1 dB/0.05 nm 當雷射波長為 1548.50 nm 以 4.6dBm 的輸出功率被量測到。

為了去了解所提出的雷射波長輸出的特性，BER 的量測將被表現和分析。在此實驗中，RSOA 被操作在 50mA 和被直接被調變在 2.5 Gb/s OOK 的資料率，且我們選擇雷射波長在 1546.25 nm 以 3.8 dBm 的輸出功率作為信號的測試。圖 6-5 顯示出我們所提出的雷射架構 BER 之表現作為光源分別在 Back-to-back (B2B)、25km、50km 和 75 km 單模光纖(Single-mode Fiber ; SMF)的傳輸下。如圖 6-5 所示，光功率的懲罰(Optical Power Penalties)為 0.4dB、0.5dB 和 1.5dB 被觀測到分別在經過 25km、50km 和 75 km SMF 的傳輸後，當 BER 為  $10^{-9}$  時且沒有色散補償。另外，圖 6-5 嵌入的初圖為相對應的眼圖分別經過 B2B、25km、50km 和 75 km 單模光纖(SMF)的傳輸，當 BER 為  $10^{-9}$  時。這些被量測到的眼圖均有開闊和清楚的眼。經過 75 km SMF 的傳輸後，所提出的波長可調雷射架構的輸出波長仍然顯示出很好的輸出的特性。



最後，為了去了解和研究提出的波長可調雷射架構中輸出的穩定度在波長和功率上，一段短時間的觀察將表現在此實驗中並顯示於圖 6.6，當雷射波長被選擇在 1546.25 nm 以 3.8dBm 的輸出功率作為初始。經過了 20 分鐘的觀察後，觀察到所提出的雷射在功率和波長的變化分別在 0.5dB 和 0.1nm 之內，如圖 6-6 所示。值得一提的是，經過兩小時的觀察時間後，所提出的雷射架構在輸出的表現仍維持一樣的穩定性。

#### 6.4 討論

總結的來說，我們首先提出和實驗上的研究出穩定的波長可調的雷射架構藉由使用自行內注入(Self-seeded)的 FP-LD 和 RSOA 的外注入(External-injected)。在此，所提出的雷射波長範圍可在 1534.05nm 到 1553.00 nm 間作調變，以 1.1nm 作為調變的步階。且此雷射架構的輸出功率和 SMSR 分別在 -5.3 到 4.6 dBm 之間和 31.2 dB 到 50.1 dB/0.05 nm 之間。並且所提出的雷射架構可以被直接調變在 2.5 Gb/s OOK 的調變格式下和傳輸 75 km SMF 在沒有額外使用任何光放大器和色散補償的情形下。此外，我們提出的波長可調的雷射的輸出穩定性在波長和功率上也被實驗上的表現和分析。

