

東海大學物理系  
碩士論文

在具有平凹共振腔之半導體飽和吸收鏡  
被動鎖模摻釹釩酸釷雷射之研究

Passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> lasers  
with semiconductor saturable absorber  
mirror in a plano-concave cavity.

研究生：許偉綸

指導教授：吳小華 教授

中華民國九十九年七月

## 誌謝

首先，要先感謝吳小華老師的教導，讓我在做論文工作時可以為我解惑以及指點方向，也帶領我進入了雷射光學這個領域，增廣了我許多見識，衷心的感謝。

然後我也要感謝我的實驗室好夥伴琬怡，讓我在遇到瓶頸以及有煩惱時可以有抒發的空間，還有彥廷學長總是熱心地傳授經驗以及老師因忙碌而較少交待到的事項，系辦的學長姐們也都親切地提供我們所需要的資源，在此都獻上最真的感謝。

最後，這篇論文我要獻給我的父母，沒有他們的栽培和養育，我今天也沒辦法完成這項工作，養育之恩，三言兩語無法道盡心中的感謝。

最後僅以短短的幾行字，獻上感謝的心。

# 在具有平凹共振腔之半導體飽和吸收鏡被動鎖模 摻釹鈮酸鈮雷射之研究

研究生：許偉綸

指導教授：吳小華 教授

東海大學物理系

## 摘要

本論文探討將半導體飽和吸收鏡置於平凹共振腔內，來產生被動鎖模摻釹鈮酸鈮雷射。在使用飽和吸收為 2 % 之飽和吸收鏡時可得到穩定的連續波鎖模，在最大吸收功率為 1.3 W 之下，平均輸出功率為 240 mW，重覆率為 369 MHz，脈衝寬度為 11 ps。飽和吸收為 0.5 % 及 1 % 者皆可得到穩定之 Q 開關鎖模。當使用飽和吸收為 0.5 % 及 1 % 的飽和吸收鏡時，只能產生 Q 開關鎖模，其最大峰值功率分別為 1.3 kW 和 617.4 W。我們同時也利用五鏡式共振腔加以驗證此系統在長腔中依然可以運作。

# **Passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> lasers with semiconductor saturable absorber mirror in a plano-concave cavity.**

**Student: Wei-Lun Xu**

**Advisor: Dr. Hisao-Hua Wu**



**Department of Physics, Tungshai University**

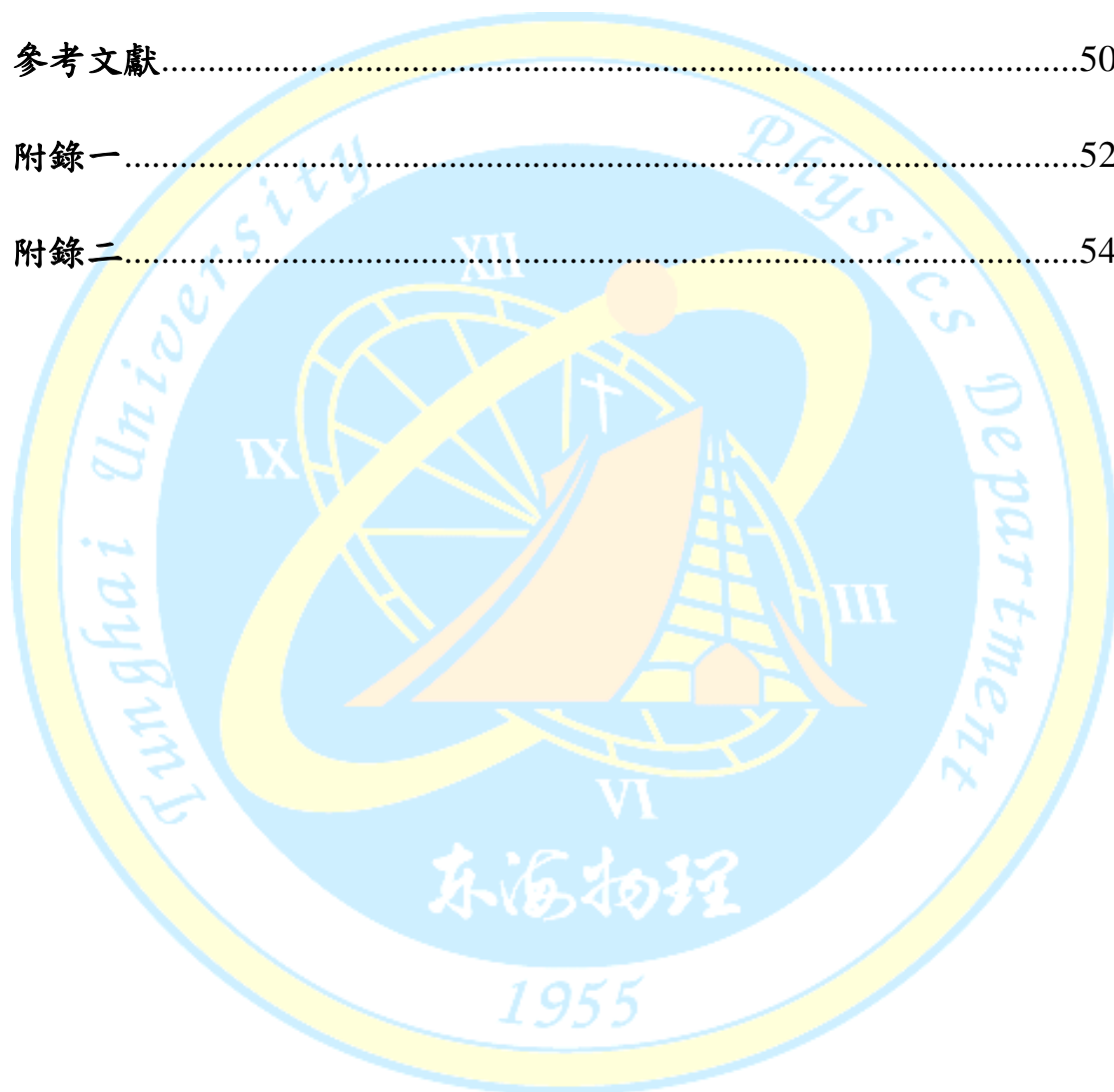
## **Abstract**

In this thesis, passive mode locking of diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers are investigated by placing a semiconductor saturable absorber mirror (SAM) in a plano-concave cavity. By using the SAM with 2 % absorbance, the laser is able to generate continuous wave mode-locked pulses with average output power of 240 mW, repetition rate of 369 MHz, and duration of 11 ps under absorbed pump power of 1.3 W. When the SAM with absorbance of 0.5 % and 1 % was used, the lasers could only operate at Q-switched mode locked state. The peak power as high as 1.3 kW and 617.4 W is achieved for the SAM with absorbance of 0.5 % and 1 %, respectively. Our scheme with a long cavity is also demonstrated in terms of a five elements resonator.

# 目錄

誌謝.....	I
摘要.....	II
目錄.....	IV
第一章 緒論.....	1
第二章 理論.....	5
2.1 穩定連續波鎖模的條件.....	5
2.2 共振腔內光點大小之分佈.....	7
第三章 平凹共振腔.....	11
3.1 實驗架構.....	12
3.2 飽和吸收為 2%之半導體飽和吸收鏡.....	15
3.3 飽和吸收為 0.5%之半導體飽和吸收鏡.....	22
3.4 飽和吸收為 1%之半導體飽和吸收鏡.....	26
3.5 結果與討論.....	29
第四章 五鏡式長腔.....	31
4.1 實驗架構.....	31
4.2 飽和吸收為 2%的半導體飽和吸收鏡.....	33
4.3 飽和吸收為 0.5%之半導體飽和吸收鏡.....	38
4.4 飽和吸收為 1%之半導體飽和吸收鏡.....	42

4.5 結果與討論.....	46
第五章 結論與未來展望 .....	47
5.1 結論.....	47
5.2 未來展望.....	49
參考文獻.....	50
附錄一.....	52
附錄二.....	54





## 緒論

在雷射系統中，脈衝雷射可以有較廣的應用層面，而為了得到短脈衝雷射，我們常使用所謂鎖模(mode locking)的方法。鎖模雷射可產生的相當短的脈衝，其寬度大都在皮秒級甚至是飛秒級的短脈衝。而產生鎖模的方法主要可分為兩類：主動鎖模(active mode locking)和被動鎖模(passive mode-locking)。

主動鎖模最常用的方法是在共振腔中加入聲光調制器(acousto-optic modulator)來調制振幅。調制週期設定成在共振腔中走一週程的時間(round trip time)。所以調制的頻率會受限於共振腔的長度，腔長縮短就意味著調制的頻率升高，所需的功率也會跟著增加，所以在設計上也會有極限。一般主動鎖模雷射所輸出的脈衝寬度較寬，設備也較為昂貴且龐大，操作上較為不易。

被動鎖模則是常用飽和吸收體(saturable absorber)作為鎖模元件，利用其非線性的吸收特性，對強光吸收少，對弱光吸收多，即可使共振腔內僅存脈衝型態的分佈。其優點是體積小，價格較為便宜且受共振腔長度的限制較小。飽和吸收體常見的是以有機染料或是半導體來作為材料，以有機染料為飽和吸體最成功的例子是脈衝碰撞鎖模

(CPM, collide-pulse mode-locked)。若以類似飽和吸收體相同效果的非線性效應，像是 Kerr 透鏡式鎖模(KLM, Kerr lens mode-locked)或是加成式脈衝鎖模(APM, additive pulse mode-locked)這類稱之為等效飽和吸收體。

將飽和吸收體和反射鏡結合在一起，利用半導體製程將反射鏡和量子井長於晶片上稱之為半導體飽和吸收鏡(SESAM, semiconductor saturable absorber mirror)，其基本結構下層通常為半導體反射鏡，上面生長一層半導體可飽和吸收薄膜，最上層再生長一層反射鏡或是直接利用半導體與空氣的介面作為反射鏡。因此，上下兩面反射鏡就形成了法布里-珀羅腔(Fabry-Perot cavity)。飽和吸收鏡最早在 1992 年被使用於產生被動鎖模，U. Keller 等人利用鈦藍寶石(Ti:sapphire)雷射和摻鉍氟鋰鈮晶體以及法布里-珀羅腔飽和吸收體(Fabry-Perot saturable absorber)，成功獲得寬度為 3.3 ps 的被動鎖模雷射[1]。而近十五年來，半導體飽和吸收鏡也成為被動鎖模雷射裡的關鍵元素[2]。也發展出不同形式的飽和吸收鏡，2005 年 T. R. Schibli 等人將飽和吸收體長在奈米碳管(carbon nanotube)上製成飽和吸收鏡，並獲得連續波鎖模 [3]。



