

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

不同頻段的摻鉕光纖放大器之研究

Study of Various Band Erbium-Doped Fiber Amplifier



研究生：黃盈傑

指導教授：祁 甦 教授

李健仲 博士

中華民國九十三年六月

不同頻段的摻鉕光纖放大器之研究

Study of Various Band Erbium-Doped Fiber Amplifier

研究生：黃盈傑

Student : Ying-Jie Huang

指導教授：祁 姓 教授

Advisor : Sien Chi

李健仲 博士

Chien-Chung Lee



Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering College of
Electrical Engineering and Computer Science
National Chiao-Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master in Electro-Optical Engineering

June 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

博碩士論文授權書

本授權書所授權之論文為本人在國立交通大學光電工程研究所 92 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文名稱：不同波段的摻鉍光纖放大器之研究

指導教授：祁 甦，李健仲

1. 同意 不同意

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)資料，授予行政院國家科學委員會科學技術資料中心(或改制後之機構)，得不限地域、時間與次數以微縮、光碟或數位化等各種方式重製後散布發行或上載網路。

本論文為本人向經濟部智慧財產局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：_____，註明文號者請將全文資料延後半年再公開。

2. 同意 不同意

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)資料，授予教育部指定送繳之圖書館及國立交通大學圖書館，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會及學術研究之目的，教育部指定送繳之圖書館及國立交通大學圖書館得以紙本收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，不限地域與時間，讀者得進行閱覽或列印。

本論文為本人向經濟部智慧財產局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：_____，註明文號者請將全文資料延後半年再公開。

3. 同意 不同意

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)，授予國立交通大學與台灣聯合大學系統圖書館，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會及學術研究之目的，國立交通大學圖書館及台灣聯合大學系統圖書館得不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行線上檢索、閱覽、下載或列印。
論文全文上載網路公開之範圍及時間 -

本校及台灣聯合大學系統區域網路：93 年 6 月 2 日公開

校外網際網路：93 年 6 月 2 日公開

上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未鈎選，本人同意視同授權。

研究生簽名：

學號：9124516

(親筆正楷)

(務必填寫)

日期：民國 93 年 6 月 2 日

國家圖書館博碩士論文電子檔案上網授權書

本授權書所授權之論文為本人在國立交通大學光電工程研究所 92 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文名稱：不同波段的摻鉺光纖放大器之研究

指導教授：祁 姓，李健仲

同意 不同意

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)，以非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未鈎選，本人同意視同授權。

研究生簽名：
(親筆正楷)



學號：9124516
(務必填寫)

日期：民國 93 年 6 月 2 日

不同頻段的摻鉍光纖放大器之研究

學生：黃盈傑

指導教授： 祁甦 教授
李健仲 博士

國立交通大學光電工程研究所



本論文在研究以摻鉍光纖為主的寬頻光放大器，其頻寬包括了目前最廣為使用的三個頻段，S 頻段(1480nm~1520nm)，C 頻段(1530nm~1560nm)以及 L 頻段(1570nm~1610nm)之摻鉍光纖放大器。本論文包括單一頻段的放大器，混合型的放大器，最後整合成一涵括三大波段的超寬頻光放大器。在實驗中，我們使用新的技術來達到較經濟且通用度高的 S 頻段，C+L 頻段，與 S 到 L 頻段的放大器。

另外，增益箝制的光放大器，也會在本論文中做討論。

Study of Various Band Erbium-Doped Fiber Amplifier

student : Ying-Jie Huang

Advisors : Sien Chi

Chien-Chung Lee

Institute of Electro-Optical Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University



In this thesis , we focus our study on the wide-band erbium-doped fiber amplifiers , including the S-band(1480nm~1520nm), C-band (1530nm~1560nm) and L-band(1570nm~1560nm) , the three most popular bands . This study includes single stage amplifier , hybrid amplifier , and broadband amplifiers . In these experiments , we achieve the S-band , C- plus L-band and S- to L-band fiber amplifier by employing novel techniques.

Furthermore , the other important issue in amplifier research , gain-clamping , will be discussed in the latter part of the thesis .

誌 謝

從不熟悉的研究環境摸索起，到稍能由研究中了解一些研究的樂趣與奧妙後，短短的研究生生涯竟也在知不覺中即將結束。實驗得以順利完成，首先要感謝祁甦老師與李健仲學長，其傳授的知識與提供的自由發展空間，是研究得以成型的主因。再來，要感謝葉建宏學長在實驗上幫忙，才能使實驗中的問題得以一一解決。感謝賴暎杰老師，陳智弘老師與馮開明老師撥冗擔任口試委員且提出寶貴意見。也要感謝實驗室裡的錢鴻章學長，曾弘毅學長，周森益學長，彭朋群學長，彭煒仁學長，葉信宏學長，黃明芳學姊及粘芳芳學姊，謝謝你們在實驗或生活上不求回報的幫忙。

另外，實驗室裡的同學至揚，坤錫，加和，淑玲以及學弟妹小強，玉婷與重佑，也要謝謝你們的陪伴，讓我有愉快的心情進行實驗。

最後我要感謝我的家人，謝謝你們在我近二十年的求學生涯的陪伴與支持，沒有你們我走不到這裡，謝謝。



目錄

	頁次
中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
第一章 緒論	
1.1 簡述.....	1
1.1.1 寬頻光纖放大器.....	1
1.1.2 全光增益箝制技術.....	3
1.2 研究動機.....	4
第二章 原理	
2.1 摻鉍光纖基本原理.....	6
2.1.1 三階態物理.....	6
2.1.2 小訊號增益.....	8
2.1.3 泵激光源與組態的選擇.....	10
2.2 L 頻段放大機制.....	11
2.2.1 最佳長度.....	11
2.2.2 L 頻段設計原理與應用.....	12
2.2.3 L 頻段噪聲指數表現.....	15
2.3 S 頻段設計基本原理.....	17
2.4 半導體光放大器(SOA).....	18
2.4.1 SOA 基本結構原理.....	18
2.4.2 SOA 使用在系統上的優缺點.....	19
2.5 增益箝制.....	20
2.5.1 增益箝制(Gain-Clamping).....	20
2.5.2 增益箝制原理與應用.....	20
2.5.3 增益箝制噪聲指數表現.....	24
第三章 混合型之寬頻光纖放大器	

3.1 混合式C+L頻段光纖放大器.....	25
3.1.1 簡述.....	25
3.1.2 雙級C+L頻段放大器架構與實驗結果.....	25
3.1.3 三級C+L頻段放大器架構與實驗結果.....	27
3.2 S到L頻段平行架構光放大器.....	28
3.2.1 簡述.....	28
3.2.2 實驗架構.....	28
3.2.3 實驗結果與討論.....	29
3.3 總結.....	31
第四章 增益箝制技術於光放大器上的探討	
4.1 簡述.....	40
4.2 混合式 C+L 頻段放大器增益箝制.....	40
4.3 增益箝制在摻鉕光波導放大器的應用.....	42
4.3.1 摻鉕光波導放大器簡介.....	42
4.3.2 摻鉕光波導放大器全光增益箝制.....	43
4.4 總結.....	45
第五章 結論與展望.....	52
參考資料.....	55



圖目錄

	頁次
圖 2.1 三能階示意圖.....	6
圖 2.2 不同強度的 980nm 與 1480nm 泵激雷射對粒子反轉的效果.....	10
圖 2.3 (a) 激發態粒子數對光纖距離關係圖, 使用 980nm 泵激.....	11
(b) 激發態粒子數對光纖距離關係圖, 使用 1480nm 泵激.....	11
圖 2.4 光纖最佳長度對泵激強度的關係圖, 使用 980nm 泵激與 1530nm 測試光.....	12
圖 2.5 (a) 最佳長度對泵激強度的關係圖, 使用 980nm 泵激與 1530nm (-40dBm) 測試光	13
(b) 最佳長度對泵激強度的關係圖, 使用 980nm 泵激與 1550nm (-40dBm) 測試光.....	13
圖 2.6 增益途徑倍增之 L 頻段放大器.....	14
圖 2.7 (a) 經過兩次增益媒介的 ASE 圖形.....	14
(b) 訊號增益與噪聲指數對泵激光源強度作圖.....	14
圖 2.8 利用反射鏡提高 L 頻段放大效率的架構.....	14
圖 2.9 不同反射率補償的 ASE 圖形.....	15
圖 2.10 基本雙級 L 頻段放大器架構.....	16
圖 2.11 L 頻段不同泵激組態下增益與噪聲指數對波長作圖.....	16
圖 2.12 光源在一般摻鉕光纖裡的吸收與放射係數圖.....	17
圖 2.13 S 頻段摻耳光纖纖蕊與外層折射係數分部圖.....	17
圖 2.14 使用反向迴路雷射之增益箝制架構.....	22
圖 2.15 使用雙鏡面形成迴路雷射之增益箝制架構.....	23
圖 3.1 混合式 C 加 L 頻段放大器架構.....	32
圖 3.2 (a) C+L 頻段雙級架構之第一與第二級放大器個別的增益頻譜	32
(b) 雙級放大器串連的增益與噪聲指數頻譜.....	33
圖 3.3 傳統 L 頻段 EDFA(92m 長摻鉕光纖) 的增益與噪聲指數頻譜....	34
圖 3.4 改良後三級混合式 C+L 頻段光放大器架構.....	34
圖 3.5 三級 C+L 架構第一與第三級放大器個別的增益頻譜.....	35
圖 3.6 改良式 C+L 頻段放大器增益與噪聲指數的表現.....	36
圖 3.7 S+C+L 寬頻摻鉕光纖放大器架構.....	37
圖 3.8 當輸入訊號為 0, -15 與 -30dBm 時 S 頻段放大器的增益與噪聲指數表現.....	37
圖 3.9 輸入訊號為 0, -15 與 -30dBm 時 C+L 頻段放大器的增益與噪聲指數表現.....	38

圖 3.10 (a)輸入訊號為 0, -15 與 -30dBm 時寬頻放大器的增益頻譜...	38
(b)當輸入訊號為 0, -15 與 -30dBm 時寬頻放大器的噪聲指數	
.....	39
圖 4.1 混合式C+L頻段光放大器增益箝制架構.....	45
圖 4.2 箝制用雷射在 1560nm 下的增益箝制效果示意圖, 測試光源為	
1566nm.....	46
圖 4.3 選用 90:10 光耦合器的迴路架構下的增益與噪聲指數頻譜...	46
圖 4.4 摻鉍光波導放大器增益箝制架構.....	47
圖 4.5 摻鉍光波導放大器的增益與噪聲指數頻譜.....	48
圖 4.6 三個不同濾波波長所量到的放大器自發輻射圖(分光為 30:70)	
.....	49
圖 4.7 (a)迴路雷射為 1540nm 時, 由 1548nm 測試光所量得之增益箝制	
情形.....	49
(b)迴路雷射為 1550nm 時, 由 1548nm 測試光所量得之增益箝制	
情形.....	50
圖 4.8 迴路雷射選在 1540nm 且分光為 30:70 時的增益頻譜.....	51



第一章

緒論

1.1 簡述

1.1.1 寬頻光纖放大器

隨著光多波分工(WDM)技術的長足進展，大大提升了系統傳輸量。也正因為如此，在傳輸途中的重要元件：線上光放大器(in-line Amps)也面臨比以往更加嚴謹的審視；即其適用的頻寬，使用的靈活度與價格是否合理的種種因素都有待於進一步的改進整合以趨完善。然而，在比較常被使用的 C 頻段與 L 頻段的放大器或是兩者混合的模組(1530nm~1600nm)也只能到達每秒鐘幾個泰拉位元(terabits)，所以若要配合成長迅速的頻寬需求，必定要朝其他波段做發展，且與現有的波段放大技術整合[1]。以光纖放大器來說，一般以矽材製程的單模光纖裡光在 1450nm 到 1650nm 之間有著非常小的損耗(0.2dB/km)，要如何廣泛使用到此一寬廣的波段將是光纖通訊重要發展方向之一，當然也必須要有適用的光放大器做配合來實現此一目標。

在光纖通訊最初期幾年的發展下，C 頻段的放大機制已經研究的非常成熟，儘管其放大率以及噪聲指數(NF)的表現令人滿意，但其可用的放大頻寬僅僅約是 30nm，不得不再往其他頻段研究，以摻鉕光纖為主架構的光放大器(EDFA)而言大概可以分成兩個不同的發展方向：**1.摻入其它元素或改變光纖內部結構。** **2.改變一般摻鉕光纖的長度及不同泵激波長。**舉第一點為例，如摻入碲(telluride)元素將增益頻譜移到 L 頻段；或摻入鈹(thulium)元素將增益頻譜平移到 S 頻段，使用的泵激也可以因應其吸收放射的能帶的改變而作其他較好的選

擇。其基本原理都是藉由摻雜元素的加入，使得原本沒有的頻帶被創造出來，也因此使原本光放大器的頻段改變[2][3]。而改變摻耳光纖內部結構的效果與摻雜其他元素類似，旨在利用創造出來的光纖特殊結構壓抑原本的增益最大值(加大其色散)，使其增益平移到另一個頻段[4]。而第二個方向的研究則是架構在原有的摻鉍光纖基本物理原則上，藉由增益通道長度變長來增加長波長居量反轉以延長增益頻譜到 L 頻段[5][6][7][8]，或者直接改變泵激的波長(非 980nm 與 1480nm)，增加長波長粒子的轉換效率也會有同樣效果[9]。對 S 頻段放大的設計來說大多的研究是使用第一種方法來達成[10]，因一般摻鉍光纖在其頻段的吸收與輻射的條件不利於使用第二種方式將增益延伸到 S 頻段。而對 L 頻段來說，以第一種方式或第二種方式來達到其頻域放大的研究都非常的多。

除了上述對單一波段放大器的研究之外，也有很多其他寬頻的光纖放大器，如建構在光纖非線性現象上的光放大器可以藉由不同的泵激光源達到寬頻的放大頻域，舉一般最為所知道的拉曼光放大器(Raman Amp)來說，藉由打入不同的泵激波長就可以在比泵激波長約大 100nm 的波長處有最好的放大增益效果，理論上藉由變化不同的泵激頻率級可以涵蓋任何波段，以目前泵激光源的技術增益頻寬可以超過 700nm(1000nm~1700nm)，比起摻鉍光纖放大器也有較好的增益平坦度(約 1dB) [11][12]。架構在摻鉍光纖上的寬頻放大器，目前以使用分波器做平行的(分波段的)放大架構被公認為最快速可行的方法[13][14]，其優點為架構中使用的為一般摻鉍光纖與最常被使用的泵激光源，兩者在技術方面已經相當的成熟，取得上不會有大問題，且共通性高使得元件使用彈性大增，舉例而言，在架構中可以利用巧

思使利用同一光源但不同方向的放大器自發輻射(backward and forward ASE)個別對不同波段的放大都有其功能[15]。另外，其他的光放大器如：半導體光放大器(SOA)或摻鉍波導光放大器(EDWA)在近年來的發展之下，在頻寬，增益值與躁聲指數逐漸令人滿意之下，可當成主流單波段放大器或在混合式寬頻光放大器裡出現的可能性都將大大的增加。

1.1.2 增益箝制技術

在 WDM 系統裡，除了光放大頻域要寬之外，增益箝制的議題也相當的重要。由於摻鉍光纖在本質上有著較長的粒子激發態轉變到基態時間，所以隨著總通道數的增加或減少(總功率變化)，單一波長的增益也會有敏感的變動，而這對訊號傳送錯誤率(bit error rate)會有一定程度的影響。近 10 年來摻鉍光纖放大器中常用來做增益箝制的方法大概可以分成三類：1.利用光電回授在光泵激源上做補償。 2.額外加入一補償光信號。 3.使用光迴路做增益的補償。第一個實行的方法很直觀，即是在查覺輸出總功率有變化時，賦予一回授機制在放大器泵激光源的電性控制上，利用訊號增益隨著泵激功率的改變而改變來達到增益箝制[16]，第二種類的方法則是利用外加的光源如：DFB 或 Fabry-Perot 雷射，由光耦合器或旋波器導入至訊號光路，藉之固定不同波段的居量反轉數(population inversion of active ions)，如此單一波長的增益僅與其波段吸收跟輻射的淨值成正比，而與輸入波長的功率大小無關來達到箝制，由 Fabry-Perot 雷射注入甚至可以達到頻譜增益平坦的效果[17]。而第三種方法原理上是與第二種一樣，是利用放大器自發輻射(ASE)配合可調光濾波器(TBF)或布拉格光纖光柵(FBGs) 或單純只是在輸入光源與摻鉍光纖間加入一光纖光柵或光反

射鏡形成一共振腔迴路雷射[18][19][20]，在不需額外加入補償光源的情形下來達到與方法二同樣的箝制效果。在方法二與三中因為牽涉到非訊號光源在光路中與訊號一起傳輸的機制，在躁聲指數上會有不同的影響，在設計原則上是要將系統中訊號的放大率與躁聲指數的表現與增益箝制的效果一並列入考量[21]，如此的箝制才有其意義。

1.2 研究動機

有鑒於超寬頻光纖放大器在未來的需求，本論文專研於彈性大的寬頻光放大器。上述的非線性拉曼光纖放大器來說，以目前的技術而言其放大頻寬雖然可以到達近 800nm，遠大於現今摻鉕光纖放大器的放大頻寬，其放大率以及躁聲指數的表現不下於摻鉕光纖放大器，甚至在總功率的變動之下，單一波長的增益變動程度也不像摻耳光纖放大器般敏感[11]，使其深具在分波多工放大器上的發展潛力，但由於拉曼光纖放大器的原理是利用光纖裡的非線性放大原理，需要功率大的泵激光原來達成另一個波段的放大，且若要延伸其放大的頻寬，也要有許多不同波長的泵激來達成，如此一來架設一拉曼光纖放大器將會因其對光源的需求而大大提高價格，且單一波長對單一放大頻寬在使用彈性上也顯缺乏。另者，雖說其可用頻寬在 700nm 以上，但若用到所有的頻寬，勢必有些頻段受到的色散情形會非常嚴重，在沒有適當的色散補償(DC)之下，會產生嚴重的四波混頻現象(FWM)，所以其適合同時使用的頻帶仍有待商確。

對摻鉕光纖放大器的頻寬而言，即便目前最常使用的三大頻域(S, C, L 頻段)的總合仍遠不及多光源泵激拉曼光纖放大器的可用頻段，但因其架設上非常的便捷，所需要的泵激在數量上以及功率操作

都要比前者來的經濟，加上摻鉕光纖放大器已經可以順利應用在一般光纖損耗最低的三個頻段，甚至整合成混合波段的光放大器，大大提升其在系統上的吸引力。在一般光纖中摻入不同元素以及配合不同泵激所建構而成的光纖放大器可以將增益平移至不同波段，理論上配上合適的分波器即可組成寬頻的混合式光纖放大器，唯其對於不同的波段需要摻入不同的元素，且需要因應能帶的變化而改變泵激的波長使其達到區域增益的效果[22]，如此一來在摻雜不同特殊元素光纖與特殊波長壘激的取得將會顯得繁雜與不經濟。也因此主架構朝向使用同一種特殊元素摻雜的光纖，且不需使用特殊波長泵激的混合波段放大器更顯出其優勢。近年來使用摻鉕光纖放大器應用在 L 頻段的放大器研究日趨成熟，多數的研究方法是朝向改變摻鉕光纖的長度以及泵激的強度與方向使得原本屬於 C 頻段增益得以延伸到 L 頻段；而在 S 頻段的應用方面，除了在光纖中摻雜鉍元素外，還有在摻鉕光纖包覆層作結構上的變化使得原本再 C 頻段或 L 頻段的增益被壓抑，如此形成 S 頻段的摻鉕光纖放大器。

實驗中的第一部分先討論如何構成一寬頻摻鉕光纖放大器：包括在 L 頻段的設計採用三級串接的放大器來達成。再以分波器將 C+L 頻段的放大器與 S 頻段的放大器以一平行架構方式組成，以達寬頻摻鉕光纖放大器。除外，為了確保此混合放大器在 WDM 系統裡亦能被使用，增益箝制的部分會在實驗的第二部分中提出來做討論，結合已被發表過的 S 頻段增益箝制[10]，續以討論 C+L 頻段放大器的增益箝制，進一步確保個波段的信號都不會因為系統中信號的增減而有顯著的影響。最後，我們也將增益箝制的方法應用在摻鉕光波導放大器，證明了相同的方法也可以應用在非光纖放大器裡頭。

