

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

極寬頻半導體光放大器(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-002-012-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學光電工程學研究所

計畫主持人：林清富

計畫參與人員：蘇益信、黃啟嘉、吳肇欣、蔡志宏

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 12 月 17 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 極寬頻半導體光放大器

### Extremely broad-band semiconductor optical amplifiers

計畫編號：NSC 92-2215-E-002-012

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人：林清富 台灣大學光電工程研究所

#### 一、中文摘要

在今年度的研究中，我們以組合不同種類量子井的方式成功的在磷化銦基板上製作出通訊波長用的光放大器，並以兩段式元件的方式測量元件的增益頻譜。此極寬頻放大器可做為寬頻可調雷射的增益元件，我們以此放大器做出的可調雷射可以同時輸出八個波長的雷射光，做為通訊用之多波長雷射光源。

**關鍵詞：**量子井、光通訊、光放大器、多波長可調雷射、極寬頻放大器。

#### 英文摘要

By combining different type of quantum wells, we successfully fabricate broad band optical amplifiers on InP substrates which can be used at communication wavelength. The gain of this designed device is measured by two-section technique. These broadband amplifiers can be used as the gain media of broadband wavelength tunable lasers, also. Using our new amplifier, the laser can simultaneously provide laser output at eight wavelengths at the communication band.

**Key words:** quantum well, optical communication, optical amplifier, multi-wavelength tunable laser, broadband amplifiers.

#### 二、前言與研究目的

在光通訊的架構上，隨著科技的進步，光纖的頻寬已經可以達到在整個的通訊波段從 1250nm 到 1650nm 擁有小於 0.5dB/Km 的損耗。所以，要如何充分有效地利用這段頻寬，來增加整個光通訊系統的傳輸能力，是一個值得研究的課題。半導體光放大器(SOA)在利用上具有許多用途，有波長轉換[1]、光訊號切換[2]、光脈波或訊號之重整或重製、光訊號放大等，並可做為多波長半導體雷射或大範圍波長可調半導體雷射之增益材料，在整合半導體雷射的系統上也具有相對優勢。

早期的 SOA 由於材料與製程上的因素，頻寬上面較難達到具有寬頻的效果，但我們實驗室在這方面的努力，研究成果已經可以達到使得 SOA 具有極寬的發光頻譜，但是到目前為止，量測這些 SOA 的增益頻譜，都是採用比較複雜的實驗架構[3-5]，也就是利用一個外部的可調波長雷射，藉由透鏡耦合的方式，將雷射打入待測的 SOA 中，量測前

後的頻譜和強度，紀錄在不同波長時，被放大的光強度，實驗架構說明如圖 2-1。

但是當我們設計出的 SOA 的頻寬越來越寬的時候，這種利用外部實驗架構的方式，就變得相對複雜。第一，要找到同樣具有極寬的大範圍可調波長的雷射是比較困難的，大部分的一顆商用可調連續波長 DFB(Distributed Feedback)雷射的波長範圍都在 10-15nm 變化[6]，要量測寬頻的半導體光放大器的時候，需要更換不同的模組並做校正的工作，增加實驗步驟麻煩度。第二，外部雷射的實驗架構需要很高的光路耦合，在做光學實驗的架設上面，也是增加實驗的複雜度與困難。

### 三、使用兩段式元件量測增益之原理

我們所使用的兩段式(Two-section)元件，不同於一般所知的耦合共振腔(Coupled-cavity)式的元件結構[7]，如圖 3-1。傳統的耦合共振腔式的元件，主要應用在單一整合可調雷射的使用上，而我們的元件和此種耦合式共振腔元件不同的地方在於，我們的兩段式元件並未把發光主動層(Active Layer)做蝕刻的分隔，而是保有主動層的完整，只在元件波導的部分往下做出蝕刻，使得一個元件分隔出兩段獨立的區域，能夠獨立地注入個別的電流在兩段區域上，改變最後的發光頻譜，兩段式元件的示意圖如圖 3-2。

如圖 3-2 (a)所示，我們將元件的中間以蝕刻(Shallow Etching)的方式，從波導上方向下蝕刻，蝕刻深度直到元件的主動層上方約 150nm 為止，過深的蝕刻可能會影響主動層發光的效果，此間距的功用主要為隔絕個別注入兩端的電流，使我們能夠分別的使用兩台訊號產生器，控制不同的電流來驅動元件發光，而元件的發光頻譜則是受到兩段不同的電流所產生的個別增益，最終疊加出來的總增益造成的結果。

由圖 3-2 (b)，兩段式元件結構做成傾斜的脊狀波導，用來取代兩端的抗反射鍍膜(Anti-Reflection Coating)，目的是減少光在兩端面沿著波導的反射，消除元件本身 Fabry-Perot 模態的共振；另一方面，傾斜波導的結構，也可以確定我們的光路是沿著波導走單一的路徑，確保我們後面所量測得到的增益是為一個單一路徑的增益(Single-Pass Gain)。

換言之，我們這個兩段式的元件結構，一端可以看成是我們的光源端(Source End)，用來產生打入光放大器的光源頻譜；另一端則是我們的增益放大端(Gain Media End)，亦即為一個 TWA(Traveling Wave Amplifier)，而在此端面後所測量得到的發光頻譜，可看成有部分的光源端的光，在經過光放大器之後所產生的被放大頻譜(Amplified Spectrum)。這個發光頻譜  $S_{tot}(I_1, I_2, \lambda)$ ，取決於兩端的注入電流  $I_1$  與  $I_2$ ，根據圖 3-2(a)，我可以把它寫成以下的式子：

$$S_{tot}(I_1, I_2, \lambda) = C \cdot [S_1(I_1, \lambda)] \cdot e^{G_m(I_2, \lambda) \cdot L_2 - \alpha_i \cdot L_2} + S_2(I_2, \lambda) \quad (3-1)$$

在這裡， $S_1(I_1, \lambda)$  和  $S_2(I_2, \lambda)$  分別是在注入電流為  $I_1$  和  $I_2$  時得到的區域 1 和區域 2 的自發性放光頻譜(Spontaneous Emission)， $G_m(I_2, \lambda)$  和  $\alpha_i$  分別是第二段區域的增益以及內部損耗， $L_2$  是光放大器的長度，也就是第二段的長度； $C$  則是耦合係數(Coupling coefficient)，包含了兩個部分，分別是在量測時，光從元件端面耦合到光纖的係數，以及光從光源端耦合到放大器端之間的係數，關於耦合係數的計算這個部分，我們將在後面再做詳細的討論。

由式子(3-1)，我們可以推導出增益係數的式子如下：

$$G_m(I_2, \lambda) = \frac{1}{L_2} \ln \left[ \frac{S_{tot}(I_1, I_2, \lambda) - S_2(I_1 = 0, I_2, \lambda)}{C \cdot [S_1(I_1, I_2 = 0, \lambda)]} \right] + \alpha_i \quad (3-2)$$