相較於飽和吸收體，使用飽和吸收鏡來產生鎖模雷射是較為簡便的方法，通常只要共振腔內的功率夠高，加入飽和吸收鏡後即可得到鎖模，所受限的條件較小。2009年，Tao Li 等人使用雷射二極體來激發 Nd:LuVO<sub>4</sub> 晶體，利用半導體飽和吸收鏡來獲得穩定的連續波鎖模雷射，其脈衝寬度為 7.9 ps，在輸入功率為 22 W 之下最大平均輸出功率可達 7.6 W，峰值功率可達 9.2 kW[4]。2009年 H. R. Chen 等人也利用 Nd: LuVO<sub>4</sub> 晶體及半導體飽和吸收鏡來獲得寬度為 3.7 ps，最大吸收功率為 18 W，最大輸出功率為 1.67 W，峰值功率 3.47 kW 的穩定連續波鎖模 [5]。

然而，在上述實驗中由於半導體飽和吸收鏡多使用於端面鏡的緣故，在共振腔的兩端都為全反射鏡的情況之下，雷射光被迫在共振腔中間輸出，使得雷射共振腔往往都為較複雜的四鏡式以上的折疊腔，在操作上也增加了更多的困難度，且因為折疊腔中輸出光束會來自不同角度的反射鏡，而過多的反射鏡會使光產生像散的現象，也會造成輸出光束不唯一，及功率分散等缺點。若能改善這個缺點，進而以端面輸出的方式來利用飽和吸收鏡產生鎖模雷射，如此一來便可利用不同曲率半徑的凹面鏡來改變共振腔的長度，以符合不同需求的重覆頻率。

在本篇論文中我們以最大操作功率在 1.9 瓦之光纖輸出雷射二極體為幫浦(pumping)。我們選用  $\text{Nd:YVO}_4$  為雷射晶體，因為摻釹鈮酸鹽有著大的吸收截面和受激放射截面以及較寬的螢光譜線，較適合用在產生高功率的雷射二極體幫浦被動鎖模雷射[4][5][6][7]。半導體飽和吸收鏡做為反射鏡而不是做為端面鏡，部分反射的凹面鏡做為輸出耦合鏡，以簡單的二鏡式平凹共振腔來產生鎖模雷射，以獲得端面輸出的雷射光。

本篇論文將在第二章介紹使用半導體飽和吸收鏡來產生連續波鎖模和 Q 開關鎖模的理論，以及計算共振腔內的光點大小分佈。在第三章中，我們將探討以平凹共振腔和不同飽和吸收的半導體飽和吸收鏡，在反射率為 98 %的輸出耦合鏡之下，其所產生的連續波鎖模以及 Q 開關鎖模性質對於輸入功率以及共振腔長之關係。在第四章中我們將使用五鏡式的長腔重覆測試不同飽和吸收之飽和吸收鏡，然後觀察其產生的鎖模脈衝，來驗證這種系統在長腔之下也能運作。第五章將做總結以及未來的展望。

## 第二章 理論

被動鎖模可分為 Q 開關鎖模(Q-switching mode-locked)以及連續波鎖模(continuous wave mode-locked)，以下我們將介紹如何使用半導體飽和吸收鏡來獲得這兩種鎖模的基本原理。

### 2.1 穩定連續波鎖模的條件(The conditions of stable CW mode-locked)

在本章節中，我們要介紹獲得穩定連續波鎖模的條件與關係式 [8][9][10]。連續波鎖模是雷射產生一連串相同振幅的脈衝，而 Q 開關鎖模的脈衝振幅和 Q 開關的封包有關，所以起伏較大，相較之下比較不穩定，但是可以產生較高峰值功率的脈衝。

要獲得這兩種被動鎖模輸出的基本理論，我們可由共振腔內功率、增益和飽和吸收的速率方程式(rate equations)出發來推導。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{g - l - q_P(E_P)}{T_R}, \quad (2-1)$$

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{g - g_0}{\tau_L} - \frac{P}{E_{sat,L}} g, \quad (2-2)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q - q_0}{\tau_A} - \frac{P}{E_{sat,A}} q, \quad (2-3)$$

其中：

$P$  : 腔內平均功率 ;  $T_R$  : 腔內往返時間 ;  $E_P$  : 腔內鎖模脈衝能量 ;

$g$  : 與時間相關之腔內往返增益 ;  $\tau_A$  : 飽和吸收體之回復時間 ;

$q$  : 與時間相關之腔內往返飽和吸收 ;  $g_0$  :  $P=0$  時之  $g$  ;

$q_0$  :  $P=0$  時之  $q$  ;  $l$  : 腔內往返之損失 ;  $E_{sat,L}$  : 增益介質之飽和能量 ;

$E_{sat,A}$  : 飽和吸收體之飽和能量 ;  $\tau_L$  : 雷射增益介質之上層能階生命期 ;

$\tau_A$  : 飽和吸收體之回復時間 ;  $q_P(E_P)$  : 脈衝每次往返之能量損失。

然後我們可以藉由一些推導得到以下三個式子 :

$$E_P^2 > E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R \quad (2-4)$$

$$F_{P,A}^2 > F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R \frac{A_{eff,L}}{A_{eff,A}} \quad (2-5)$$

$$P^2 > F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R A_{eff,L} A_{eff,A} \frac{1}{T_R^2} \quad (2-6)$$

其中  $F_{sat,L}$  是增益介質上之飽和強度 ,  $F_{sat,A}$  是飽和吸收鏡上之飽和強度 ,  $\Delta R$  是飽和吸收鏡的調制深度 ,  $A_{eff,L} A_{eff,A}$  為增益介質及飽和吸收鏡上的有效模面積。

由(2-6)式我們可得產生連續波鎖模之腔內臨界功率 :

$$P \equiv \left( F_{sat,L} \cdot F_{sat,A} \cdot \Delta R \cdot A_{eff,L} \cdot A_{eff,A} \cdot \frac{1}{T_R^2} \right)^{1/2} \quad (2-7)$$

當腔內功率高於臨界功率時可獲得連續波鎖模 , 當腔內功率低於臨界功率時可獲得 Q 開關鎖模。

## 2.2 共振腔內光點大小之分佈

今考慮一共振腔長度為  $L$ ，兩端面鏡分別由厚度  $l$ 、折射率為  $n$  的雷射晶體以及曲率半徑為  $R$  的凹面鏡所組成，則共振腔內光束的傳播矩陣可寫成：

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L-l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L-l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{l}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 - \frac{2}{R} \left( L-l + \frac{l}{n^2} \right) & n \left( L-l + \frac{l}{n^2} \right) \left[ 2 - \frac{2}{R} \left( L-l + \frac{l}{n^2} \right) \right] \\ -\frac{2}{nR} & 1 - \frac{2}{R} \left( L-l + \frac{l}{n^2} \right) \end{bmatrix}$$

在共振腔內的  $q$  參數可表示為：

$$q(z + \text{round trip}) = q(z)$$

利用 ABCD law 可將上式改寫成

$$q(z) = \frac{Aq(z) + B}{Cq(z) + D}$$

化簡上式，並把  $AD-BC=1$  代入，整理後可得：

$$\frac{1}{q(z)} = -\frac{A-D}{2B} - i \frac{\left[ 1 - \left( \frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{B}$$



高斯光束的  $q$  參數可寫成：

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda_0}{\pi n w^2(z)}$$

對照二式可得：

$$\frac{n \pi w^2(z)}{\lambda_0} = \frac{B}{\left[ 1 - \left( \frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$w(z) = \left[ \frac{\lambda_0}{n \pi} \frac{B}{\left[ 1 - \left( \frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

將  $A$ 、 $B$  和  $D$  代入便可求出在雷射晶體上之光點大小。同理，我們也能以此方法計算出位於飽和吸收鏡以及輸出耦合鏡上之光點大小，畫出這三者隨著共振腔長度變化的關係圖，如圖 2-1 所示：

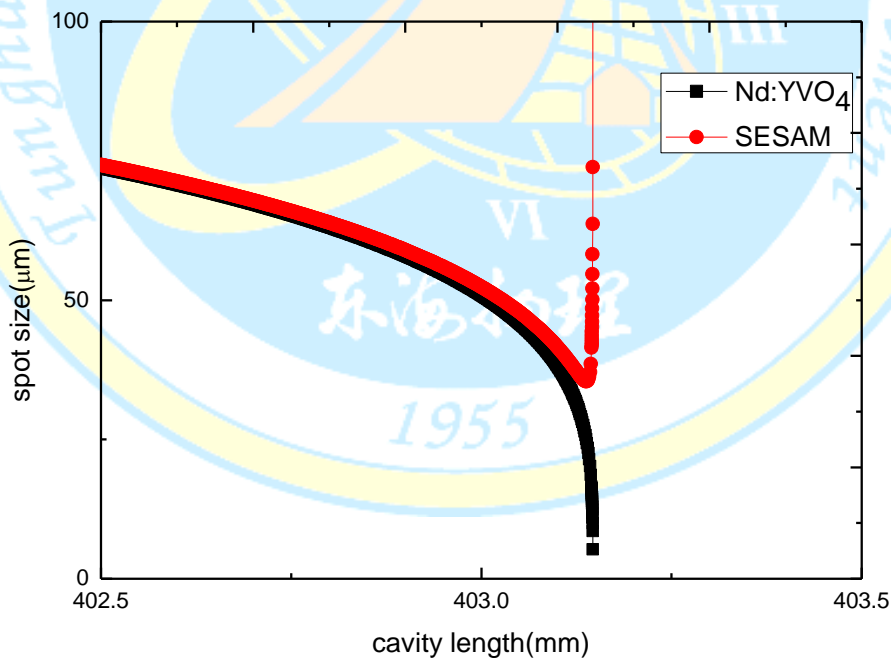
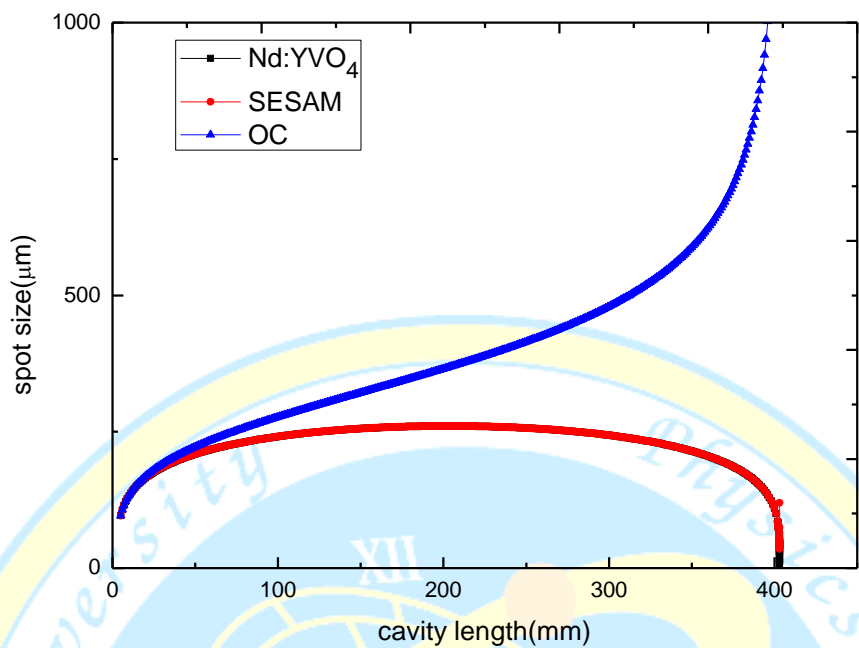


