

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 單模、短脈衝、高速光纖雷射技術基礎與應用研究(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2215-E-009-039-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學光電工程研究所

計畫主持人：林恭如

計畫參與人員：張詠誠 交通大學光電工程研究所，吳忠嶸 台北科技大學  
光電工程研究所，薛百勝 台北科技大學光電工程研究所

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 29 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計劃期中報告

## 單模、短脈衝、高速光纖雷射技術基礎與應用研究(1/3)

計劃編號：NSC 91-2215-E-009-039-

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：林恭如 交通大學光電工程研究所

計劃參與人員：張詠誠 交通大學光電工程研究所

吳忠嶸 台北科技大學光電工程研究所

薛百勝 台北科技大學光電工程研究所

### 一、中文摘要

本計劃期中報告將針對建立使用一個以迴授注入再生式的的摻鉕光纖放大器，配合波長在 1.55  $\mu\text{m}$  的 Fabry-Perot 雷射二極體(FPLD)來實現的一個單模且高側模抑制比雷射光源之研究目標進行階段進度檢討。

一個單模且高側模抑制比的 Fabry-Perot 雷射二極體(FPLD)，波長在 1.55  $\mu\text{m}$ ，是藉由摻鉕光纖放大器迴授再生注入 FPLD 方式來達成目的，雷射光在封閉迴圈內產生再生式迴授，以便從 Fabry-Perot 雷射二極體的增益光譜中選擇最強的縱膜，在操作條件上 Fabry-Perot 雷射二極體必須操作在略低於臨界電流的狀態下並迴授注入摻鉕光纖放大器 0.02% 的輸出功率。這單模 Fabry-Perot 雷射二極體發出雷射的模態和中心波長是由摻鉕光纖放大器及 Fabry-Perot 雷射二極體的交互關係增益圖所決定，然而，我們發現 Fabry-Perot 雷射二極體注入的模態群的影響較為顯著。在量測系統限制下，有效的雷射線寬可達到 0.01 nm 以及  $> 49$  dB 的側模抑制比，這狀態比 Fabry-Perot 雷射二極體自由運作的好很多，最窄的線寬在 3-dB 和 10-dB 衰減的時候可被觀察到分別為 0.016 nm 和 0.05 nm。線性的波長調整可藉由調整 Fabry-Perot 雷射二極體的溫度(攝氏 10 度到 40 度)達到 6 nm 上下變化(1558.5 nm 到 1564.7 nm)，其波長改變斜率約為 0.14 nm/度 (在 0.1 度的準確率下)。

關鍵詞：側模抑制、窄線寬、Fabry-Perot 雷射二極體、迴授注入、波長可調。

### Abstract

The mid-term report states the progress on developing a single mode and highly side-mode suppressed 1.55 $\mu\text{m}$  Fabry-Perot laser diode (FPLD) with feedback injection control from a regenerative Erbium-doped fiber amplifier (EDFA).

A single mode and highly side-mode suppressed 1.55  $\mu\text{m}$  Fabry-Perot laser diode (FPLD) is achieved by feedback injecting with a regenerative Erbium-doped fiber amplifier (EDFA). To help selecting the strongest longitudinal mode from the gain-spectrum of FPLD for lasing in the closed-loop regenerative EDFA cavity, the FPLD is operated at just below threshold condition and feedback injected by 0.02 % of EDFA output power. The lasing mode and center wavelength of the proposed single-mode FPLD source are decided by both the cross-correlated gain profile of regenerative EDFA and FPLD, however, the effect of FPLD injection modes is found to be more pronounced. The optimized lasing linewidth (system limitation) and side-mode suppression ratio of 0.01 nm and  $> 49$  dB are obtained, which are far better than those of a FPLD at free-running condition. The worst linewidth at 3-dB and 10-dB decay are observed to maintain at about 0.16 nm and 0.05 nm, respectively. Linear wavelength tuning of up to 6 nm (from 1558.5 nm to 1564.7 nm) by adjusting temperature of FPLD from 10  $^{\circ}\text{C}$  to 40  $^{\circ}\text{C}$  at just below threshold is reported. The wavelength-tuning slope is about 0.14 nm/ $^{\circ}\text{C}$  under temperature accuracy of 0.1  $^{\circ}\text{C}$ .