第二章

原理

2.1 摻鉍光纖基本原理

2.1.1 三階能態物理

以三階能態來分析摻鉍光纖對光的放大機制是目前最常被使用的方式，許多重要的放大器特性都可以藉由分析三階模型而得到證實。考慮一三階能態系統如下圖 2-1:

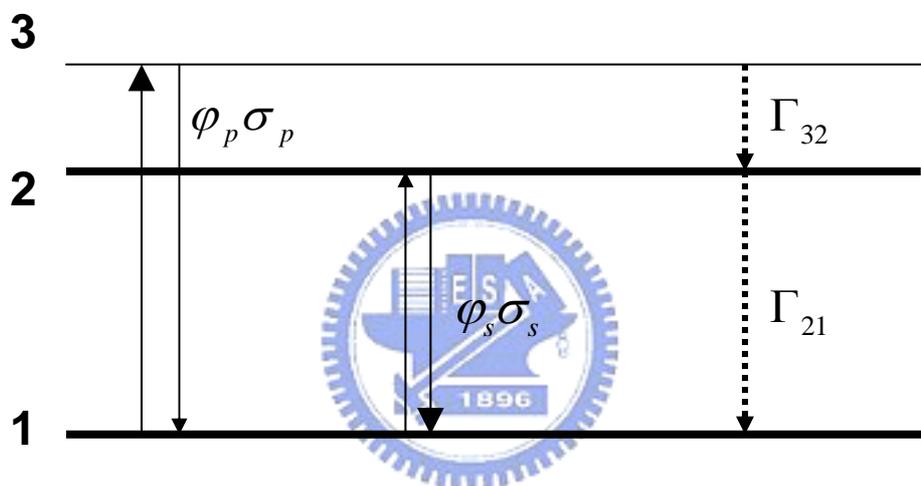


圖 2.1 三能階示意圖

第三層為過度層，也是泵激光源將粒子反轉到的能階，此層的粒子將以非常短的時間轉換至能態圖的第二層，此能階的粒子有著較長的生命期所以通常也被稱為準穩態(metastable level)，而第一層就是基態層，粒子從第二層到第一層的遷移所造成的能量轉換即是造成光放大的機制，也就是說我們必須先將足夠量的粒子從基態層反轉至準穩態層以提供放大的基本需求。

我們以 N_1, N_2, N_3 分別表示三個能階的粒子數，再定義光能量相當於能階 1 與 3 能量差值的光通量為 φ_p ，相當於能階 1 與 2 能量差值

的光通量為 ϕ_s 。以 Γ_{32} 表示從能階 3 到能階 2 的躍遷機率，以 Γ_{21} 表示從能階 2 到能階 1 的躍遷機率(以摻鉍光纖而言代表從層到層的躍遷)。由能階 1 到能階 3 的吸收橫截面定義為 σ_p ，能階 2 到能階 1 的放射橫截面則為 σ_s 。由此粒子轉換速率方程可以表示如下：

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p \quad (2.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (2.2)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p + (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (2.3)$$

在穩定狀況下，粒子對時間的微分應該為零，意即：

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

定義總粒子數 N 為：

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (2.5)$$

將 2.1 式改寫成：

$$N_3 = \frac{1}{1 + \Gamma_{32}/\phi_p\sigma_p} N_1 \quad (2.6)$$

代入 2.2 式得：

$$N_2 = \frac{(\phi_p\sigma_p/\Gamma_{32}) + \phi_s\sigma_s}{\Gamma_{21} + \phi_s\sigma_s} N_1 \quad (2.7)$$

最後利用 2.5 式導出：

$$N_2 - N_1 = \frac{\phi_p\sigma_p - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\phi_s\sigma_s + \phi_p\sigma_p} N \quad (2.8)$$

要達到粒子反轉的條件，則是要上式的值大於零，由其等於零時可以求出臨界的泵激通量為：

$$\phi_{th} = \frac{\Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{1}{\tau_2 \sigma_p} \quad (2.9)$$

式 2.8 以改寫成：

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{\phi_p' - 1}{\phi_p' + 1} \quad (2.10)$$

上式中定義 $\phi_p' = \frac{\phi_p}{\phi_{th}}$

又泵激強度可以表示為 $I_p = h\nu_p \phi_p$ ，所以可將臨界泵激光通量改寫成強度的表示式：

$$I_{th} = \frac{h\nu_p \Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2} \quad (2.11)$$

以摻鉕光纖放大器來說，其準穩態的粒子生命奇非常的長，所以粒子可以長處於此預備放大的層級，不需要泵激快速的來回作態能反轉，如此可以大大減少泵激所需的能量。

2.1.2 小訊號增益

光在經過一段小距離後，強度會被放大或衰減，端由在基態的粒子收激到準穩態的數目與準穩態的粒子輻射到激態的數目多寡而決定。

由上述的三階態模型可以導出：

$$\frac{d\phi_s}{dz} = (N_2 - N_1)\sigma_s\phi_s \quad (2.12)$$

$$\frac{d\phi_p}{dz} = (N_3 - N_1)\sigma_p\phi_p \quad (2.13)$$

由關係式 $\phi_p = \frac{I_p}{h\nu_p}$ ， $\phi_s = \frac{I_s}{h\nu_s}$ 可以將上述二式改寫成：

$$\frac{dI_s}{dz} = \frac{\frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p} - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p}} \sigma_s I_s N \quad (2.14)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\Gamma_{21} + \frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s}}{\Gamma_{21} + 2\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p}} \sigma_p I_p N \quad (2.15)$$

從 2.14 式中可以明顯看出，若訊號要有增益則 $\frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p} - \Gamma_{21}$ 需要 >0

即：

$$I_p \geq I_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2} \quad (2.16)$$

定義一些規一化的參數如下以利簡化：

$$I'_p = \frac{I_p}{I_{th}} \quad (2.17)$$

$$I'_s = \frac{I_s}{I_{th}} \quad (2.18)$$

$$\eta = \frac{h\nu_p \sigma_s}{h\nu_s \sigma_p} \quad (2.19)$$

$$I_{sat}(z) = \frac{1 + I'_p(z)}{2\eta} \quad (2.20)$$

由 2.17 到 2.20 可以將 2.14，2.15 改寫成：

$$\frac{dI'_s(z)}{dz} = \frac{1}{1 + I'_s(z)/I_{sat}(z)} \left(\frac{I'_p(z) - 1}{I'_p(z) + 1} \right) \sigma_s I'_s(z) N \quad (2.21)$$

$$\frac{dI'_p(z)}{dz} = -\frac{1 + \eta I'_s(z)}{1 + 2\eta I'_s(z) + I'_p(z)} \sigma_p I'_p(z) N \quad (2.22)$$

上述二式是最常被拿來描述摻鉕光纖放大器的公式，我們進一步去分析訊號在光纖裡傳輸的細節。在小訊號增益的條件之下，即 $I'_s \ll I_{sat}$ 且

$I_p \geq I_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2}$ 的情形之下，由上述訊號光強度對距離的微分式積分可

以得到公式如下:

$$I'_s(z) = I'_s(0) \exp(\alpha_p z) \quad (2.23)$$

且定義參數 α_p 如下:

$$\alpha_p = \frac{I'_p - 1}{I'_p + 1} \alpha_s N \quad (2.24)$$

但當 $I'_s \gg I_{sat}$ 時, 2.23 式不在適用, 可由 2.2.1 推得公式如下:

$$\frac{dI'_s(z)}{dz} = I_{sat}(z) \left(\frac{I'_p - 1}{I'_p + 1} \right) \sigma_s N \quad (2.25)$$

2.1.3 泵激光源與組態的選擇

在摻鉕光纖放大器裡, 因應其物理特性, 980nm 與 1480nm 的泵激光源是最常被使用的, 1480nm 比起 980nm 的泵激有著稍微較小的臨界功率, 原因為 1480nm 離要放大的波段能帶較近, 所以其粒子反轉在低泵激功率下的效率要比 980nm 來的高, 但因為摻鉕光在 980nm 時有著近乎為零的放射橫截面, 在泵激強度漸強時其放大率將會大過以 1480nm 為泵激的光放大器, 如下圖 2.2 所示[23]:

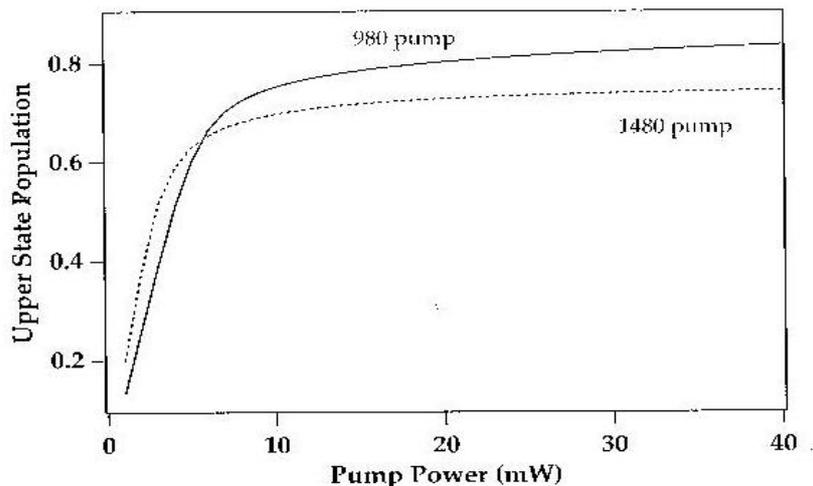


圖 2.2 不同強度的 980nm 與 1480nm 泵激雷射對粒子反轉的效果。

又在其原件特性上, 980nm 泵激有著比 1480nm 泵激要好很多的電-

光轉換效率，且躁聲指數上的表現也優於 1480nm 泵激，所以在一般 C 頻段放大器裡使用 980nm 當泵激的較為常見。而 1480nm 泵激光源比起 980nm 泵激可以將沿著摻鉕光纖中的粒子作較為平緩的反轉，如下圖 2.3 所示[23]:

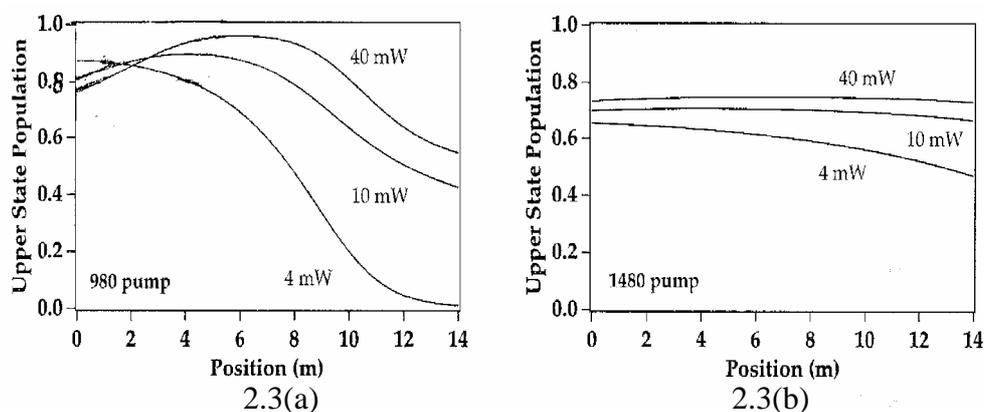


圖 2.3 (a) 激發態粒子數對光纖距離關係圖，使用 980nm 泵激。

(b) 激發態粒子數對光纖距離關係圖，使用 1480nm 泵激。

如此將更適合使用在第二級放大器中使訊號獲得較高的增益，或在長摻鉕光纖放大器裡使用，如 L 頻段放大器。

至於在泵激組態方面的選擇則必須因應不同的系統需要作改變。一般來說，與訊號同向的泵激預期對輸出訊號會有較好的躁聲指數表現，而與訊號反向的泵激則能提供較高的輸出訊號功率，但兩者對與所使用的摻鉕光纖都必須要有一定的要求限制才能達到所期待的效果。相對的，若是使用雙向的泵激光源，則能擁有兩者的好處，訊號對摻鉕光纖長度的要求限制也不會向上述兩者般敏感。

2.2 L 頻段放大機制

2.2.1 最佳長度(Optimal Length)

放大器中，若已經給定一固定的泵激強度，位了要達到訊號光源

在光纖裡有最大的增益，光纖長度必須適當的增長或縮短到泵激的強度在此距離剛好等於其臨界強度(I_{th})。舉例說明，沿著光纖軸中有一點 Z 點，再此點之前訊號的增一是正值，而大於此點的距離，訊號將受到衰減，此點就定義成光纖的最佳距離長度。實際上在系統中訊號光源並非是唯一傳輸於光纖中的訊號，放大器自發輻射也是需要考慮進去的，當自發輻射加入信號光源做放大時，使用 $I_p(z)=I_{th}$ 中的 Z 點當作是最佳長度將不再適合，而必須由實際量測到訊號增益最大值來定義最佳長度，如下圖 2.4 所示[23]:

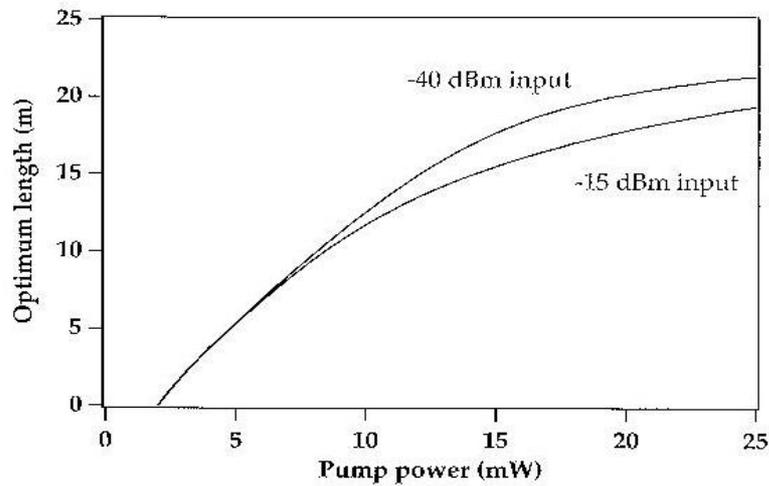


圖 2.4 光纖最佳長度對泵激強度的關係圖，使用 980nm 泵激，1530nm 測試光。

2.2.2 L 頻段設計原理與應用

在 2.2.1 探討了最佳長度對單一波長在光纖裡的增益有重要的影響。相同的，對於不同波長的訊號也其對應的最佳長度存在。回憶在 2.1.2 中討論的小訊號增益，最後由三階物理模型所推得的訊號光源與泵激光源強度隨距離變化的關係如下:

$$\frac{dI'_s(z)}{dz} = \frac{1}{1+I'_s(z)/I_{sat}(z)} \left(\frac{I'_p(z)-1}{I'_p(z)+1} \right) \sigma_s I'_s(z) N$$

$$\frac{dI'_p(z)}{dz} = -\frac{1+\eta I'_s(z)}{1+2\eta I'_s(z)+I'_p(z)} \sigma_p I'_p(z) N$$

考慮不同波長但相同注入功率的訊號，從上述訊號強度對距離的變化方程式來看，有著較大放射橫截面的信號在一開始時訊號的增益現象會比較明顯，反之較小放射橫截面的信號在一開始時訊號的增益現象會比較緩慢，即： $\frac{dI'_s(z)}{dz} \sim k\sigma_s$ 。但同時，較大的信號會對泵激強度造成比較快的損耗(由上述泵激強度對距離的變化方程式可以看出)。如此一來，雖然說有著比較大放射截面積的信號在一開始的訊號隨距離的增益會比較大，但相對泵激強度隨距離的衰減也會比較快，如此 I_{th} 就會落在比較近的距離(跟小放射截面積的信號比起來)。就摻鉕光纖放大器來說來說，放射橫截面積在 1560nm 之後變得很小，藉由上述的原理就可以將放大頻域往長波長移動，如下圖 2.5 所示[23]:

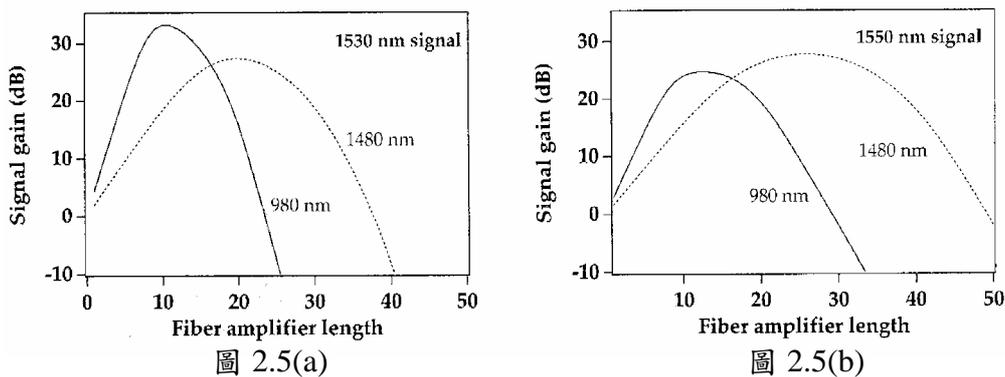


圖 2.5 (a)最佳長度對泵激強度的關係圖，980nm 泵激，1530nm(-40dBm)測試光。
 (b)最佳長度對泵激強度的關係圖，980nm 泵激，1550nm(-40dBm)測試光。

下圖 2.6[6]為一基本的 L 頻段放大器架構，使用的是一段比較長

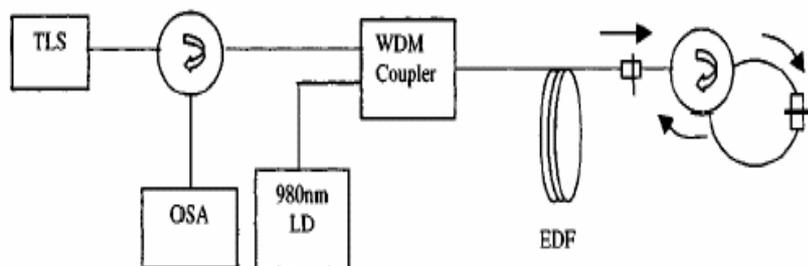


圖 2.6 增益途徑倍增之 L 頻段放大器

的摻鉕光纖(50m)來達到 L 頻段光的放大，其架構上比較特別的是以旋波器組成了一個迴路，讓訊號光源得以經過增益媒介兩次，等同於經過了 100 公尺的摻鉕光纖，此方法可以達成使用較短的摻鉕光纖來來到等效較長的放大效果，如下圖 2.7(a)所示，其對 L 頻的增益的確

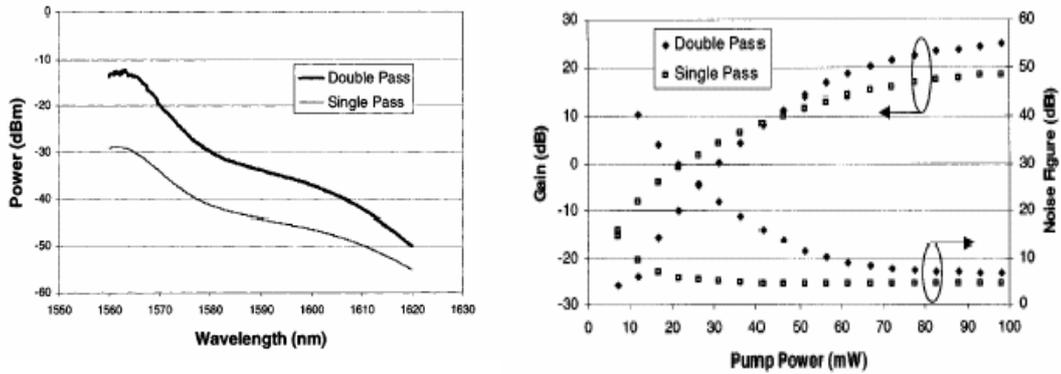


圖 2.7 (a)經過兩次增益媒介的 ASE 圖形
(b)訊號增益與躁聲指數對泵激光源強度作圖

有增加的效果，但相對的，對於泵激功率的使用也要增加，才能讓訊號在第二次經過摻鉕光纖時仍然有放大訊號的效果，如上圖 2.7(b)所示，從 2.7(b)也可以看出訊號輸出端包含了反向 ASE 以及兩次放大的正向 ASE，所以躁聲指數也會無可避免的稍微提高一點。