圖 2-1 共振腔長對不同位置上之光點大小關係圖

圖 2-2(a)是我們計畫改變共振腔的長度時，位於雷射晶體和半導體飽和吸收鏡以及輸出耦合鏡上光點大小之關係圖，圖 2-2(b)是在共振腔邊緣位於雷射晶體和半導體飽和吸收鏡之光點大小變化關係。若我們將計算出來的光點大小以及增益介質和飽和吸收鏡之參數代入(2-7)式計算，我們可得腔內臨界功率之理論值對共振腔長變化之關係，如圖 2-3 所示：

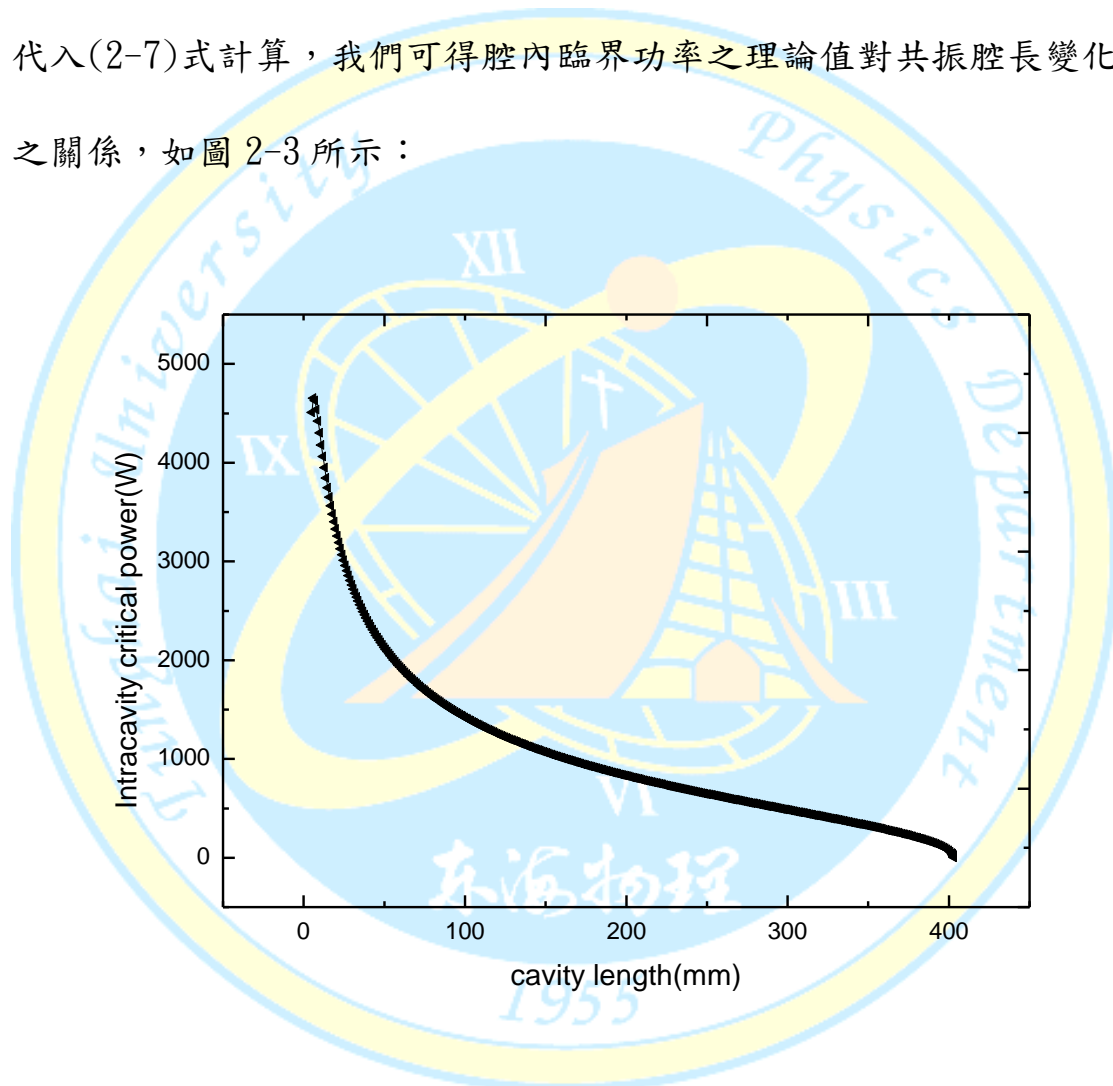


圖 2-2  $A_0=2\%$  SESAM 之腔內臨界功率對共振腔長度關係圖

### 第三章 平凹共振腔

平凹共振腔係由一面平面鏡及一面凹面鏡所組成的簡單共振腔，其中一面為部分反射的面鏡。平凹共振腔的優點在於其架構簡便，在調整光路的操作上也較為簡單，雷射共振腔的腔體長度也能操控在較短的腔長，以獲得較高的重覆率，而經過較少的折射和反射也能減少色散和像散的產生。

本章要介紹的是在平凹共振腔中置入飽和吸收為 2%、0.5% 以及 1% 的半導體飽和吸收鏡 (SESAM) 產生被動鎖模的實驗架構方法以及結果討論，詳細方法如下。



### 3.1 實驗架構

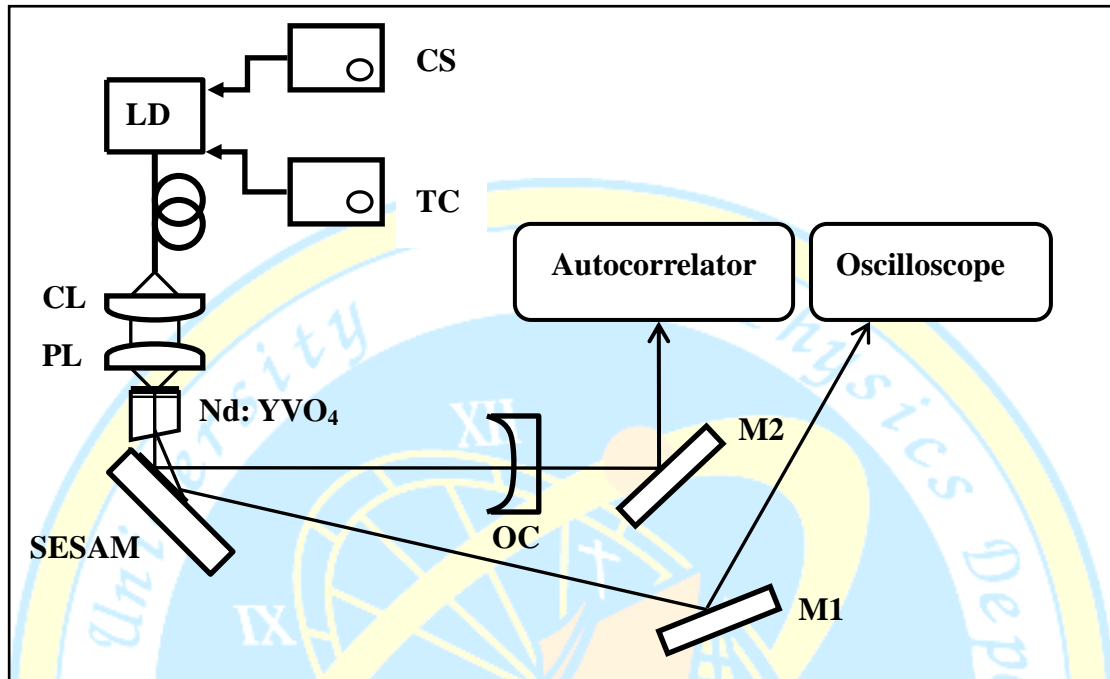


圖 3-1 實驗裝置圖

CS：電流源      TC：溫控器      LD：雷射二極體      CL：準直透鏡  
 PL：聚焦透鏡      Nd:YVO<sub>4</sub>：雷射晶體      OC：輸出耦合鏡  
 SESAM：半導體飽和吸收鏡      M1、M2：反射鏡  
 Autocorrelator：自相關干涉儀      Oscilloscope：示波器