**Keywords:** side mode suppression ratio, narrow linewidth, Fabry-Perot laser diode, feedback injection, wavelength-tunable

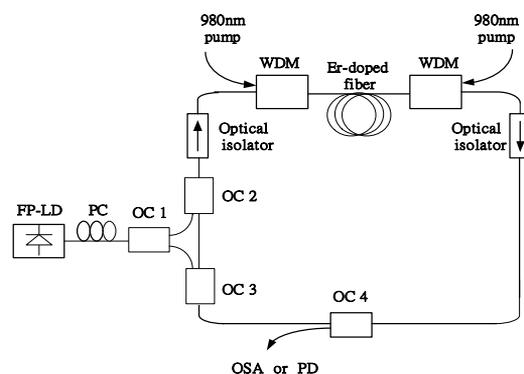
## 二、緣由與目的

具有窄光譜線寬和低雜訊效果於固定波長的雷射上的高穩定度連續波雷射，是未來在傳統光纖傳輸上具有潛力的光傳輸或測試光源。隨著摻鉍光纖放大器(EDFAs)的快速演進，具有相當寬的增益譜、窄線寬和波長可調這樣一個高功率光源已經變成一個令人感興趣的研究主題。之前，各種的最先進的光濾波器像是直寫式或是外部的光纖布拉格光柵(FBGs)、可調式光纖Fabry-Perot etalons(FFPEs)，和其他具有特別窄線寬的衍射光柵已經成功被研發出來以符合各式各樣的需求。然而，這些架構不是構造複雜，就是不符合成本效益。最近，利用雷射二極體光源做新型外部迴授式或以自注入為基礎的濾波技術已經被成功展示。至今，由於摻鉍光纖雷射(EDFLs)突出的特性，像是寬自發性輻射、高輸出功率、直接光纖相容..等特性，許多研究者開始對產生窄線寬和波長可調的EDFLs應用在被動光纖傳輸裝置和次模組之特性感到興趣。利用一個商用的內腔帶通濾波器可以得到最一般及簡單的窄線寬的摻鉍光纖雷射光源。這個方法雖然很容易實現波長可調的特性，然而它的側模抑制比(SMSR)和過濾後線寬仍然很差。

最近，出現一個顯著有效以及低成本的方法被報導，是藉由Fabry-Perot 雷射二極體(FPLD)來產生波長可調單模雷射脈衝，方法是利用自注入 Fabry-Perot 雷射二極體以及較低(約 0.2~6%)迴授功率。在 11.5 nm 的波長可調範圍內具有大於 40 dB 的側模抑制比的單模脈衝是由自注入式的 Fabry-Perot 雷射二極體所產生。雖然如此，這項技術仍然需要依賴可調的線性啾頻的光纖布拉格光柵的使用來提供波長選擇的迴授以及輸出過濾功能。相對的，Fabry-Perot 雷射二極體快速且廣範圍波長可調也可以藉由光迴授的供應，對於自注入式的雷射二極體來說像是一個主動的 Fabry-Perot 濾波器，來實現。波長選擇可藉由電子控制一個操作在低於臨界電流 Fabry-Perot 雷射二極體的梳狀光譜響應來達成，其具有一個階梯式的波長可調範圍 (9~11nm) 並且有 13dB 到 22dB 的側模抑制比。另外，由自注入式引起的模態選擇的過程所導致的功率損失是另一個缺點。