由上面推導出來的式子，作為我們此次實驗的基礎，再去分別量測兩段式結構的在不同電流時所發出的頻譜，將其帶入後，可以得到半導體光放大器最後的增益頻譜值。

#### 四、兩段式元件的量子井設計

量子井結構在設計的時候要考慮的因素有很多，包括了所用來成長量子井的材料與種類、晶格的匹配(lattice match)與應力(Strain)、量子井的寬度與能障(Barrier)的寬度、對應的發光能階與波長、增益和材料吸收的問題、分離侷限異值結構區域(SCH layer)的長度、量子井對載子的捕捉能力、以及一些載子在量子井中動態變化造成的影響，種種因素都會造成最後設計出來的元件所發出來頻譜的不同。為了能夠充分利用光纖通訊頻寬，我們希望設計出來的量子井結構，是一顆能夠適用在整個通訊的波段的寬頻放大器，不像傳統的半導體光放大器，其涵蓋的範圍多只侷限在很窄的頻帶，若是未來的光纖通訊系統只需要靠一個寬頻的半導體光放大器，即可節省許多架設的成本，且在 WDM 的系統上，可以做許多的應用，例如波長的轉換，頻帶的切換等，是一個十分經濟且實用性高的元件，在這個部分我們實驗室也和國外的安捷倫公司 (Agilent Tech.) 做很多技術上的合作。

綜合以往的經驗，為了得到寬頻的發光頻譜，本次實驗所使用的 SOA 在量子井設計上，採用的是兩種不同寬度的量子井組合做多層的交替組合，兩種量子井其發光波長主要分別設計在 1.3 μm 及 1.55 μm，且為避免 1.3 μm 的量子井的發光被 1.55 μm 量子井全部吸收，設計發光在 1.3 μm 的量子井數目有三個而 1.55 μm 的量子井數目為兩個，希望可使 1.3 μm 量子井的增益較高，示意圖如圖 4-1，根據 L-K Hamiltonian 計算出量子井所對應的的波長如表 4-1 所示，寬的量子井有三個量子化能階 (Quantized State)，窄的量子井則有兩個量子能階。此元件的量子井結構我們給予命名為 05012，其 layer structure 見表 4-2。

表 4-1 所設計發光於 1.3 及 1.55 微米量子井之能階對應波長

	發光於 1.55 μm 量子井	發光於 1.3 μm 量子井
n=1 能階對應波長	1.54	1.30
n=2 能階對應波長	1.46	1.24
n=3 能階對應波長	1.18	Unbound

表 4-2 05012 的 layer structure

P-InP		
InGaAsP quaternary @ 1.1 $\mu$ m	undoped	750A
In <sub>0.86</sub> Ga <sub>0.14</sub> As <sub>0.3</sub> P <sub>0.7</sub>	undoped	450A
In <sub>0.67</sub> Ga <sub>0.33</sub> As <sub>0.72</sub> P <sub>0.28</sub>	undoped	60 A
In <sub>0.86</sub> Ga <sub>0.14</sub> As <sub>0.3</sub> P <sub>0.7</sub>	undoped	150A
In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	undoped	87A
In <sub>0.86</sub> Ga <sub>0.14</sub> As <sub>0.3</sub> P <sub>0.7</sub>	undoped	150A
In <sub>0.67</sub> Ga <sub>0.33</sub> As <sub>0.72</sub> P <sub>0.28</sub>	undoped	60 A
In <sub>0.86</sub> Ga <sub>0.14</sub> As <sub>0.3</sub> P <sub>0.7</sub>	undoped	150A
In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	undoped	87A
In <sub>0.86</sub> Ga <sub>0.14</sub> As <sub>0.3</sub> P <sub>0.7</sub>	undoped	150A
In <sub>0.67</sub> Ga <sub>0.33</sub> As <sub>0.72</sub> P <sub>0.28</sub>	undoped	60 A
In <sub>0.86</sub> Ga <sub>0.14</sub> As <sub>0.3</sub> P <sub>0.7</sub>	undoped	450A
InGaAsP quaternary @ 1.1 $\mu$ m	undoped	750A
N-InP	1e18	0.5 $\mu$ m
N+ InP Substrate		

圖 4-2 為此半導體光放大器在長度為 800  $\mu$ m 時候所產生的頻譜。藉由兩種不同的量子井的組合，在我們增加注入電流的過程中可以發現，最後產生的頻譜會隨著電流的增加，發光波長往短波長移動，最後則集中在 1.35  $\mu$ m 附近，而在特地電流下，載子會有特定的分佈在各個量子井中，致使每個量子井在不同的波長所提供的增益可以達到平衡，組合起來使發光的頻譜可以達到寬頻的效果，這也是設計寬頻半導體光放大器的概念。

## 五、兩段式元件的製作

在製作上，我們的寬頻半導體光放大器所使用的材料是磷砷化銦鎵 (InGaAsP)，並藉由不同的 x、y 比例，In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>，來達到發光能階的改變，主動層的結構是 PIN 接面的二極體，成長在磷化銦 (InP) 的基版上，整個 layer structure 是交由中華電信研究所的金屬氣相磊晶儀 (MOCVD) 成長磊晶，磊晶參雜條件如表 3-2。晶片在磊晶完成之後，經過曝光顯影，活化離子蝕刻 (Reactive Ion Etch, RIE) 蝕刻 [8-10]，PECVD 成長絕緣層，金屬接觸層蒸鍍，劈切等基本步驟，參數的調整依據以往的經驗之下，即完成本實驗所用之兩段式元件，元件側面示意圖如圖 5-1。

元件的波導採用雙通道脊狀波導，通道寬度從波導中央向兩邊蝕刻各 50  $\mu$ m，定義出波導寬度，如圖 5-1 所示為 3  $\mu$ m，藉由波導深度與寬度造成主動區的等效折射率的變化，達到波導的光侷限功用；另一方面，在金屬界面與 P-InP 之間成長一層厚度為 300nm 的二氧化矽絕緣層，如圖 5-1 中綠色部分。在波導的兩旁做開窗 (Open Window) 的動作，使得注入的電流可以被侷限在波導的位置，如圖中的電流方向所示，達到電流侷限的功用。

圖 5-2 為元件在立體顯微鏡下放大 100 倍所照得的俯視圖，元件的長度總長為 1mm，被中間蝕刻的部分分成兩段區域，光源端為 200  $\mu$ m 長，另一放大器端的長度為 800  $\mu$ m，中間隔著的分隔區域為 10  $\mu$ m，用作電流隔絕的功用，經過量測，此段的電阻約為 612 歐姆，對於電流隔絕的效果還算不會太差。傾斜波導的角度與端面的法線方向夾著 7 度角，正極金屬的表面為鈦鉑金的合金，透過探針，作為電流的注入接觸面。

## 六、兩段式元件的量測結果與討論

我們依序量測元件在不同電流時，兩段式結構兩端各自發出的頻譜。首先，我們把兩段式元件其中的放大器端的電流設為零，亦即  $I_2=0$ ，只改變光源段的電流  $I_1$ ，把光纖放到在第一段元件的端面處做量測，得到的頻譜如圖 6-1 所示，由圖中可以發現，由於光源段長度只有  $200\ \mu\text{m}$ ，光無法得到足夠的增益能夠被放大，並且由頻譜上看來，由於量子井的設計，即使在注入電流較低（例如  $I_1=80\text{mA}$ ）的情況下，頻譜還是可以包含很大的範圍，從  $1.3\ \mu\text{m}$  到  $1.55\ \mu\text{m}$ ，恰好可以拿來當作我們需要的寬頻光源頻譜，來量測我們的寬頻半導體光放大器。