本實驗使用摻釹鈮酸鈮( $\text{Nd:YVO}_4$ )為雷射晶體( $4\text{mm}\times 4\text{mm}\times 4\text{mm}$ )，摻釹量為 1 %，其輸入電流對吸收功率關係圖如圖 3-2 所示。實驗裝置如圖 3-1 所示，我們使用光纖輸出雷射二極體為激發光源，最大操作功率約 1.9 W，其操作時之峰值波長為 808 nm。雷射二極體由一穩定電流源來供應電流，並且以溫度控制器對雷射二極體作溫度控制，使雷射二極體能產生穩定的輸出功率及波長，圖 3-3 為雷射晶體之吸收功率對輸出功率之關係圖。雷射增益介質摻釹鈮酸鈮一面鍍上激發光 808 nm 的抗反射鍍膜(AR coating)以及雷射光 1064 nm 的高反射鍍膜(HR coating)，作為雷射共振腔的端面鏡使用。另一面則是鍍上雷射光的抗反射膜並在製作時切割成和光軸有 2 度的斜角以防止次共振腔的產生，也因為這個斜角使得雷射光會經由晶體的斜面和 SESAM 的反射而多出一道較弱的輸出，利用這道較弱的輸出恰好可同時監看輸出功率和脈衝圖形的關係。在半導體飽和吸收鏡的方面我們選用 BATOP 公司出產 SAM-1064-X-25.0s 的飽和吸收鏡。其操作波長為 1064 nm。我們先將雷射晶體的位置固定，將準直透鏡和聚焦透鏡架於晶體前的平移台上，將半導體飽和吸收鏡架於晶體之後使其盡量靠近雷射晶體，選用曲率半徑為 40 cm，反射率為 98 % 的凹面鏡為輸出耦合鏡，將其架設在平移台上，以便我們可以透過改變共振腔的長度來控制位於雷射晶體和飽和吸收鏡上的光點大小。

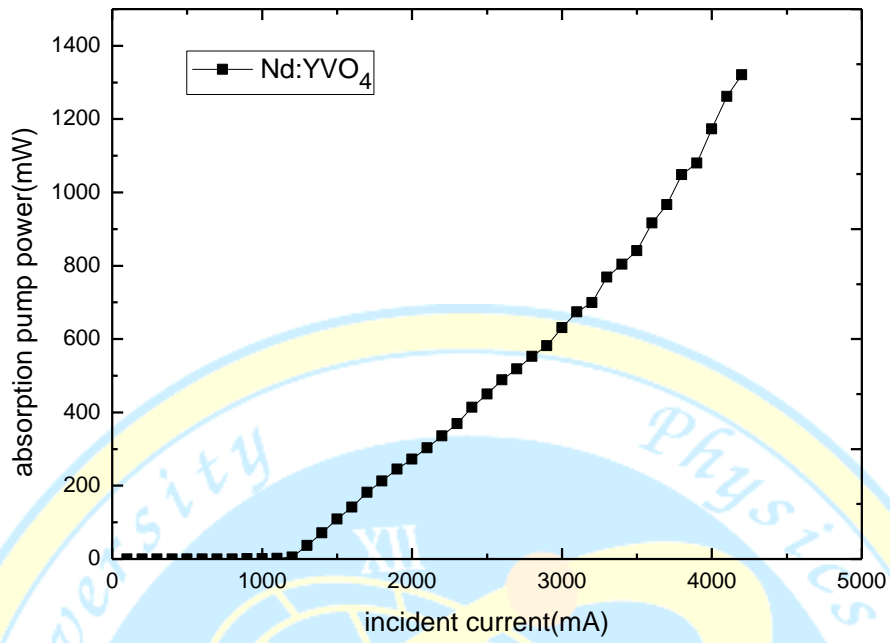


圖 3-2 輸入電流對吸收功率之關係圖

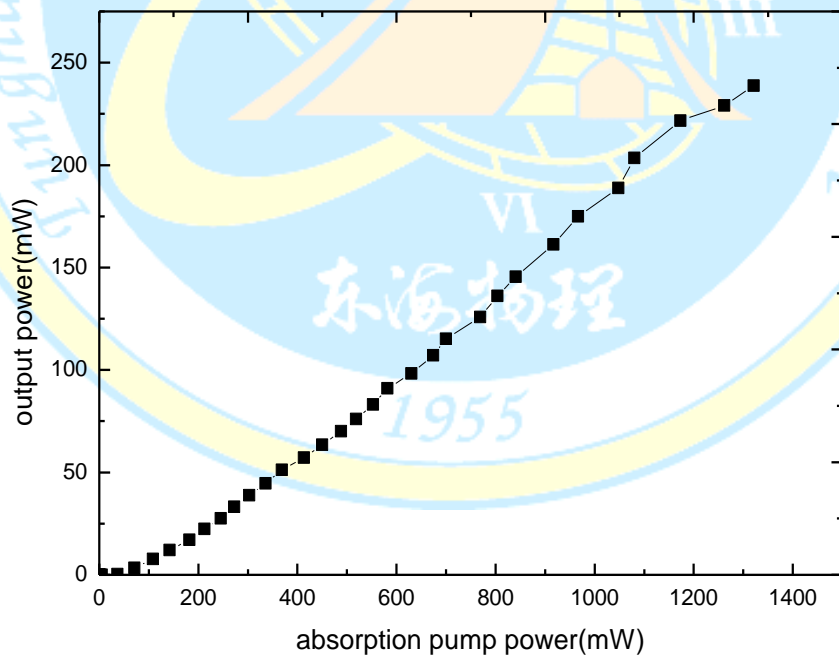


圖 3-3 吸收功率對輸出功率之關係圖

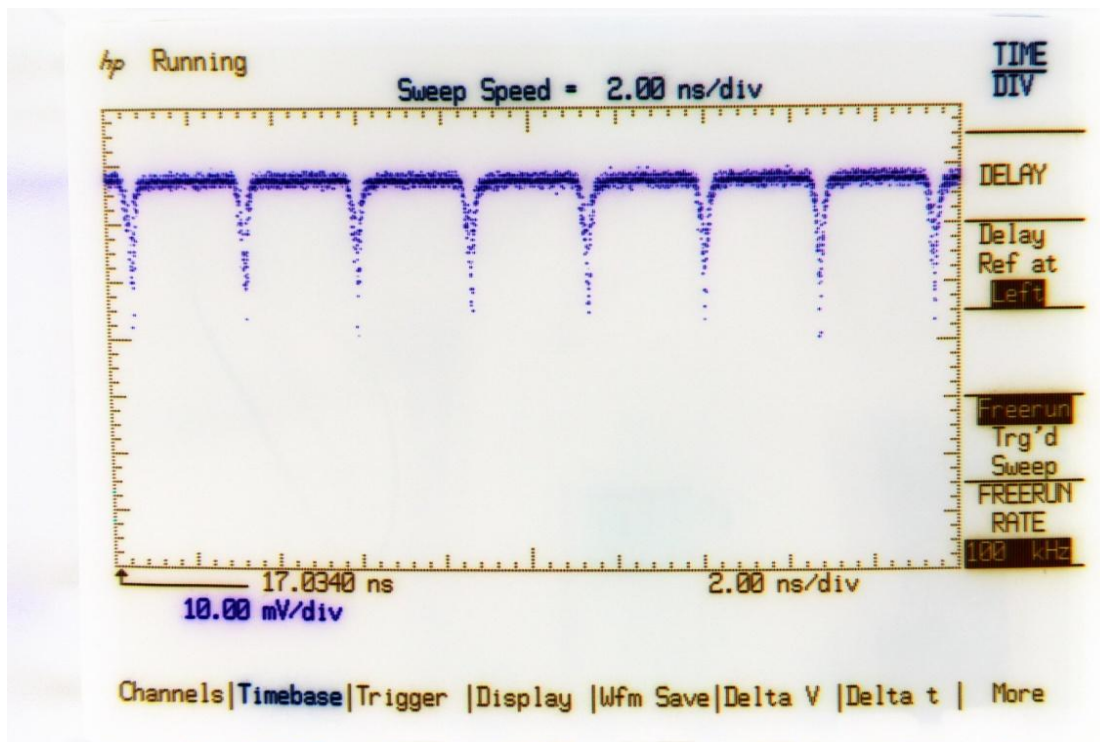
### 3.2 飽和吸收為 2% 之半導體飽和吸收鏡

首先，我們先將飽和吸收鏡拆下，取一曲率半徑為 8 cm 的凹面鏡進行對光，凹面鏡靠近晶體時，調整晶體的角度，遠離時則調整面鏡的角度，使分裂的光點合而為一。如此一來若雷射光不論在短腔或長腔的位置都能有漂亮的光點輸出，就能確定產生雷射之後的光路是平行於桌面。接著我們將飽和吸收為 2 % 飽和吸收鏡架上，一樣使用曲率半徑較短的輸出耦合鏡，調整飽和吸收鏡的角度，讓雷射晶體的受激放射光藉由飽和吸收鏡反射至面鏡中央，接著轉動面鏡使反射光點打回飽和吸收鏡上，產生雷射之後再將曲率半徑 40 cm 的輸出耦合鏡(OC)架在雷射的光路上，調整輸出耦合鏡的高度使雷射光能打在 OC 的正中央。接著拿掉 8 cm 的凹面鏡，調整輸出耦合鏡的反射光點是否打回飽和吸收鏡上，產生雷射光產生之後便微調鏡架上的旋鈕使光點變成單一的圓形光點。接著重覆對光的動作，推動平移台使 OC 往飽和吸收方向鏡移動，在腔長最短的位置時調整雷射晶體或 SESAM 的角度使光點維持在單一光點，然後將平移台推回長腔的位置，調整 OC 的角度，一樣使輸出的光點維持在單一光點，反覆數次直到輸出的光點不論腔長如何變化都不會分裂為止。之後便可調整準直透鏡和聚焦透鏡的旋鈕以及平移台使雷射優化。