在此計畫中，為了突破以自注入為基礎的過濾技術下 Fabry-Perot 雷射二極體功率消耗以及有限的 SMSR 之困境，我們提出一個新的方法來產生一個高功率、單模以及超高側模抑制比的 Fabry-Perot 雷射二極體，方法是使用封閉迴圈再生式的摻鉕光纖放大器以及迴授注入技術。這個窄線寬的實現，是藉由控制來自摻鉕光纖放大器的光迴饋注入到 Fabry-Perot 雷射二極體，並且不使用任何的光循環器、光纖布拉格光柵以及光帶通濾波器。這個系統和舊的架構比較，具有簡單架設以及較高輸出功率的優點。並且，我們討論到 FPLD 的電流和溫度，以及摻鉕光纖放大器迴授功率對於以摻鉕光纖放大器放大後之 Fabry-Perot 雷射二極體輸出的側模抑制比之影響。

再生式摻鉕光纖放大器迴授注入的 Fabry-Perot 雷射二極體架構如圖一所示。



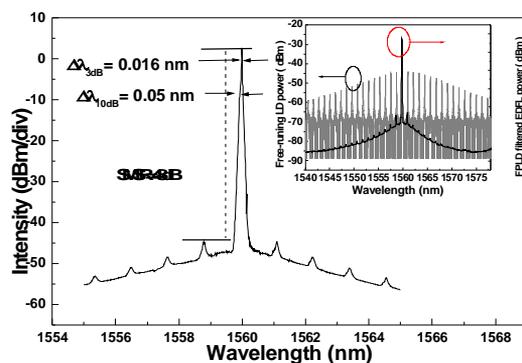
圖一

一個雙向激發的商用摻鉕光纖放大器模組(具有 23dBm 最大輸出)是封閉迴圈，以及使用不同比例的光耦合器迴授注入一商用的光纖的 Fabry-Perot 雷射二極體，並串聯線型極化控制器。這樣的一個設計不包含任何昂貴的元件，像是光循環器、光纖布拉格光柵、DBR or DFB 雷射二極體，以及窄帶通濾波器。自由運轉的 Fabry-Perot 雷射二極體在攝氏 35 度時其波長、臨界電流還有縱模模態寬分別為 1560 nm、12 mA 和 1.2 nm。在實驗中，光耦合器 1 (90/10) 耦合 Fabry-Perot 雷射二極體輸出並且以光耦合器 2 (50/50) 連結到再生式的摻鉕光

纖放大器，還有以光耦合器 3 (90/10) 連結再生式的摻鉕光纖放大器輸出迴授到 Fabry-Perot 雷射二極體。再生式的摻鉕光纖放大器的光輸出連結到光耦合器 4 (65/35)，光耦合器 4 也可維持增益在這光纖迴路內飽和。因為在此 Fabry-Perot 雷射二極體和摻鉕光纖迴路中調整極化的狀態成一個極化的固有態是很重要的，所以我們必須仔細的調整在 Fabry-Perot 雷射二極體和光耦合器 1 之間的極化控制器來控制光迴授進入 Fabry-Perot 雷射二極體的極化。這樣的架構保證單模的震盪、最佳化效側模抑制比，同時抑制雷射的雜訊 35 % 的 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式的摻鉕光纖放大器輸出以具有 0.01nm 的解析度的光譜分析儀(Advantest, Q8384) 和光功率計 (ILX Lightwave, OMM-6810B) 來觀察。線型的極化控制器用於微調從再生式的摻鉕光纖放大器到 Fabry-Perot 雷射二極體的迴授注入功率，再生式的摻鉕光纖放大器迴授注入功率調整在 0.01%到 0.05%之間，並且控制 Fabry-Perot 雷射二極體在略低於臨界電流的狀態下。再生式的摻鉕光纖放大器的迴授和 Fabry-Perot 雷射二極體的腔內損失互相妥協藉此輕易地在 Fabry-Perot 雷射二極體選擇一個縱模得到被改善的側模抑制比，然後再迴授至再生式摻鉕光纖放大器以得到一線寬縮減的輸出。在精確的控制迴授功率於約 12.4  $\mu\text{W}$ ，Fabry-Perot 雷射二極體或再生式的摻鉕光纖放大器的其他模態在增益競爭過程被抑制，可觀察到線寬有效變窄。