再來考慮一個比較特別的架構如下圖 2.8[5]:

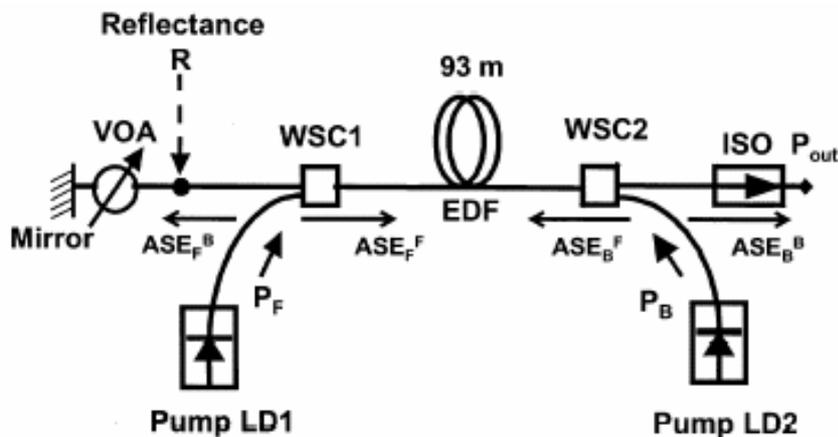


圖 2.8 利用反射鏡提高 L 頻段放大效率的架構

上途中的架構使用了雙向泵激，可以避免因為錯誤估算而造成訊號在長摻鉕光纖中遭受衰減。比較特別的是，架構中還加入了一個反射鏡，由可以使 L 頻段的增益更大且平坦，由 2.2.2 中可知，雖然比較長的摻鉕光纖可以提供較長波長的訊號有較好的增益表現，但是波長雖然可以從 C 頻段平移到 L 頻段，仍然免不了有著不平坦的小訊號增益值，從 ASE 圖形及可以看出，如下圖 2.9 所示：

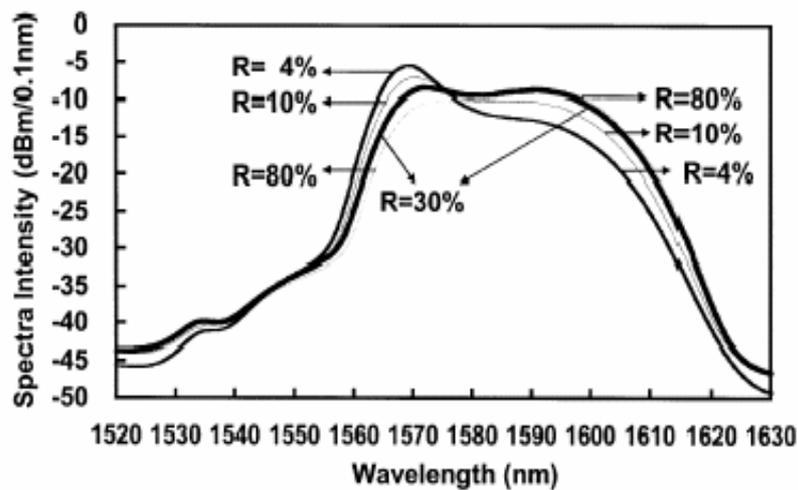


圖 2.9 不同反射率補償的 ASE 圖形

上圖中可見，再調整反射率僅有 4% 時，其 ASE 值與 C 頻段的 ASE 分布相似，只是落在 L 頻段。漸漸增加其反射比例，從 ASE 圖中可以發現，原來不平整的頻域分部會變的較為平坦，一般來說 ASE 的頻域可以推測小訊號的增益圖形，而一般的 L 頻段放大器可以藉由將訊號操作在飽和帶而提供大訊號的增益平坦，卻沒有辦法做到小訊號的增益平坦，如此的架構便可以提高 L 頻段小訊號增益的效率。

2.2.3 L 頻段噪聲指數表現

下圖 2.10 為基本的 L 頻段放大器架構，儘管藉由調整摻鉕光纖的長度，可以將放大的頻段平移到 L 頻段，另外一項放大器重要特性”噪聲指數”也應該同時作觀察。由圖 2.10 的放大器架構所得到的增益與噪聲指數對頻域作圖[24](如下圖 2.11 所示)可以看出，最低的噪聲

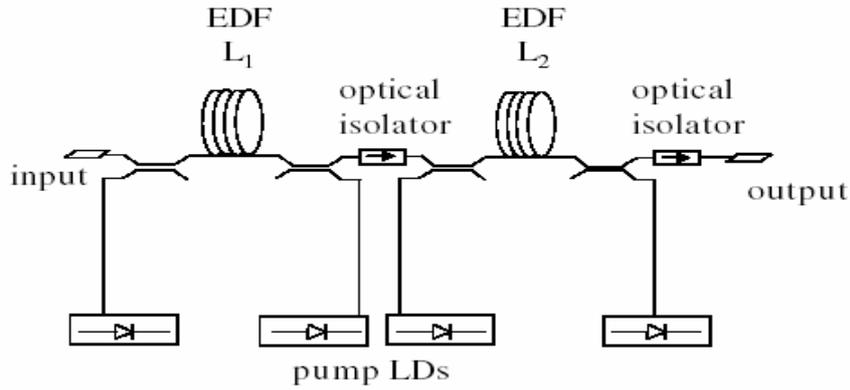


圖 2.10 基本雙級 L 頻段放大器架構

指數是發生在增益平整最遠可以延伸的頻段。原因可以 2.2.2 中獲知，當原來增益值較大的波段因為摻鉕光纖的增長而飽和或受衰減時，躁聲指數會持續上升；反觀原本增益比較小的長波長頻段在經過長摻鉕光纖的放大之下，增益值漸漸升高，則造聲指數就會相對降低。

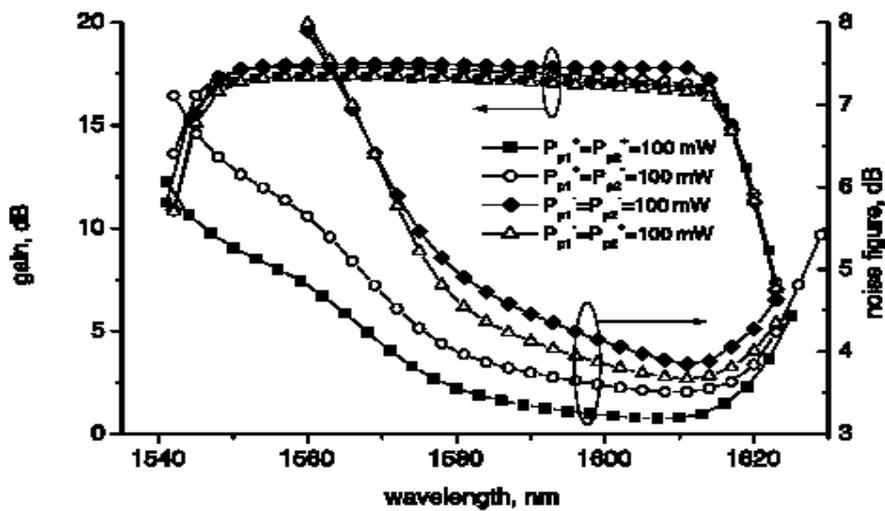


圖 2.11 L 頻段不同泵激組態下增益與躁聲指數對波長作圖

由上圖可以發現，當兩級放大器階使用與訊號同向放大的泵激時，可以得到比較低的躁聲指數，反之當使用反向泵激時躁升指數的表現就會差一點。在一般設計考量中，除非特別要求要有比較高的增益，而採用反向泵激，否則會先行考慮較低躁聲指數的同向泵激組態。

2.3 S 頻段設計基本原理

下圖 2.8 為一般摻鉕光纖對不同光源吸收與放射的圖形，很明顯的在 S 頻段時(1450nm~1510nm)光的吸收明顯大於放射，因此並不能使用與跟 L 頻段相同的放大方式來達到 S 頻段的放大。一般而言，

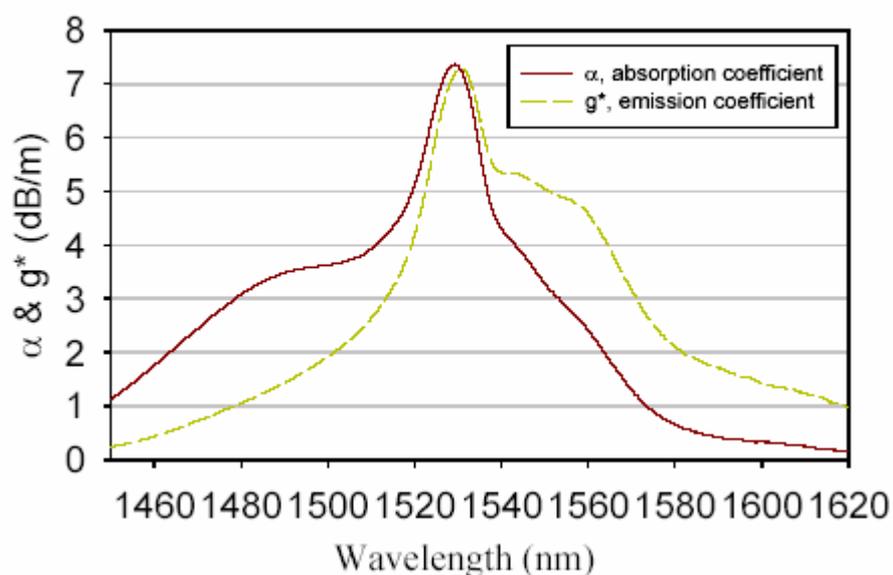


圖 2.12 光源在一般摻鉕光纖裡的吸收與放射係數圖

會在光纖中摻入元素鈣(Tm^{+3})可以創造其放射能階，使其成為S頻段的放大器。另外，也有利用色散位移光纖的光纖結構來達成，一般色散位移光纖的原理是在光纖的纖蕊與包層交界間的折射率作變化，如下圖 2.9 所示：

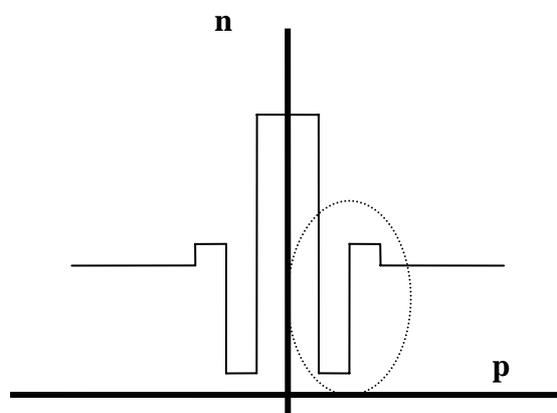


圖 2.13 S 頻段摻耳光纖纖蕊與外層折射係數分部圖

以此架構可以形成特定波長色散量的控制，如：將其截止波段設計在 1530nm(即 C 頻段與 L 頻段的光受到嚴重的色散)，則隨著摻鉍光纖長度的增加，便能將增益移到 S 頻段。

2.4 半導體光放大器(SOA)

2.4.1 SOA 基本結構原理

半導體光放大器(SOA)的基礎原則上就是一個半導體雷射的晶片，其結構上是一模一樣的，輸入雷射晶片的電流藉由光放大與正迴授機制產生共振進而產生雷射，而其中的正迴授機制是利用晶片兩末端鍍上反射鍍膜，將反射鍍膜移除改鍍上抗反射材料，原來的雷射晶片就會變成為SOA。雖然SOA兩端的抗反射鍍膜可以消除大部分因折射率差異所造成的共振，但是殘餘的共振效應仍然存在，因此可以將SOA分成兩類：共振式或Fabry-Perot放大器(FPA)與Travelling Wave放大器(TWA)，FPA在末端表面反射量遠小於雷射，但仍有小部分的光會反射進入主動層，這將使共振能量上升而造成在增益頻譜曲線的不平滑，而依據雷射所有的縱模模態而產生有些許的波紋，且敏趕不易預測之；而對於TWA，反射光強度幾乎為零，因此通過SOA的光訊號都只能經過一次的放大，理想TWA的增益頻譜曲線是非常的平滑，而理想TWA的條件，設單次增益 G 與平均面反射量 R ，當單次增益接近 1dB時， GR 的乘積需小於 0.06，在增益 30 分貝時 GR 乘積就必須小於 6×10^{-5} ，這在技術上並不容易達到。這樣的區分方式是肇因於抗反射鍍膜材料在光輸入訊號波長不同時，會有不同的面反射量，所以若在操作波長附近會有最低反射量就可以視為在TWA狀態下，高品質鍍膜下的SOA在TWA的狀態約有 50nm (或 6THz) 的寬度。TWA狀態範圍的大小與放大器主動層的增益也有關係，當增益夠大時，面反射量相對而言是極小，共振狀態不行明顯的情況下，就可以

將之視為TEA狀態。

在任何的光放大器中，訊號與雜訊都是同時被放大，SOA 的雜訊特性在近十至十五年年內已經被充分的研究，對於放大器雜訊與光系統特性，包含了實驗與理論分析。對於光放大器，雜訊的主要來源來自於主動層的自發光源，TWA 的噪音特性特徵常被量化為一參數 N_{sp} ，稱為”粒子反轉參數”(population inversion parameter)，對於一個理想(粒子有限)的放大器而言其 $N_{sp}=1$ ，然而實際上，SOA 並不理想而且 N_{sp} 是會隨著其他條件而改變，如泵激光源比率、面反射量與波長。

2.4.2 SOA 使用在通訊系統上的優缺點

半導體光放大器內部的動作媒介是由三五族的半導體合金所製成。半導體光放大器誘人的地方在於它可操作在 1330nm 及 1550nm 兩個低衰減的區域中。一般來說，其與滲入式光纖光放大器比較起來有以下的好處：容易與其他光元件整合在一起、電功率消耗較低、較少的組成元件，以及更為緻密。此外，半導體光放大器的增益響應(gain response)相當快速，這使得它適用於交換以及信號處理等光網路應用中，不若摻鉍光先放大器需要適當的增益箝制。缺點則在於當用於高速光通信時，它快速的增益響應可能會導致某些光波長的衰減，也可能會造成串音(cross-talk)現象。EDFA 有三樣主要勝過 SOA 的優勢，詳細討論如下：1.缺少非線性效應。 2.光纖放大器是與發射光纖的折射率匹配(index match)，省略了抗反射鍍膜的需求。 3.增益會自然的與光訊號偏極化無關。這些是光纖放大器的強大優勢，然而，半導體放大器的優勢有：1.可操作在任何波長範圍。 2.與其他元件合為一體。 3.超低能量耗費。 4.緊密結構、所佔用空間更小。在 EDFA 中缺少非

線性效應，造成放大器中有非常長的上部載子週期($\sim 10\text{ms}$)，而因此只有平均的增益是可以被飽和的，然而，SOA 中的非線性效應可以用來作為訊號處理應用的一個優點。我們可以發現在光纖傳輸的應用上，對於光纖放大器與 SOA 之間有著明確的選擇標準：EDFA 主要針對 $1.5\ \mu\text{m}$ 波長系統傳輸的應用，而 SOA 則與拉曼放大器相似，主要應用在 EDFA 無法供應增益的頻段提供增益。但是隨著 SOA 發展日益成熟，不同波長的放大利用：如 $1.3\ \mu\text{m}$ 區段；或與其他光路元件整合都漸漸受到矚目。

2.5 增益箝制技術

2.5.1 增益箝制(Gain-Clamping)

摻鉍光纖放大器跟其他光放大器比較起來，由於有著較高的增益，以及不受串音(crosstalk)及光偏振態的影響，使其在 $1.5\ \mu\text{m}$ 長途光纖通訊中扮演非常重要的角色。但是當其實際應用在光通訊系統中，隨著訊號開關，光纖中的飽和效應會使訊號的增益會受到影響而會有緩慢且造成辨識困難的擾動出現。在早期，使用電光回饋的增益箝制技術已經可以將訊號受到總訊號功率有變化時的增益變動減低許多，藉由的是調變泵激的工率來達到輸出功率不變，儘管這種方法可以藉由設計良好的回饋機制來達到很好的增益穩定度，但整個架構就要多了一個光電轉換器(photo detector)以及驅動泵激的電路，不斷改變泵激操作電流對其也會減短其壽命。

2.5.2 增益箝制原理與應用

除此之外，從外部注入光源，如 DFB 或 FP 雷射來當成飽和光源，也被提出可以有效減少因總功率發生變化時對單一波長增益的擾動，使用的是藉由一較強的光原來鎖定原來會隨訊號大小而變化不一

的粒子反轉數，如此輸出與輸入訊號大約會是正比於放大距離而與輸入訊號大小無關，可達增益箝制效果，但是這樣還是得要多出一個光源，提高了系統的成本。近來比較常被使用且經濟的方法，即是在原來的架構上作一迴路，讓放大器一部分的自發性輻射(ASE)經過濾波器慮出一特定的波長再反覆注入放大器中形成一迴路雷射，再藉由調整濾波器的波長以及注入迴路量的多寡來選擇最佳的增益箝制情形。以一般情形來說，輸出訊號與輸入訊號的關係可以表示為下式 [25]:

$$p_k^{out} = p_k^{in} \exp[-\alpha_k L + \frac{1}{p_k^{IS}} \sum_{j=1}^N (p_j^{out} - p_j^{in})] \quad (2.26)$$

p_k^{IS} 代表某單一訊號的飽和功率， α_k 則是在某特定波長 λ_k 在光纖裡的吸收常數， L 則是放大的距離。令 f 為在眾多訊號中所慮出來提供當飽和的光信號，我們將其輸出與輸入的關係表達成下式:

$$p_f^{out} = \beta p_f^{in} \quad (2.27)$$

上述中的 β 是訊號在光纖中所放大的倍率，也是迴路雷射中在平衡後的迴路衰減量，如此才能符合其邊界條件。將 2.27 與 2.26 作比較可以得 $\beta = \exp[-\alpha_f L + \frac{1}{p_f^{IS}} \sum_{j=1}^N (p_j^{out} - p_j^{in})]$ ，移項後可得:

$$\sum_{j=1}^N (p_j^{out} - p_j^{in}) = p_f^{IS} (\ln \beta + \alpha_f L) \quad (2.28)$$

由上式 2.28 中可以看出，飽和信號 f 的的增益 β 理當也會受信號加入或移去的影響(式中左方代表功率變化的總合)，但當迴路雷射產生時，功率變化的總合大約就等於迴路雷射的功率變化(從 ASE 在 f 頻率的強度變成最後雷射強度)，並不會明顯受信號加減而改變。將 2.28 代入 2.26 中可得:

$$p_k^{out} = p_k^{in} \exp[-\alpha_k L + \frac{p_f^{IS}}{p_k} (\ln \beta + \alpha_f L)] \quad (2.29)$$

上式右方指數中，並沒有與 p_k^{out} 或 p_k^{in} 有關的項，所以只與 β 值有關。所以，只要不是在飽和訊號的頻率，其增益大約就可以維持在一個定值。值得一提的是，增益箝制的條件必須要有明顯的迴路雷射產生時才會明顯，如此 2.29 式中的 β 才能保持固定；反過來說，當輸入訊號大到某一極值使得迴路雷射不明顯時，增益箝制的功能也將不再存在。

目前比較常見的增益箝制的應用，大致上可以分成使用慮波迴路，或是單程增益箝制。在慮波迴路方面，主要是加入一慮波機制在 ASE 迴路中，如光濾波器，或光分波器，而迴路類型則有額外導接成環形或者是利用鏡面來達成。下圖 2.14[21]中是一利用分波器的雷射迴路：