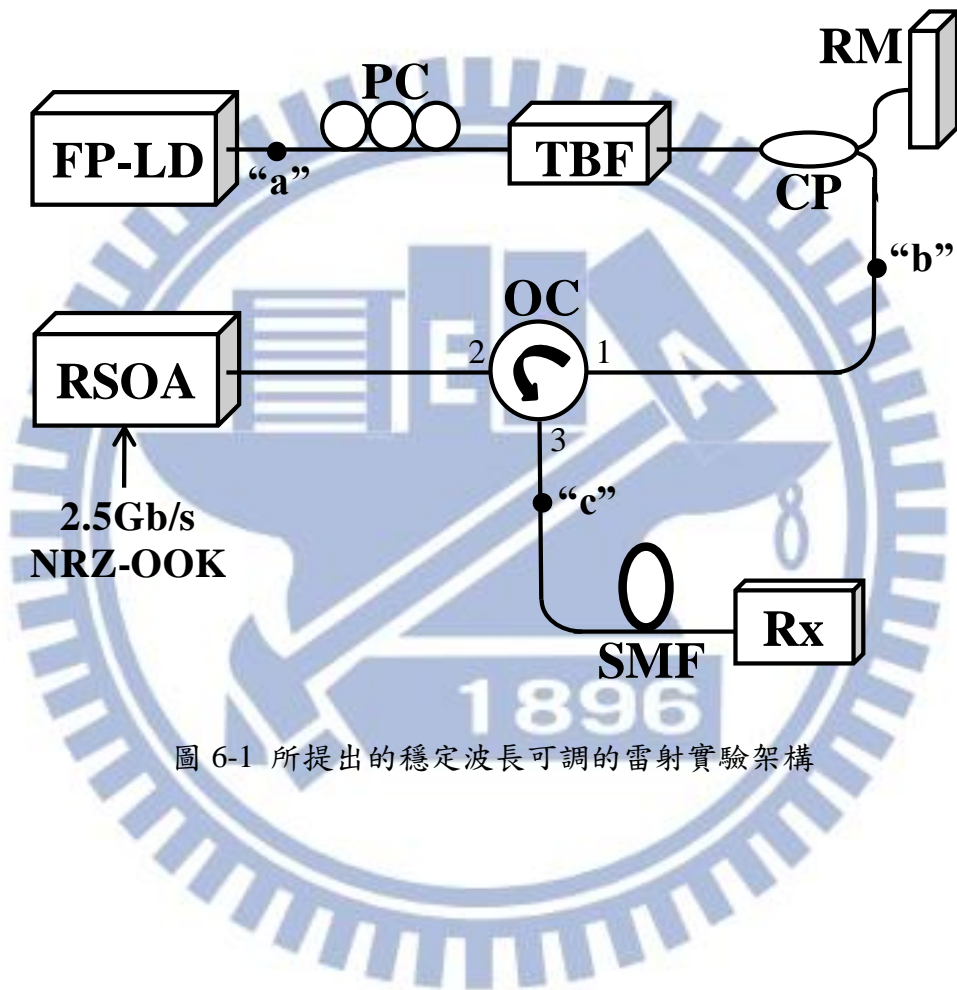


圖 6-1 所提出的穩定波長可調的雷射實驗架構

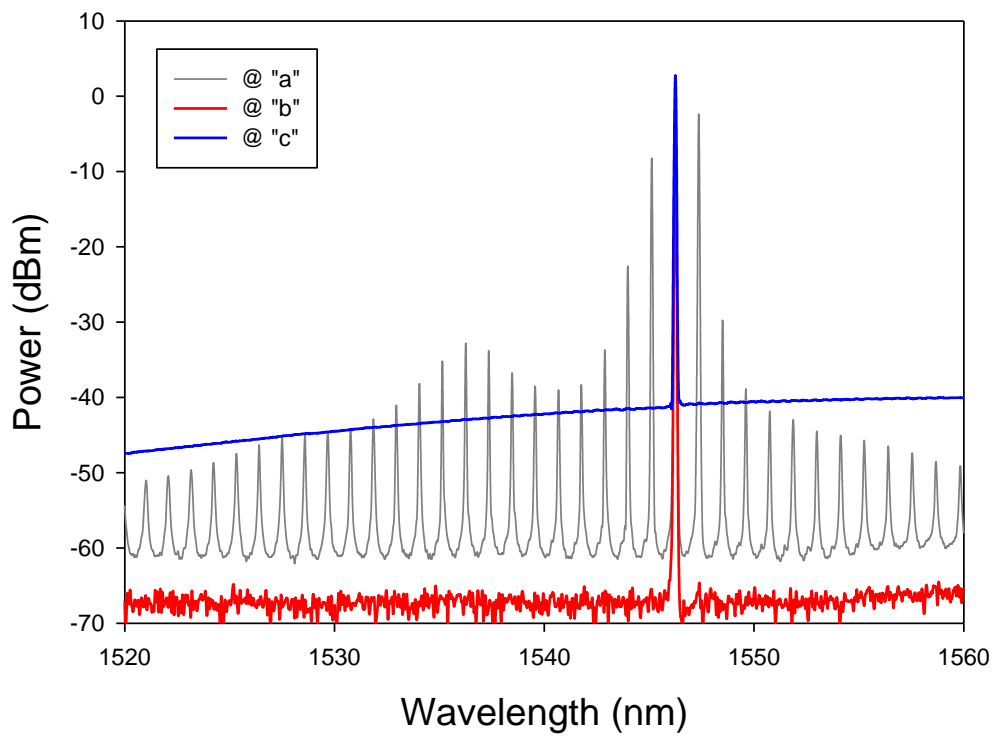


圖 6-2 所提出雷射架構的輸出頻譜分別在圖 5-1''a''、''b''和''c''的位置

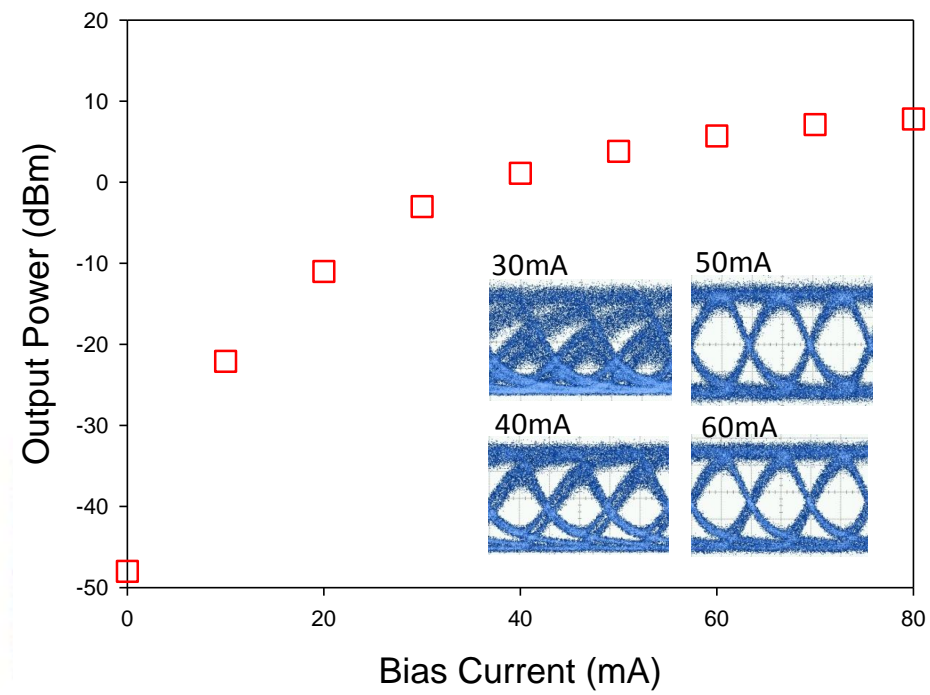