圖 6-2 所展示的是，在第二段的輸出端面所量測得到的放大頻譜，也就是在固定第一段（光源段）的操作電流為  $80\text{mA}$  的時候，去改變第二段（放大器段）的電流（亦即改變光放大器的操作電流），看最後第一段（光源）的光經過第二段（放大器）被放大出來得到的頻譜是如何。由圖中可以發現，當電流  $I_2$  慢慢增加的時候，頻譜也逐漸往短波長移動，而且增加的速率是比較快的，相對於在低電流  $I_2$  時長波長增加的速率，由此我們可以推論，當此光放大器在電流大的時候，短波長所貢獻的增益是比較大的，當然，短波長的增益主要包含了短波長量子井所提供的之外，也有長波長量子井的高能階復合放光所貢獻的部分。

### 1. 耦合係數的估計與增益頻譜

我們提到了耦合係數  $C$  卻尚未說明，將在接下來的部分做討論。其中  $C$  包含了兩個部分：第一，光從元件端面耦合到光纖時的耦合係數， $C_1$ 。第二，光從第一段耦合到第二段的時候的耦合係數， $C_2$ 。

$C_1$  實際上是包含了元件兩邊個別的耦合係數，由於我們在量測光源端與放大器端的頻譜的時候，是分開個別在兩端去用光纖接收，所以兩邊各自有各自的耦合係數， $C_1$  與  $C_2$ 。這裡的耦合係數，其實是用來正規化 (Normalize) 我們量到的頻譜所用的，用來得到光纖所量得的頻譜與實際上光剛出元件端面的頻譜之間的關係，在圖 6-1 的實驗系統中有提到為什麼我們要用一個 InGaAs 的光偵測器來量測實際的光強度，就是為了得到  $I_{\text{measured}}$ ，經過簡單計算得到的

$$C_1 = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (6-1)$$

$C_2$  為元件兩段之間的耦合係數，我們有兩個方法來估計這裡的  $C_2$ ，取決於到底光源段的光的強度大小。第一種，由於在元件兩段中間 Gap 區域是沒有波導的情況，所以光在水平方向會有發散的情形，此發散角可以由導波理論 (Guided-Wave Optics) 計算 [11]，去估計折射率造成的差異後比較得到，但是在用這個方法估計的時候，有個前提是，光從另一段發出的時候也必須是一個很好的 Guiding Mode，換言之，就是光在光源段產生後能夠達到被波導侷限效果很好 (Well-guided) 的模態，在這個時候才適用這個方法來估計  $C_2$ ，若我們先回到圖 3-9 來看，這個頻譜的量測是在光源段的長度不夠的情況下，所以觀察不到放大的現象，也就是說，這裡光源段的光還沒有形成好的 Guiding Mode，此時我們在估計  $C_2$  的時候就不適合用這個方法，而是用接下來的第二種方法來估計。

在光尚未形成 Guiding Mode 之前，我們可以假設量到的光都是屬於自發性的放光，也就是 Spontaneous Emission。自發性放光可以觀察到的現象就是其放光是沒有方向

性的，也就是朝四面八方放射，所以我們在這裡估計由第一段耦合到第二段的係數便可以用立體角 (Solid Angle) 來計算，首先我們考慮我們元件實際的尺寸，元件的主動區厚度約為  $0.34 \mu\text{m}$ ，脊狀波導的寬度約為  $3 \mu\text{m}$ ，兩段相距的長度為  $10 \mu\text{m}$ ，於是立體角估計如下：

$$R_{\Theta} = \frac{0.34 \times 3}{2 \times \pi \times (10)^2} \text{ B } 0.162\% \quad (6-2)$$

上式在分母的部分，我們考慮只有半邊的發散角來校正原先量到的頻譜，換言之，我們的  $C_2$  最後的值为  $0.162\%$ 。

而我們最後得到的耦合係數  $C$  的值为下式：

$$C = C_1 \times C_2 \quad (6-3)$$

將式子(6-3)得到的值以及量測到的頻譜帶入式子(3-2)，我們可以得到我們的增益頻譜如圖 6-3。

從圖 6-3 我們可以看出，05012 這一顆半導體光放大器在注入電流較低的時候，載子主要貢獻在  $1.55 \mu\text{m}$  波長部分的增益，隨著操作電流的上升，載子有能帶填充 (Band Filling) 的現象，致使貢獻的增益往短波長  $1.45 \mu\text{m}$  移動，但是當  $1.3 \mu\text{m}$  短波長量子井內也逐漸有夠多的載子累積到可以放光的地步， $1.35 \mu\text{m}$  附近的增益逐漸被觀察到，其增益上升的速率較低電流時長波長增益增加速率為快，由於我們設計短波長的量子井數目較多，當注入載子超過某一臨界值之後，短波長量子井所貢獻的增益將超過長波長量子井，使得增益最後會集中在短波長，而長波長也因為能階逐漸填滿最後的增益不再增加。在注入電流為  $I_{2, \text{max}}=320\text{mA}$  的時候，載子的分佈剛好使得兩種量子井貢獻的增益達到一個平衡，我們可以得到一個平坦度最大的增益頻譜，由圖上看來，其波長涵蓋範圍可達  $290\text{nm}$ ，最大的增益可以到達將近  $40\text{cm}^{-1}$ ，由於我們的量子井個數較多，長短波長的量子井是彼此交錯成長，一方面可使  $1.3 \mu\text{m}$  量子井與  $1.55 \mu\text{m}$  共享注入載子，一方面載子分散的結果使得每個頻帶相對貢獻的增益會下降，卻可以達到寬頻的效果。

## 2. 不同光源端電流下的增益頻譜比較

為了確定我們量測的增益頻譜，我們比較在不同光源端電流  $I_1$  操作的時候，量測得到的增益，由於我們的增益頻譜理論上應該只受到光放大器本身的操作電流  $I_2$  的影響，藉此我們可以看出增益頻譜之間有什麼差異，是否和光源的強度有關係。圖 6-4 是  $I_1$  為  $40\text{mA}$  的時候量測得到的增益頻譜，比較圖 6-4 和圖 6-3 我們發現，增益頻譜在各個操作電流下強度很相似，相差約在  $2$  到  $3\text{cm}^{-1}$  以內，略有不同的地方可能是對光路和計算上的誤差，對於不同波長的相對強度來說，取最大平坦的增益頻寬時的操作電流  $I_{2, \text{max}}$  來看， $I_1$  操作在  $40\text{mA}$  的時候，光放大器的操作電流  $I_{2, \text{max}}$  約為  $360\text{mA}$ ，若我們同時來看圖 6-5， $I_1$  操作電流在  $120\text{mA}$  的時候，增益最大頻寬應該在光放大器的操作電流  $I_{2, \text{max}}=240\text{mA}$  到  $280\text{mA}$  之間，理論上來說，光放大器的增益頻譜應該只和本身的操作電流有關，由這三張圖比較看來，在強度上和頻譜上來說，似乎有  $I_1$  電流越大，要達到相同的增益頻譜時，光放大器的操作電流  $I_2$  越小的趨勢，這有可能表示說，當  $I_1$  的電