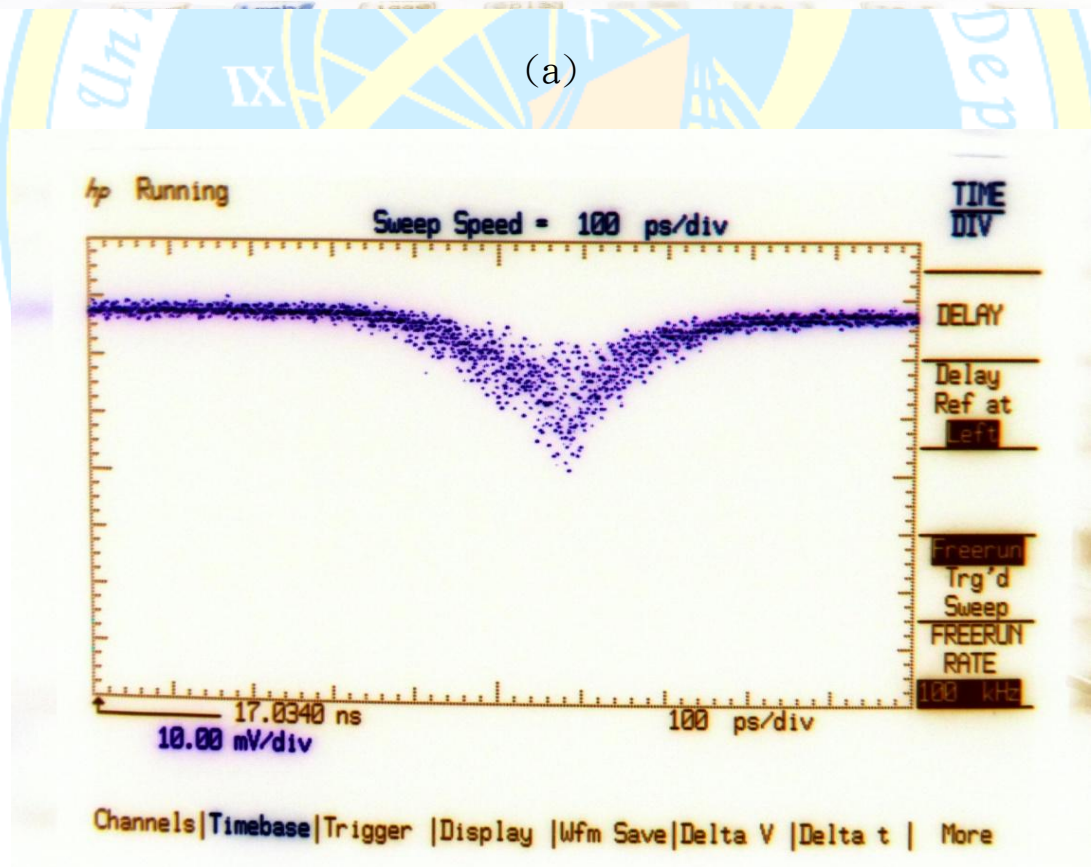
接著我們將共振腔的長度調整至 40 cm 附近，輸入電流為 3800 mA，將主要輸出光束打入光功率偵測器中，另一道經由晶體斜面和半導體飽和吸收鏡反射而得的較微弱的輸出光束打入取樣示波器中，並且留意高速光偵測器的讀數不可超過 1 mA。調整取樣示波器 Trigger，使畫面上出現脈衝圖形，如圖 3-4 所示，接著微調共振腔的長度以及輸出耦合鏡與雷射晶體的角度，觀察示波器上脈衝圖形的變化，當脈衝圖形明顯變窄且清晰時，如圖 3-5 所示，此時即為單一脈衝鎖模。輸入電流為 4200 mA，脈衝重覆率為 369 MHz，換算後共振腔長為 407.6 mm，最大輸出功率為 240 mW。







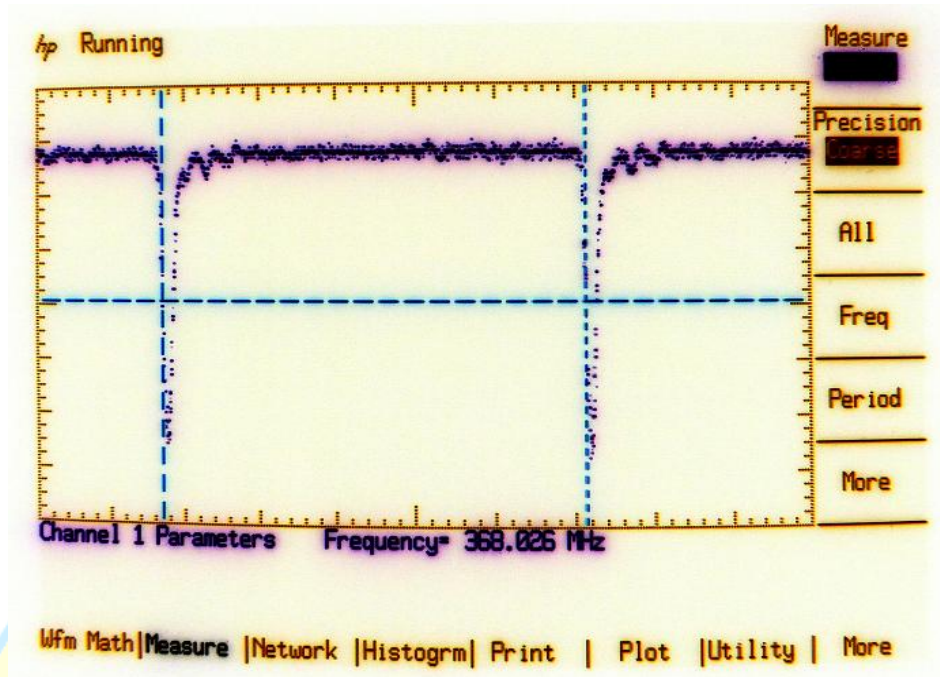
(a)



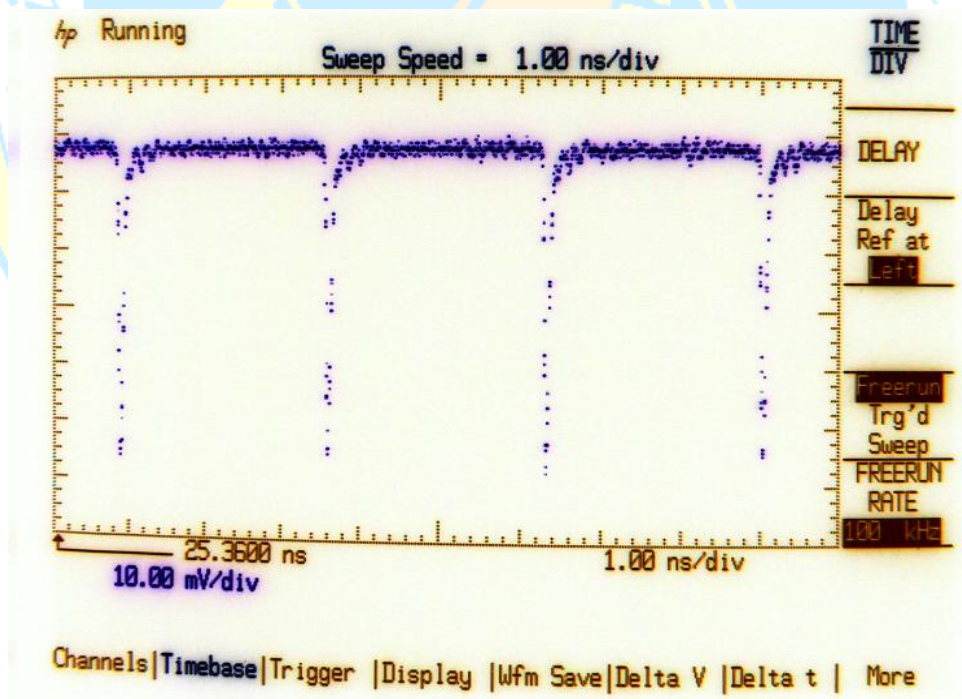
(b)

圖 3-4 取樣示波器觀測到脈衝連續波鎖模圖形(a)脈衝列(b)單一週期多脈衝。

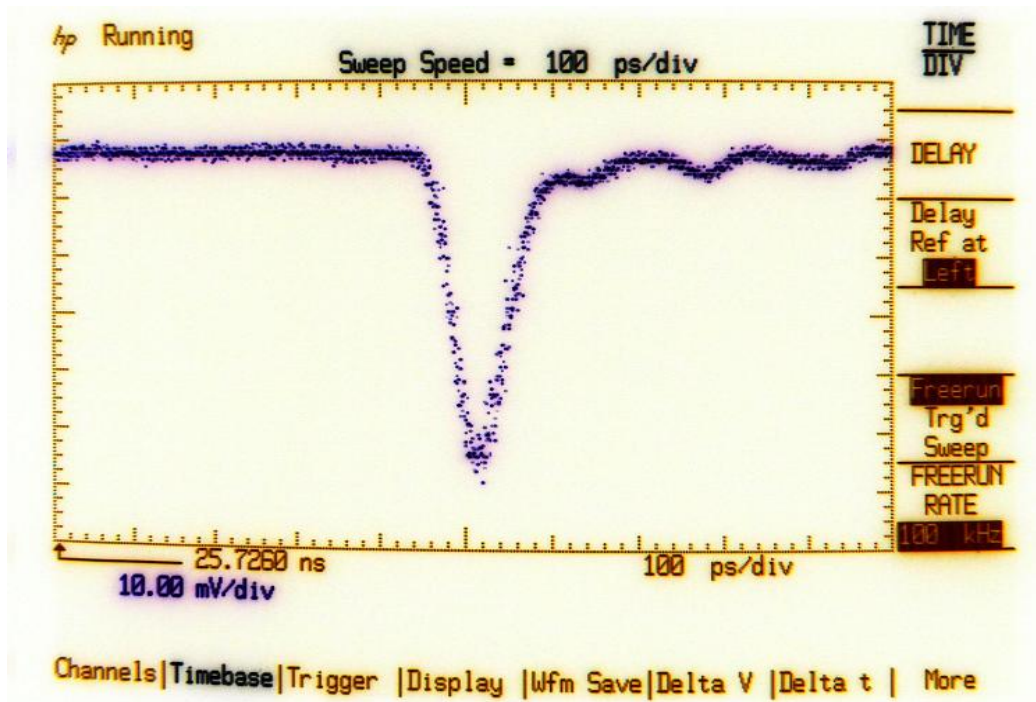




(a)



(b)



(c)

圖 3-5 取樣示波器所觀測到單一脈衝的圖形(a)重覆率 368.02MHz (b)脈衝列 (c)單一週期之單脈衝圖形。

記錄平移台上的刻度以及能產生單一脈衝的區間以及對應的輸出功率。接著我們推動平移台，測量改變共振腔長度時輸出功率之變化，如圖 3-6 所示。接著我們觀察單一脈衝出現的區間並記錄與輸出功率之間的關係，如圖 3-7 所示。橘色的部分為單一脈衝出現的區間，我們可以看出隨著輸入電流的提升，單一脈衝的區間也隨著往穩定區邊緣移動。而在輸入電流為 3600 mA 以及 3800 mA 時，其產生單一脈衝的區間最長。