圖 6-3 所量測到的 RSOA 輸出功率在不同的操作電流時，當注入的波長選擇在 1546.25 nm 為初始。嵌入的插圖為不同電流相對應的眼圖。

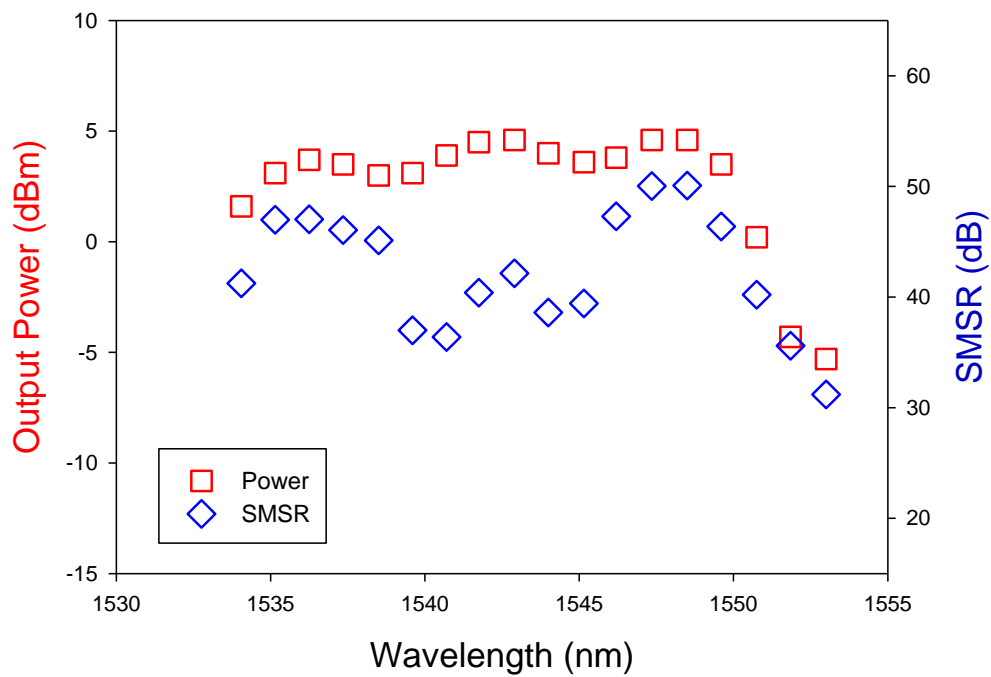


圖 6-4 所量測到的輸出功率與邊模壓制比(SMSR)在不同的雷射波長在 1534.05nm 到 