流越大，強度越強的時候，光形成 Guiding Mode 的可能性增加了，從光源端耦合入光放大器端的比例也相對變大，原本估計的 C2 可能要略微地向上調整，使得增益頻譜的強度可以略微地向下修正，光放大器要達到相同的增益時，操作電流 I2 也就不會隨 I1 增加而越小，所以只要我們選擇的光源端長度夠短，事實上是消除這個因素造成的影響，這可能是使用這個方法量測增益頻譜要特別注意的地方。另一個可能的原因是元件中間兩段的電阻值還不夠大，使得元件兩段中間的漏電流對實際量測上造成影響，當 I1 比較小的時候，放大器端 I2 透過中間的 Gap 漏到光源端的量會較大，使得實際上此時放大器端的電流 I2 所造成的增益比原本要來得小，所以要得到同樣最大平坦增益的電流  $I_{2,max}$  就要增加，以便克服有漏電流的產生，造成了當 I1 減少， $I_{2,max}$  有增加的趨勢，但整體比較圖 6-3 到圖 6-5，增益頻譜大致的趨勢和強度是可以預期的，表示這個方法在目前來說，還是具有相當的可靠度和依賴性。

圖 6-6 為 I2 為 320mA 時的增益，不同 I1 時所量得到的增益頻譜有不同，在 I1 比較小的情況下，同樣 320mA 的時候增益比較小，增益稍微偏向長波長一點，而隨著 I1 的增加， $I_2=320mA$  時得到的增益也上升，尤其是在短波長的地方，由不同 I1 得到的增益頻譜上的差異，這顯示了我們在將來的元件改良製作上，首先要減少中間漏電流的產生，也就是增加兩段中間的電阻值大小，使得量測得到的增益頻譜會更加準確。

### 3. 不同長度半導體光放大器之比較

除了總長 1mm 的兩段式元件，我們另外製作了總長 500  $\mu m$ ，700  $\mu m$  的元件，其中在光源端長度都是 200  $\mu m$ ，所以總共有三種長度不同的半導體光放大器，分別為 300  $\mu m$ ，500  $\mu m$  以及 800  $\mu m$ 。若我們分別就這三種長度的半導體光放大器去量它們電流密度對強度的圖，由圖 6-7 我們發現在注入相同的電流密度之下，長度為 800  $\mu m$  的元件其放光的強度會比另外兩種長度的要強許多，也就是說，在 800  $\mu m$  這個長度之下，光是比較容易被放大的，可能原因有以下幾種，第一，由於我們的傾斜波導結構使得光路在元件裡頭不會產生共振，當光路在經過單一太短的路徑且缺乏端面迴授的時候，無法累積足夠的增益；第二，太短的元件如同前一節所提到的，不容易形成好的 Guiding Mode，光在半導體光放大器中產生的時候，原本波導的功用要產生的光和載子侷限效果下降，其放大光強度也會受到損耗而減少；第三，由於我們的非對稱多重量子井的結構，載子在量子井中分佈是比較分散的情形，相對在各個波長能提供的增益下降，光強度也會較只有單一種量子井來的弱。理論上來說，光的強度和半導體光放大器的長度應該是呈現指數上升的關係，若我們把不同的光功率取

自然對數後對長度作圖 6-8，我們可以發現在電流密度越高的情況下，得到的曲線就趨向非線性，似乎和理論上呈線性有差異，但如同前面所說的，長度太短的時候，光被放大的情形較弱，相同的測量若換成 800  $\mu m$  以上的長度，應該可以得到比較線性的曲線。在比較不同長度這個方法之下，我們也可以藉由此方法量出增益頻譜，但更長的元件製作，至少 800  $\mu m$  以上的長度作比較應該得到的值會比較正確。

若我們固定相同的輸入頻譜大小，也就是固定  $I_1=80mA$ ，將三種長度的 SOA 偏壓在同樣的電流密度之下，我們可以看到最後放大出來的頻譜，如圖 6-9 所示，圖 6-9(a) 為光放大器偏壓在  $6KA/cm^2$  時的頻譜，圖 (b) 為光放大器偏壓在  $8KA/cm^2$  時的頻譜，我們比較圖 (a) 和 (b) 中不同長度下經過 SOA 放大後得到的頻譜，兩張圖的主要差異在於在短波長大約 1380nm 附近，偏壓在  $8KA/cm^2$  的頻譜有明顯的大小增強的趨勢，特別在 500  $\mu m$  和 800  $\mu m$  兩種長度的 SOA 更明顯，300  $\mu m$  的部分相較兩張圖之下沒有很大的差異，

可能是長度不夠使得放大不顯著的原因。造成在短波長強度大小不同的原因，我們回頭將圖 6-3 所量測得到的增益頻譜圖中，將  $6\text{KA}/\text{cm}^2$  和  $8\text{KA}/\text{cm}^2$  時的電流所對應的增益拿出來比較，如圖 6-10，我們可以發現，在短波長的地方增益有明顯的不同，因為這個差異使得圖 6-9 的頻譜不一樣，而長度不同的 SOA 造成的頻譜差異，會隨著長度越長放大效果增強，差異更大，在  $8\text{KA}/\text{cm}^2$ （也就是  $320\text{mA}$ ）的時候，因為短波長的量子井開始貢獻增益，在這個電流之下量子井的載子貢獻在增益上較為平均，也就是最大頻寬可以發生的時候，而後載子分佈集中在短波長量子井，發光頻寬也隨之下降。

## 七、多波長雷射系統

以我們之前所發展的寬頻半導體放大器為增益介質所架設的多波長雷射共振腔如圖 7-1。所使用的是  $300\ \mu\text{m}$  的直波導 SOA 元件，利用切短波導長度抑制元件本身的共振。在以元件其中一個發射面做輸出，在另一個發射面提供八個波長的回授做為外部共振腔，並以回授的強度控制每個波長的雷射光輸出功率。基本的外部共振腔是由準直透鏡 ( $f=0.45\text{cm}$ )、光柵、透鏡 ( $f=10$  or  $20\text{cm}$ )、衰減器及反射鏡組成。由元件發出的雷射光由準直透鏡聚成平行光，經光柵分光後被透鏡聚到反射鏡上，反射鏡的反射光在沿原路回到元件的波導，衰減器是用來控制回授的強度。為了空出放置衰減器的空間，波長比  $1520\text{nm}$  短的光路被往下折疊，並且使用焦距較長的透鏡 ( $20\text{cm}$ )。波長比  $1520\text{nm}$  長的光則因為處於元件增益頻寬的下緣，較不容易與其它波長競爭，所以它的光路不經過反射鏡摺疊，而且也不以衰減器減少回授的強度。衰減器是以可轉動的玻璃片做成，因為每一道光經  $20\text{cm}$  透鏡聚焦在反射鏡上的位置間距僅  $3.5\text{mm}$ ，所以每一片衰減器都要切成長條形並緊靠在一起，利用玻璃的反射率隨入射角的變化，衰減的幅度可以靠旋轉玻璃的角度來改變。

圖 7-2 這個雷射的輸出頻譜共有八道雷射輸出，波長分別是  $1367.1\text{nm}$ ,  $1390.7\text{nm}$ ,  $1408.8\text{nm}$ ,  $1436.5\text{nm}$ ,  $1451.1\text{nm}$ ,  $1477.4\text{nm}$ ,  $1494.3\text{nm}$  及  $1526.9\text{nm}$ 。每一道光的頻譜寬度小於  $0.3\text{nm}$ ，強度都比背景大  $30\text{dB}$  以上。在適當調整衰減器使的在  $146\text{mA}$  注入電流時每一道光的強度都一樣大之後，我們量測每道光的強度隨電流的變化 (圖 7-3)，由圖中可以看到  $146\text{mA}$  注入電流時，波長較長的雷射光其強度會隨電流增加而減小，僅  $1408.8\text{nm}$ ,  $1390.7\text{nm}$  及  $1367.1\text{nm}$  三道雷射光其強度會隨電流增加而增加，前後有約  $3\text{mA}$  的範圍可以使每一道光的強度都差不多大。

