

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 利用次兆位元率鎖模光纖雷射脈衝載波探討全光網路信號 處理元件與技術(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2215-E-009-040-

執行期間：94 年 08 月 01 日至 95 年 07 月 31 日

執行單位：國立交通大學光電工程學系(所)

計畫主持人：林恭如

計畫參與人員：張詠誠、廖育聖、林螢聰、張峻源、游昆潔

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：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 6 月 1 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計劃期中報告

## 利用次兆位元率鎖模光纖雷射脈衝波探討全光網路信號處理元件與技術(1/3)

計劃編號：NSC 94-2215-E-009-040-

執行期限：94 年 8 月 1 日至 95 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

廖育聖 交通大學光電工程研究所

林螢聰 交通大學光電工程研究所

張峻源 交通大學光電工程研究所

游昆潔 交通大學光電工程研究所

### 一、中文摘要

本計劃期中報告將針對四項主題，包含建立使用 1. Fabry-Perot 半導體雷射來完成非歸零轉成偽歸零格式轉換的機制、2. 10GHz 的暗脈衝光梳時鐘訊號反向注入半導體光放大器於實現 OC-192 下全光式非歸零碼轉歸零碼的格式轉換、3. 使用暗脈衝光梳時鐘訊號反向注入半導體光放大器來完成超短脈衝光纖雷射系統(SOFLs)、4. 長於磊晶  $In_xGa_{1-x}P$  緩衝層上且以 GaAs 為基板的 InGaAs p-i-n 光偵測器的光學與通訊的特性研究。

在使用 Fabry-Perot 半導體雷射來完成非歸零轉成偽歸零格式轉換的系統中，藉由使用兩道非歸零格式、資料率在 OC-192 的光學資料流來注入鎖定一個操作在低於閾值且被同步調變的 Fabry-Perot 半導體雷射，我們可以實現在 OC-192 資料率下的全光信號格式轉換邏輯閘。其中非歸零轉成偽歸零格式轉換的機制是由於從外部注入的非歸零資料造成半導體雷射進入注入鎖定狀態，進而使雷射做增益開關的操作。偽歸零格式在注入光功率為 -2dBm 與微波驅動功率為 24.4dBm 操作情況下，其最大消光比為 12.2 分貝。我們觀察到此半導體雷射在注入鎖定情況下具有 40 分貝側模抑制比以及輸出的偽歸零訊號具有 0.4 皮秒的時基紊亂度。在非歸零轉成偽歸零格式後量測其誤碼率，功率償罰在  $10^{-9}$  下為 1.2 分貝。透過此信號格式轉換機制，我們可以進一步實現全光學式邏輯或閘。

在使用 10GHz 的暗脈衝光梳時鐘訊號反向注入半導體光放大器的系統中，實現 OC-192 下全光式非歸零碼轉歸零碼的格式轉換。而外部注入的非歸零碼資料訊號，其消光比為 7.13dB，在不需要放大的情況之下，經過我們的格式轉換器後，轉換後歸零碼資料訊號的消光比提升到 13.6dB。在位元率 10Gbit/s 的操作下，轉換後歸零碼訊號的接收功率在 -18.3dBm 時，我們可以獲得  $10^{-12}$  的誤碼率，在此情況下的功率補償為 -3.7dB。

在半導體光放大器光纖雷射系統(SOFLs)中，當調變光訊號注入 SOA 經過 XGM 後(將於後面介紹)放出的光訊號經過光隔離器後使之反向注入 SOA，而反向式光注入 POWER 必須夠高使得 SOA 飽和，並且消耗在 SOA 裡激發態的電子。為了要得到更短的鎖模脈衝半高寬，Tunable Laser 放出的波長必須稍稍大於 SOA 的中心波長，以至於可以得到更短的增益恢復時間與更深的調變深度，反向注入後，光訊號經過一 14 公尺長的光纖環腔，由於光在光纖環腔內傳遞因為傳遞的距離不同，不同頻率之間會有整數倍的頻率差距  $n\Delta f$  ( $\Delta f = C/2NL$ , n 介質係數, L 腔長)產生，藉由不同的頻率疊加形成鎖模訊號，鎖模於此系統，造成訊號被壓縮，使單位時間  $\Delta t$  內可以載入更多的訊號，此舉將有助於寬頻的通訊，而此專題研究探討的是當不同的波長輸入時對鎖模脈衝訊號半高寬的影響，半高寬愈小則可以在單位時間內載入更多的訊號，將有助於未來傳輸容量與傳輸速度的提昇，在應用端，例如用於 E-O sampling(電光取樣)或 OTDM(分時多工)的系統。

在長於磊晶  $In_xGa_{1-x}P$  緩衝層上且以 GaAs 為基板的 InGaAs p-i-n 光偵測器的光學與通訊的特性研究中，主要展現此光偵測器在 SONET OC-192 晶片中的接收過程。以低價的 TO-46 包裝，由於此元件超低的暗電流  $3.6 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> 和雜訊等效功率  $3.4 \times 10^{-15}$  W/Hz<sup>1/2</sup>，故在 10 Gbit/s 的資料速率下可到達靈敏度-19.5 dBm 並只有  $10^{-9}$  的位元錯誤率。在 1.2ps 的脈衝光照明測試下，測量到的脈衝反應為 41ps 而其向量網路分析頻寬到達 8GHz。在 10Gbit/s 下沒有轉阻放大器(Trans-Impedance Amplifier)時做眼圖分析，藉由記錄眼圖中心以下的信號雜訊比可得統計分佈 Q 值為 8.59，在接收功率-6dBm 時可對應位元錯誤率  $4.4 \times 10^{-18}$ 。

關鍵詞： Fabry-Perot 雷射二極體、半導體光放大器、暗脈衝光梳時鐘訊號反向注入、鎖模、光纖雷射光偵測器。

## Abstract

The mid-term report states the progress on four developing fields. By using an optical nonreturn-to-zero (NRZ) formatted data-stream to injection-lock an synchronously modulated Fabry-Perot laser diode at below threshold condition (without DC driving current), an output data-stream with pseudo-return-to-zero (PRZ) format can be generated at bit rate of up to 2.488 Gbit/s. Such an NRZ-to-PRZ format transformation is due to the injection locking induced gain-switching of the FPLD with the incoming NRZ data. The PRZ data-stream with a maximum on/off extinction ratio of 12.2 dB is obtained under the optical injecting and RF driving powers of -2 dBm and 24.4 dBm, respectively. The best side mode suppression ratio and lowest timing jitter of 40 dB and 0.4 ps, respectively, for the PRZ data-stream are observed, which leads to a power penalty of 1.2 dB measured at a bit-error rate of  $10^{-9}$ . In applications, the demonstration of an all-optical logical OR gate using the FPLD-based NRZ-to-PRZ transformer is also reported.

By using a semiconductor optical amplifier (SOA) backward injected with a dark-optical-comb pulse-train at 10 GHz, we demonstrate for the first time a beyond 10Gbit/s all-optical conversion of an incoming optical pseudorandom binary sequence (PRBS) data-stream from nonreturn-to-zero (NRZ) to return-to-zero (RZ) format. Both of the data polarity and its wavelength are conservative during the conversion process. Without any pre-amplification on the degraded optical NDZ PRBS data, its extinction ratio is greatly improved from 7.13 dB to 13.32 dB after converting into a RZ PRBS data. Ultra-low bit-error-rate of 10-13 at data rate up to 10 Gbit/s is obtained with a received optical power of -18.5 dBm. To date, the converted RZ PRBS data exhibits a positive power penalty of >3.7 dB at a BER of 10-13 in comparison with the NRZ PRBS data.