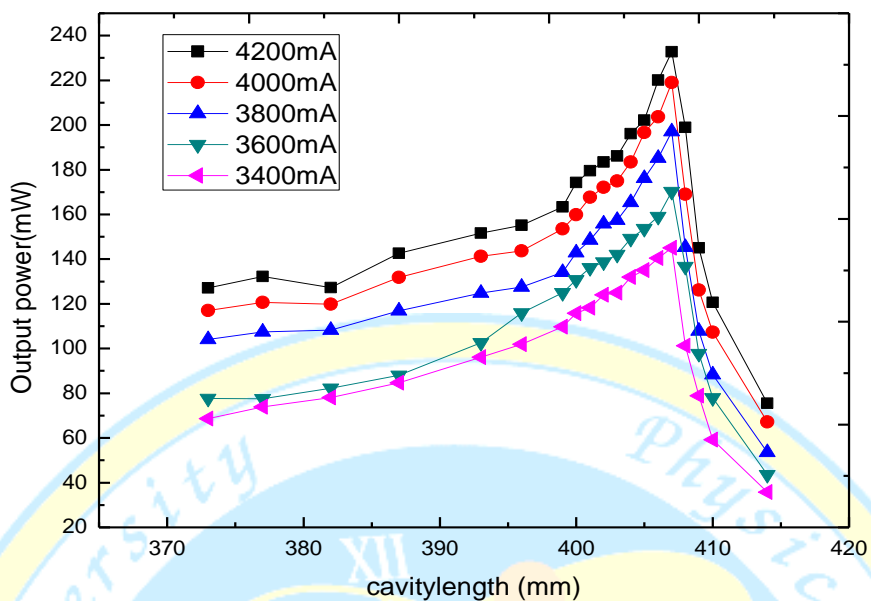


圖 3-6 不同輸入電流下共振腔長與輸出功率之關係圖

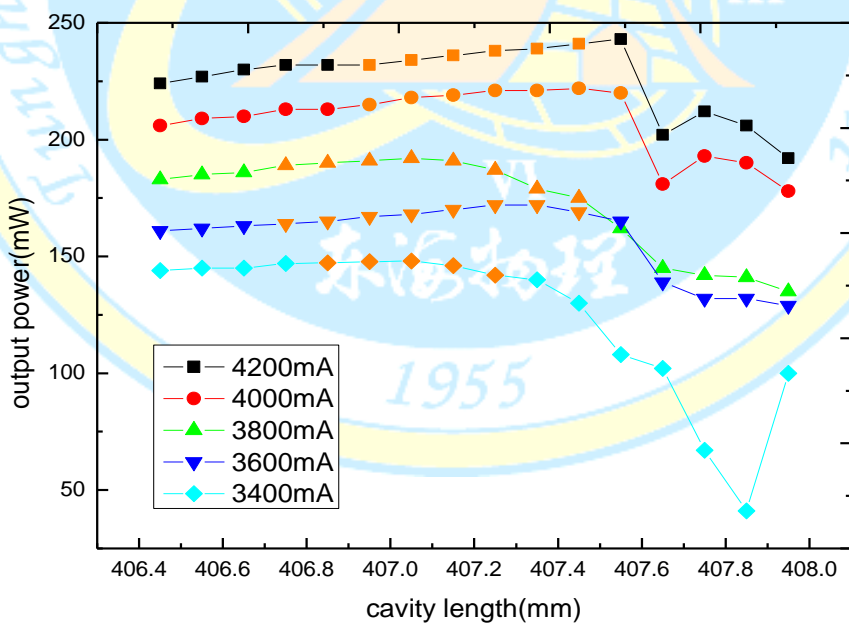


圖 3-7 不同輸入電流之下出現單一脈衝區間與輸出功率之關係圖

在記錄腔長對輸出功率的關係圖時，我們的重點著重在會出現穩定單一鎖模脈衝的區間做觀測。在推動平移台時我們發現輸出功率的最大值發生在穩定腔長的附近，然而，如果我們將輸出功率最大值附近放大觀測的話會發現最大輸出功率隨著輸入電流的變化並不會固定在同一個位置。

接著我們使用 COHERENT 公司出產，型號：FR103 Autocorrelator 自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，如圖 3-8 所示：

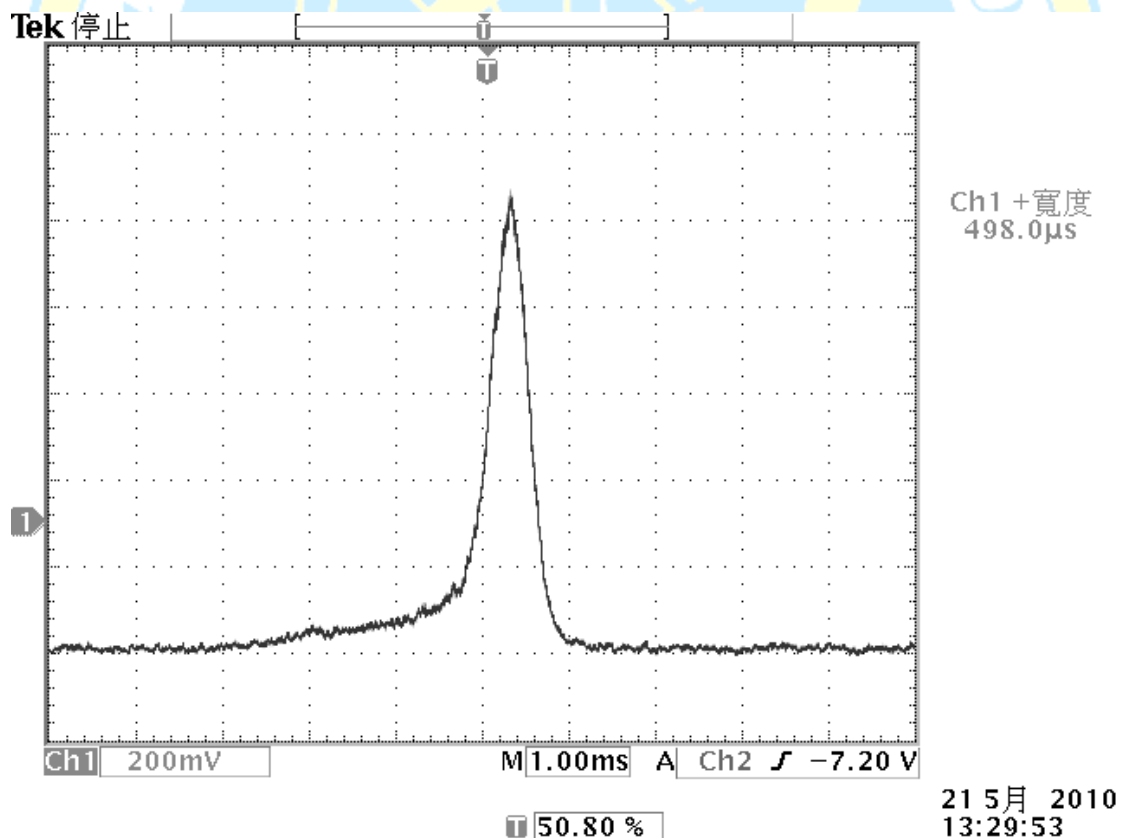


圖 3-8 自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形

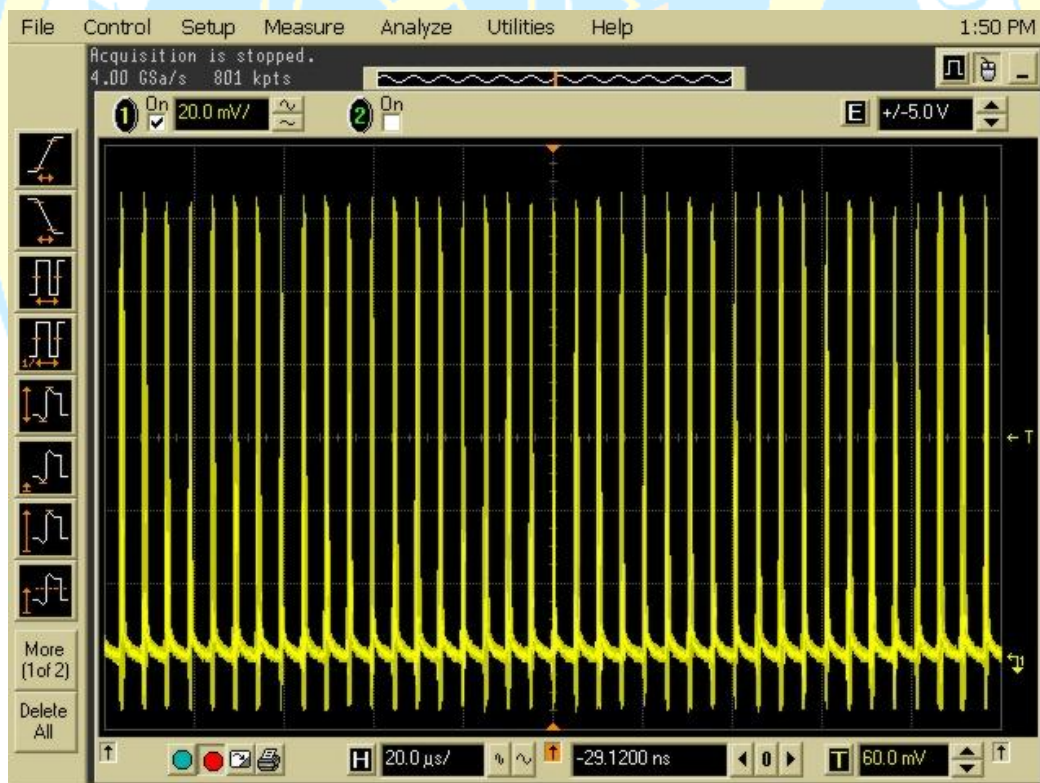
圖 3-8 是在吸收功率為 1.3 W，輸出功率為 240 mW，此時所看到的是單一脈衝的連續波鎖模雷射，換算後所得之脈衝寬度為 11 ps