另外，在這個雷射裡不同波長的雷射光彼此競爭不強，這使的我們的可以任意關閉某些波長的雷射輸出，而又不影響其它波長的功率，如圖 7-4。

## 七、結論

在這個計劃裡我們以組合不同種類量子井的方式成功的在磷化銦基板上製作出通訊波長用的光放大器，並發展了使用兩段式的元件作為量測增益的方法，這個增益的量測方法，在目前來說具有一定的方便性與可靠度。同時這一類極寬頻放大器可做為寬頻可調雷射的增益元件，我們架設的可調雷射可以同時輸出八個波長的雷射光，做為通訊用之光源，這個雷射有極低的背景雜訊，以及每道光可以隨時開關，並有極大使用波長範圍的優勢。

## 八、參考資料

- [1] C. Joergensen, S. L. Danielsen, K. E. Stubkjaer, M. Schililing, K. Daub, P. Doussiere, F. Pommerau, P. B. Hansen, H. N. Poulsen, et al., *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* 3, 1168 (1997)
- [2] M. Ikeda, Switching characteristics of laser diode switch, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-19, 2, 157-164, 1983
- [3] T. Ssith and M. Mukai, “1.5 $\mu$ m GaInAs traveling-wave semiconductor laser amplifier,” *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-23, no.6 1010-1020 (1987)
- [4] R. Andrea, et al, “Gain dynamics in traveling-wave semiconductor optical amplifiers,” *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 7, no.2 293-299, (2001)
- [5] K. Magari, T. Ito, H. Kamioka, Y. Tohmori, and Y. Suzuki, “Novel gain measurement method without optical fiber alignment in a semiconductor optical amplifier,” *Conference Proceedings - International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 2002, pp 139-142
- [6] M. Kuznetsov, “Theory of wavelength tuning in two-segment distributed feedback lasers,” *IEEE J. Quant. Electronics*, col. QE-24, pp.1837-1844, 1988.
- [7] W. T. Tsang, in *Semiconductors and Semimetals*, Vol.22B, W. T. Tsang, Ed., Academic Press, San Diego, CA, 1985, Chap. 4.
- [8] T. R. Hayes, “Dry etching of In-based semiconductors”, from “Indium Phosphide and Related Materials: Processing, Technology, and Devices”, A. Katz, editor, Artech House, MA, 1992.
- [9] L. F. Thompson, C. G. Willson, and M. J. Bowden, “Introduction to Microlithography”, 2nd ed., Chap. 5, pp. 377-493, ACS Professional Reference Book, Washington, DC, 1994.
- [10] T. R. Hayes, “Dry etching of In-based semiconductors”, from “Indium Phosphide and Related Materials: Processing, Technology, and Devices”, A. Katz, editor, Chap. 8, pp. 284-293, Artech House, MA, 1992.
- [11] R. G. Hunsperger, *Integrated Optics: Theory and Technology*

九、圖表

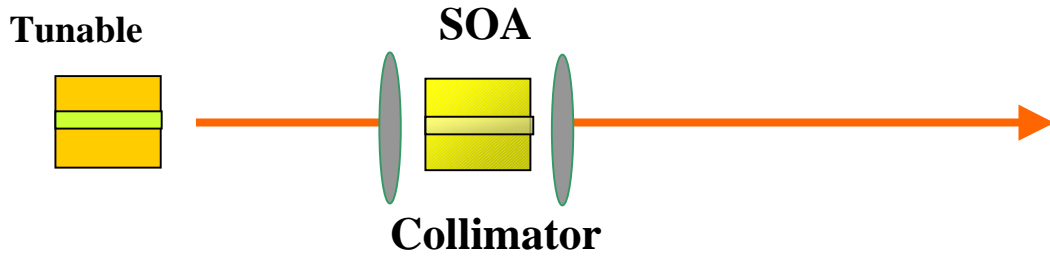


圖 2-1. 架設外部雷射的實驗示意圖

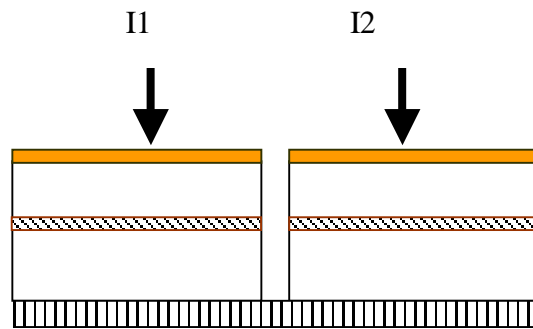
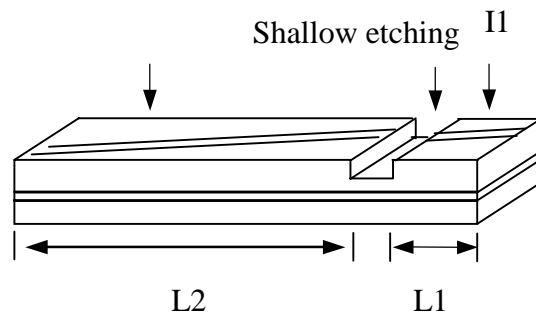
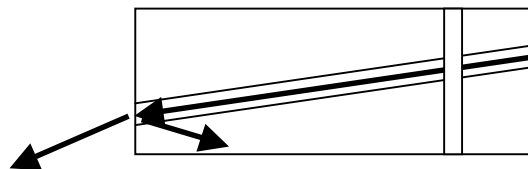


圖 3-1 Coupled-Cavity laser (Side View)