1553.00 nm 操作範圍之間，以 1.1nm 作為一個調整的步階根據 MLM FP-LD 的有效輸出。



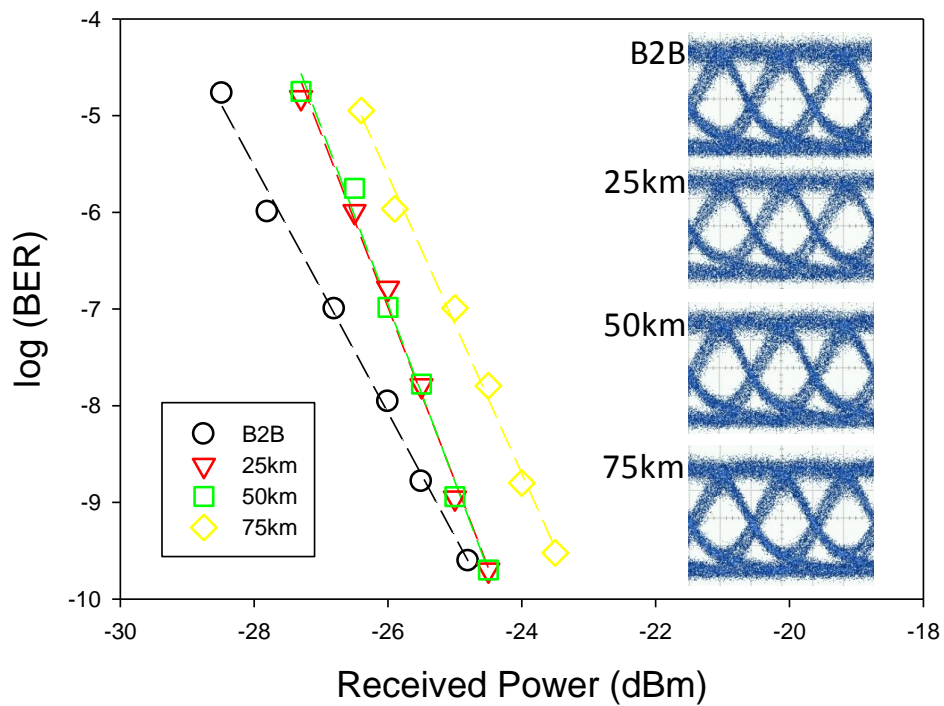


圖 6-5 所提出的雷射源的 BER 表現分別在 back-to-back (B2B)、25、50 和 75 km 單模光纖的傳輸後。嵌入之插圖為其相對應的眼圖。