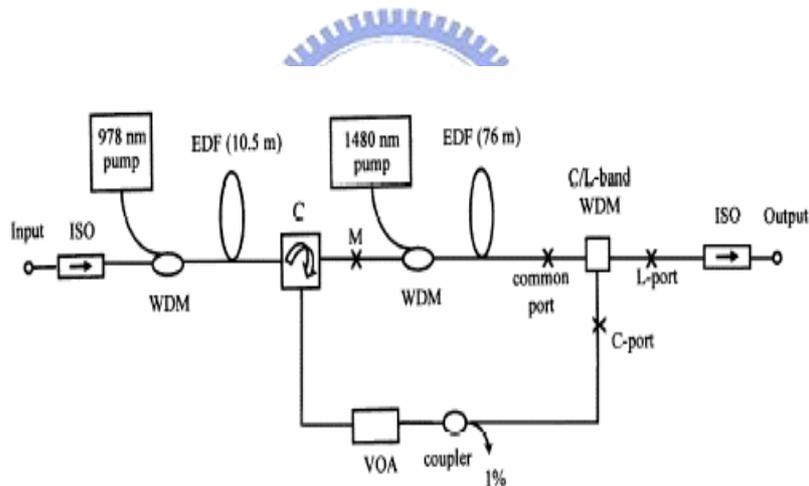


圖 2.14 使用反向迴路雷射之增益箝制架構

此架構利用放大器的反向 ASE 來當做迴路的光源，比較特別的是，在架構中並沒出現最常被使用的光濾波器，取而代之的是使用一 C/L 頻段的分波器達到相同的功能。如上圖所示，架構允許屬於 C 頻段的反向 ASE 在架構迴路中作傳輸，且會在 C 埠的截止頻率約 1566nm 的地方產生迴路雷射，因此可以拿來當增益箝制所需要的飽和訊號，且架構中另一項優點是，在所用來形成回路雷射的 C 頻段 ASE 並不會進

入 L 埠(輸出端)，而造成噪聲指數的上升；而缺點是，使用分波器會限制主訊號與 ASE 在迴路光與輸出光的比例，如此就比較缺乏彈性，不能藉由改變其比例來微調最佳回授值。

而下圖 2.15[26]則是另外一個可以應用來當做增益箝制的架構：

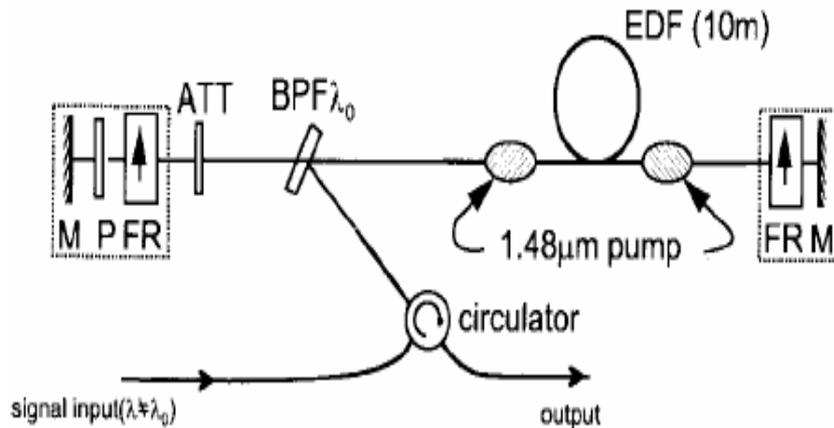


圖 2.15 使用雙鏡面形成迴路雷射之增益箝制架構

其方法是應用在放大器兩端加入反射鏡面，使摻耳光先放大器的正反向 ASE 在裡頭作來回放大，路徑中加入一光濾波器使波長為 λ_0 的訊號在架構中產生，以此當作增益箝制的飽和訊號(saturation tone)，兩端的鏡面可以藉由調整其反射率來達到最佳箝制效果，其缺點是反覆來回於系統中的 ASE 會使得整體的噪聲指數上升。

另外，還有使用光纖光柵將特定頻率的訊號打回以當成飽和訊號，不經過多次放大而是與訊號一般只經過一次放大，如此的架構擁有較低的噪聲指數表現，但其控制的困難點在於了沒有迴路的來回放大飽和訊號，就必須從摻鉍光纖的長度來控制，較長的摻鉍光纖可以提供較明顯的飽和雷射，但相對的也會影響到主訊號的放大(由 2.2.1 可知)，所以控制的困難度會高一些，因而比較不常被使用。

2.5.3 增益箝制躁聲指數表現

增益箝制的應用使得系統得以緩和因總信號功率的變動而發生再單一通道的增益擾動，且不需要額外的光源或光電回授電路來補償，對整個放大系統來說顯得更便捷且經濟。然而，要在系統中用一飽和信號來做增益箝制，就不能避免使用到相同的增益媒介，而造成在增益值的減少或主訊號躁聲指數的上升。主訊號功率的減少很難避免，因為迴路中總會分掉一部分的信號去形成迴路雷射，迴路雷射也會影響摻鉍光纖中激發態與基態粒子的分布，進而減低訊號增益增加躁聲指數，兩者是一體兩面的描述。

一般來說，使用正反雙向的 ASE 來形成迴路雷射作增益箝制的架構有著較大的訊號躁聲指數表現。其次是使用單向的 ASE 的架構，又在單向 ASE 形成的迴路雷射中，與主訊號同向傳輸的箝制架構又會比反向傳輸的有著較低的躁聲指數，原因是因為與主訊號反向傳輸的飽和訊號會在主訊號進入摻鉍光纖的那端有著較大的功率值，等同於造成低粒子反轉數，對主訊號而言，一開始進入摻鉍光纖的增益就變小必定造成輸出躁聲指數的提升，跟反向泵激的原理類似。躁聲指數最佳的情形應該是利用單向的 ASE 迴路雷射，且能在輸出端將飽和訊號率掉，如此不會與主訊號相互影響，更能提升躁聲指數表現。

第三章

混合型之寬頻光纖放大器

3.1 混合式 C+L 頻段光纖放大器

3.1.1 簡述

近年來，L 頻段(1560nm~1610nm)光纖放大器發展日漸成熟，舉凡有摻碲元素將增益一到 L 頻段的光纖放大器，有使用非線性的拉曼光纖放大器，還有使用比一般 C 頻段放大器更長的摻鉍光纖所達到的放大器。除此之外，使用組合結構的 C 加 L 頻段的放大器，因其頻寬的增加也漸漸受到矚目[27][28]。另外，隨著半導體光放大器(SOA)在其放大率表現上的進步，也增加了其與光纖放大器混合使用的可能性。本節將提出一個新的混合型之半導體光放大器與光纖放大器的 C+L 頻段寬頻放大器，其效能表現在 1540nm~1600nm 的訊號增益上，也可以當做一個寬頻的放大器自發性光源(ASE)使用。

3.1.2 雙級 C+L 頻段放大器架構與實驗結果

圖 3.1 為混合式 C+L 頻段的放大器架構，其架構組合為串接式，而第一級為半導體光放大器，第二級則是由一般摻鉍光纖所架構的放大器。半導體光放大器操作電流為 250mA。而第二級的摻鉍光纖放大器是由 44m 的摻鉍光纖，一個 1480/1550nm 波長分波器，一個操作在 120mW 輸出功率的 1480nm 泵激，以及兩個阻波器所組成。

原則上，繼續加長摻鉍光纖的長度則可以順利將放大頻域繼續移向 L 頻段，但是相對的其需要的條件也會更加嚴苛[5][6]。當摻鉍光纖長度加長時，雖然可以慢慢將增益頻譜往 L 頻段移去，但是卻因為所需要的光纖通常要超過 80m 才可以看到效果[15][16]。然而，本架

構在加入有著比較寬頻增益的半導體光放大器之後，可以有助將整體的放大頻域延伸至 L 頻段，以下將配合使用可調雷射光源(TLS)以及光頻譜分析儀(OSA)來分析其增益與躁聲指數的表現。

圖 3.2(a)為雙級放大器架構個別的增益頻譜，輸入分別使用 $P_{in}=0$ 與 $P_{in}=-30\text{dBm}$ 來表示大小訊號的放大情形，圖中可看出，在小訊號輸入時($P_{in}=-30\text{dBm}$)，半導體光放大器(SOA)與摻鉍光纖放大器在 1562nm 及 1556nm 處各有著其增益的最大值，個別為 12.14dB 與 33.8dB。圖中也可以看出，半導體光放大器在小訊號的增益範圍可寬至 80nm(1530nm~1610nm)。而圖 3.2(b)中則是則是整個雙級放大器的增益頻譜與躁聲指數的表現圖，其放大頻域可從 1540nm 延伸到 1600nm，且在小訊號(-30dBm)時的增益及躁聲指數表現可以在 1562nm 處個別達到 40.1 及 12.5dB。在 3.4(b)的插圖為功率值在 -40dBm 以上的放大自發性輻射(ASE)，範圍分布從 1540nm 到 1600nm。另外，我們也可以從 3.2(b)中觀察到，由於加入了半導體光放大器為架構中的第一級，整個架構的躁聲指數表現也因原本 SOA 的躁聲指數就不理想而升高。

使用較長的摻鉍光纖所發展的 C+L 頻段放大器由來已久[29]。為了跟以往的放大器做個區別比較，我們另外架構了一個 92m 長，且使用一個操作在 140mW 的 1480nm 泵激的放大器。圖 3.3 即是使用此架構所呈現的增益及躁聲指數示意圖，顯示了此 L 頻段的放大器再輸入訊號為 $P_{in}=0\text{dBm}$ 與 -30dBm 時，頻域為 1540nm~1600nm 的訊號增益及躁聲指數表現圖。將其表現與圖 3.2(b)中的作比較，兩個架構有著相似的頻率增意圖譜，換句話說，即是我們可以使用混合式的光放大器，以減少摻鉍光纖光纖長度，與我們所提出的架構相較下，約

可以減少 50% 以上的摻鉍光纖使用量(92m~44m)。

3.1.3 三級 C+L 頻段放大器架構與實驗結果

為了改善在 3.1.2 中所提出雙級 C+L 頻段放大器躁聲指數過高的問題，我們再提出一個新的架構如下圖 3.4，此架構為包含三級的混合式光放大器，第一級是由 10m 長的摻鉍光纖配合操作在 60mW 的 980nm 泵激雷射組合而成的光放大器，而第二級則是操作在 250mA 的半導體光放大器，第三級則是使用 34m 長的摻鉍光纖配合操作在 100mW 的 1480nm 泵激組合而成的光放大器。而圖 3.5 為此三級架構中的第一級與第三級在輸入訊號為 $P_{in}=0\text{dBm}$ 與 -30dBm 時的個別增益頻譜，在圖中可以看出，第三級的增益頻譜圖在輸入為 0dBm 時，大於 10dB 的增益區為 1524nm~1574nm。此架構中，第一級 10m 長放大器的功用在降低整體的躁聲指數，且另外一方面可以加速飽和 C 頻段的增益，有益於 L 頻段放大的延伸。圖 3.6 為此三級放大器在輸入訊號為 $P_{in}=0\text{dBm}$ 與 -30dBm 時的個別增益頻譜與躁聲指數的圖形。在圖 3.6 中同時也插入了此三級混合式放大自發輻射頻譜(ASE)。結果顯示，在輸入訊號為 -30dBm 時，在 1562nm 處可以達到增益為 41.5dB 且躁聲指數為 3.7dB 的表現。與圖 3.1 中的架構比較，這個新的三級架構可以大幅的降低之前表現不好的躁聲指數(比較圖 3.2(b) 與圖 3.6)，且第三級的摻鉍光纖長度還得再減少。圖 3.6 中亦顯示，在輸入訊號為 0dBm 時，增益達到 10dB 以上的範圍為 1540nm~1600nm，與之前的雙級架構大致相似。

3.2 S 到 L 頻段平行架構光纖放大器

3.2.1 簡述

一般架構在短摻鉍光纖的放大器(C 頻段放大器)解決了 1530nm 到 1560nm 傳輸光訊號放大的問題。而利用較長的摻鉍光纖構成的放大器，拉曼放大器，以及混合式的放大器(如拉曼與摻鉍光纖放大器的混合或光半導體放大器與摻鉍光纖放大器混合)可以提供 1560nm 到 1610nm 之間的光訊號放大(L 頻段)。近來，利用變化蕊心與包層間的折射率來當做訊號抑制結構且使用 980nm 泵激的放大器架構，已經被證實可以拿來當作 1450nm 到 1530nm 之間訊號光源的放大器 [30]。因此，如果可以應用這個新的 S 頻段放大機制，我們便可以將之與原來已經架構在一般摻鉍光纖上的 C 與 L 頻段放大技術作一整合，使其成為一 S 到 L 頻段的平行結構寬頻放大器。在這個小節，我們將介紹一個新的 S 到 L 頻段的摻鉍光纖放大器模組，頻寬可達 120nm(1480nm~1600nm)，其架構為使用分波段放大的平行架構(coupled structure)。

3.2.2 實驗架構

下圖 3.7 為平行架構的摻鉍光纖放大器模組。其架構為使用兩個 1480/1550nm 的波長分波耦合器，一個 S 頻段摻鉍光纖放大器，與一個 C 加 L 頻段的雙級摻鉍光纖放大器的平行結構所組成。從圖 3.7 中可以看出，兩個波長分波耦合器是用來結合兩個不同放大訴求的平行架構放大器，如圖所示埠 1, 2, 3 分別為 1480nm~1600nm 與 1480nm~1520nm 與 1520nm~1600nm 所可以傳輸的路線。在圖示上方的 S 頻段摻鉍光纖放大器所使用的摻鉍光纖為特殊結構的包層，對摻鉍光纖裡的長波長訊號造成衰減，慢慢將增益移至 S 頻段。此架構的

第一級使用的摻鉕光纖為 20m 長，藉由與訊號同向的 980nm 泵激可以提供低的躁聲指數表現，而第二級的光纖使用長度為 30m 長且與反向的 980nm 泵激結合使用，有助於提高訊號的增益。除此之外，在兩級架構中加入了一個阻波器(isolator)，可以阻止第二級反向放大自發輻射(ASE)對第一級的影響，因此對躁聲指數的改進也有助益。所使用的泵激強度最高可操作在 356mA，相當於有 280mW 的功率輸出，如此一個不同於傳統 C 頻段的放大器就可以建立，原先於 1530nm 有著增益最大值的頻譜，在結構變化後產生了一個對 C 與 L 頻段的截止波長，使得粒子反轉可以用在本來吸收大於放射的 S 頻段，造成 S 頻段訊號的放大。

而圖 3.7 下方的 C 加 L 頻段放大器模組是由兩個摻鉕光纖放大器，一個 1X2(50:50)的光耦合器(C)，以及一個 C/L(1564/1570nm)的波長分波器(其附加損耗 $<0.43\text{dB}$)。圖中 C/L 分波器(BS)a, b, c 埠分別為訊號 1500nm~1600nm, 1570nm~1610nm, 1500nm~1564nm 的適用通道。第一級摻鉕光纖放大器使用的摻鉕光纖長度為 12m 長，980nm 泵激強度操作在 65mW 輸出，而第二級的摻鉕光纖放大器使用 88m 長的摻鉕光纖，其 1480nm 泵激光源操作在 95mW 輸出。如同一般設計，第一級光纖放大器除了提供當增益媒介外，對於躁聲指數的改善也扮演著重要的角色，第二級主要是將放大的最佳長度移至 L 頻段，比較特別的設計是利用 C/L 頻段分波器(BS)的加入，可以在輸出端在將 C 頻段的訊號再次加回，而非只有 L 頻段的放大，此與分別使用兩個平行結構的 C 加 L 頻段放大器簡潔許多。

3.2.3 實驗結果與討論

要研究此平行架構放大器在頻域增益與躁聲指數上的表現，我們

分級個別使用輸入訊號為 $P_{in}=0\text{dBm}$ ， -15dBm ， -30dBm 的訊號當測試光源。圖 3.8 即為 S 頻段放大模組的在上述條件所測試得的噪聲指數與增益頻譜圖(1480~1520nm)，圖中插入的圖為放大自發性輻射 (ASE)於 1480nm~1520nm。我們可以從圖 3.8 中看出，輸入為小訊號時(-30dBm)，在波長為 1506nm 處其增益與噪聲指數分別達到 34.1 與 5dB。另外，也可以從輸入為 0dBm (大訊號)時的圖形觀察，其增益大於 10dB 的頻域，大致是從 1480nm 到 1520nm。

圖 3.9 為在圖 2.7 中下方的 C 到 L 頻段放大器從 1520nm 到 1600nm 的增益與噪聲指數頻譜。大致上來說，此組放大器的頻寬大約是 80nm(1520nm~1600nm)，其增益的峰值在 1532nm 與 1568nm 處分別為 35.4 與 38.1dB，噪聲指數則為 3.3 與 2.7dB。特別要注意的是，在其增益與噪聲指數頻譜圖中的 1564nm 處，因為剛好是 C/L 分波器的頻率分界點，所以會造成增益的下降與噪聲指數的增加。

圖 3.10(a)與 3.10(b)分別為架構圖 3.7 的增益與噪聲指數的最終表現(適用測試頻率為 $P_{in}=0\text{dBm}$ ， -15dBm ， -30dBm)，在圖 3.10(a)的插入圖是此平行架構所形成的 120nm 寬的放大自發輻射(1480nm~1600nm)。另外，在圖 3.10(b)中的插入圖為在圖 3.7 架構中所標示的埠 2 與 3 對頻率所測試的附加損失，圖中顯示的交界處為 1522nm。由圖 3.10(a)中可以看出，其放大頻域由 1480~1600nm 總共為 120nm，小訊號輸(-30dBm)入的增益峰值在 1504nm，1532nm，1568nm 處分別為 32.8dB，34.7dB 與 38.1dB，由於架構中使用的波長分波器有其附加損失，所以其小訊號的最大增一直會略小於個別量測到的值。如同之前所說的，在 1522nm 附近也因處於所使用分波器的分界處，也會有著跟在 1564nm 處附近相同的增益變低，且噪聲指數提高的現

象。整體而言，此放大器包括了兩個模組，S 與 C+L 摻鉍光纖放大器，其效能在 1480nm 到 1600nm 之間有著 120nm 的放大頻寬。另一方面，在 1480nm 到 1606nm 之間也有著大於 -40dBm 的放大自發性輻射 (ASE) 的輸出，可以提供當成一超寬光源。

3.3 總結

在此章中，我們先介紹一個新的 C+L 頻段的混合式放大器，成功的將半導體光放大器跟摻鉍光纖放大器作一結合，其在 1540nm 到 1600 之間已經被證實有著良好的放大效果與可接受的噪聲指數。再來我們介紹使用摻鉍特殊結構光纖構成的 S 頻段放大器，其效能在 1480nm 到 1520nm 之間有著平均大於 23dB 的增益(小訊號時)。最後，我們在實驗上結合了此三個頻段的放大器於一平行架構中，實驗數據證明，此架構在 1480nm 到 1600nm 之間有著良好的放大效能(頻寬 120nm)，小訊號輸入(-30dBm)的增益峰值在 1504nm, 1532nm, 1568nm 處分別為 32.8dB, 34.7dB 與 38.1dB，大訊號輸入(0dBm)的增益值則較為平坦許多。此外，此寬頻放大器的自發性輻射尚可當作一寬頻光源使用(1480nm~1600nm)。