### 3.3 飽和吸收為 0.5% 之半導體飽和吸收鏡

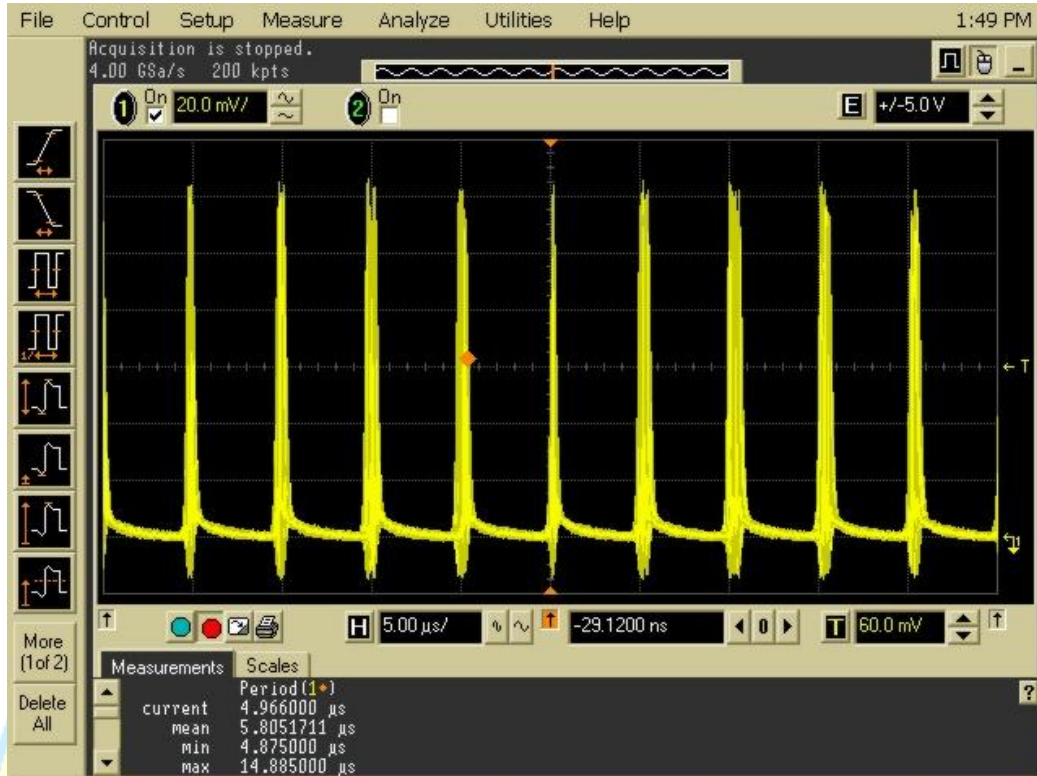
我們將原先飽和吸收為 2 % 的飽和吸收鏡換成飽和吸收為 0.5 % 的半導體飽和吸收鏡，一樣使用曲率半徑為 40 cm，反射率為 98 % 的凹面鏡為輸出耦合鏡。由於對光的工作先前都已完成，故我們只需將半導體飽和吸收鏡拆換，調整其角度讓雷射產生即可。

接著我們使用一般的示波器觀察產生鎖模的情況，如圖 4-2 所示：

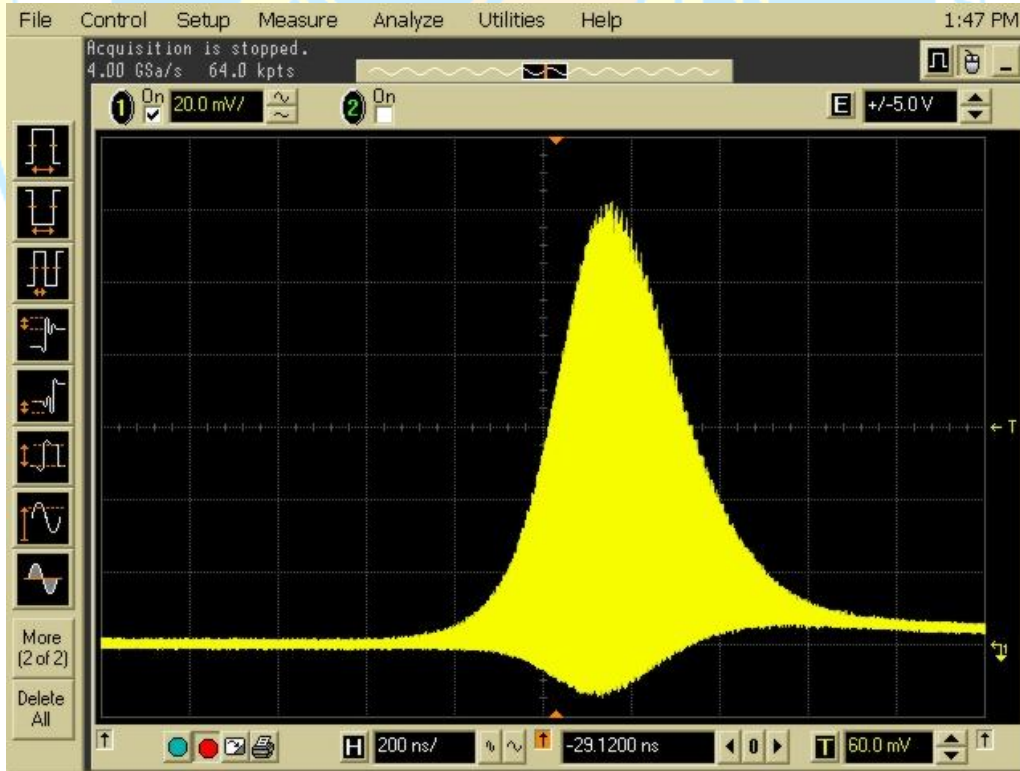


(a)

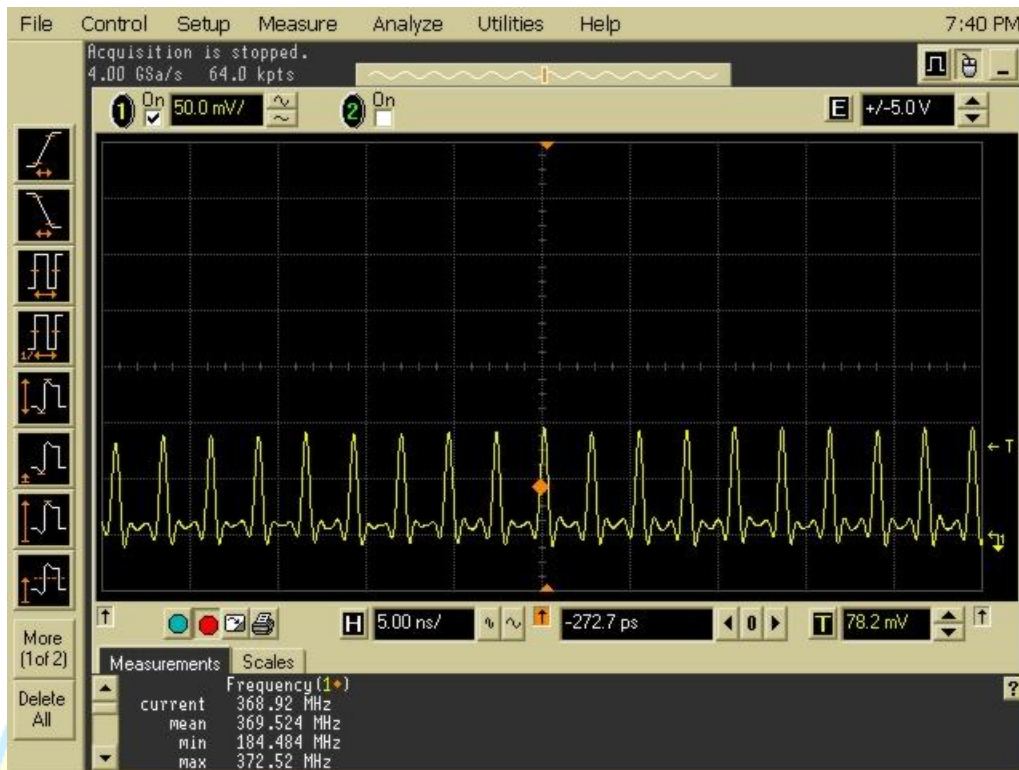




(b)



(c)



(d)

圖 3-9 示波器觀測到之 Q 開關鎖模圖形(a)穩定 Q 開關鎖模脈衝列  
(b)脈衝重覆率(c)單一週期之 Q 開關脈衝封包(d)鎖模脈衝

圖 3-9 中我們看到在這個裝置之下使用飽和吸收為 0.5 % 的半導體飽和吸收鏡所產生的 Q 開關鎖模。在輸入電流為 4200 mA，輸出功率為 307 mW，我們可以看到穩定的 Q 開關鎖模，其脈衝週期如(b)所示為 5.8  $\mu$ s，寬度如(c)所示約為 340 ns。