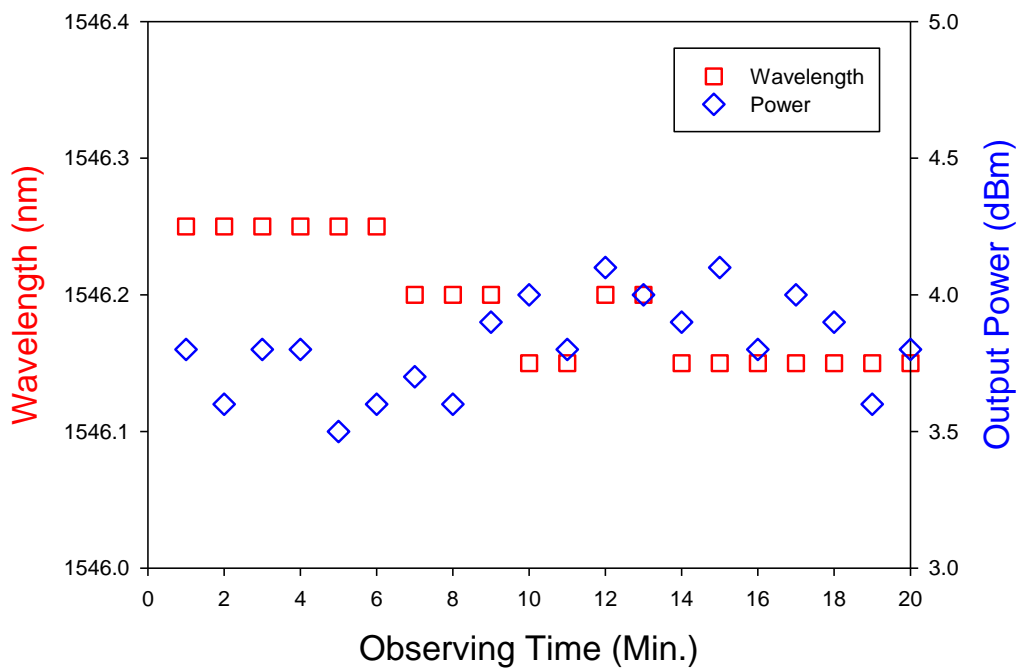


圖 6-6 所提出的雷射架構的輸出穩定性表現在功率和波長上，在經過 20 分鐘的觀察時間。

## 第七章

### 結論

本論文主要針對單一縱模的波長可調雷射進行相關的探討和研究。包含以半導體光放大器為基底之穩定且波長可調 Sagnac 迴路架構的光纖雷射、使用雙反射式結構單一縱模波長可調的摻鉍光纖雷射、利用 Sagnac 迴路並輸出穩定連續的連續波之光學注入波長可調半導體雷射架構和藉由光學注入 Fabry-Perot 雷射二極體和反射式半導體光放大器單一頻率及穩定波長可調雷射並可行長距離的光纖傳輸。

第一部分是半導體光放大器(SOA)為基底並以 Sagnac 迴路作為反射鏡的環狀光纖雷射結構。雷射的波長可以被調變在 SOA 的有效放大的增益區域內，當 SOA 以 80mA 的電流驅動，所提出的雷射可調變的範圍在 1521.0 nm 和 1563.0 nm 之間，並分別有最大和最小的輸出功率 4.8 和 -1.1dBm。所提出之光纖雷射架構的操作臨界電流為 30mA，然而原本 SOA 的臨界電流為 50mA，因此我們可以達到節能使得 SOA 臨界電流減少 20mA 在使用我們提出的 Sagnac 迴路雷射架構下。

第二部分是雙反射式結構單一縱模波長可調的摻鉍光纖雷射，利用光纖反射鏡和光循環器的環狀結構用來當作摻鉍光纖雷射的兩個反射鏡。雙反射式結構的

摻鉺光纖雷射以線性共振腔並運用一個被動式飽和吸收為基底(SAB)的濾波器和帶通濾波器(TBF)來達到單一模態(SLM)的雷射輸出並且可以調變波長。波長的調變範圍從 1530 到 1562nm 之間，並且當我們將雷射波長往上逐步調整，可得到輸出功率和 OSNR 在整個 C-band(1530 nm 到 1560 nm) 的增加，由於雙通的設計在此摻鉺光纖雷射架構中，鉺離子  $\text{Er}^+$  增益被壓制並往較高波長平移。