In this research, we use SOAFL system. After the modulating optical signal inject into SOA doing XGM, the output optical signal backward inject into SOA again by optical isolator. And the backward optical injection has to be high enough to saturate a SOA and then depletes most of the excited state electrons in the SOA. In order to obtain shorter mode-locking pulsedwidth, the Tunable Laser injecting wavelength should be slightly longer than the peak wavelength of SOA gain to benefit from shorter gain-recovery time and larger modulation Depth. After backward injection, the optical signals pass through 14 meters long

optical cavity. Because the transmission distance for optical signals are different, there will be some integral numbers of frequency differençen  $\Delta f$  ( $\Delta f=C/2nL$ , n medium coefficient, L cavity length). By piling up different frequencies to form the mode-locking signal, the optical signal will be suppressed, leading to carry more signals per unit time. This achievement will enhance the broadband communication. And in this research we talk about the effect of different wavelengths injection to the pulselwidth of mode-locking signal. As the pulselwidth is shorter, it can carry more signal per unit time. As the result, it will improve the capacity and speed of transmission in the future. In the application, we can use it in E-O sampling or OTDM system.

The premier demonstration on the SONET OC-192 receiving performance of InGaAs p-i-n photodiode grown on linearly graded metamorphic  $In_xGa_{1-x}P$  buffered GaAs substrate is reported. With a low-cost TO-46 package, such a device exhibits sensitivities of -19.5 dBm with bit-error-rate of  $10^{-9}$  at data rate of 10 Gbit/s owing to its ultra-low dark current of  $3.6 \times 10^{-7} A/cm^2$  and noise equivalent power of  $3.4 \times 10^{-15} W/Hz^{1/2}$ . Under the illumination of 1.2-ps pulse-train, the measured impulse response is 41 ps and the vector-network analyzed frequency bandwidth is up to 8 GHz. Eye diagram analysis at 10 Gbit/s without trans-impedance amplification reveals a statistically distributed Q-factor of 8.59 by recording the signal-to-noise ratio at decision level down the center of eye pattern, corresponding to a bit error rate of  $4.4 \times 10^{-18}$  at receiving power of -6 dBm.

**Keywords:** Fabry-Perot laser diode, SOA, optical dark comb injection, mode lock, fiber laser, photodetector

## 二、緣由與目的

以半導體雷射為基礎的全光信號處理技術在可預期的未來將在全光網路上扮演一重要的角色。各式各樣的技術，像時脈頻率多工、波長轉換、以及非歸零轉偽歸零格式轉換，都已經在實驗上展示過。最近，Jeong 等人利用 Fabry-Perot 雷射的橫向電磁模態吸收特性以及自相位調變技術來實現非歸零轉偽歸零資料格式轉換。在本文中，我們提出一種新的方法來實現非歸零轉偽歸零資料格式轉換，係利用一個操作在低於閾值且被同步調變的 Fabry-Perot 半導體雷射來做為訊號格式轉換元件。與 Jeong 等人所提出的方法來比較，Jeong 等人將 Fabry-Perot 半導體雷射操作在大於閾值的情況下，而本實驗卻是將 Fabry-Perot 半導體雷射操作在低於閾值的情況下。我們實現的方法是將直流驅動電流大小與調變訊號強度做適當的搭配使它低於閾值的狀態，此時雷射將處於即將進入卻未進入增益開關操作模式的邊界。當外部注入一道光到此 Fabry-Perot 半導體雷射，此雷射的閾值電流將會降低並將使雷射進入增益開關狀態。這樣的特殊操作模式使得這個 Fabry-Perot 半導體雷射當接收到高位準(位元 1)的數位信號時，會進入增益開關操作並產生對應的偽歸零信號輸出。相反的，當 Fabry-Perot 半導體雷射接收到低位準(位元 0)的數位信號時，將終止增益開關操作，也不產生偽歸零信號輸出。因此，我們可以將原來為非歸零格式的輸入信號轉換成為偽歸零信號格式輸出，值得一提的是此方法避免了傳統上在實現非歸零轉偽歸零格式轉換時，先將光信號轉電信號、再由電信號轉光信號的複雜過程。另外，以外部光注入鎖定此 Fabry-Perot 半導體雷射不只有格式轉換的好處，同時也有助於抑制雷射中側模的增益與自發輻射，使雷射具有高側模抑制比與低雜訊。在應用上，此元件可以做為具有格式轉換功能的全光邏輯或閘。半導體雷射的許多特性，包含調變頻寬的延伸、雜訊的降低都可以藉由注入鎖定來加以實現。1998 年，

Sivaprakasam 等人觀察到半導體雷射在被注入鎖定時具有增益改變與閾值電流降低的現象。本專題首次應用此現象於 Fabry-Perot 半導體雷射上來進行非歸零轉成偽歸零之格式轉換，我們採用的方法是將此雷射操作在低於閾值且被同步調變的條件下，以外部注入的非歸零格式信號來切換注入鎖定的狀態，進而產生偽歸零格式信號的輸出。在應用上，此雷射可以做為一兼具格式轉換功能的全光邏輯或閘，這對於未來全光學、無光電轉換之邏輯信號處理將有機會扮演一重要的角色。對於分時多工與分波長多工網路的介面連結，全光格式的非歸零碼(non-invert return-to-zero, NRZ)與歸零碼(return-to-zero, RZ)之間的轉換是必須的，而各式各樣實現格式轉換的技術，像使用 nonlinear optical loop mirrors、ultrafast polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs)、半導體光放大器(Semiconductor Optical Amplifiers, SOAs)、electroabsorption-modulation (EAM) based self-starting optoelectronic oscillator (OEO)及 dual-wavelength injection-locked Fabry-Perot laser diode at un-lasing condition，都已經在實驗上展示過。最近，SOA 常常配合四波混合技術或直接調變偏壓電流的方式來達成非歸零碼與歸零碼的格式轉換；然而，直接調變偏壓電流方式的缺點就是受限於 SOA 的直接調變頻寬小於 10GHz，所以無法做更高速的應用；而另一方面，雖然四波混合技術是利用直接穿透的調變方式使其具有高位元率的操作能力，但是其必須忍受低轉換效率和本身易受極化敏感的問題。最近，從 Lin 等人所發表的論文中，提到利用暗脈衝光梳時鐘反向注入 SOA，縮短 SOA 中的增益窗口進而達到最佳化鎖模；而我們發現利用這種暗脈衝光梳時鐘注入到 SOA 的好處是(1)可以在時域上準確地控制增益、(2)因為是利用光調變增益的方式來實現，因此具有很高的調變頻寬、(3)可以改善輸出脈衝的上升時間。而本實驗的實現方法，就是利用這種暗脈衝光梳時鐘反向注入 SOA，控制其內部光增益為基礎，在資料極性不反向及固定傳輸資料的波長條件下，成功地實現 10Gbit/s 全光式的非歸零轉歸零之格式轉換。在本實驗所提出的格式轉換方法，與其他以 SOA 為基礎的格式轉換技術比較，我們優點是具有簡單的架構、較高的操作頻寬、改善消光比(extinction ratio)，低誤碼率(BER)及改善功率償付(power penalty)的問題。目前 SDH 和 WDM 系統中，非歸零碼 (NRZ) 是最廣泛使用的碼型，具有成本低與頻譜效率高的優點，但由於佔空週期較大，較容易發生重疊，產生造成碼間干擾，對傳輸損傷敏感，不適用於高速超長距離光信號的傳輸，反觀，歸零碼 (RZ) 的佔空比通常只有普通非歸零碼的 34%-67%，拉開了相鄰脈衝的間隔，提高了峰值功率，為接受端提供了更高的光信噪比。半導體光放大器是常常被用在全光格式轉換的一個主要元件，其方法通常為四波混合技術或直接調變偏壓電流的方式來達成非歸零碼與歸零碼的格式轉換，但是直接調變偏壓電流方式的缺點就是受限於 SOA 的直接調變頻寬不足到 10GHz，所以無法做高速的應用；另一方面，雖然四波混合技術是雖具有高位元率的操作能力，但是其必須忍受低轉換效率和本身易受極化敏感的問題。本實驗使用暗脈衝光梳時鐘訊號注入半導體光放大器，達成全光信號的非歸零碼轉歸零碼之格式轉換，除此之外，應用上，通訊系統中重要的 3R，此架構具有其中重新整形(re-shaping)及重新放大(re-amplifying)能力，對於延伸傳輸距離有極大的益處，這對於未來全光學、無光電轉換之信號處理將有機會扮演一重要的角色。