### 三、期中計劃進度結果與討論

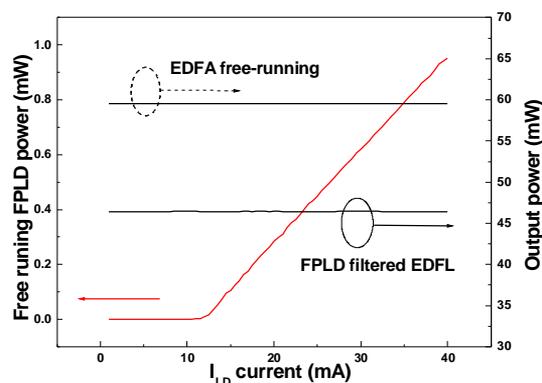
藉由驅動 Fabry-Perot 的雷射二極體其電流操作在低於臨界電流上，可以觀察到由再生式的摻鉕光纖放大器與 Fabry-Perot 的雷射二極體的連接下，所產生最好的窄線寬操作，如圖二所示。



圖二

當再生式的摻鉕光纖放大器迴授部分輸出注入 Fabry-Perot 雷射二極體，可以觀察到 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式的摻鉕光纖放大器所產生的雷射光譜有大於 48 dB 的側模抑制比，並且其線寬在 3-dB 與 10-dB 的地方分別為 0.016nm 與 0.05nm。自行運轉的 Fabry-Perot 的雷射二極體（接近臨界電流）和 Fabry-Perot 的雷射二極體過濾再生式的摻鉕光纖放大器所發出的雷射光譜顯

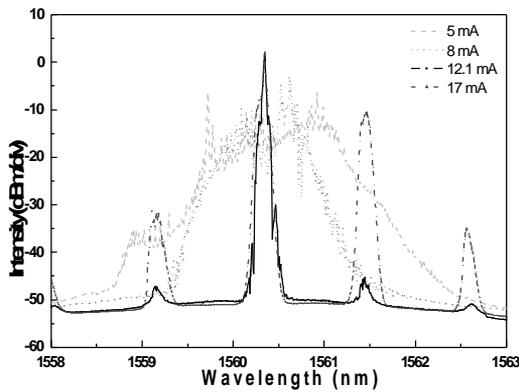
示在圖二的插圖中。我們可以很清楚的看到 Fabry-Perot 的雷射二極體過濾再生式的摻鉕光纖放大器發出的最高雷射光譜與自行運轉的 Fabry-Perot 的雷射二極體的光譜中所產生的最高模態，兩者匹配在一起。Fabry-Perot 的雷射二極體對於再生式的摻鉕光纖放大器的過濾的穩定性會隨著操作電流在很低於或者很高於臨界電流的情況下而產生變動，因此再生式的摻鉕光纖放大器會在自注入或者多模態 Fabry-Perot 雷射二極體的狀態中。比較上，在後面的情況下，對於 Fabry-Perot 的雷射二極體來說，再生式的摻鉕光纖放大器像一個封閉迴圈的放大器（或者是被動雷射）。當 Fabry-Perot 雷射二極體的電流操作在接近臨界電流時，則會變成接近透明狀態。這會使得 Fabry-Perot 雷射二極體的一個寬頻的有限自發輻射的光譜的在再生式的摻鉕光纖放大器環形共振腔中放大。經過幾次的迴圈之後，會產生一個放大的縱模模態在再生式的摻鉕光纖放大器和 Fabry-Perot 的雷射二極體的相關連的增益曲線範圍內，並且最後克服外部腔長的 Fabry-Perot 雷射二極體的損失，當該雷射二極體剛好操作在低於臨界電流的情況下，也同時主導了 Fabry-Perot 雷射二極體與再生式的摻鉕光纖放大器所發出的雷射光波長。自行運轉的 Fabry-Perot 雷射二極體，溫度操作在攝氏 35 度的功率與電流的特性、自行運轉的摻鉕光纖放大器輸出功率，和封閉迴圈的再生式的摻鉕光纖放大器帶有內腔濾波迴授注入控制的 Fabry-Perot 雷射二極體如圖三所示。我們可以看到自行運轉的再生式的摻鉕光纖放大器兩者都已經被激發出雷射光了，並且輸出的功率為 60 mW 不管是否有驅動 Fabry-Perot 雷射二極體。與 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式的摻鉕光纖放大器的輸出功率高達 46.5 mW 來做一個比較，可以明顯的看出有大約 1.1 dB 的插入損失。我們可以發現再生式的摻鉕光纖放大器的功率穩定性是相當好，只發現只有大約 1% 的功率變動在 Fabry-Perot 雷射二極體的驅動電流改變時。這些殘餘的功率變化主要歸咎於 Fabry-Perot 雷射二極體增益峰值的微小紅位移以及較少的摻鉕光纖放大器增益曲線的平坦化所影響。