(a) 三維示意圖



(b) 傾斜波導

圖 3-2 兩段式元件的三維與俯視示意圖

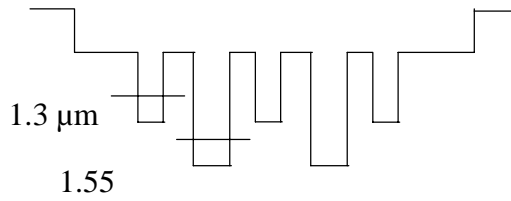


圖 4-1 量子井結構示意圖，元件包含兩種量子井結構，其第一個量子化能階分別對應在 1.3 與 1.55  $\mu\text{m}$  的波長

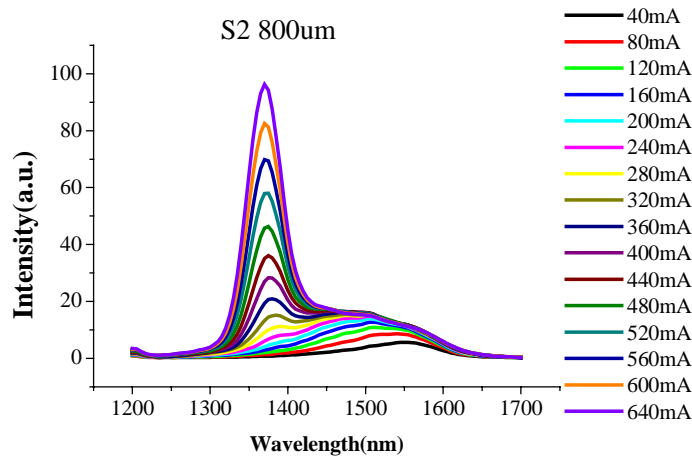


圖 4-2 05012 元件 800  $\mu\text{m}$  長度的發光頻譜

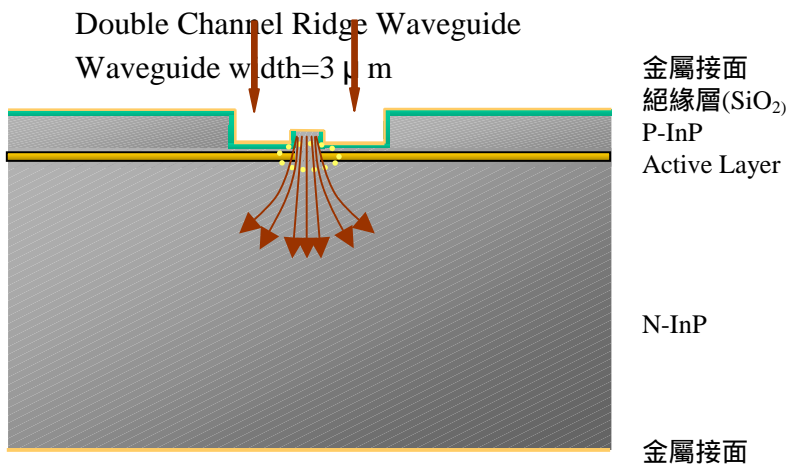


圖 5-1 元件側面示意圖。綠色層為二氧化矽絕緣層，中間金色層為載子復合放光的主動區，中間棕色線條為電流方向，黃色虛線則為光被侷限的範圍。

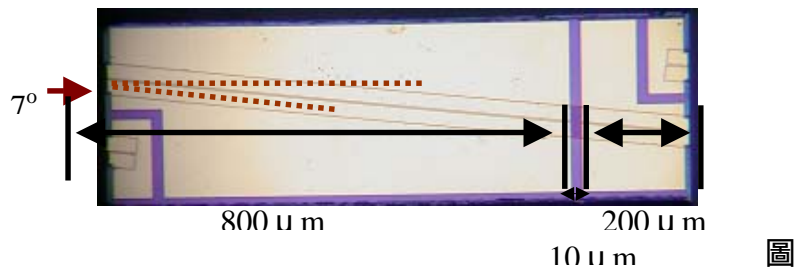


圖 5-2 實際元件在顯微鏡下的俯視圖，總長度為 1mm 的傾斜波導兩段式光放大器，分為一段 200  $\mu\text{m}$ ，另一段 800  $\mu\text{m}$ ，中間 Gap 距離為 10  $\mu\text{m}$

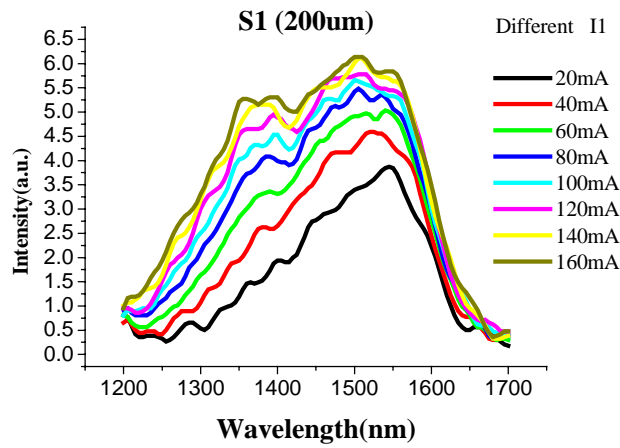


圖 6-1 將  $I_2$  設為零，改變不同的光源段電流  $I_1$ ，得到的光源段頻譜， $S_1(I_1, \lambda)$ 。

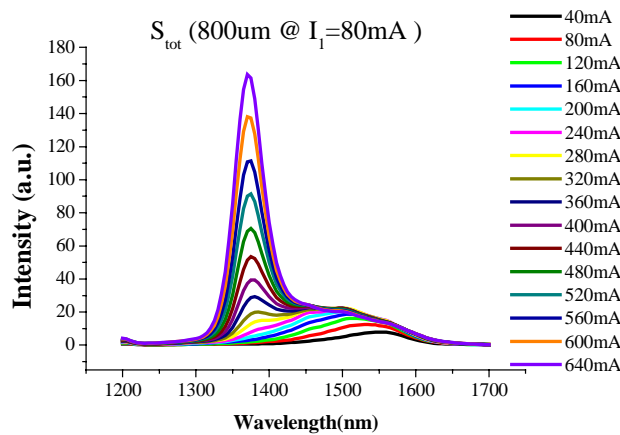


圖 6-2 將  $I_1$  設為 80mA，改變不同的  $I_2$  從 40mA 到 640mA，得到的被放大頻譜， $S_{\text{tot}}$ 。