在半導體光放大器光纖雷射系統(SOAFLs)中，SOA 有光轉換、光放大等許多方面的應用，而且具有很短的轉換時間很高的光增益與很廣的頻寬，因為有很寬的可調波長範圍，高的穩定性，所以很多研究已很廣泛的在光纖環腔雷射系統裡使用 SOA，SOAFL 系統有很多新的鎖模技術出現，最近反向式光注入成為一項新的鎖模技術，反向式光注入造成 SOAFL 系統周期性的增益損耗已經被實驗與理論所證實，現今已經可以用此 SOAFL 系統注入 20 GHz RF 的訊號產生 4.3 ps 半高寬的脈衝鎖模訊號，但是並沒有探討輸入不同波長對鎖模脈衝訊號半高寬的影響，而這就是本專題的研究主題。

由於光通訊技術有著省能源、小型化、無污染、少干擾等優點，故近年來對於在這方面有相當多的發展，而光偵測器則是光通訊技術中重要的一環。本專題研究主題為 InGaAs，長在 GaAs 基板，以線性成長之  $In_xGa_{1-x}P$ ( $x$  從 0.49 到 1)作為緩衝層之光偵測器的量測。以 InP 為基板的高速光電元件與積體電路在長波長光纖通訊網路中最常使用的光接收器為磷化鎵(InGaP)的 PINPD，通常長在晶格匹配的 InP 基板上，並且有超低暗電流、高光電轉換功率、運作頻寬很適合等優點。但是 InP 基板有些許缺點，像是易碎、製程技術不成熟、晶圓尺寸較小造成成本較高等，故將  $In_0.53Ga_0.47As$ ，長在 GaAs 基板上。以目前的光通訊技術發展目標而言，最重要的大概就是使資料傳輸速率“越快越好”、“越準確越好”，故若在這些方面的特性皆不遜於製作於 InP 基板上的話，配合前面講的優點，對於光通訊產業來說，想必是一大幫助，因此這個專題的主要目標就是用各種方式來測量此光偵測器的反應速度以及其判斷雜訊引起的錯誤率大小，證明其實用性是相當大的。

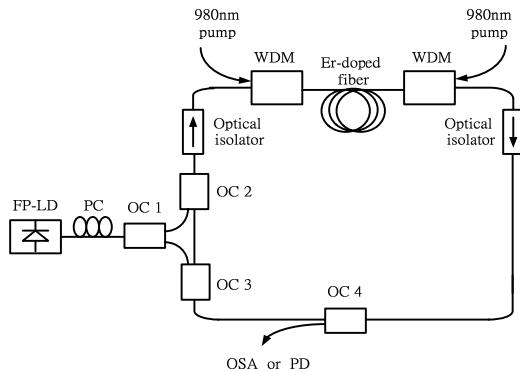
具有窄光譜線寬和低雜訊效果於固定波長的雷射上的高穩定度連續波雷射，是未來在傳統光纖傳輸上具有潛力的光傳輸或測試光源。隨著摻鋨光纖放大器(EDFAs)的快速演進，具有相當寬的增益譜、窄線寬和波長可調這樣一個高功率光源已經變成一個令人感興趣的研究主題。之前，各種的最先進的光濾波器像是直寫式或是外部的光纖布拉格光柵(FBGs)、可調式光纖 Fabry-Perot etalons(FFPEs)，和其他具有特別窄線寬的衍射光柵已經成功被研發出來以符合各式各樣的需求。然而，這些架構不是構造複雜，就是不符合成本效益。最近，利用雷射二極體光源做新型外部迴授式或以自注入為基礎的濾波技術已經被成功展示。至今，由於摻鋨光纖雷射(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鋨光纖雷射光源。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鋨光纖放大器以及迴授注入技術。這個窄線寬的實現，是藉由控制來自摻鋨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，以及摻鉗光纖放大器迴授功率對於以摻鉗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。

再生式摻鉗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鉗光纖放大器模組（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) 連結到再生式的摻鉗光纖放大器，還有以光耦合器 3 (90/10) 連結再生式的摻鉗光纖放大器輸出迴授到 Fabry-Perot 雷射二極體。再生式的摻鉗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 雷射二極體和摻鉗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鉗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鉗光纖放大器到 Fabry-Perot 雷射二極體的迴授注入功率，再生式的摻鉗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。再生式的摻鉗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鉗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鉗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

#### 3-1、Fabry-Perot 半導體雷射完成非歸零轉成偽歸零格式轉換：

圖(一)是典型的增益開關法與由外注入導致之增益開關法之比較。在典型的增益開關法中[見圖(一)(a)]，驅動半導體雷射的直流驅動電流是設定在閾值，然後施加一大信

號弦波來使半導體雷射產生增益開關操作。相較下，外部注入導致之增益開關操作需要將直流驅動電流降至 0mA 並且施加一較大的弦波信號來使半導體雷射操作在略低於閾值情況下[見圖(一)(b)]。在這種操作條件下，半導體雷射原本是不會產生雷射輸出。

以下我們介紹此種以 Fabry-Perot 半導體雷射為基礎之非歸零轉偽歸零信號格式轉換元件的操作原理。首先，一個 Fabry-Perot 半導體雷射的閾值電流可以被表示成

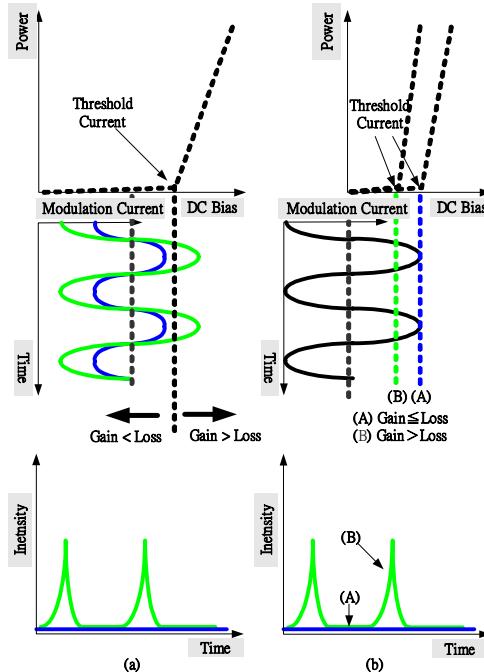
$$I_{th} = \frac{eN_{th}V}{\tau_s} = \frac{eV \left[ \frac{G(N_{th})}{G_N} + N_0 \right]}{\tau_s} \quad (1)$$

$$G_N = \frac{\partial g}{\partial N} v_g \tau_{ph}$$

在此  $e$  是 electronic charge,  $V$  是 volume of the active region,  $\tau_s$  是 carrier lifetime in active region of the laser diode,  $G(N_{th})$  是 normalized gain of the laser diode at threshold condition,  $\partial g/\partial N$  是 differential gain coefficient,  $v_g$  是 group velocity of light,  $\tau_{ph}$  是 photon lifetime, 以及  $N_0$  是 carrier number in active region of the laser diode at transparent condition。特別的是，閾值電流本身是外注入功率(或光子密度)的非線性函數，可以表示成[6,7]

$$I_{th}' = I_{th} - \frac{eV\tau_{ph}}{G_N\tau_s} \left[ \frac{R_{sp}}{S_{Lm}} + \sqrt{4\alpha^2 k_c^2 S_i / (1 + \alpha^2) S_{Lm}} \right] \quad (2)$$