第三部分是利用 Saganc 迴路並輸出穩定連續的連續波之光學注入波長可調半導體雷射架構，藉由使用以 Saganc 迴路自行注入(Self-injected) FP-LD 以達到鎖模的架構。在這個提出的架構中，單一模態(SLM)雷射波長的調整範圍在 1526.20nm 到 1549.75nm 之間，以 1.30nm 為一個調整步階。為了達到連續的波長調變，我們可以控制和調整 FP-LD 在不同溫度下的波長平移。

第四部分是單一頻率和穩定波長可調雷射藉由光學注入 Fabry-Perot 雷射二極體和反射式半導體光放大器以作長距離的光纖傳輸，我們提出波長穩定可調的雷射架構藉由使用內注入(Self-seeded) Fabry-Perot 雷射二極體和外注入(external-injected)反射式半導體光放大器(RSOA)。所提出的雷射可以在 1534.05nm 到 1553.00 nm 的波長範圍之間調變，以 1.1nm 為一個調整步階，並可以直接調變在 2.5Gb/s on-off keying (OOK)調變格式和經過 75km 單模光纖(SMF)在沒有光放大器和色散補償的情況。

## 參考文獻

- [1] 黃忠偉(1997)。中山文庫科技系列-光電漫談，台北：台灣書店
- [2] <http://www.ieo.nctu.edu.tw/~ieofuture/102/LZapl.html>
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [4] C.-H. Yeh, F.-Y. Shih, C.-T. Chen, C.-N. Lee and S. Chi, “Multiwavelength erbium fiber ring laser using Sagnac loop and Fabry-Perot laser diode,” *Laser Phys. Lett.*, vol. 5, pp. 210-212, 2008.
- [5] C. H. Yeh, C. W. Chow and C. L. Pan, “Utilizing erbium fiber ring scheme and Fabry-Perot laser diode for stable and wavelength-tunable laser in single-longitudinal-mode output,” *Laser Phys. Lett.*, vol. 8, pp. 130-133, 2011.
- [6] C.-H. Yeh, F.-Y. Shih, C.-T. Chen, C.-N. Lee and S. Chi, “Stabilized dual-wavelength erbium-doped fiber dual-ring laser,” *Opt. Express*, vol. 15, pp. 13844-13848, 2007.
- [7] J. Vasseur, M. Hanna, J. Dudley and J. Goedgebuer, “Alternate multiwavelength mode-locked fiber laser,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1816-1818 2004.
- [8] G. Das and J. Lit, “Wavelength switching of a fiber laser with a Sagnac loop reflector,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 60-62, 2004.
- [9] C.-H. Yeh, M.-C. Lin, C.-C. Lee and S. Chi, “Fiber Bragg grating-based multiplexed sensing system employing fiber laser scheme with semiconductor optical amplifier,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, part 1, vol. 44, pp.6590–6592, 2005.
- [10] C. H. Yeh, C. C. Lee and S. Chi, “Fast wavelength switching based on a Fabry-Perot laser pair using optical injection,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, part 1, vol. 43, pp. 3454–3455, 2004.
- [11] S. W. Harun, M. Z. Zulkifli and H. Ahmad, “A linear cavity S-band Brillouin/Erbium fiber laser,” *Laser Phys. Lett.*, vol. 3, pp. 369-371, 2006.