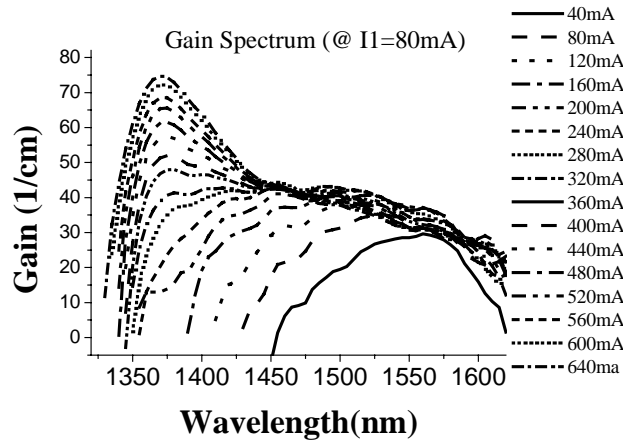


圖 6-3 05012 元件的寬頻增益頻譜

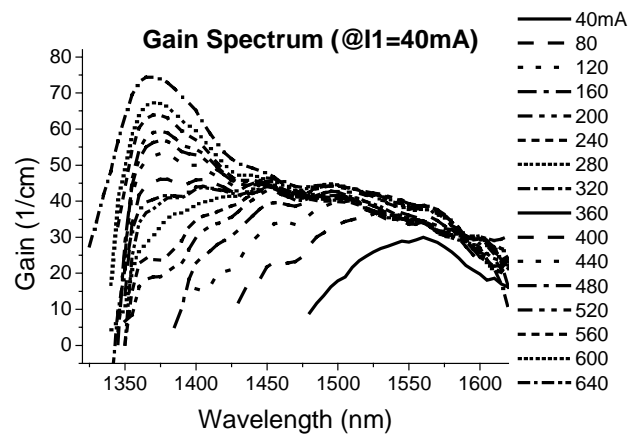


圖 6-4  $I_1=40\text{mA}$  下得到的增益頻譜

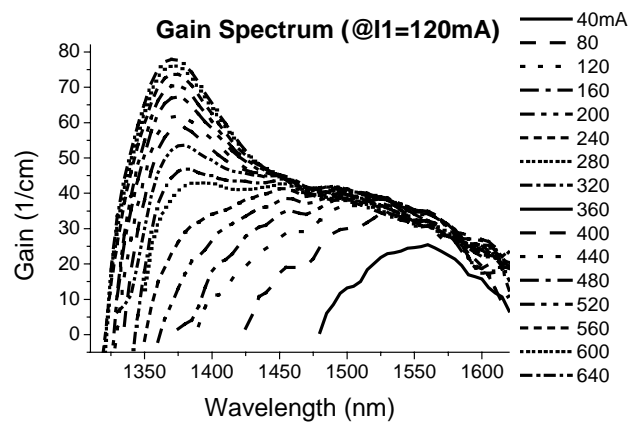


圖 6-5  $I_1=120\text{mA}$  下得到的增益頻譜

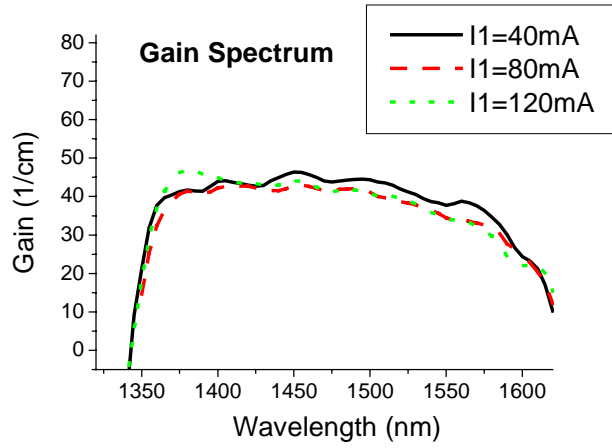


圖 6-6  $I_2=320\text{mA}$  下得到的增益頻譜， $I_1$  越大得到增益有越大的趨勢。

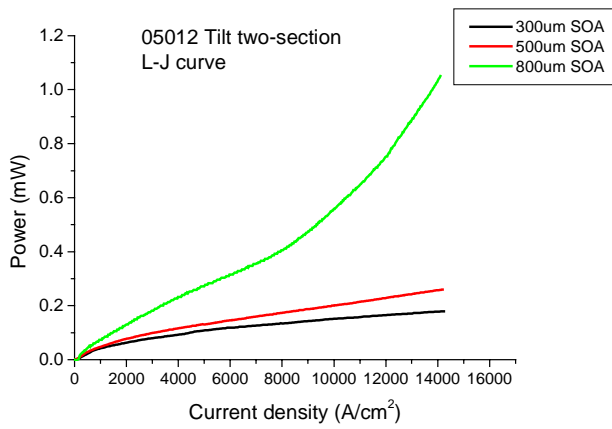


圖 6-7 在不同的長度之下的 SOA，電流密度對強度作圖

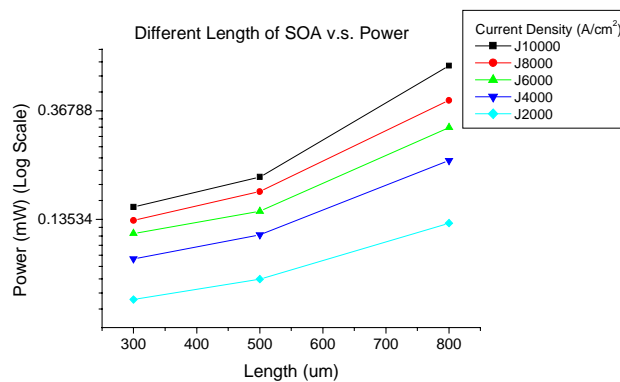
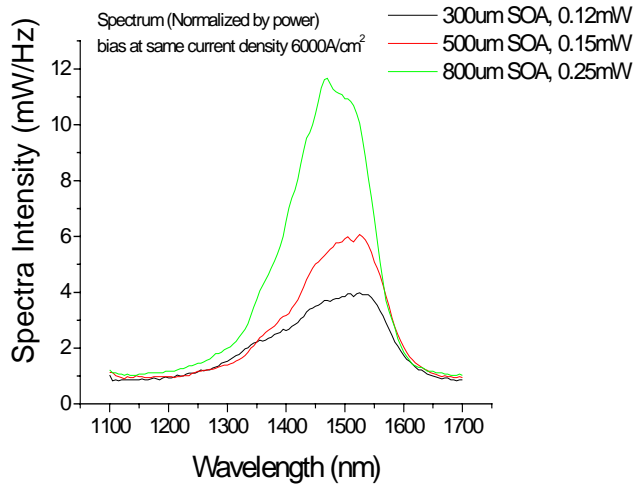
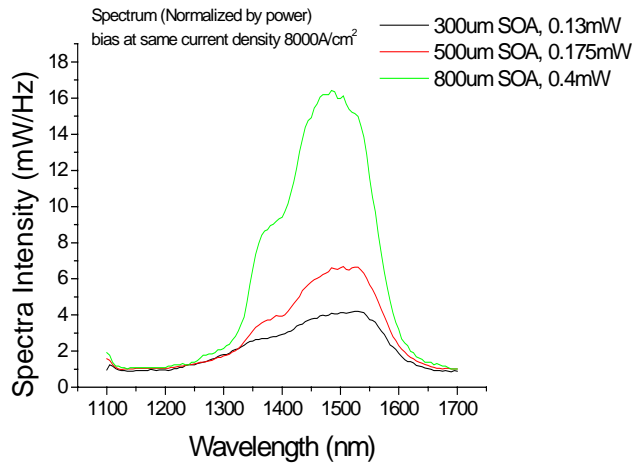