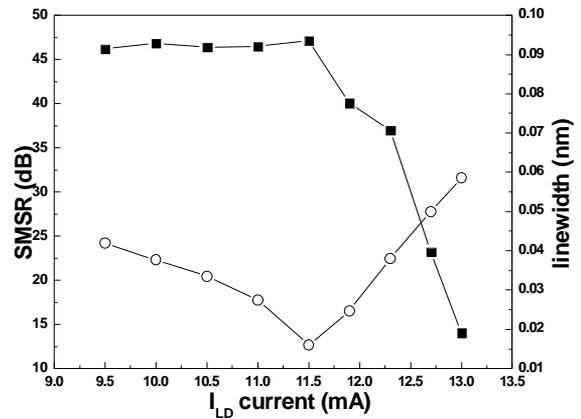
圖三

再生式的摻鉕光纖放大器控制內部腔長迴授注入的 Fabry-Perot 雷射二極體的

輸出光譜輸出在一個不同的電流狀態（低於、接近以其高於臨界電流），並穩定操作溫度於 35 度上顯示在圖四。

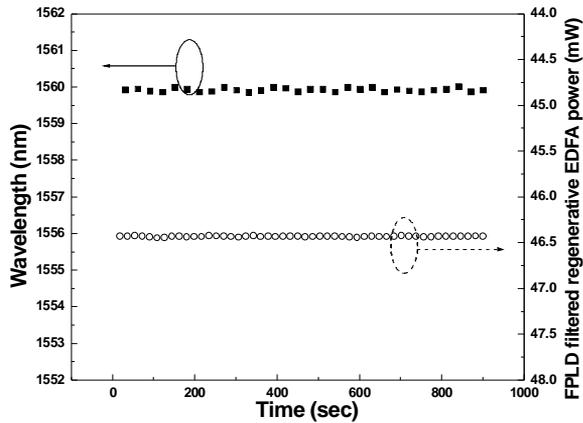


圖四

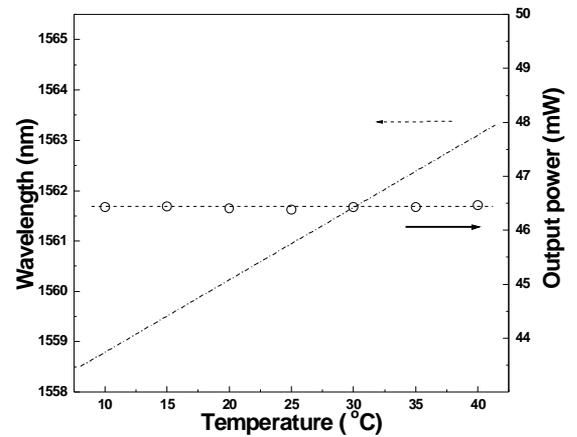


圖五

我們可發現這輸出光譜有稍微變寬，側模抑制比則大量降低由於側模的放大當 Fabry-Perot 雷射二極體操作於高電流（超過臨界電流）。再生式的摻鉍光纖放大器環狀腔的模態數也劇烈的增加，當 Fabry-Perot 雷射二極體的偏壓電流增加時。這清楚的說明峰值的波長在這些模態之間仍然被再生式的摻鉍光纖放大器和 Fabry-Perot 雷射二極體其交互關聯的增益圖所支配。然而，Fabry-Perot 雷射二極體的影響較為顯著，我們所提出的計畫有一個顯著的特色，那就是操作再生式的摻鉍光纖放大器在一個單一的 Fabry-Perot 雷射二極體模態中產生高的側模抑制比，藉由驅動回授注入的 Fabry-Perot 雷射二極體其電流接近於臨界電流處。我們了解當 Fabry-Perot 雷射二極體操作於接近激發雷射的狀態，Fabry-Perot 雷射二極體的寬帶光譜顯示有競爭在由自發性輻射引起的腔內模態間。在這階段，即使一個小小的內部腔內回授功率也能有效的導致單模在腔內中維持穩定，最後終於抑制其他的再生式的摻鉍光纖放大器的激發雷射的模態。這個模態的選擇是因為微調功率以及從再生式的摻鉍光纖放大器腔內回授的光的極化。當再生式的摻鉍光纖放大器和 Fabry-Perot 雷射二極體是注入互鎖狀態，理論性激發雷射模態的峰值波長的漂移變化在由 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式的摻鉍光纖放大器，在 Fabry-Perot 雷射二極體電流增加的情況下是可被忽略。Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式摻鉍光纖放大器的側模抑制比能夠維持在 40 dB。如圖五所示，當 Fabry-Perot 雷射二極體的操作電流從 9.5 mA 到 12 mA 時，側模抑制比可以再提高。而較窄的線寬只有在當 Fabry-Perot 雷射二極體操作在剛好低於臨界電流 20 % 以內才有可能發生，此時，其他的側模會因為 Fabry-Perot 雷射二極體操作電流超過臨界電流而增加。所以我們可以得知，當 Fabry-Perot 雷射二極體操作電流相當於臨界電流或是稍微高過臨界電流時，側模抑制比就會明顯的降低。



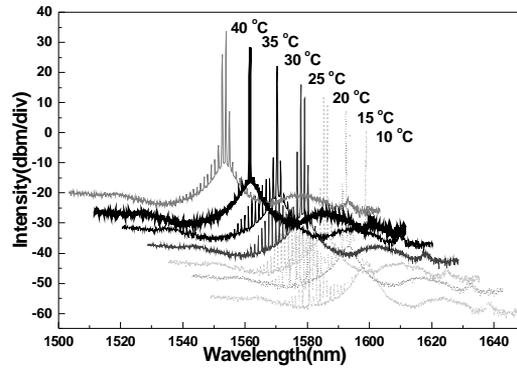
圖六