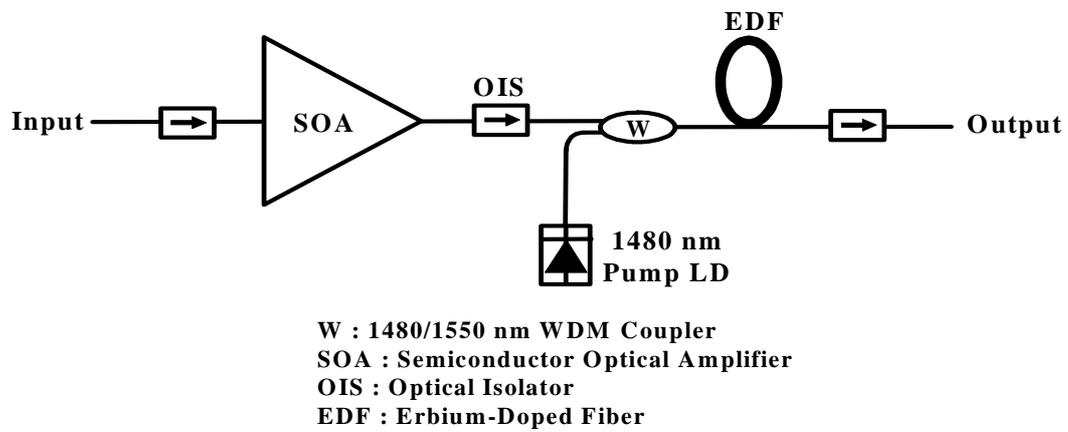


圖 3.1 混合式 C 加 L 頻段放大器架構

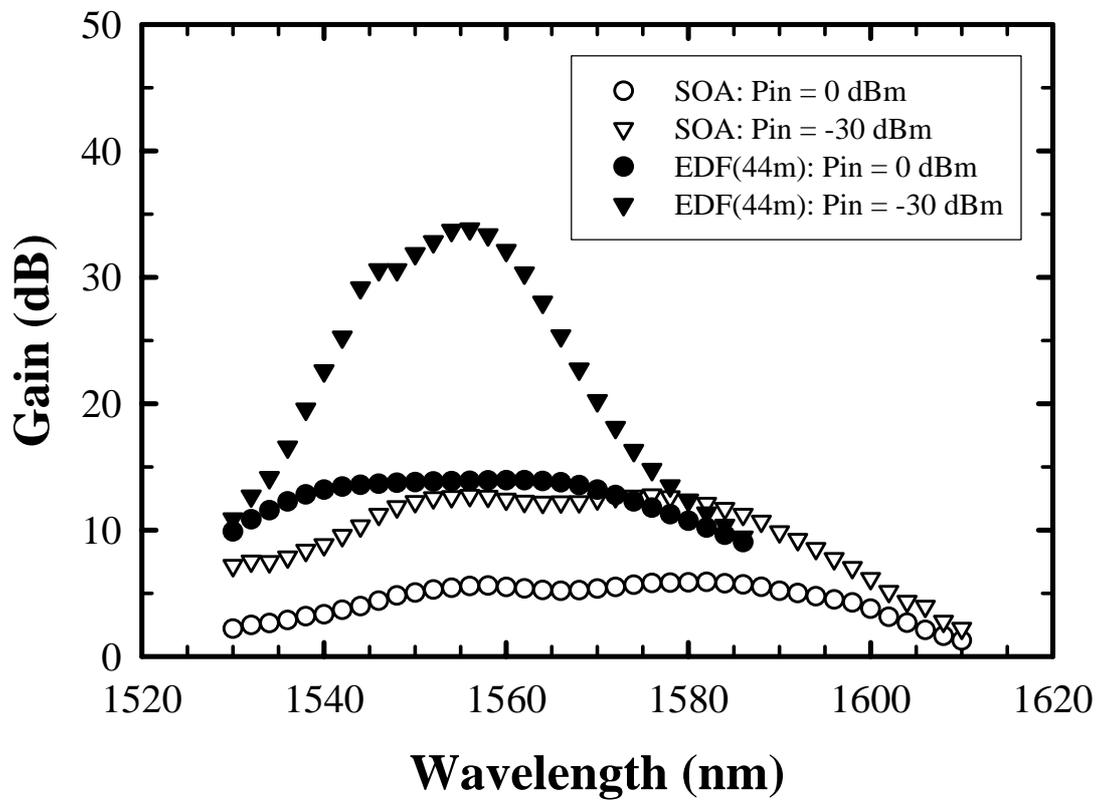


圖 3.2(a) C+L 頻段雙級架構之第一與第二級放大器個別的增益頻譜

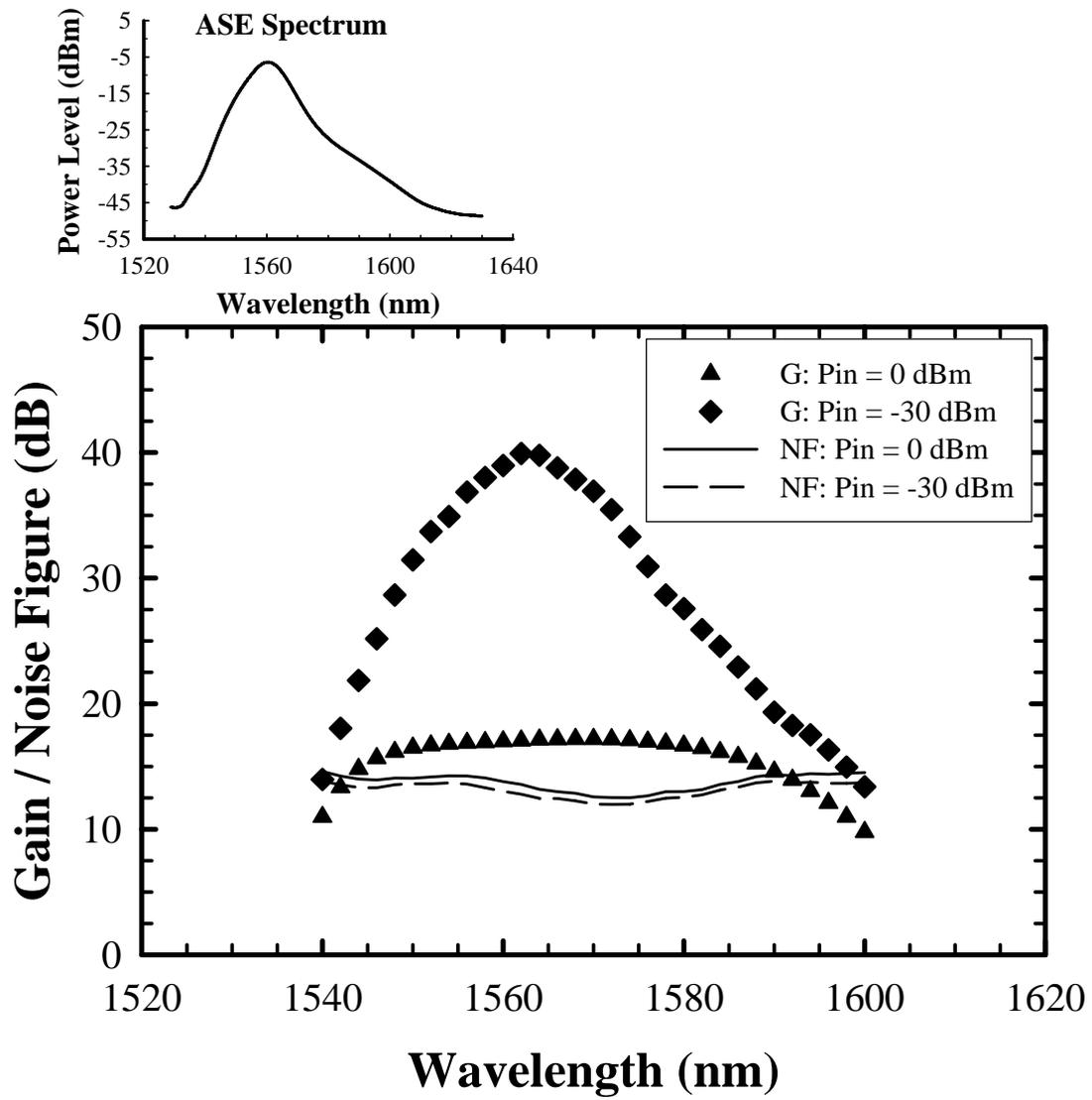


圖 3.2(b) 雙級放大器串連的增益與噪聲指數頻譜

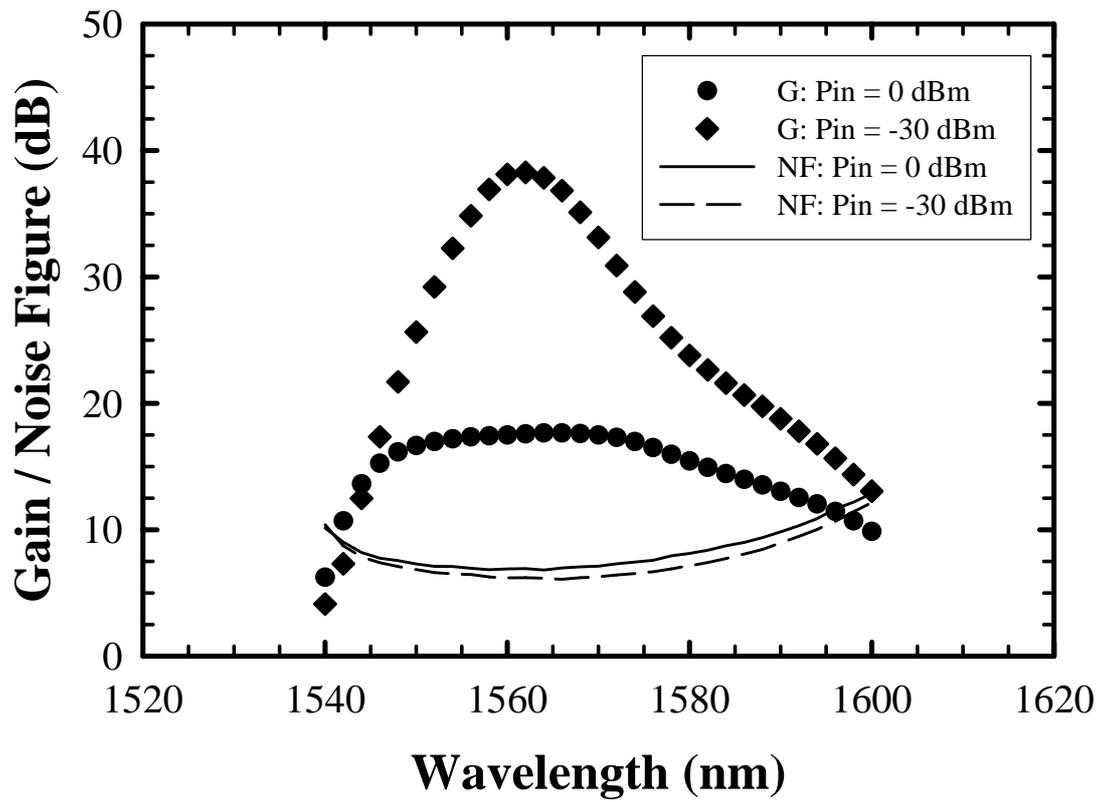
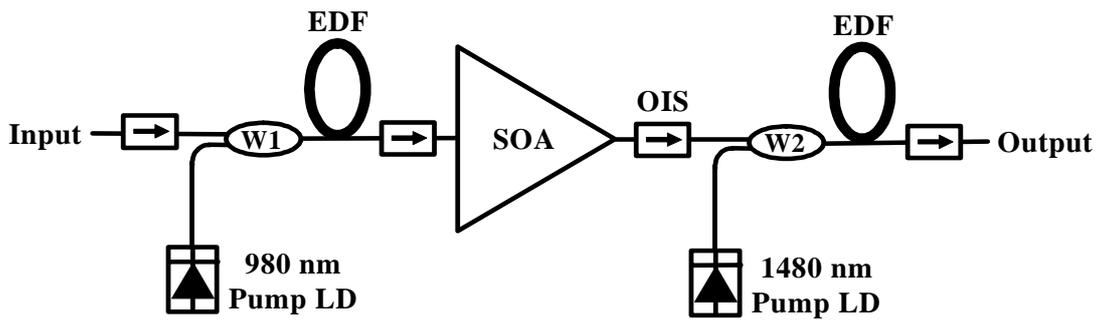


圖 3.3 傳統 L 頻段 EDFA(92m 長摻鉕光纖)的增益與噪聲指數頻譜



W1 : 980/1550 nm WDM Coupler
W2 : 1480/1550 nm WDM Coupler
SOA : Semiconductor Optical Amplifier
OIS : Optical Isolator
EDF : Erbium-Doped Fiber