圖 6-8 三種長度的 SOA，不同電流密度下，光功率和長度的關係。縱軸取自然對數之後，理論上應該和長度成正比



(a) 偏壓在  $6\text{KA}/\text{cm}^2$



(b) 偏壓在  $8\text{KA}/\text{cm}^2$

圖 6-9 不同電流密度下時的三種長度 SOA 的輸出頻譜

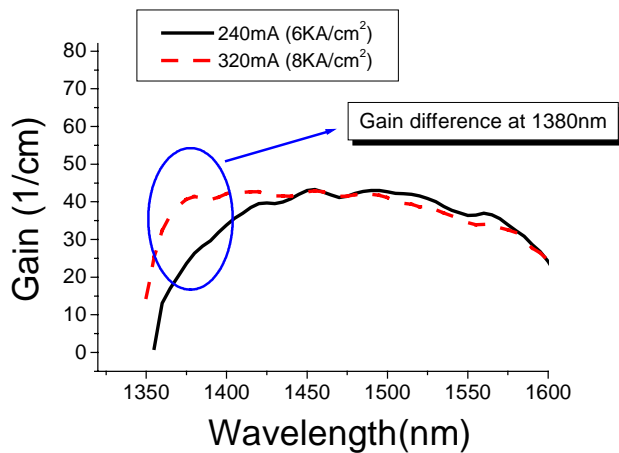


圖 6-10 不同電流密度下的增益頻譜，在短波長的地方有明顯的增益大小差別

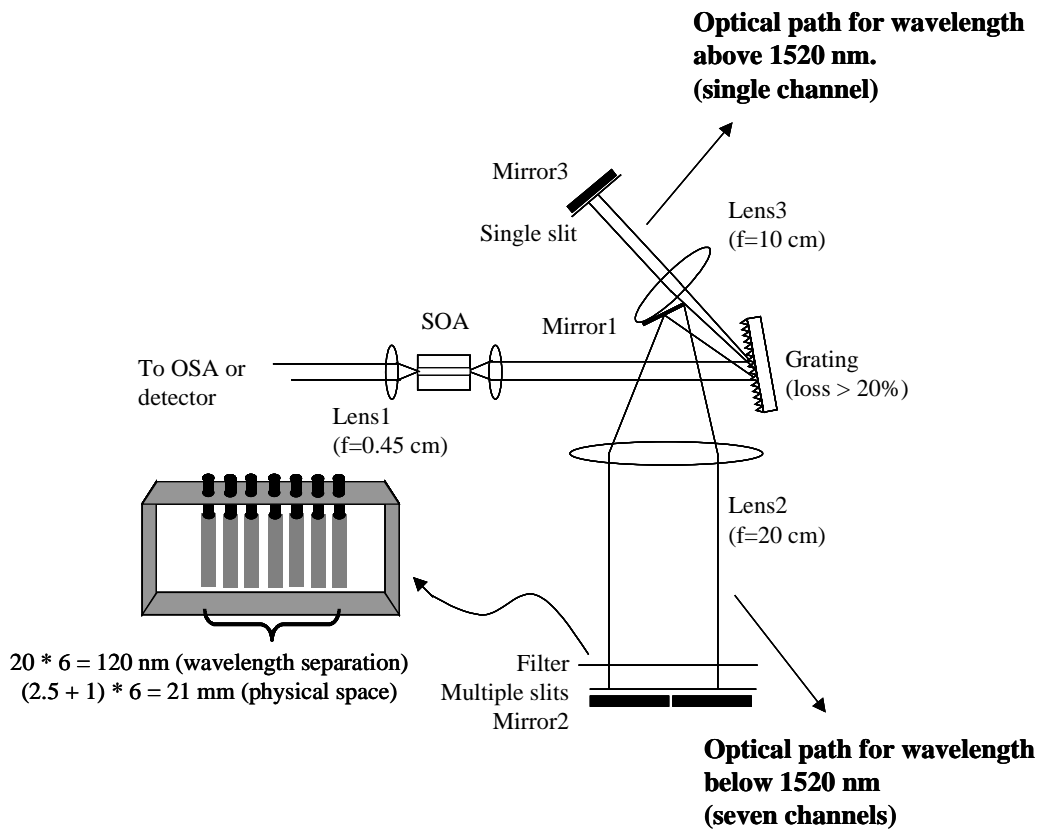


圖 7-1 多波長雷射的共振腔架構

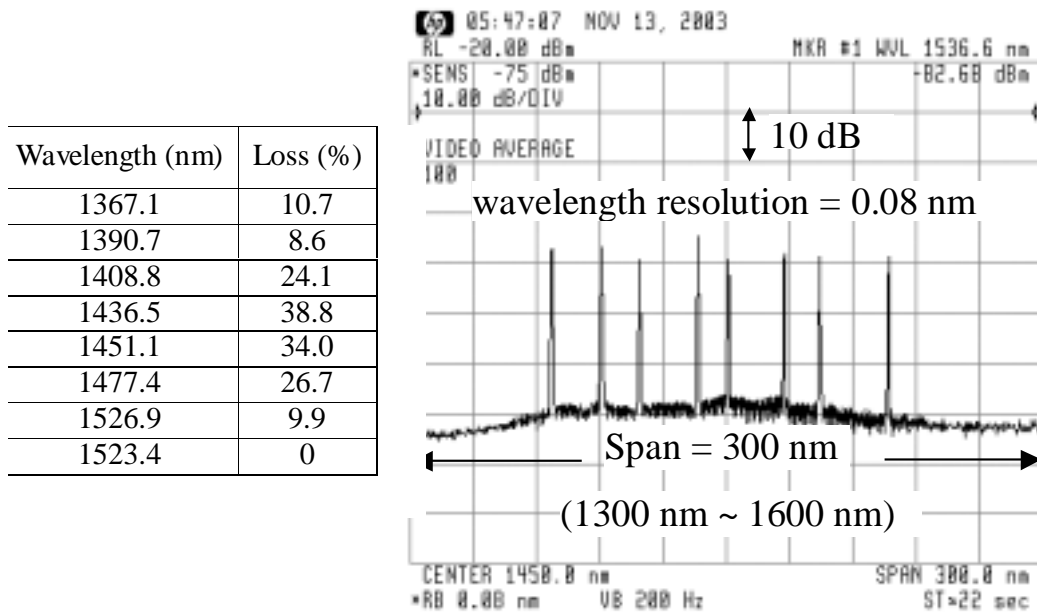


圖 7-2 多波長雷射的輸出頻譜輸出波長 (左到右) 1367.1, 1390.7, 1408.8, 1436.5, 1451.1, 1477.4, 1494.3 and 1526.9. 左邊是各波長的回授光路的衰減倍率

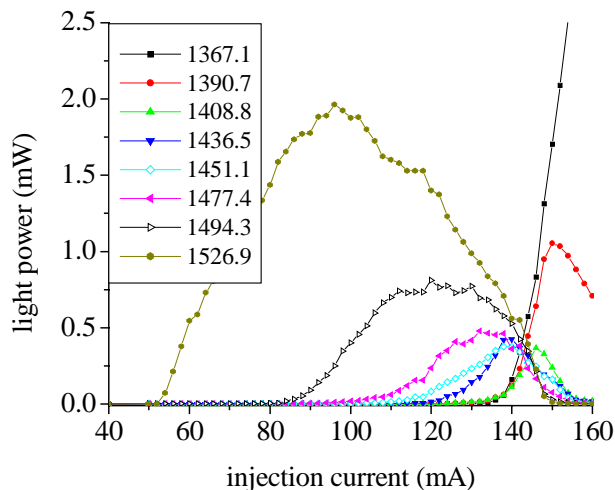
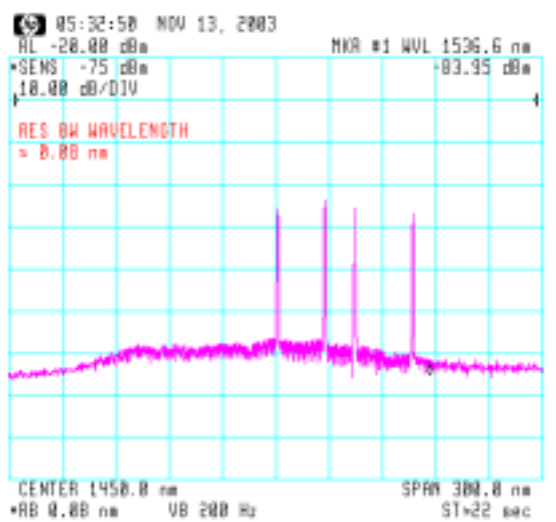
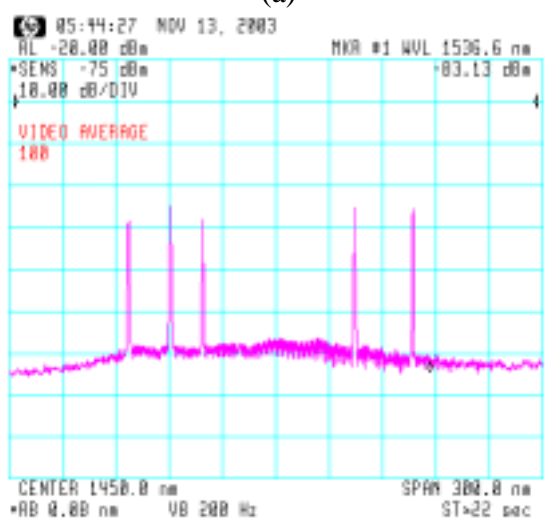


圖 7-3 多波長雷射的各波長輸出強度隨電流的變化



(a)



(b)

圖 7-4 關閉某些波長後的輸出頻譜(a)關閉左邊四道雷射(b) 關閉中間邊三道雷射