在此  $R_{sp}$  是 spontaneous emission rate,  $S_{Lm}$  是 maximum photon number in the locked mode,  $\alpha$  是 linewidth broadening factor,  $k_c$  是 coupling coefficient, 以及  $S_i$  是 photon number injected into the laser cavity.



圖(一)(a) 傳統增益開關法;(b) 異常增益開關法: (A)無外部光注入; (B)有外部光注入。

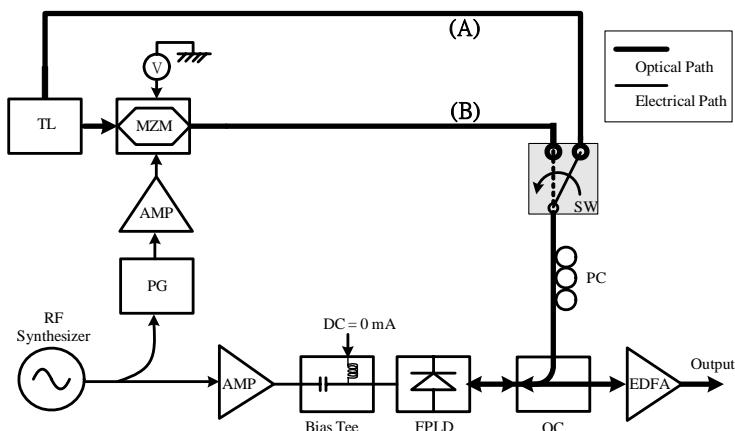
因此，當 Fabry-Perot 半導體雷射受到外部單模連續光注入鎖定時，雷射的有效閾值電流將降低[見圖(一)(b)線段(B)]。這有效閾值電流降低的現象在 1998 年也被印度研究群 Sivaprakasam 等人所觀察到[8]。在外部注入的情況下，Fabry-Perot 半導體雷射將從不產生雷射輸出的情況轉換到增益開關模式下。藉由利用此種 Fabry-Perot 半導體雷射的異常操作狀態，我們可以實現全光信號處理。其結果，當輸入的光數位信號準位為 1 時，將導致雷射呈增益開關操作，反之，準位為 0 時，將不會導致增益開關操作。因此，我

們可以實現非歸零轉偽歸零格式轉換操作。

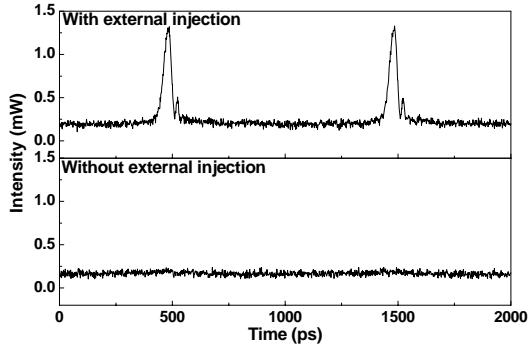
在以連續光注入半導體雷射，研究在注入鎖定下造成的閾值電流下降，進而產生雷射的增益開關操作方面。當波長可調雷射的波長與 Fabry-Perot 半導體雷射中的某一縱模的波長相吻合時，此時注入鎖定下產生的增益開關脈衝(偽歸零格式)會具有最大的峰值功率及最短的脈衝寬度。值得注意的是，當我們將波長可調雷射的波長調離 Fabry-Perot 半導體雷射中的縱模波長時，增益開關脈衝將會明顯劣化並且在調整達 0.4 奈米時導致增益開關脈衝消失[見圖(三)]。當波長可調雷射的波長與 Fabry-Perot 半導體雷射中的某一縱模的波長相吻合時，此時雷射具有最大達 34 分貝的側模抑制比。

因此，我們首先觀察當改變波長可調雷射的注入與否以及改變波長可調雷射的注入波長對半導體雷射產生的偽歸零格式增益開關脈衝消光比的影響。當波長可調雷射的注入波長在完全吻合與偏離 0.6 奈米(縱模間距的一半)間切換時，我們得到 10.5 分貝的消光比。另一方面，我們將波長可調雷射在不注入與注入強度-2dBm 下切換，得到 12.2 分貝的消光比[見圖(三)]。值得注意的是在不產生偽歸零格式增益開關脈衝的情況下，我們發現有較高的放大自發輻射存在於輸出中，而外部的光注入將造成雷射中側模與放大自發輻射的抑制，並造成半導體雷射在增益競爭過程中，被注入的縱模其閾值電流有效的降低。

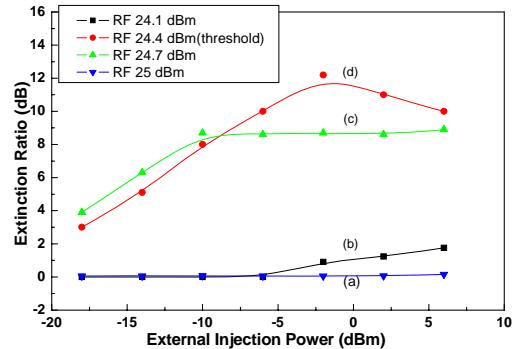
此外，微波調變的功率變化與外部注入光功率變化將強烈的影響到半導體雷射輸出脈衝的消光比[見圖(四)]。我們發現當微波調變的功率增加到超過臨界值的 0.2% 時，雷射輸出脈衝的開關現象將不復存在，這是因為此時半導體雷射已經進入自增益開關操作區[見圖(四)曲線(a)]。也就是說，在此時不管有沒有外部注入光，半導體雷射都會產生輸出脈衝。而半導體雷射對於微波調變功率的容忍度相當的有限，當微波調變功率超過最佳操作值 1 分貝時，將會造成雷射輸出脈衝嚴重的劣化。實驗上最佳化的微波調變功率介於 24.4 到 24.7dBm 之間，約在臨界值 1.5% 的範圍內。



圖(二) 利用注入鎖定半導體雷射實現之信號格式轉換元件研究架構圖



圖(三) 在外部光注入與不注入強況下的脈衝強度變化



圖(四) 在不同微波調變功率下，輸出脈衝消光比對外部注入光強度的關係圖

因此，要得到最大的消光比，適當的注入光功率是需要的。在過大的注入光功率注入下，將造成消光比下降，這是由於過多的外部注入光貢獻到輸出的直流成分上。此外，我們也量測在不同注入功率下，半導體雷射輸出脈衝的峰值強度與側模抑制比的變化關係[見圖(五)]。在 6dBm 注入功率下我們得到 40 分貝的最佳側模抑制比，此時的峰值功率為 140mW。