圖七

圖六表示著中心波長對於溫度的穩定度和 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式的摻鉍光纖放大器的輸出功率。在沒有機械或環境的擾亂之下，系統的中心波長是可以有很好的穩定度。從光耦合器 4 (35%) 量測的 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式摻鉍光纖放大器輸出功率的變動在 2.5 小時內約 30 nW (低於 0.2%)。這個結果很清楚地解釋我們所提議利用 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式摻鉍光纖放大器的系統能夠擁有 Fabry-Perot 雷射二極體單一且線寬很窄的縱模。另一方面，雖然在 10 分鐘可以維持定值最大側模抑制比 50 dB，但是我們可以在 1 小時或是更長的時間得到稍微低一點的側模抑制比約 49 dB。實驗結果也展現出即使 Fabry-Perot 雷射二極體的操作電流增加(或是降低操作溫度)時，不但會導致 Fabry-Perot 雷射二極體其他側模的生成，也會使我們發出的雷射光譜有紅位移現象。最後，和溫度有關 Fabry-Perot 雷射二極體的輸出波長以及利用 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式摻鉍光纖放大器的輸出功率穩定性則在圖七表示。藉由簡單的改變 Fabry-Perot 雷射二極體溫度從 10 度到 40 度並將 Fabry-Perot 雷射二極體的電流操作在剛好低於臨界電流(從 16 到 20 mA)，我們可以得到線性的波長調變。在這個情況下，藉由 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式摻鉍光纖放大器的輸出波長從 1558.5 nm 增加到 1564.7 nm。這也可以說是波長靈敏度每度 C 有 0.14 nm 的變化。雖然在不同 Fabry-Perot 雷射二極體溫度下，摻鉍光纖放大器輸出的側模抑制比很難達到一個定值，但當 Fabry-Perot 雷射二極體操作在 40 度 C 時，側模抑制比仍然可以維持在 24 dB。圖八所表示的是溫度從 10 度到 40 度每 5 度利用 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式摻鉍光纖放大器所量到的光譜。當 Fabry-Perot 雷射二極體的溫度增加時，我們可以發現 Fabry-Perot 雷射二極體的縱模有紅位移的現象。當 Fabry-Perot 雷射二極體的電流固定而將溫度從 10 度增加到 40 度時，Fabry-Perot 雷射二極體從激發輻射變為發出雷射光，而這會導致 Fabry-Perot 雷射二極體和摻鉍光纖放大器相互注入的關係被中斷。