圖 3.4 改良後三級混合式 C+L 頻段光放大器架構

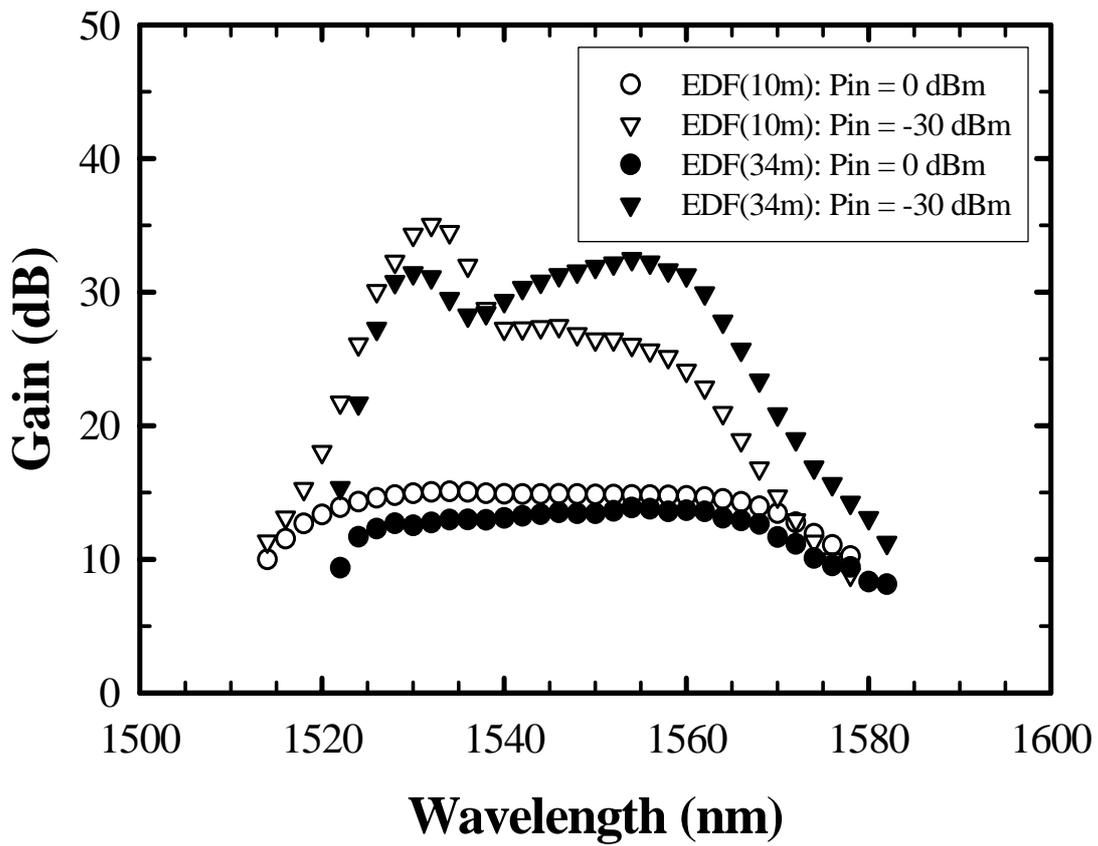


圖 3.5 三級 C+L 架構第一與第三級放大器個別的增益頻譜

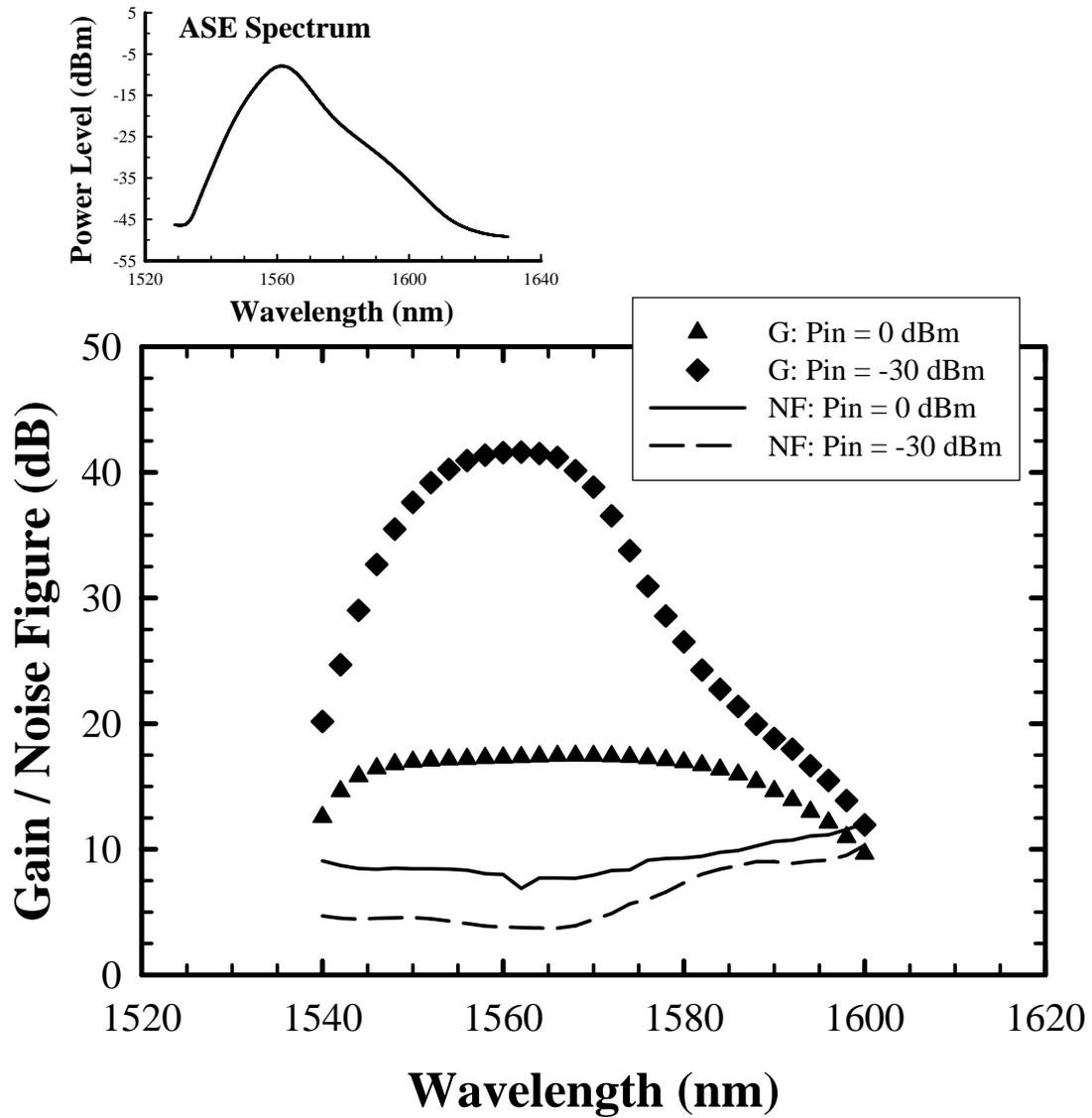


圖 3.6 改良式 C+L 頻段放大器增益與噪聲指數的表現

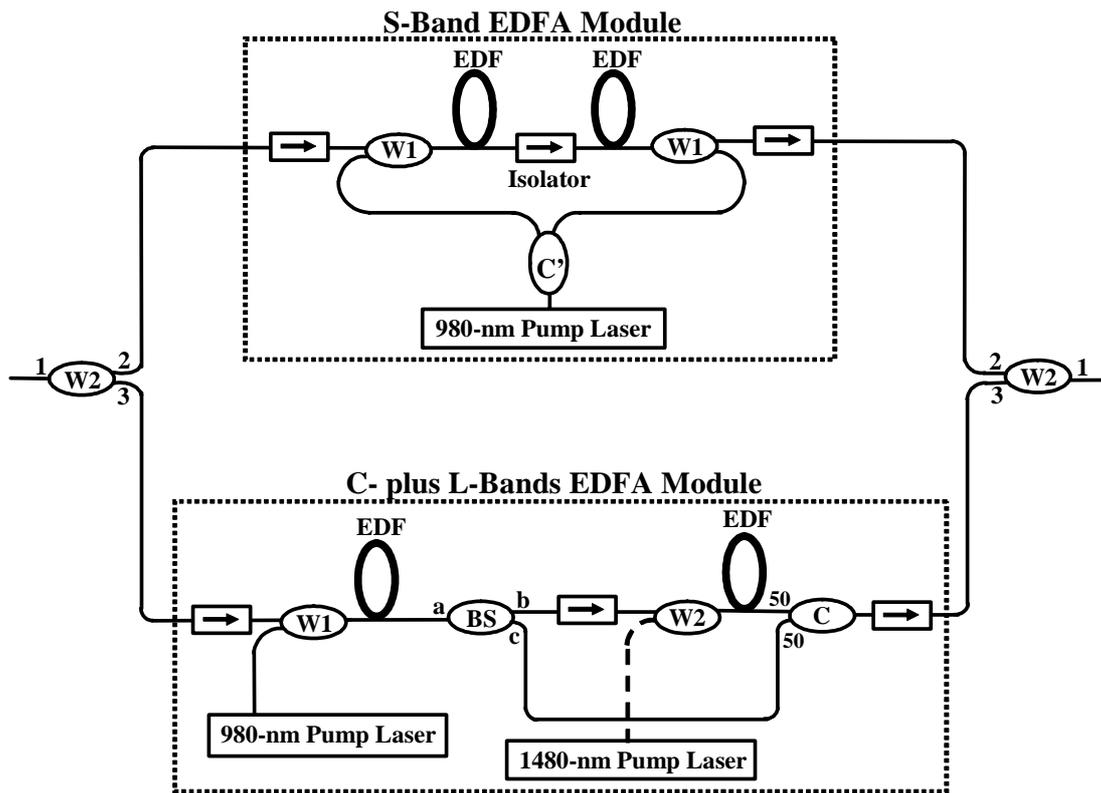


圖 3.7 S+C+L 寬頻摻鉕光纖放大器架構

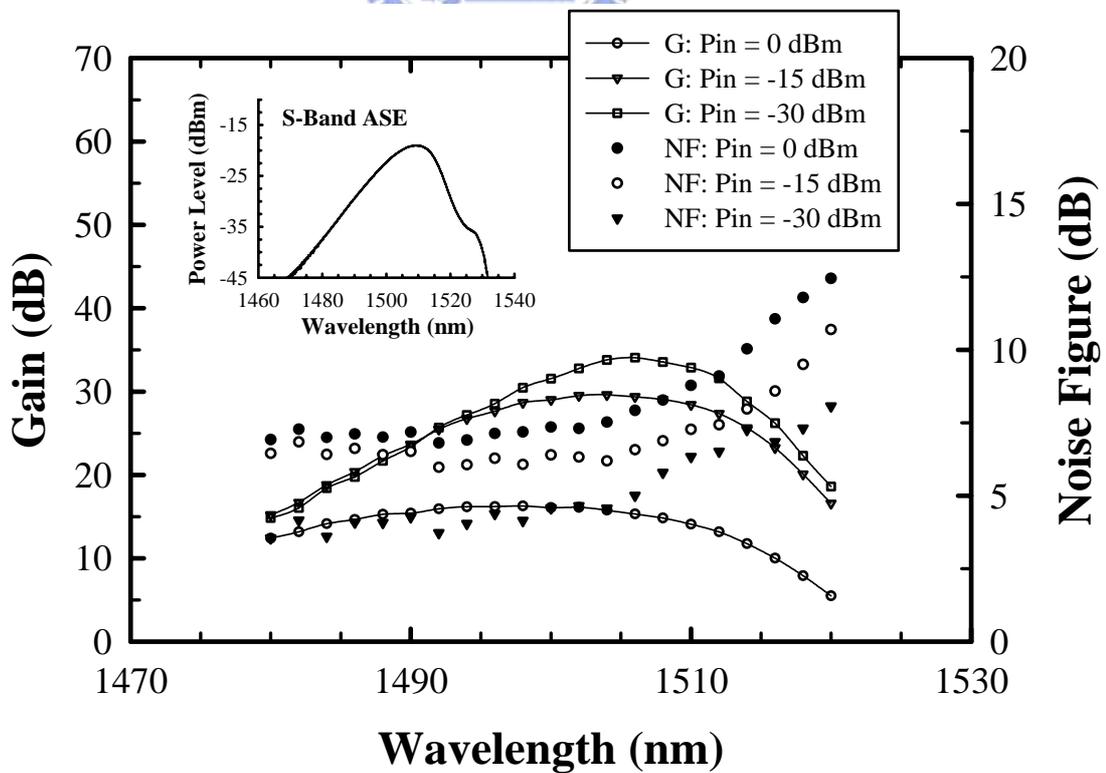


圖 3.8 當輸入訊號為 0, -15 與 -30dBm 時 S 頻段放大器的增益與噪聲指數表現

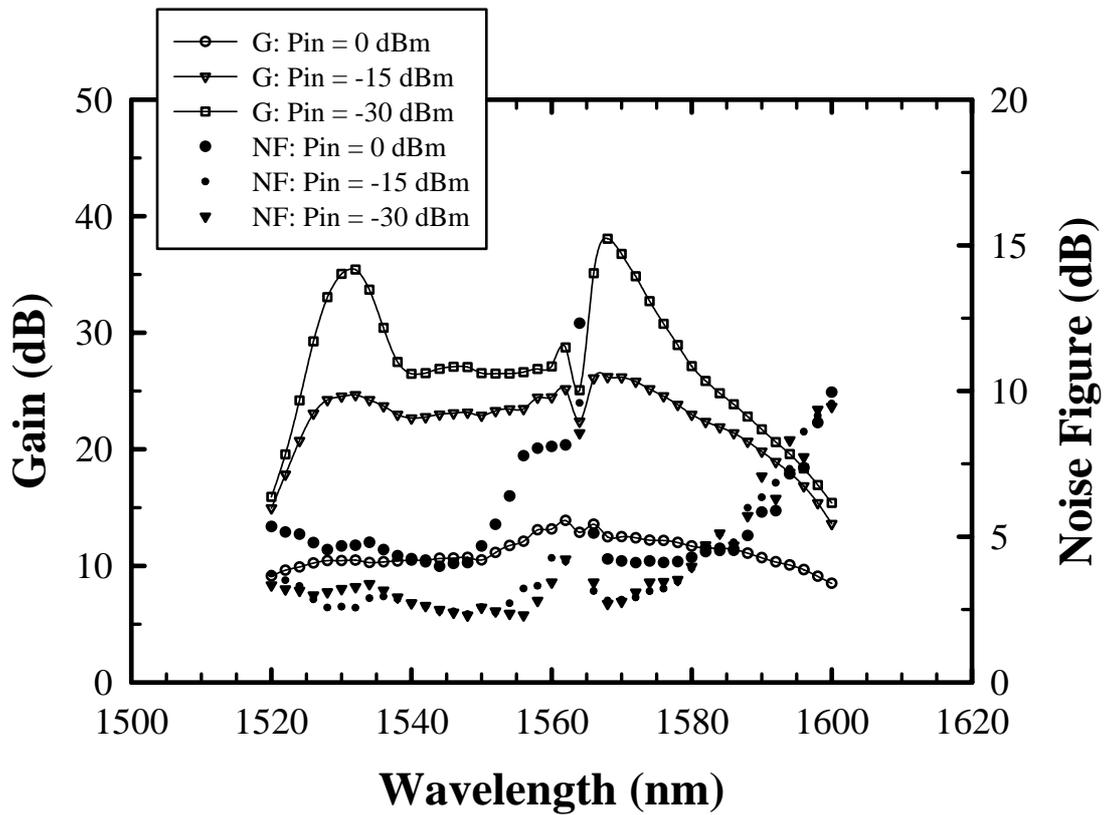


圖 3.9 輸入訊號為 0, -15 與 -30dBm 時 C+L 頻段放大器的增益與噪聲指數表現

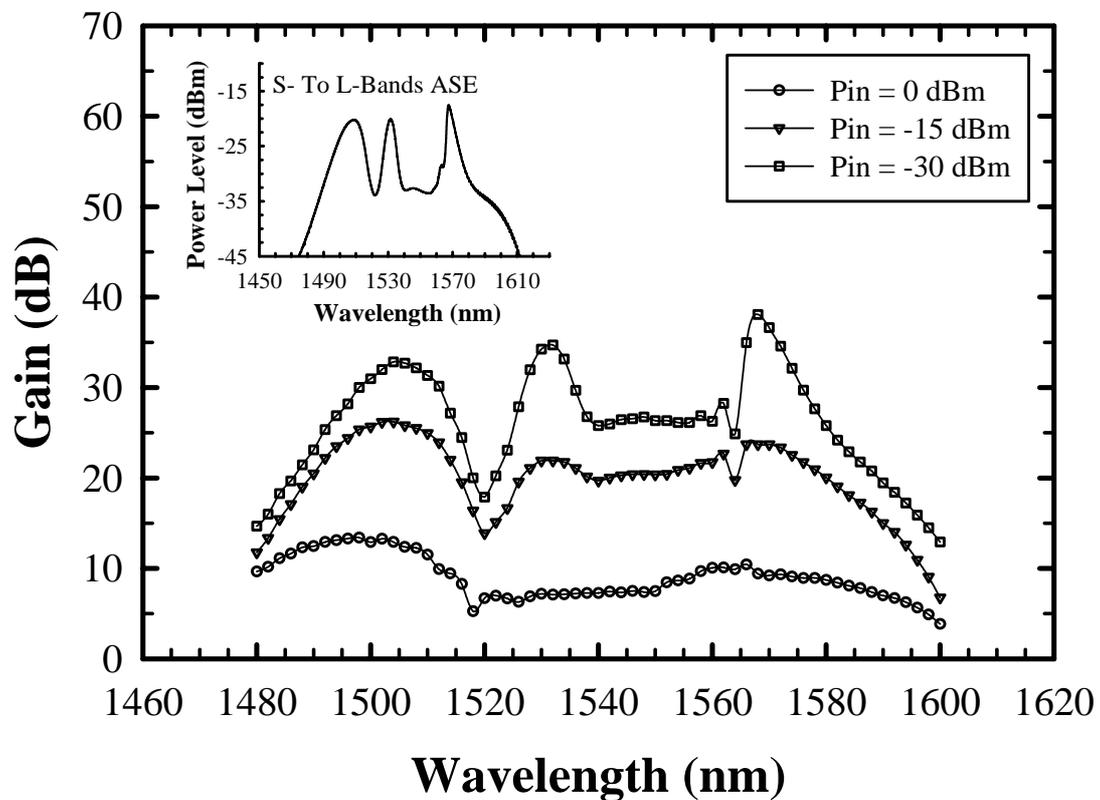


圖 3.10(a) 當輸入訊號為 0, -15 與 -30dBm 時寬頻放大器的增益頻譜

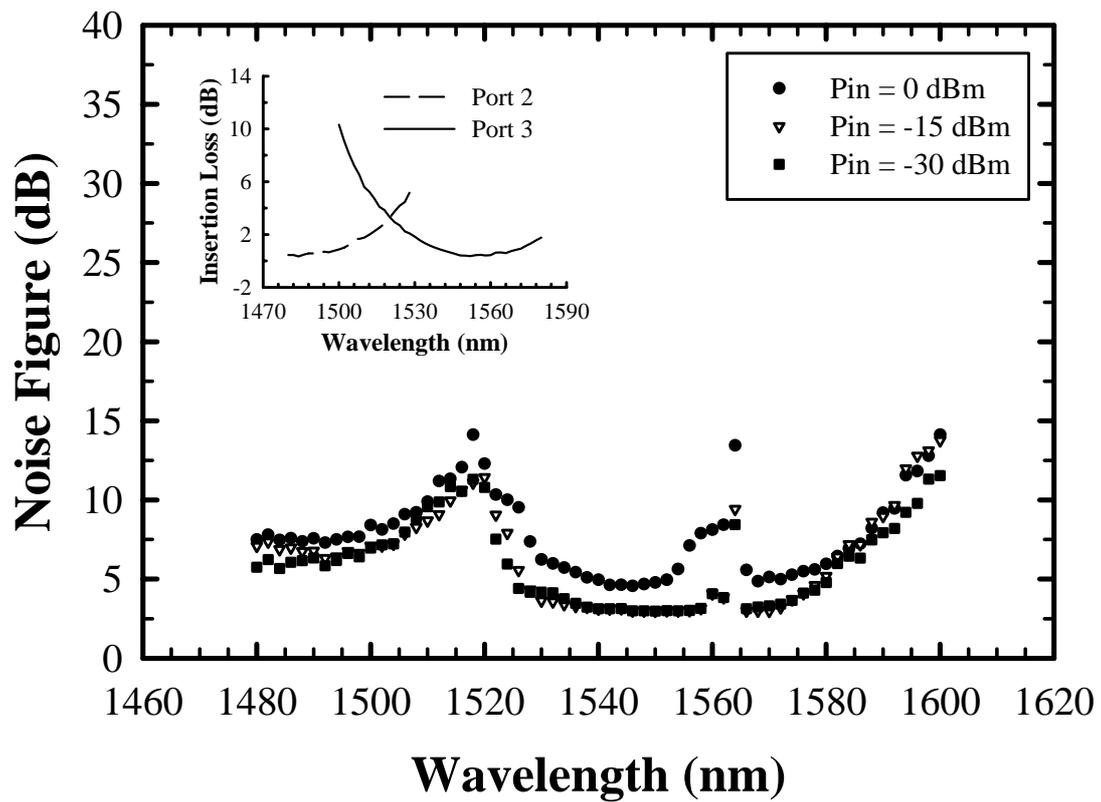


圖 3.10(b) 當輸入訊號為 0，-15 與-30dBm 時寬頻放大器的噪聲指數表現

第四章

增益箝制的技術於光纖放大器上的探討

4.1 簡述

在波長區分多工系統裡，訊號的增益的增益穩定度表現相當的重要，因此增益箝制的存在變的相當的重要。如 2.5 章節中敘述，迴路光增益箝制是目前使用中最經濟且簡單的架構，使用各式不同的光濾波器及光纖光柵來造成雷射迴路的產生則是架構的精神所在。在同質分布(homogeneously broadened)的介質材料，如摻鉕光纖放大器中，雷射的產生可以固定光纖裡總合的粒子反轉數，因此各波長的只和其吸收與輻射的橫截面積有關，而不會是輸入訊號強的函數。在此章節裡，我們將以增益箝制技術應用在先前提出的放大器結構上，證明除了增益大小與躁聲指數堪用之外，也有著增益穩定的效果。最後，我們也將其技術運用在摻鉕光波導放大器(EDWA)上，更證明此技術的廣泛適用性。

4.2 混合式 C+L 頻段放大器增益箝制

在上一章節中所提出的平行 S+C+L 的寬頻摻鉕光纖放大器中，S 頻段的增益箝制已經被驗證有其效果[10]。而圖 4.1 則為在 3.1 小節中提出來的混合式 C+L 頻段放大器的增益箝制架構，架構中使用的迴路雷射的形成方向與傳輸訊號相反，如同 2.5 小節中提到的，此種架構會使得迴路雷射在訊號入口處有著最大的強度，如此減低了訊號在光纖前端的放大率，躁聲指數也相對提高。針對此問題，我們特別在輸出端使用一旋波器(OC)，讓迴路雷射光源不在輸出出現，如此可以降低躁聲指數，量測時也可以不用避開迴路雷射波長而造成訊號使用的不連續。上圖迴路中的可調帶通光濾波器(TBF)調整在 1560nm

來產生飽和訊號作增益箝制用。圖 4.2 為選用圖 4.1 中的光耦合器(C) 耦光比例分別為 95:5, 90:10, 70:30, 50:50 時所量測到增益與噪聲指數對輸入光訊號的頻譜圖, 圖中增益箝制的效果在光耦合器比例選擇為 95:5 時就可以觀察出來, 一般來說讓架構形成迴路雷射會大大降低噪聲指數的表現, 然而由於上述所說的, 輸出端並不會受到迴路雷射的影響, 且此架構前級為低噪聲指數的 C 頻段放大器, 所以可以從結果看出, 噪聲指數的表現仍然非常的理想。使用 90:10 的光耦合量當回授時, 可以由圖中看出, 訊號輸入到 -25dBm 時期增益都還大概維持在一定值。整體來說, 加上了增益架構之後輸入訊號從 -45dBm 到 -25dBm 之間有著平坦且增益大於 32dB 的效能。而圖 4.3 為使用 10% 光回授量架構所得到的增益與噪聲指數頻譜, 輸入訊號分別為 -25 與 -45dBm, 由圖中可看出, 最大的增益發生在 1562nm 處, 其增益為 41.7dB(噪聲指數為 5.6dB), 且可以看出, 在 -45dBm 與 -25dBm 輸入時, 兩者的增益頻譜(1530nm~1610nm)有著非常小的變化(小於 2.4dB), 可以明顯的看出增益箝制的效能。

4.3 增益箝制在摻鉕光波導放大器的應用

4.3.1 摻鉕光波導放大器簡介

隨著光傳送網不斷向邊緣網領域延伸，各類新的低成本光器件將不斷湧現並將在這些領域發揮重要的作用。網路營運商需要一種能在城域網和接入網特定節點上按需給出特定增益量的放大器，這種放大器必須做到價格低廉、維護成本最少、充分利用現有的光纖，並能隨著城域網的發展而擴容。2001年出現的商用化摻鉕波導光放大器(EDWA)就是其中一種，是適合於城域網應用的新型集成光器件產品，其優勢在於它的緊湊性、可靠性、靈活性和較低的製造成本。相對於EDFA，EDWA在尺寸、增益和成本上都有所下降，這樣EDWA就可以根據需要在網路的多個地點安裝。由於結構緊湊、尺寸小巧，很適合於有限空間內的靈活應用，相對於半導體光放大器，EDWA具有低雜訊指數、很小的增益偏振相關性以及不存在通道間的串擾等一些固有優勢。



EDWA是由嵌入摻鉕玻璃基片上的波導組成的，選用合適的波導材料，只需使用數釐米長高濃度的摻鉕增益介質，就可以得到常規摻鉕光纖幾十倍的單位長度光增益。由於單純增加鉕離子濃度會降低鉕離子的轉換效率，因此，在製造過程中必須要精確地微調並保持平衡才能製造出所需增益的光波導放大器。研究表明，每釐米獲得2到3dB的增益是較好的平衡點，根據不同的波導材料，一般採用5到10釐米長的摻鉕波導，就可以獲得可靠、高效的EDWA。其不僅可以提供單波長而且可以提供多波長的光放大，並且可採用雙源雙向泵浦的方式以提高各通道的增益；可在同一個基片上集成多個EDWA，形成陣列型的光放大器，大大縮小體積，並可方便地實現DWDM系

統中多波長增益的動態調節。

4.3.2 摻鉍光波導放大器增益箝制

同樣的，我們將用對 S 頻段與 C+L 頻段放大器作增益箝制相同的方法，應用在摻鉍光波導放大器上。圖 4.4 為摻鉍光波導放大器的增益箝制架構。因其模組裡包含了兩個前後端的阻波器，所以我們應用與前面 S 頻段增益箝制相同的架構。其迴路原件包括兩個 1X2 的光耦合器，一個固定其分光比例為 90:10(C1)，另外一個則是選用 90:10，80:20，70:30，50:50，的分光器(C2)，且使用可調雷射來測試其效能。圖 4.5 為輸入訊號為 0，-15 與 -35dBm 時摻鉍光波導放大器的增益與噪聲指數表現。圖 4.4 中的可調帶通光濾波器(TBF)有著很寬的可調範圍，在此架構中，我們將使用其來濾出三種不同的波長的光來當飽和光源，並觀察不同的效能表現。下圖 4.5 為摻鉍光波導放大器在尚未做增益箝制時的增益與噪聲指數頻譜。

其增益與噪聲指數的表現都預 C 頻段摻鉍光纖放大器類似，擁有高的小訊號增益與優優良的噪聲指數表現。下頁圖 4.6 為選用光耦合器 C2 的比例為 70:30 產生迴路雷射後在輸出端所量得的放大器自發性輻射，從圖中可以觀察當光濾波器調再 1530nm 時，迴路雷射的效果並不明顯，而當濾波在 1540nm 與 1550nm 時，迴路雷射的現象則比較明顯，但 1530nm 與 1550nm 除了濾波器所產生的光頻段外，其他波段的放大器自發輻射與沒有接增益箝制迴路時沒有太大的差別。

基於 2.5 小節中的原理，我們選擇以 1540nm 與 1550nm 的迴路雷射作為此架構的飽和訊號，而非不明顯的 1530nm 訊號。圖 4.7(a)