### 3-2、注入半導體光放大器於實現全光式非歸零碼轉歸零碼的格式轉換

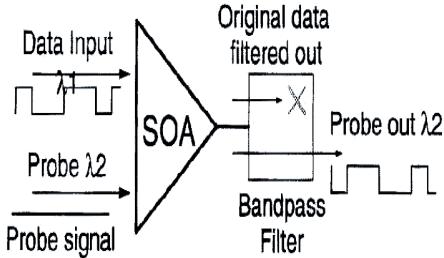
本實驗是利用 SOA 的交叉增益調變原理配合注入暗光梳形脈衝時鐘訊號來實現，其示意圖如圖五、六所示。在圖五中， $\lambda_1$  為被調變的光訊號， $\lambda_2$  則為不調變的連續光訊號，當兩道光同時注入到 SOA 時，會在 SOA 當中產生交叉增益調變的作用，再經過光帶通濾波器濾掉  $\lambda_1$  的調變光訊號，則輸出的  $\lambda_2$  會被調變成與  $\lambda_1$  極性相反的光訊號。而圖六(a)則是說明其中一道光我們利用所產生暗脈衝光梳時鐘訊號注入到 SOA，因為暗脈衝光梳具有較大的佔空週期是在“1”位準，所以在這段“1”位準的時間週期內會消耗 SOA 中的大部分增益，只留下一個極窄的增益窗口，此時，注入的另一個光訊號為被調變的非歸零虛擬隨機二位元序列 (NRZ PRBS) 訊號，而這個 NRZ PRBS 訊號的“1”位準在 SOA 當中，只能在極窄的增益窗口可以獲得增益，所以輸出會變成脈衝的形式，因此這個脈衝式的光訊號就是我們所稱的 RZ 訊號。相反地，圖六(b)則是說明具有較大時間週期在零位準的亮脈衝光梳時鐘訊號注入到 SOA 後，會留下一個極寬的增益窗口，使得輸出不會是一個脈衝訊號，因此無法達到本實驗之目的。

本實驗是以強光注入 SOA 使其增益達到飽和的方式來實現，然而 SOA 在增益飽和的情況下，峰值波長會產生位移的現象，因此這個現象我們可以用以下理論式來描述 [10]：

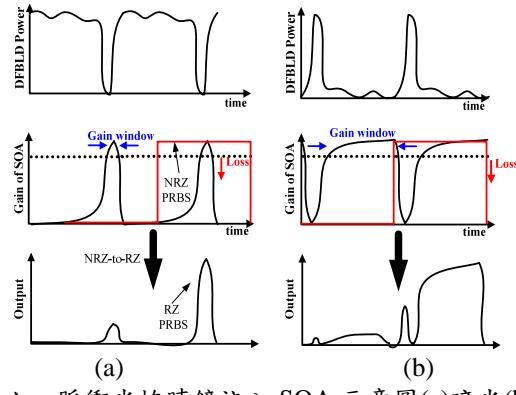
$$\lambda_N = \lambda_0 - \kappa_0 (N - N_0) \quad (1)$$

其中，； $\lambda_N$  是 peak wavelength at carrier density  $N$ ； $\lambda_0$  是 peak wavelength at transparency； $\kappa_0$  是 constant； $N$  是 carrier concentration； $N_0$  是 carrier concentration at transparency。從公式(1)中可以觀察出當 SOA 中的增益未被完全消耗前( $N_0 \ll N$ )，增益峰值的波長會往短波長位移，此時經過 SOA 的光訊號都得到其增益而被放大；而當強光注入到 SOA 時，則會使其增益飽和(loss condition :  $N < N_0$ )，則此時增益峰值的波長便會往長波長位移，其增益飽和示意圖如圖七所示。因此強光注入的暗脈衝光梳時鐘訊號的波長須在長波長的位置，而輸入的 NRZ PRBS 訊號，其波長須在短波長的位置，如此經 SOA 之後轉換的訊號才會具有較高的性能。

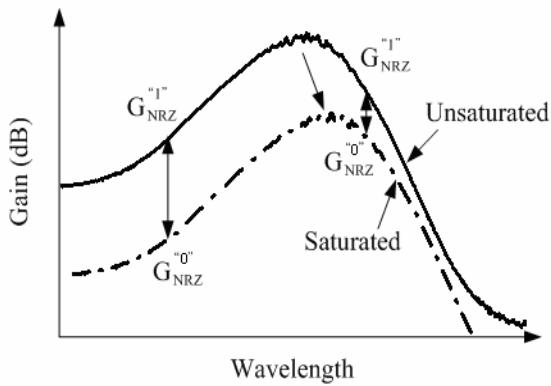
本實驗所想要呈現的理論機制圖如圖八所示，只要利用具有較大佔空週期的時鐘訊號調變 SOA 中的增益，則注入此 SOA 的資料訊號，都可以被轉成脈衝訊號輸出。