在不同溫度下，我們可以得知雷射光譜下降部分是由 Fabry-Perot 雷射二極體和摻鉕光纖放大器所貢獻。因此，我們也可以得到利用固定溫度且低於臨界電流之下，再調整 Fabry-Perot 雷射二極體的調變電流可以使 Fabry-Perot 雷射二極體過濾再生式摻鉕光纖放大器的系統發出任何波長的雷射光。而 Fabry-Perot 雷射二極體也展示了在接近 20 %腔內損耗下可以降低線寬和再生式摻鉕光纖放大器側模的抑制。



圖八

#### 四、經費使用情形

- (1)設備費：取樣示波器部分已完成採購，頻譜分析儀部分因受敝校採購配合款不足之限制，目前尚在招標議價中，將等待第二期計畫設備款到位後完成採購程序。
- (2)其他費：使用正常。
- (3)貴儀使用費：使用正常。
- (4)研究生獎助：正常申請，按月核撥。

#### 五、期中計劃成果自評

- 1.學術：已在國際光電學術會議中被接受即將發表 3 篇論文。另有 3 篇期刊論文投稿審查中。
- 2.應用：預期本計畫成果將有直接應用於雷射陣列雷達系統以及高速光電取樣系統方面之可能性。
- 3.工業：國內外專利兩篇申請中。
- 4.訓練：協助研究之學生獲得微波工程、光電技術、與訊號處理等方面的入門理論與實務經驗。
- 5.其他：相關教學與研究實驗室設備的建立。

#### 六、已發表或審查中之期刊論文

1. Gong-Ru Lin "Narrow-Linewidth Wavelength-Tunable Fiber Laser Controlled by Intracavity Feedback-Injected Fabry-Perot Laser Diode", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 35, No. 1, pp. 73-75, October 2002. 國科會補助編號 NSC 91-2215-E-009-039.
2. Gong-Ru Lin and Yinchieh Lai, "A Novel Phase-Noise-Suppressed and Delay-Time-Tunable Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Ring Laser System", Optics Communications, Vol. 212, No. 1-3, pp. 169-175, October 2002.
3. Gong-Ru Lin, "Mutual Injection Locking of Erbium-Doped Fiber Laser and Fiber-Pigtailed Fabry-Perot Laser Diode", to appear in Optics Letters, June 2003.
4. Gong-Ru Lin and Shih-Kai Lee, "A Feedback-Injected Fabry-Perot Laser Diode Filtering Technique for Side-Mode Suppression and Linewidth Reduction of Erbium-Doped Fiber Laser", revised to Optics Communications, May 2003.
5. Gong-Ru Lin and Pai-Shen Hsueh, "Mutual Injection Locking of Fiber-Pigtailed Close-Loop Semiconductor Optical Amplifier and Fabry-Perot Laser Diode", revised to Optics Communications, March 2003.
6. Gong-Ru Lin and R.L. Wu, "Single-Mode Operation of Fabry-Perot Laser Diode with High Side-Mode-Suppressing Ratio from a Regenerative Erbium-Doped Fiber Amplifier", revised to Applied Optics, April 2003.