與 4.7(b)分別為選用 1540nm 與 1550nm 當作飽和訊號時的不同回授度增益箝制效果，測試訊號為 1548nm。我們可以從兩張圖中比較得知，當使用 1540nm 當飽和雷射訊耗時，在 C2 的比例為 70:30 時及可以看到其增益箝制效果，訊號在-40dBm 到-10dBm 左右，其增益值幾乎維持一定值在 11.5dB 左右。而選用 1550nm 當飽和雷射的架構，則看不出來有因此架構的加入導致增益平坦的延伸。因此，在增益箝制的條件上除了要能清楚看到迴路雷射產生的之外，還要能使原本的放大器自發性輻射的輪廓有所改變才行，圖 4.6 中我們可以觀察到，雖然使用 1550nm 的飽和雷射當架構可以在輸出端明顯的看到其訊號，但是放大自發輻射卻沒有因此而改變，根據 2.5 小節中的原理，如此並不能改變(固定)反轉粒子的分布，增益箝制的效果就無法呈現。



圖 4.8 為當 C2 比例為 70:30 時，濾波器選在 1540nm 所做得增益箝制，由其增益頻譜圖中可以看出在-15dBm~0dBm 之間的輸入，增益的變動小於 3dB ;比較圖 4.8 的結果，在同樣條件下，其增益擾動卻高達 10dB。與之前的 S 頻段與 C+L 頻段放大器的增益箝制作比較，摻鉍光波導放大器的增益箝制效果在還未特別接上箝制迴路時就已經在-40dBm 到-20dBm 的訊號輸入時有著近乎定值的增益(在 1548nm 約 18dB)。原因為摻鉍光波導放大器的放大途徑遠很短(約 5cm)，受到飽和效應的影響相對的也會減小。

4.4 總結

在此章中，我們利用迴路光增益箝制技術應用在不同的放大器架構之上，得到增益箝制的效果。在 C+L 頻段的放大架構裡，選用 10% 的輸出光進入迴路時，可以讓輸入訊號從 -45dBm 到 -25dBm 之間有著平坦且增益大於 32dB 的效能(探測光為 1566nm)。最後，應用在摻鉕光波導放大器裡，增益箝制一樣有其效果，在 30% 的輸出光進入迴路之後，整體的系統在 -40dBm 到 -20dBm 的訊號輸入時，可以改善其增益擾動由原來的 10dB 降至 3dB 左右。

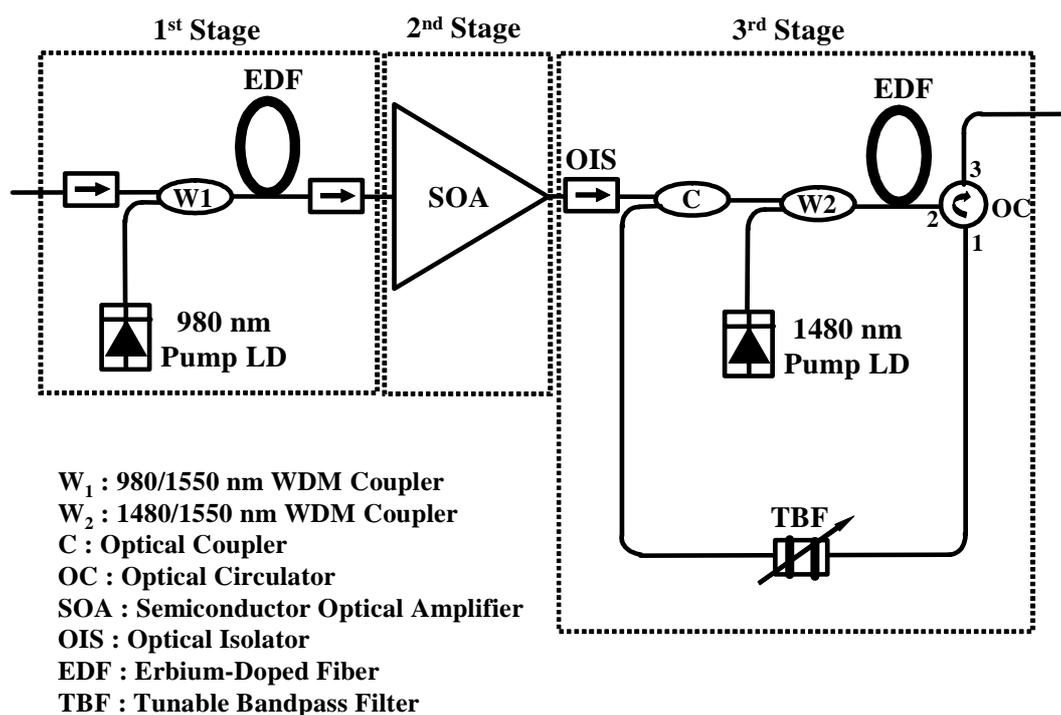


圖 4.1 混合式 C+L 頻段光放大器增益箝制架構

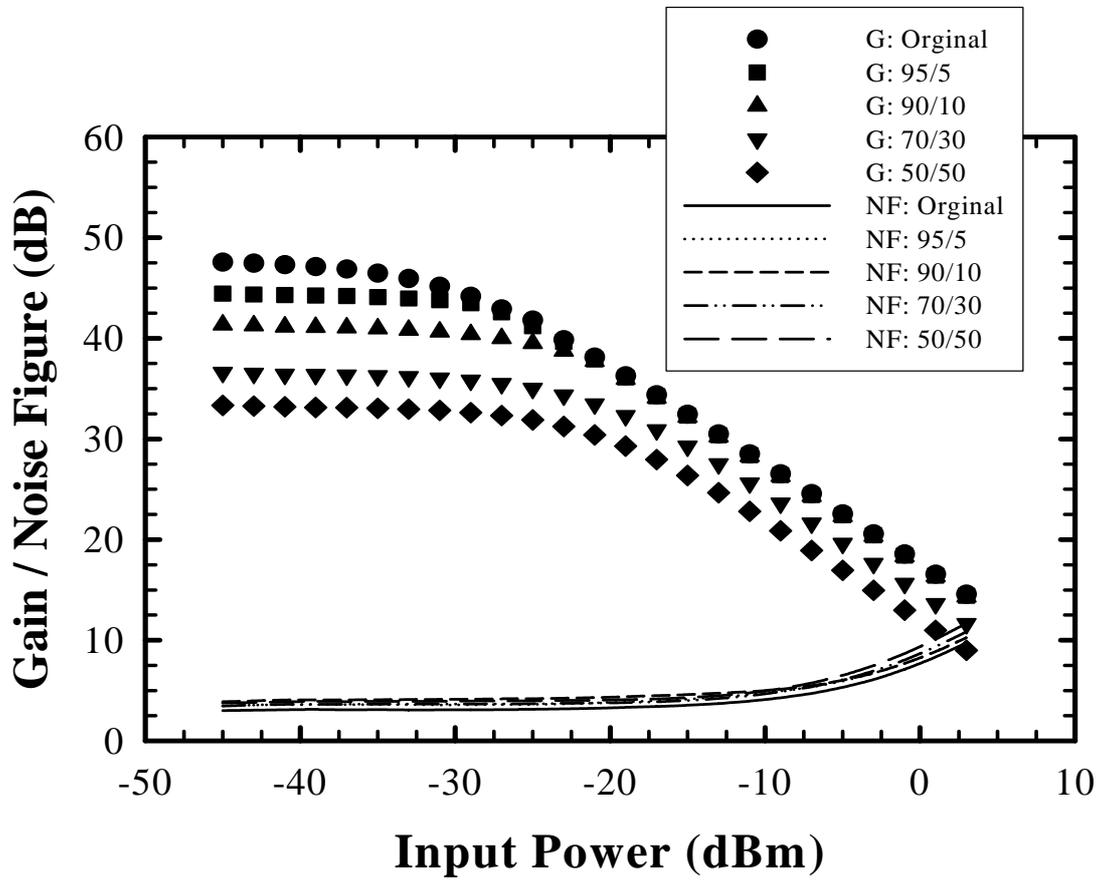


圖 4.2 箱制用雷射在 1560nm 下的增益箱制效果示意圖，測試光源為 1566nm

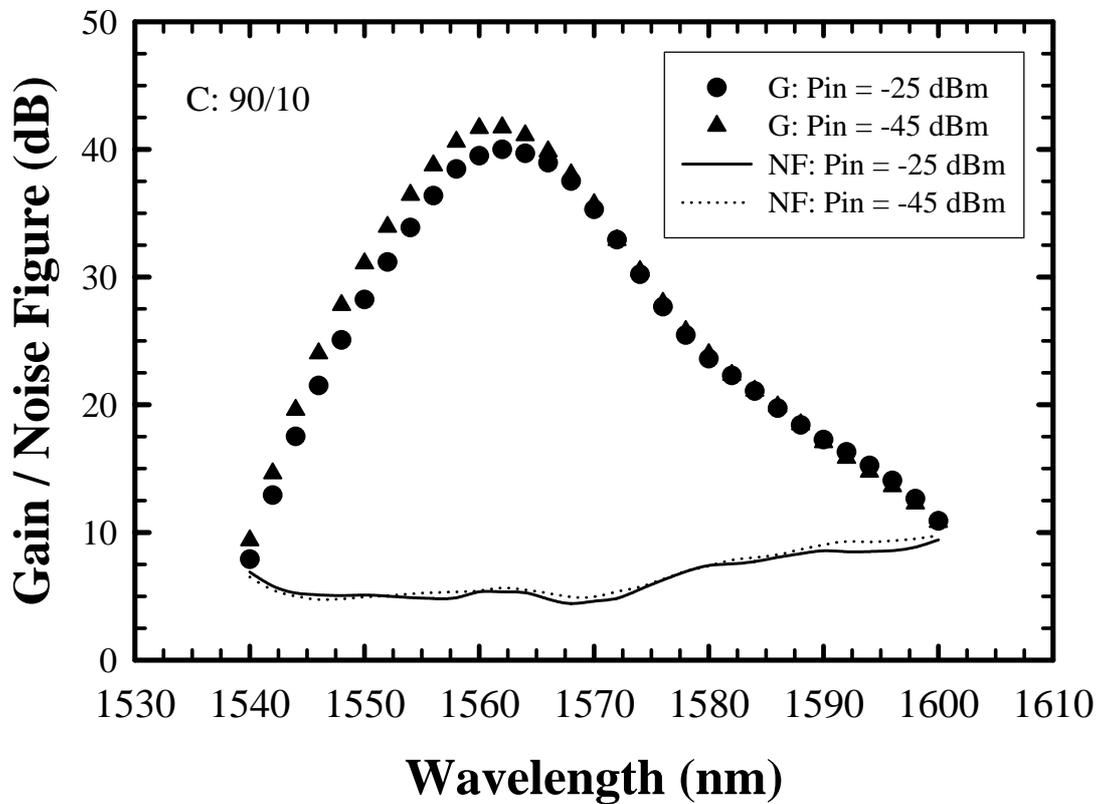


圖 4.3 選用 90:10 光耦合器的迴路架構下的增益與噪聲指數頻譜

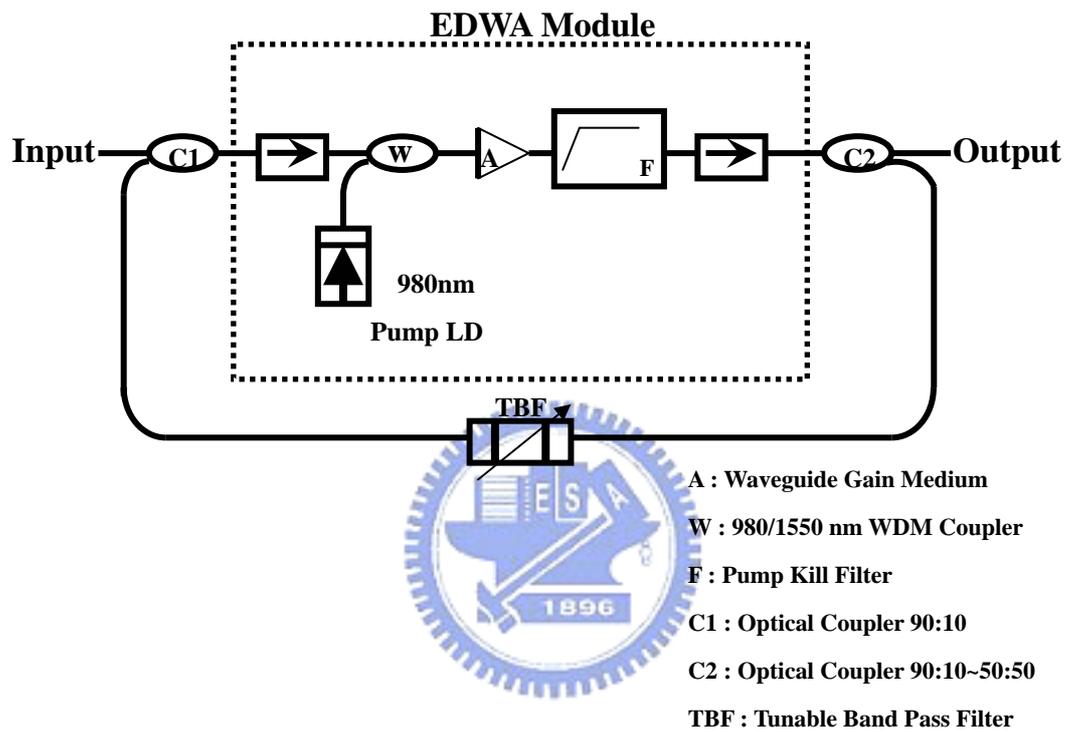


圖 4.4 摻鉕光波導放大器增益箱制架構

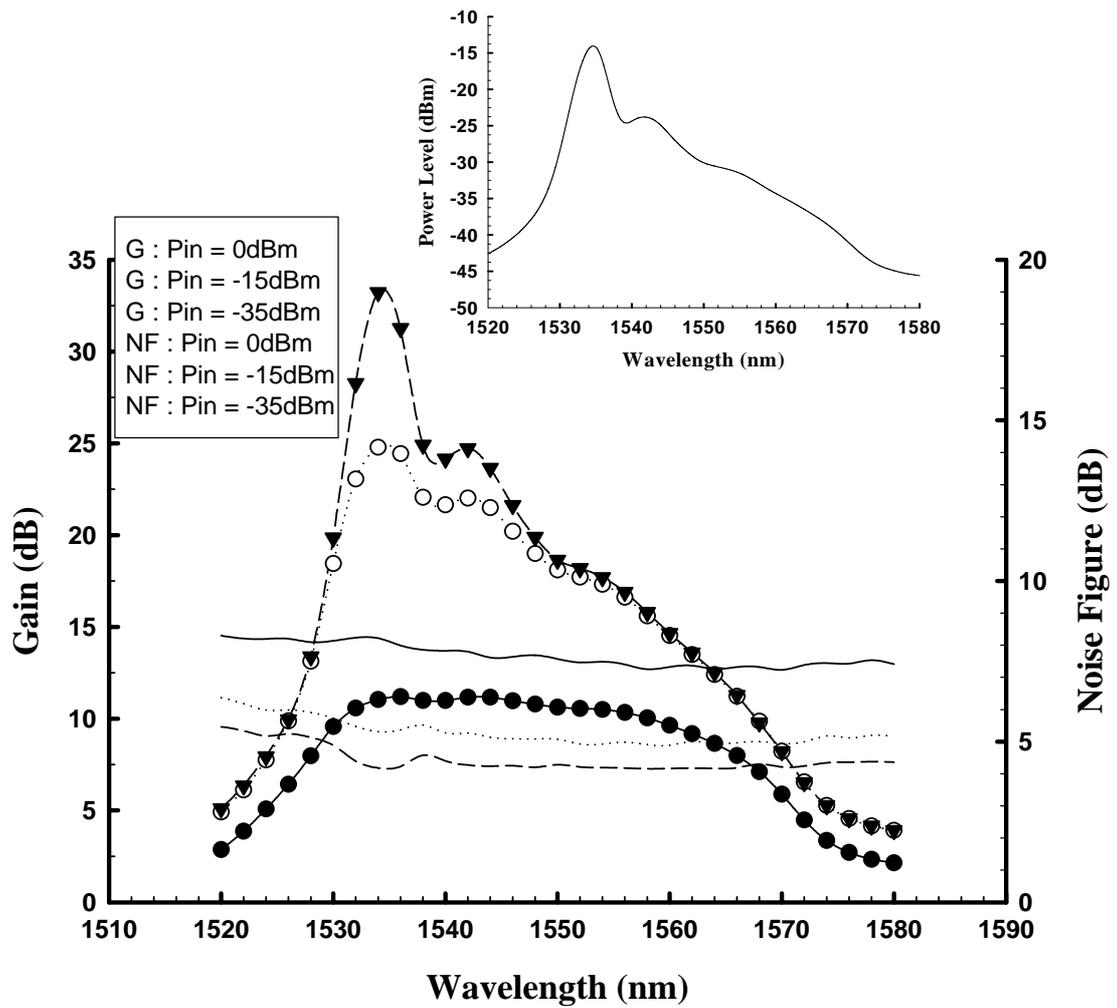


圖 4.5 摻鉕光波導放大器的增益與噪聲指數頻譜

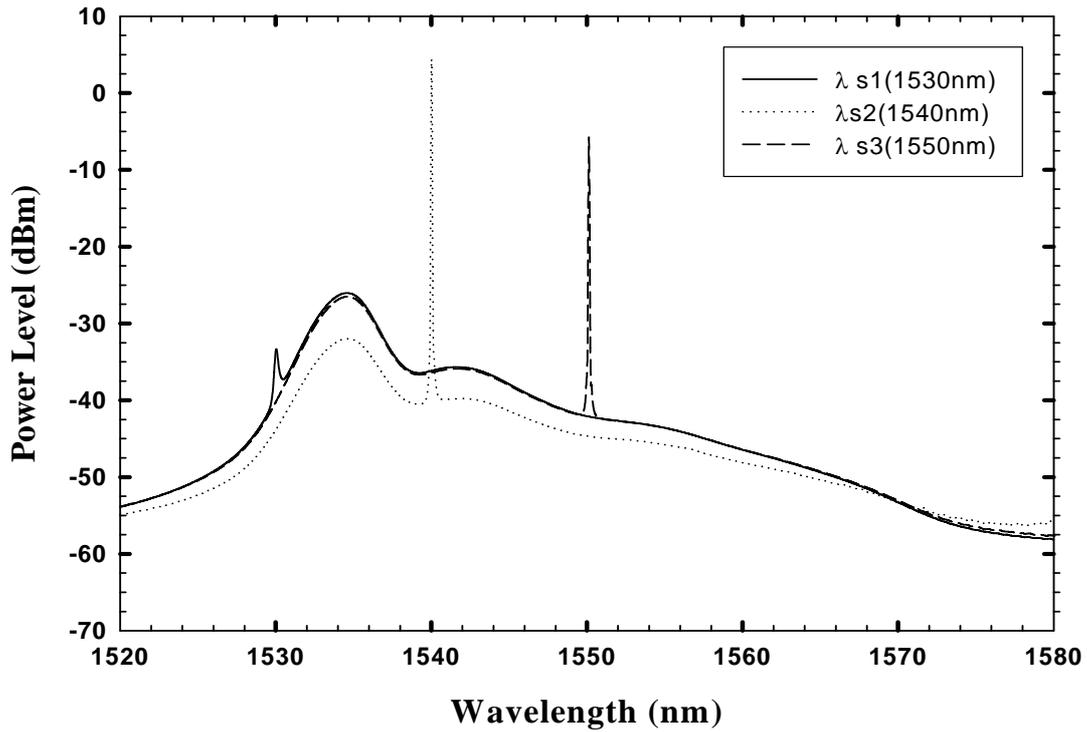


圖 4.6 三個不同濾波波長所量到的放大器自發輻射圖(分光為 30:70)