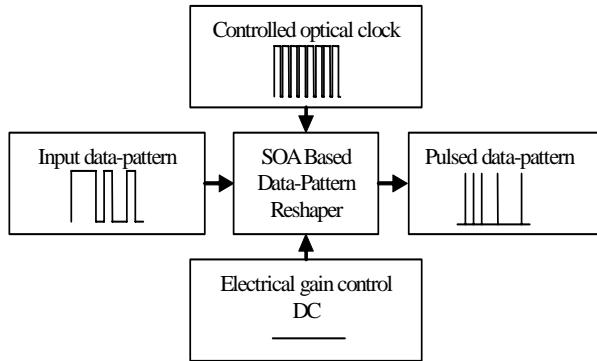
圖五、SOA 交叉增益調變示意圖



圖六、脈衝光梳時鐘注入 SOA 示意圖(a)暗光(b)亮光

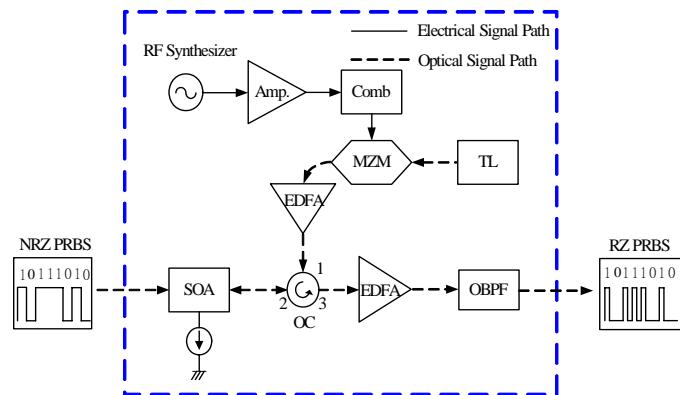


圖七、SOA 增益示意圖

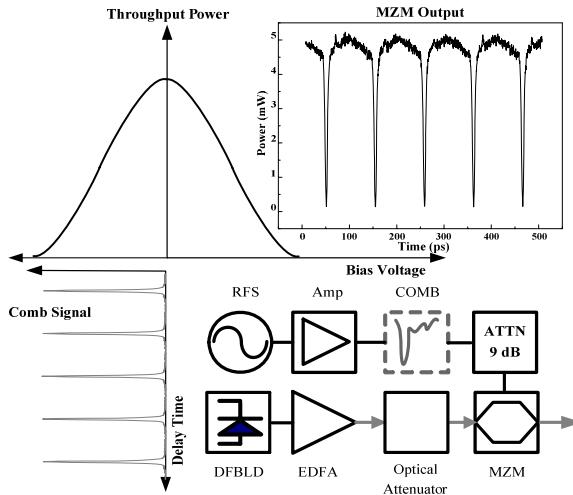


圖八、以 SOA 為基礎之格式轉換器示意圖

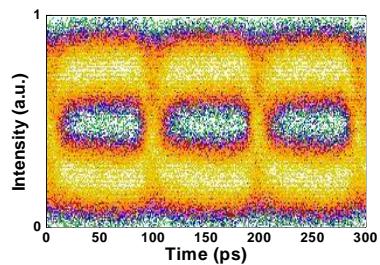
在本實驗系統中使用的儀器及元件，包含微波訊號產生器(RF Synthesizer)、數位訊號產生器(PG)、功率分配器(power splitters)、微波放大器(AMP)、半導體光放大器(SOA)、電梳信號產生器(electrical comb generator)、馬克-詹德強度調變器(Mach-Zehnder Modulator)、波長可調雷射(TL)、光循環器(OC)、摻鉗光纖放大器(EDFA)、光帶通濾波器(OBPF)。本實驗的操作系統如圖九所示，SOA 的偏壓電流是操作在 280mA，此時增益峰值波長是在 1530 奈米，具有 35 奈米的放大自發輻射線寬。輸入光訊號則是模擬一個近失真的 NRZ PRBS(見圖十一眼圖)，其波長是 1530 奈米，消光比為 7.13dB，字串長度為  $2^{31}-1$ ，操作功率嘗試從 -10dBm 到 -1dBm。而在暗脈衝光梳時鐘訊號的產生機制如圖 6 所示，利用微波放大器放大微波訊號產生器所產生的時鐘訊號，去觸發電梳訊號產生器，然後再利用這個電梳時鐘訊號去驅動馬赫-詹德強度調變器，使得通過的光訊號能被調制成暗脈衝光梳時鐘，本實驗所使用的暗脈衝光梳時鐘訊號如圖 8 所示，波長為 1550 奈米，佔空週期約為 78%，經摻鉗光纖放大器放大訊號後，經由光循環器反向注入到 SOA，此時經由光循環器的 2 端注入的功率為 17.9dBm，而這個強光注入的結果將有效地消耗 SOA 的增益，進而留下一個極窄的增益窗口其半高寬大約為 30 皮秒。



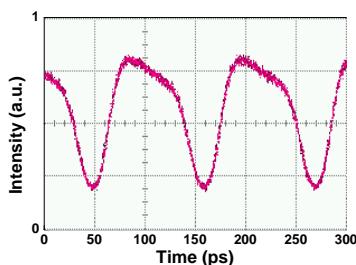
圖九、系統架構圖



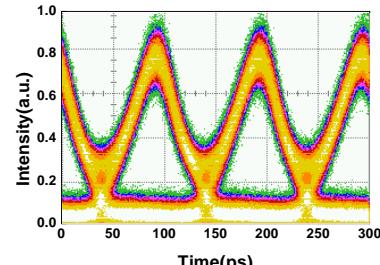
圖十、暗脈衝光梳時鐘產生機制



圖十一、NRZ PRBS 眼圖



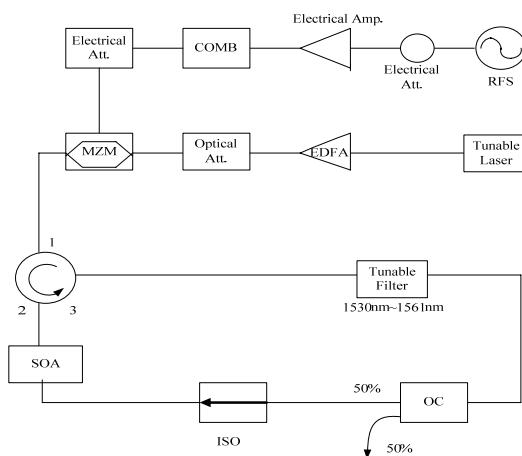
圖十二、暗脈衝光梳時鐘



圖十三、RZ PRBS 眼圖

### 3-3、超短脈衝半導體光放大器光纖雷射系統(SOAFLs)

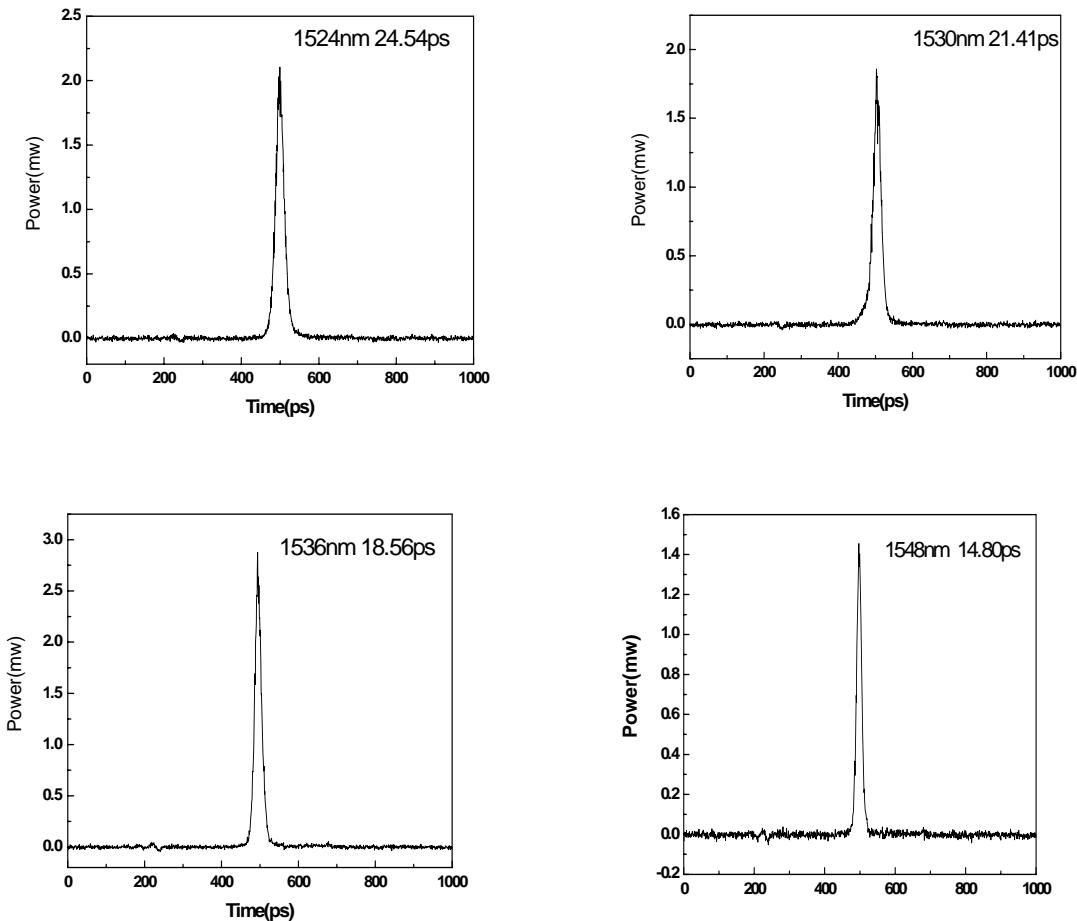
這次專題的主題是藉由實驗探討可調式雷射，放出不同波長的雷射光訊號對鎖模後脈衝訊號半高寬的影響，由於不同波長的光經過調變後進入 SOA 誘發輻射不同波長的光，研判會造成不同的調變深度，鎖模脈衝訊號的半高寬也會不同，此研究的目的就是探討不同波長注入與鎖模脈衝訊號半高寬的關係。入射到 SOA 的調變光訊號如波長較長時帶有比較小的能量，而激發態電子在比較小的 energy gap 較容易做躍遷，所以波長較長光訊號研判將會造成較多的電子做躍遷而造成較深的調變深度，理應造成較小的鎖模脈衝訊號半高寬，而此專題會以 1524nm、1530nm、1536nm、1542nm、1548nm 等五種不同的波長，來看對鎖模脈衝訊號半高寬的影響。