- [12] C.-H. Yeh, F.-Y. Shih, C.-T. Chen, C.-N. Lee and S. Chi, "Stabilized dual-wavelength erbium-doped fiber dual-ring laser," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 13844-13848, 2007
- [13] J. Dong, A. Shirakawa and K. Ueda, "Switchable pulses generation in passively Q-switched multilongitudinal-mode microchip laser," *Laser Phys. Lett.*, vol. 4, pp. 109-116, 2004.
- [14] J. Zhang, and J. W. Y. Lit, "Compound fiber ring resonator: theory," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 11, pp. 1867-1873, 1994.
- [15] J. Zhang, C.-Y. Yue, G. W. Schinn, W. R. L. Clements and J. W. Y. Lit, "Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 104-109, 1996.
- [16] C. H. Yeh, C. W. Chow, K. H. Chen and J. H. Chen, "Employing dual-saturable-absorber-based filter for stable and tunable erbium-doped fiber ring laser in single-frequency," *Laser Phys.*, vol. 21, pp. 924-927, 2011.
- [17] N. A. Awang, Z. A. Ghani, S. W. Harun and H. Ahmad, "Multi-wavelength fiber laser in the S-band region using a Sagnac loop mirror as a comb generator in an SOA gain medium," *Laser Phys. Lett.*, vol. 7, pp. 673-676, 2010.
- [18] H. Ahmad, K. Thambiratnam, A.H. Sulaiman, N. Tamchek and S. W. Harun, "SOA-based quad-wavelength ring laser," *Laser Phys. Lett.*, vol. 5, pp. 726-729, 2008.
- [19] E. Snitzer, *Phys. Rev. Lett.*, No.7, p444, 1961
- [20] J. Stone and C. A. Burros, *Appl. Phys. Lett.*, No.23, p888, 1973
- [21] M. J. F. Digonnet, Ed., *Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers*, Marcel Dekker, New York, 1997
- [22] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, and D. N. Payne, *Electron. Lett.*, No.21, p738, 1985
- [23] [http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_amplifier)
- [24] <http://wsht.kuas.edu.tw/network/s7/index.html>

- [25] NISHIMOTO,H.,KUWAHARA,H.,andMOTEGI,M.:”Injection – locked 1.5  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP lasers capable of 450 Mbit/s transmission over 106 km”,*ibid.*,1983,19,pp.509-510
- [26] TOBA,H.,KOBAYASHI,Y.,YANAGIMOTO,K.,NAGAI,H., and NAKAHARA,M.:”Injected-locking technique applied to a 170 km transmission experiment at 445.8 Mbit/s “,*ibid.*,1984,20,pp.370-371
- [27] KOBAYASHI,S.,YAMADA,J.,MACHIDA,S., AND KIMURA , T. : ”Signal-mode operation of 500 Mbit/s modulated AlGaAs semiconductor laser by injection locking”,*Electron Lett.*, 1980,16. pp.746-748
- [28] MALYON,d.j., and MCDONNA,AP.:”102 km unrepeated monomode fiber system experiment at 140 Mbit/s with an injection locked 1.52  $\mu\text{m}$  transmitter”,*Ibid.*,1982,18pp.445-447
- [29] NISHIMOTO,H.,KUWAHARA,H., AND MOTEGI,M.:”Injection-locked 1.5  $\mu\text{m}$  InGaAsP / InP lasers capable of 450 Mbit/s transmission over 106 km:”,*Ibid.*,1983,19,pp.509-510
- [30] GOLDBERG,L.,TAYLOR,H.F., and WELLER,J.F.:”Intermodal injection locking of semiconductor lasers”.*Electron.Lett.*, 1984,20, pp.809-811
- [31] GOLDBERG,L.,TAYLOR,H.F., and WELLER,J.F.:”Intermodal injection locking and gain profile measurement of AlGaAs lasers”, *IEEE J.Quantum Electron.*,1984,Q-E20,pp. 1226-1229
- [32] ITO,M.,ITO,T.,and KIMURA,T.:”Dynamic properties of semiconductor lasers ” , *J.Appl. Phys.*,1979,50,pp.6168-6174
- [33] BORES.P.M.,DANIELSEN.M., and VLAARDINGERBROEK,M.T.: ”Dynamic behaviour of semiconductor laser”,*Electron.Len.*,1975,11, pp.206-208
- [34] OPSUKA,K.,and TARUCHA,S.:”Theoretical studies on injection locking and injection -induced modulation of laser diodes”.*IEEE J.Quantum Electron.*,1981,Q-E17,pp.1515-1521

[35] ITO,M.,ITO,T., and KIMURA,T.:"Dynamic properties of semiconductor lasers " ,  
J.Appl.Phys.,1979,50,pp.6168-6174

[36] OTSUKA,K., and TARUCHA,S.:"Theoretical studies on injection locking and  
injection -induced modulation of laser diodes",IEEE J.Quantum  
Electron.,1981,Q-E17,pp.1515-1521