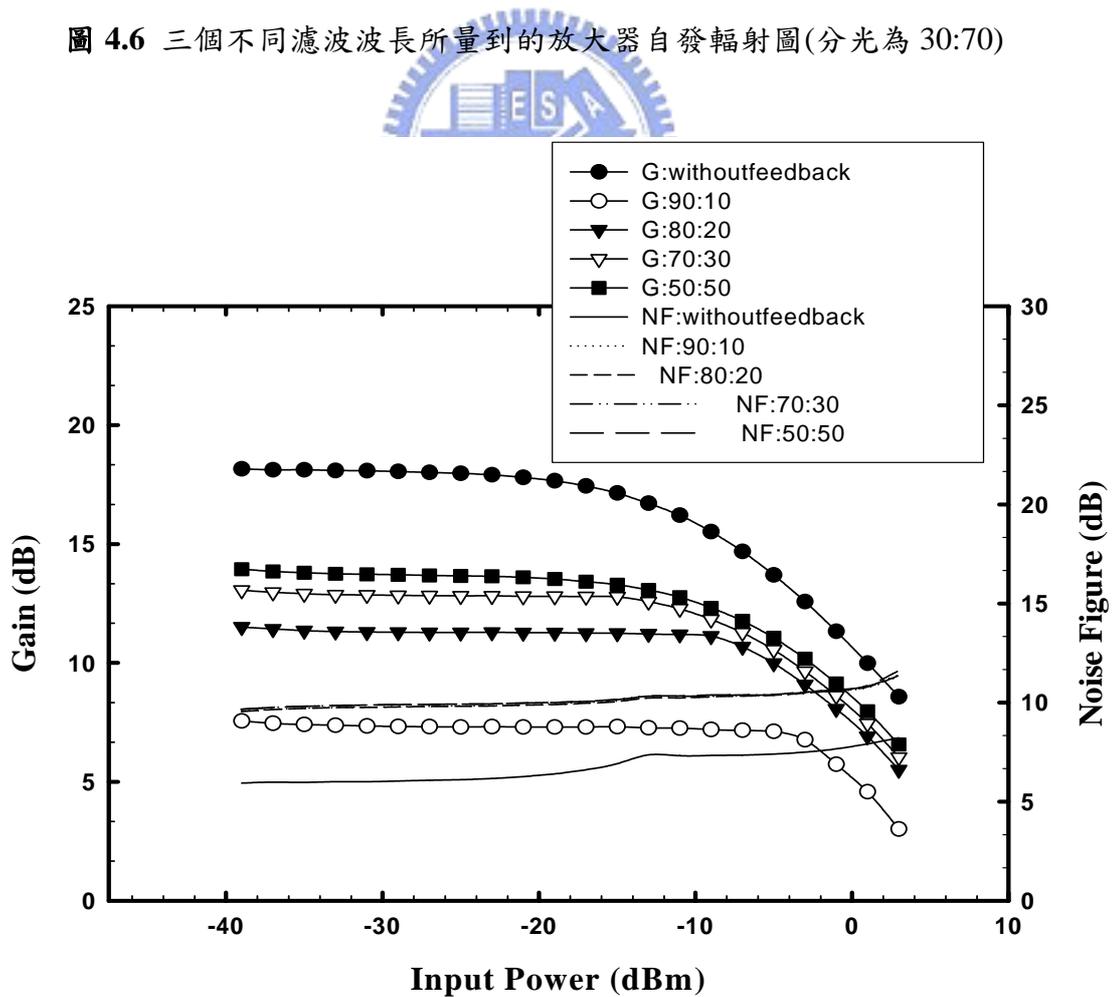


圖 4.7(a) 迴路雷射為 1540nm 時，由 1548nm 測試光所量得之增益箝制情形

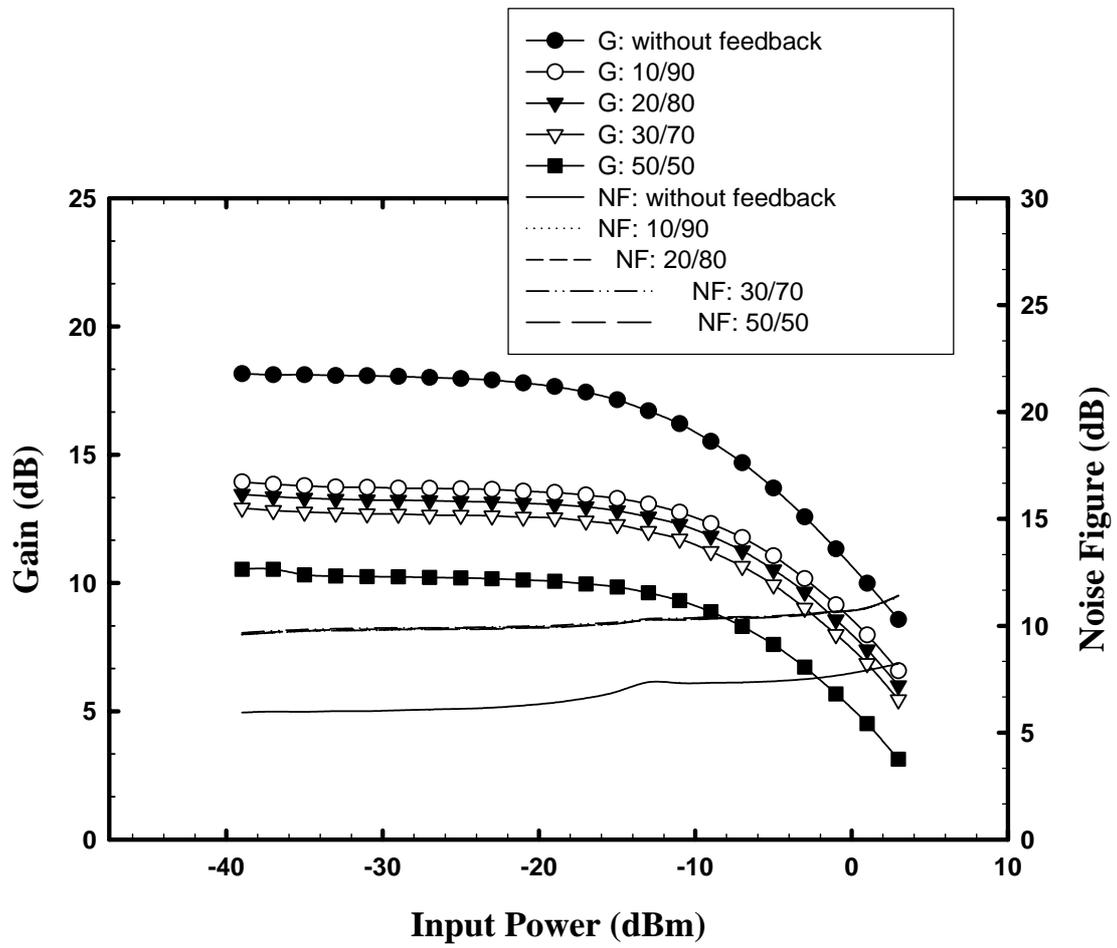


圖 4.7(b) 迴路雷射為 1550nm 時，由 1548nm 測試光所量得之增益箝制情形

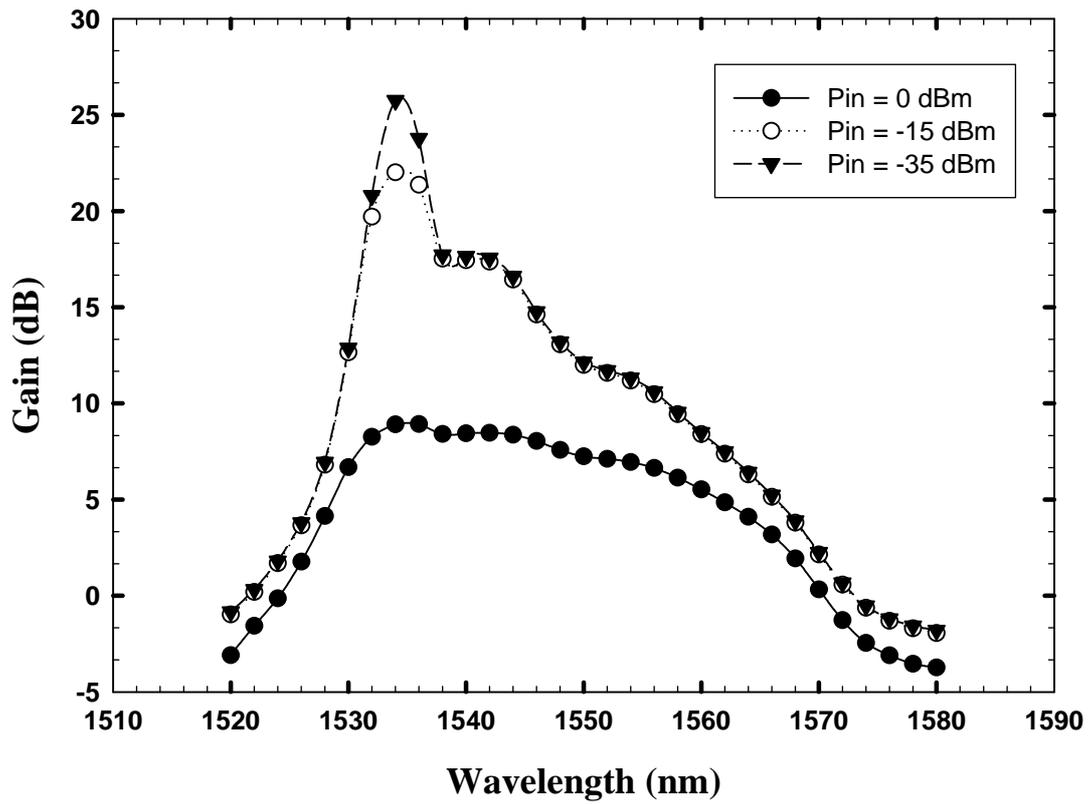


圖 4.8 迴路雷射選在 1540nm 且分光為 30:70 時的增益頻譜

第五章

結論與展望

本論文一開始的精神在於架構出一簡單，經濟的摻鉍光纖放大器架構以配合頻寬漸長的光通訊系統。首先利用有著比較寬增益頻帶的半導體光放大器與既有的 L 頻段摻鉍光纖放大技術(使用比 C 頻段長的摻鉍光纖及較強的泵激)作結合，可以架構出一增益範圍從 1540nm 到 1600nm 的 C+L 頻段放大器，在小訊號上擁有超過 20dB 的增益，大訊號上，也有著較平坦的 12dB 平均增益，也因為半導體光放大器的加入，使得原本摻鉍光纖長度必須達到 92m 時才有的 L 頻段放大效果縮短成用 44m 就可以達成同樣的效果。如此可以避免因熔接光纖不良而使訊號在長摻鉍光纖行進中產生雷射，也可以降低泵激的能量與組態，跟傳統上的架構比起來顯得彈性許多。再來將一級 980nm 泵激的 C 頻段摻鉍光纖放大器加在前級，用來將原本因半導體光放大器造成的高躁聲指數(約 14dB)降低至 7dB，使其更能適用在實際的系統裡，後級的摻鉍光纖也因此能再縮減至 34m。

再則是 S 頻段到 L 頻段的摻鉍光纖放大器的建立，以往來說，利用混合型或平行架構所達到的寬頻摻鉍光纖放大器，其效能總是涵括 C 與 L 頻段，對於一般單模光纖的最低損耗區 1450nm~1650nm 的放大獨缺 S 頻段。我們使用平行的架構，架構將三種不同頻段的放大器作整合，其中 C+L 頻段的放大器原則是使用前述的架構，形成一涵括 S, C 與 L 頻段的摻鉍光纖寬頻放大器，其效能被證實在 1480nm 到 1600nm 之間有著高的小訊號增益及躁聲指數表現，在大訊號的增益(約 10dB)頻譜平整度也頗為理想。實驗中特別的是，我們皆使用一般的摻鉍光纖與最常使用的 980nm 與 1480nm 的泵激，並沒有使用到

其他特殊且少用原件，如此在系統的整合性與便利性得以大大提升。

接著，再提出增益箝制技術來使所架構出來的放大器更加完備。在 C+L 頻段的放大架構裡，選用 10% 的輸出光進入迴路時，輸入訊號從 -45dBm 到 -25dBm 之間有著平坦且增益大於 15dB 的效能 (1540nm~1595nm)。其訊號的躁聲指數會隨著條件不同而有異，S 頻段保持在 8dB 左右，而 C+L 頻段則在 5dB 左右，但大致上都在可用的範圍之內，雖然最後我們使用的 C+L 頻段的放大器與之不同，並沒有光半導體放大器的存在，但原本混合式 C+L 放大器的增益箝制架構單純就只在摻鉍光纖放大器上(第三級)形成迴路，並沒有經由光半導體放大器，且之後使用的 C+L 頻段放大結構有著比原來混合式架構要長很多的後級摻鉍光纖，迴路雷射的形成應該更容易才是，因此估計同樣的架構也可以應用在後來的 S+C+L 頻段的放大器上，形成一個有著增益箝制效果的寬頻摻鉍光纖放大器。

最後，我們在增益箝制的應用裡引入了摻鉍光波導放大器，其擁有著小的體積，與幾乎與摻鉍光纖一樣好的效能，高訊號增益與低的躁聲指數。在其箝制實驗上，以 30% 的輸出光進入迴路之後，整體的系統在 -40dBm 到 -20dBm 的訊號輸入時，可以改善其增益擾動由原來的 10dB 降至 3dB 左右，證明了增益上的擾動也可以藉此在摻鉍光波導放大器中獲得控制，更加完備此放大器的功能。

隨著光通訊持續的方展與進步，光放大器的種類越來越多，且既有的光放大器在效能及應用上也日趨完善，要如何將其應用在系統上變成一個很重要的議題，單一種類的放大其可能沒有辦法符合所有的需求，所以適時的配合不同種類的放大器來達到特定的效果或在單一

種類的放大器上作整合才是比較聰明的解決方案，以目前來說，拉曼與摻鉕光纖放大器的種種組合已經被廣泛的研究，值得注意的是原來的半導體光放大器在效能上有了長足的進展，實驗中提及摻鉕光波導放大器也以黑馬的姿態迎頭趕上，很明顯的要如何繼續運用其獨特的效能來整合原有的光放大器將會是個值得研究的議題。



参考文献

- [1] J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori, and K. Oguchi, "Triple wavelength band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted-fiber," in *OAA'99, WC2*, 1999.
- [2] A. Mori, T. Sakamoto, K. Kobayashi, K. Shikano, K. Oikawa, K. Hoshino, T. Kanamori, and M. Shimizu, "A 50m broadband tellurite-based EDFA with a 0.6dB gain excursion and a 25dB gain for 1.58-um band WDM signals," in *Proc. ECOC'99 vol.1*, 1999, pp. 268-269.
- [3] S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, and M. Shimizu, "Gain-shifted thulium-doped fiber amplifiers employing novel high concentration doping technique," *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 418-419, 2000.
- [4] M. Jinno, M. Fukui, T. Sakamoto, S. Aisawa, J. Kani, and K. Oguchi, "WDM transmission technology for dispersion-shifted-fibers," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E81-C, no. 8, pp. 1264-1275, 1998.
- [5] S. C. Tsai, T. C. Tsai, P. C. Law, and Y. K. Chen, "High pumping-efficiency L-band erbium-doped fiber ASE source using double-pass bidirectional-pumping configuration," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 197-199, 2003.
- [6] S. W. Harun, P. Poopalan, and H. Ahmad, "Gain enhancement in L-band EDFA through a double-pass technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 296-297, 2002.

[7] H. S. Chung, M. S. Lee, N. Park, and D. J DiGiovanni, "Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980nm pumping," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 13, pp. 1099-1010, 1999.

[8] Y. Zhang, X. Liu, J. Peng, X. Feng, and W. Zhang, "Wavelength and power dependence of injected C-band Laser on pum conversion efficiency of L-band EDFA," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 290-292, 2002.

[9] B. H. Choi, H. H. Park, and M. J. Chu," New pump wavelength of 1540-nm band for long-wavelength-band erbium-doped fiber amplifer," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 39, no. 10 ,2003.

[10] C. H. Yeh, C. C. Lee, C. Y. Chen, and S. Chi, "S band gain-clamped erbium-doped fiber amplifier by using optical feedback method," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 90-92, 2004.

[11] Agrawal, G., "Nonlinear Fiber Optics", 3rd Edition, *Academic Press*.

[12] 鄭翰陽, "利用多泵浦半導體光源之寬頻且增益平坦的拉曼放大器," 交通大學光電所碩士論文, 2003.

[13] M. Yamada, H. Ono, T. Kanamori, S. Sudo, and Y. Ohishi, "Broadband and gain-flattened amplifier composed of a 1.5um-band and 1.58um-band Er³⁺-doped fiber amplifier in parallel configuration," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 8, pp. 710-711, 1997.

[14] Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivasta, J. L. Zyskind, T. A. Strasser, J.

R. Pedrazzani, C. Wolf, J. Zhou, J. B. Judkins, R. P. Espindola, and A. M. Vengarkar, "80nm ultra-wide-band erbium-doped silica fiber amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 23, pp. 1965-1967, 1997.

[15] B. Min, H. Yoon, W. J. Lee, and N. Park, "Coupled structure for wide-band EDFA with gain and noise figure improvement from C to L-band ASE injection," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 480-482, 2000.

[16] L. Tancevski, L. A. Rusch, and A. Bononi, "Gain control in EDFA by pump compensation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 9, pp. 1313-1316, 1998.

[17] C. H. Yeh, Y. W. Hsu, Y. J. Huang, C. C. Lee, and S. Chi," Simultaneously gain-flattened and gain-clamped technique for erbium-doped fiber amplifiers by backward injection of a fabry-perot laser light," *OPT 2002*.

[18] M. Cai, X. Liu, J. Cui, M. Leblance, P. Tang, and J. Peng, "Study on noise characteristic of gain-clamped erbium-doped fiber-ring lasing amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 1093-1095, Aug 1997.

[19] S. Y. Ko, M. W. Kim, D. H. Kim, S. H. Kim, J. C. Jo, and J. H. Park, "Gain control in erbium-doped fiber amplifiers by tuning centre wavelength of a fiber Bragg grating constituting resonant cavity," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 990-991, 1998.

[20] S. W. Harun, S. K. Low, P. Poopalan, and H. Ahmad," gain clamping in L-band erbium-doped fiber amplifier using a fiber Bragg grating,"

IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, no.3, pp. 293-295, 2002.

[21] Y. H. lu and S. Chi, "Two – stage L-band EDFA applying C/L- band wavelength-division multiplexer with the counterpropagating partial gain-clamping," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 1710-1712, 2003.

[22] J. C. R. F de Oliveira, J. B. Rosolem, and A. A. Juriollo, "Thulium doped fiber amplifier performance in S-band using two different complementary pumping wavelengths," *Pro. SBMO/IEEE MTT-s IMOC* 2003.

[23] P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology," *Academic Press*.

[24] M. Karasek, "The design of L-band EDFA for multiwavelength applications," *Journal of Optics A, Opt.* 3 (2001) 96~102.

[25] M. Zirngibl, "Gain control in erbium-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop," *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 7, pp. 560-562, 1991.

[26] Y. Takushima, and K. Kikuchi, "Gain spectrum equalization of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 176-178, 1999.

[27] M. Yamada, H. Ono, T. Kanamori, S. Sudo, and Y. Ohishi, "Broadband and gain-flattened amplifier composed of a 1.5 μ m-band and 1.58 μ m-band Er³⁺-doped fiber amplifier in parallel configuration,"

Electron. Lett., vol. 33, no. 8, pp. 710-711, 1997.

[28] B. Min, H. Yoon, W. J. Lee, and N. Park, "Coupled structure for wide-band EDFA with gain and noise figure improvement from C to L-band ASE injection," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 480-482, 2000.

[29] Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivasta, J. L. Zyskind, T. A. Strasser, J. R. Pedrazzani, C. Wolf, J. Zhou, J. B. Judkins, R. P. Espindola, and A. M. Vengarkar, "80nm ultra-wide-band erbium-doped silica fiber amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 23, pp. 1965-1967, 1997.

[30] M. A. Arbore, Y. Zhou, G. Keaton, T. J. Kane, "30dB gain at 1500nm in S-band erbium-doped silica fiber with distributed ASE suppression," in *Proc. SPIE, Optical Device for Fiber Communication IV*, vol. 4989, pp. 47-52, 2003.