圖十四、系統架構圖

圖十四半導體光放大器光纖雷射系統(SOAFL)系統，顯示了 14 公尺內空腔腔長反向式光注入脈衝鎖模 SOAFL 系統，裡面包含一 SOA，此 SOA 的中心波長為 1530nm，

還有一光循環器,法拉第隔離器,一可調光波長率濾波器(OBPF),一有着分功比率為 50% 的偶合器。在此實驗中我們使用可調式雷射分別輸入波長為 1524nm 1530nm 1536nm 1542nm 1548nm 波長的光訊號進入半導體光放大器光纖雷射系統裡,而這些不同波長的注入光訊號有著相同的注入功率,由理論上分析,波長較長時帶有比較小的能量,而激發態電子在比較小的 energy gap 容易做躍遷,因此波長較長光訊號研判將會造成較多的電子做躍遷而造成較深的調變深度,理應造成較小的鎖模脈衝訊號半高寬,下面是經由實際操作 SOAFL 系統,將不同波長但是功率相同的光訊號注入 SOAFL 系統,在 SOA 裡進行 XGM 後,經由光隔離器反向,再經由濾波器過濾後,鎖模於 14 公尺光纖環腔的鎖模訊號。

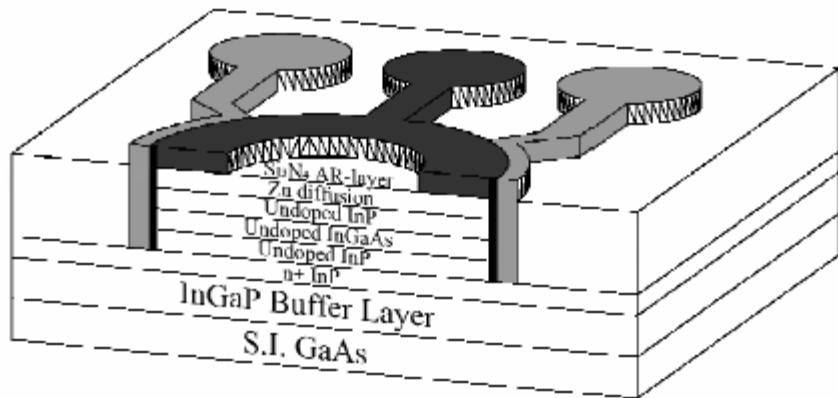


圖十五、不同波長的脈衝寬度

由上圖可知當我們固定注入光訊號的功率改變光訊號波長,可發現波長愈長脈衝鎖模訊號半高寬愈小,下面是脈衝鎖模訊號半高寬對注入光訊號波長的圖,我們可以發現此一趨勢。

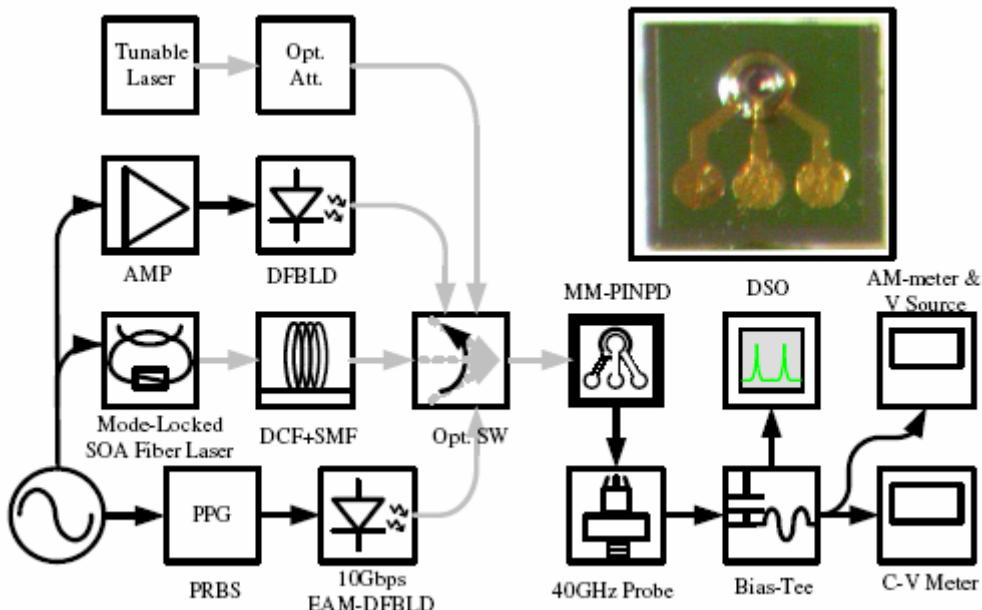
### 3-4、以 GaAs 為基板的 InGaAs p-i-n 光偵測器的光學與通訊的特性研究。

此實驗樣品為異質結構光接收器(MM-PINPD),其長晶過程如下。首先藉由氣體分子射束(GSMBE),在基板溫度 500°C 時將  $1.5 \mu\text{m}$  厚的線性異質緩衝層  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ( $x$  從 0.49 到 1)長在 3 吋、100 方向的半絕緣體 GaAs 基板上。隨後在 600°C 時將 InGaAs MM-PINPD 長出,其中包含  $1 \mu\text{m}$  厚的 n+-InP、 $0.5 \mu\text{m}$  厚的未摻雜 InP、 $2.5 \mu\text{m}$  厚的未摻雜  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ,最後是  $1 \mu\text{m}$  厚的 p-InP 層(Zn 擴散後),如圖十六:



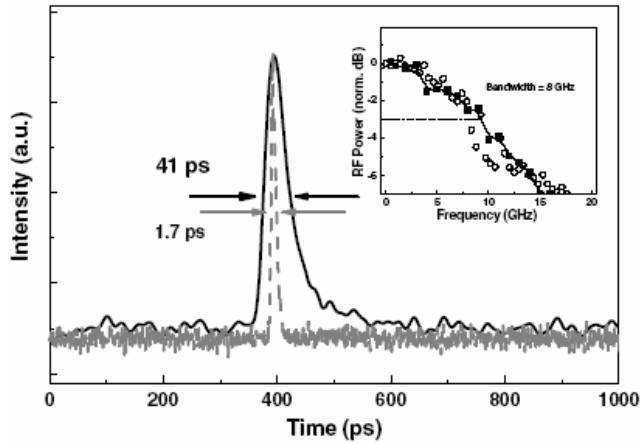
圖十六、InGaAs MM-PINPD 的構造圖，製作在異質 InGaP 緩衝層上，以半絕緣 GaAs 為基板。

長晶之後需製造同平面的 ground-signal-ground 三接觸電極與直徑  $60\mu\text{m}$  接收光訊號用的開口，其中兩個 n 型接地電極接腳與中央的 p 型訊號電極接腳分別由沉積 800nm 厚的 Ni/Au 與 Ti/Au 金屬來製造。此設計使利用 65GHz 同平面波導式毫米波探針 (Picoprobe 65A-GSG-70-P) 更容易的測量 InGaAs MM-PINPD，如下圖十七：



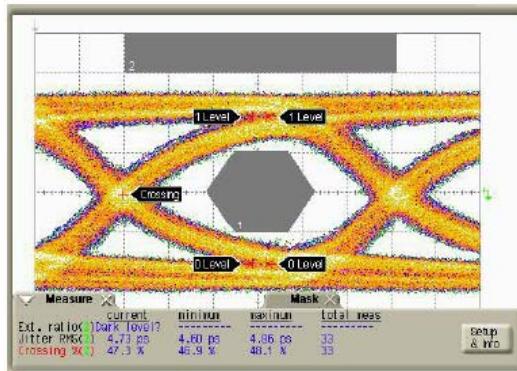
圖十七、毫米波探針裝置架構配合 InGaAs PINPD 元件上同平面保護環電極。

圖上偏壓座不但可提供逆向偏壓，並且可以接收此元件的光電流，進而使用示波器或電表測量結果。而要測量其與波長相依的響應情形則靠一可調式雷射 (Hewlett Packard, 8168F) 經衰減器 (Agilent, 8156A) 後輸入。而脈衝響應則以協波鎖模 (harmonically mode-locked) 的半導體光纖雷射 (SOAFL) 重複頻率 1GHz 注入 InGaAs MM-PINPD，再以數位示波器 (Agilent/HP 86100A+86116A) 觀測其瞬間的波形響應。最後，InGaAs MM-PINPD 與轉阻放大器使用 T0-46 封裝，另外使用透鏡聚焦訊號輸入 InGaAs MM-PINPD，其耦合損失為 4dB。再由可調式雷射透過位元錯誤分析儀 (Agilent, 71612B) 產生的假隨機數的資料串注入訊號，測量其靈敏度與位元錯誤比，其中位元率到達 12.5Gbit/s。InGaAs MM-PINPD 的電容在阻抗匹配、1 GHz 情況下測量是 0.5 pF，可以估計其理論上的三分貝頻率寬為 7 GHz 或更高。隨後，使用鎖模的半導體光纖雷射以 1.2 ps 脈衝寬的訊號串列進行脈衝測試，如同一光學 delta function 輸入觀測此 PINPD 的暫態響應。在平均功率 0.1 mw、重複頻率為 1 GHz 的半導體光纖雷射脈衝注入下，InGaAs MM-PINPD 的暫態光電流如下圖十八：



圖十八、以波長 1550 nm 脈衝訊號輸入 MM-PINPD，所得到的脈衝響應情形。

InGaAs MM-PINPD 的訊號上升及下降反應時間分別為 34.36 ps 與 38.55 ps。而半高寬為 41 ps。而圖十八右上角的插圖為使用示波器上的光波分析元件(Agilent /HP 8703A, 0.13~20GHz)的高速富利葉轉換計算出在波長 1550 nm 下的 InGaAs MM-PINPD 頻率響應情形，可看出其三分貝頻寬與六分貝頻寬分別為 8GHz 與超過 12GHz。此結果顯現出此元件非常適合應用於 10Gbit/s 的光纖通訊網路中。接著，在 9.953 Gbit/s 下進行眼圖分析來判別在模擬 SONET OC-192 的光纖網路中，InGaAs MM-PINPD 的資料接收能力表現。採用電子時分復用(ETDM)實驗，配合 10Gbit/s 的光學假隨機數序列(PRBS)資料串(有非歸零(NRZ)圖長度  $2^7 - 1$ ，而輸入光功率為 -6dBm)。圖十九即為 MM-PINPD 不使用轉阻放大器鎖輸出的眼圖訊號。



圖十九、以光功率 -6 dBm 在無轉阻放大器，10 Gbit/s 傳輸速率下 MM-PINPD 所接收到的眼圖。

看起來有不錯的眼圖開闊度，測量 15 分鐘仍有較大的動態範圍。其訊號上升與下降時間(定義為在高低訊號間 20%~80%之間改變所需時間)分別為 37 ps 與 33 ps。由測量眼圖的平均值與標準差可計算出其信號抖動之方均根值為 4.73 ps。而不接轉阻放大器時眼圖上監測到的雜訊，接近系統(數位示波器)的極限(~10 mV)。早先，柏加諾(Bergano)等人設計一套計算方法來評估光學傳輸與接收系統中的位元錯誤率，稱為訊

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad \text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

雜比(或是 Q 值)，其式如下：其中  $I_{1,0}$  與  $\sigma_{1,0}$  為其兩資料軌的平均值與標準差，而  $\operatorname{erfc}(x)$  為互補誤差函數(Complementary Error Function)。由 InGaAs MM-PINPD 接收到的資料串流之位元錯誤率能準確的由眼圖的資料計算出的 Q 值推得。我們的實驗結果得到  $I_1$ 、 $I_0$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_0$  分別為 13.9 mV、0.52 mV、0.72 mV、0.84 mV。以此可計算出此系統的 Q 值大約可到達 8.59，在套入之前的公式可算出在 10Gbit/s 下位元錯誤率大約只有  $4.4 \times 10^{-18}$ 。

#### 四、經費使用情形

- (1)設備費：使用正常。
- (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：已在國際期刊論文中被接受已發表 7 篇論文。另有 5 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高速光纖傳輸系統以及高速光電取樣系統方面之可能性。
- 3.工業：國內外專利篇準備申請中。
- 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, Ming-Chung Wu, Yung-Cheng Chang, and Ci-Ling Pan, "Ultrahigh supermode noise suppressing ratio of a semiconductor optical amplifier filtered harmonically mode-locked Erbium-doped fiber laser," *Optics Express* 13 (18): 7215-7224 SEP 5 2005
2. Gong-Ru Lin and I-hsiang Chiu, "Femtosecond wavelength tunable semiconductor optical amplifier fiber laser mode-locked by backward dark-optical-comb injection at 10 GHz," *Optics Express* 13 (22): 8772-8780 OCT 31 2005
3. Tze-An Liu, Gong-Ru Lin, Yung-Cheng Chang, and Ci-Ling Pan, "Wireless audio and burst communication link with directly modulated THz photoconductive antenna", *Optics Express* 13 (25): 10416-10423 DEC 12 2005
4. Gong-Ru Lin, Ci-Ling Pan, and I-hsiang Chiu, "Supermode-noise-free eighth-order femtosecond soliton from a backwar dark-optical-comb-injection mode-locked semiconductor optical amplifier fiber laser", *Optics Letters*, 31 (6): 835-837 MAR 15 2006
5. Gong-Ru Lin, Kun-Chieh Yu, and Yung-Cheng Chang, "10 Gbit/s all-optical non-return to zero-return-to-zero data format conversion based on a backward dark-optical-comb injected semiconductor optical amplifier", *Optics Letters*, Vol. 31, Issue 10, pp. 1376-1378 (May 2006)
6. Ying-Tsung Lin and Gong-Ru Lin, "Dual-Stage Soliton Compression of a Self-Started Additive Pulse Mode-Locked Erbium-Dope Fiber Laser for 48-fs Pulse Generation", *Optics Letters*, Vol. 31, Issue 10, pp. 1382-1384 (May 2006)
7. Gong-Ru Lin, Yung-Cheng Chang, Kun-Chieh Yu, "All-optical pulse data pattern generation in a semiconductor optical amplifier gain-controlled by a reshaped optical clock injection", *Applied Physics Letters*, 88, 191114 (2006)