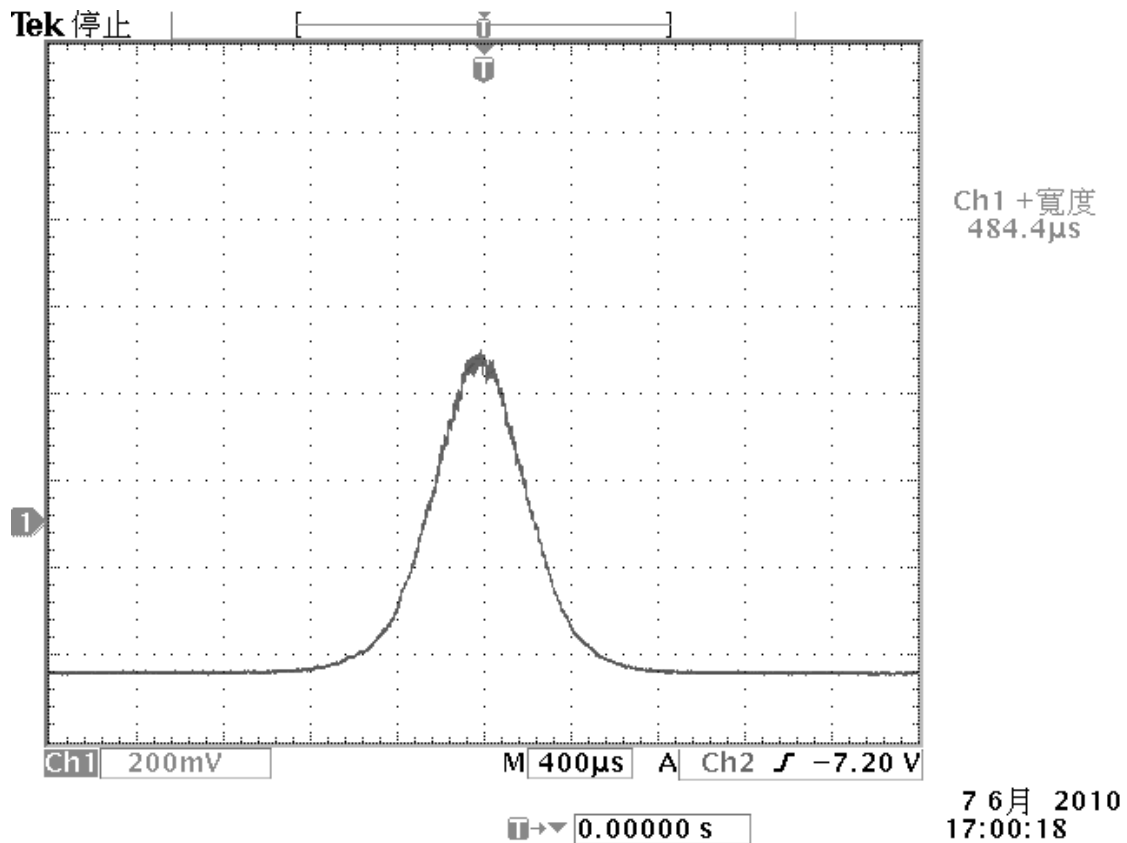
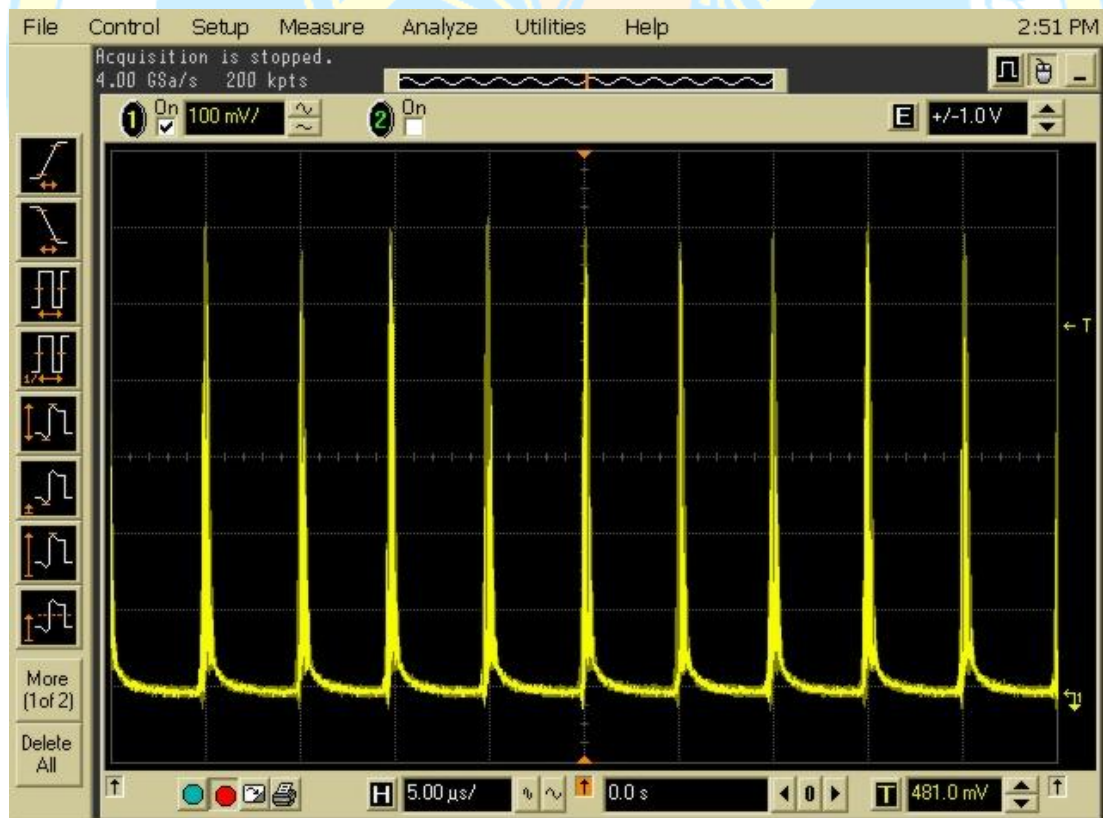


圖 3-10 自相關干涉儀所觀測到之 Q 開關鎖模圖形

圖 3-10 是我們使用自相關干涉儀量測 Q 開關鎖模脈衝寬度所得到的圖形，輸入電流為 4200 mA，輸出功率為 307 mW，經過換算之後得到的脈衝寬度為 11 ps，最大峰值功率約為 1.3 kW。

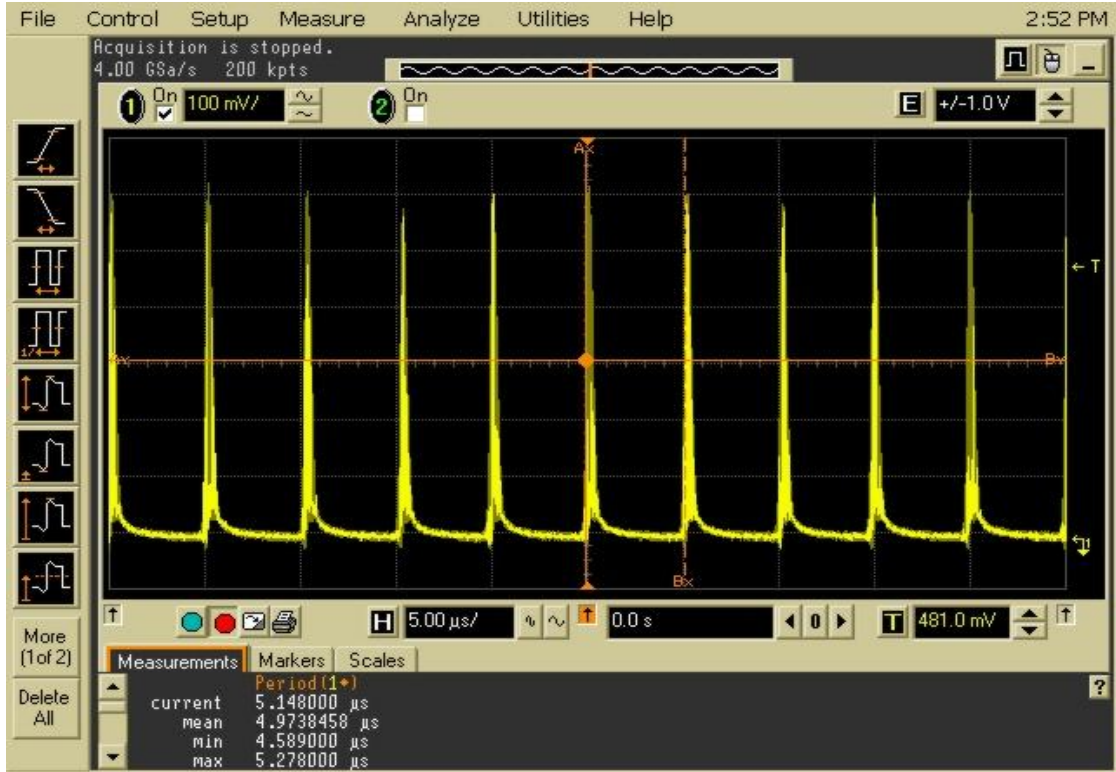
### 3.4 飽和吸收為 1% 之半導體飽和吸收鏡

接著我們使用飽和吸收為 1 % 的 SESAM，重覆上述實驗步驟，分別使用示波器以及自相關干涉儀來觀測其脈衝圖形，如圖 3-11、圖 3-12 所示。我們可以看到在共振腔邊緣時可得到穩定的 Q 開關鎖模圖形，其最大輸出功率為 336 mW，Q 開關週期如圖 3-11(b) 所示為 4.9  $\mu$ s，寬度如圖 3-11(c) 所示為 360 ns。鎖模脈衝週期如圖 3-11(d) 所示為 2.7 ns，脈衝寬度如圖 3-12 所示約為 20 ps，換算可得 Q 開關鎖模之最大峰值功率約為 617.4 W。

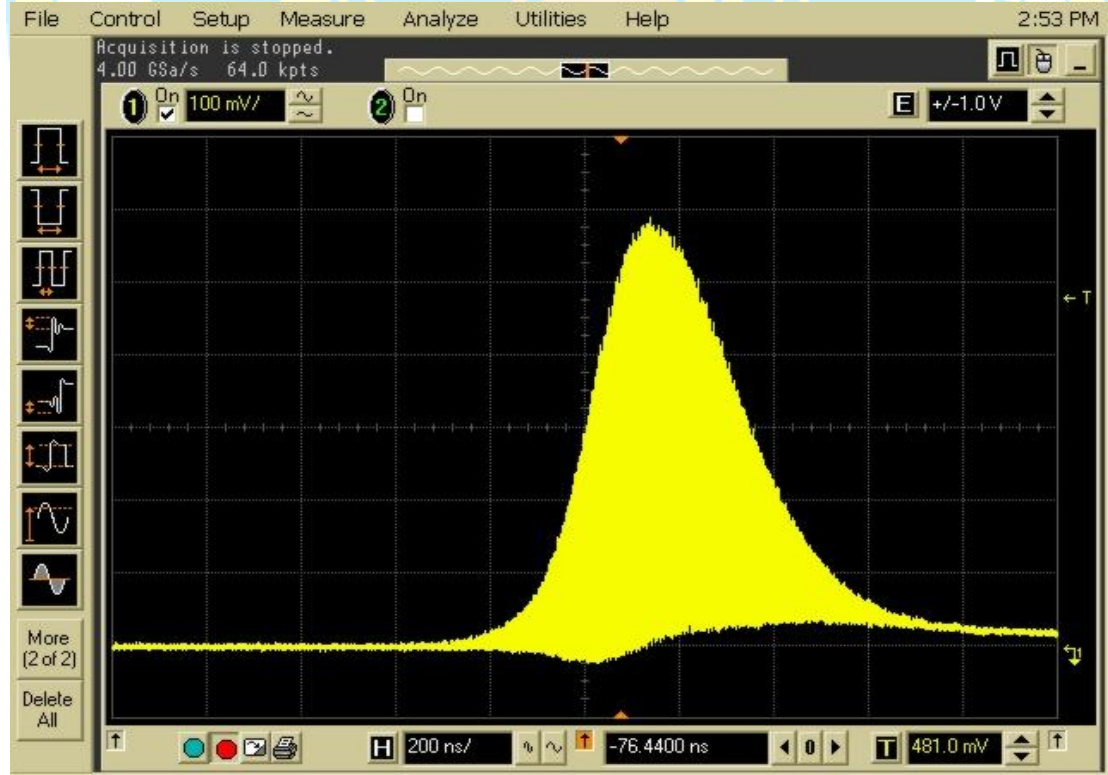


(a)



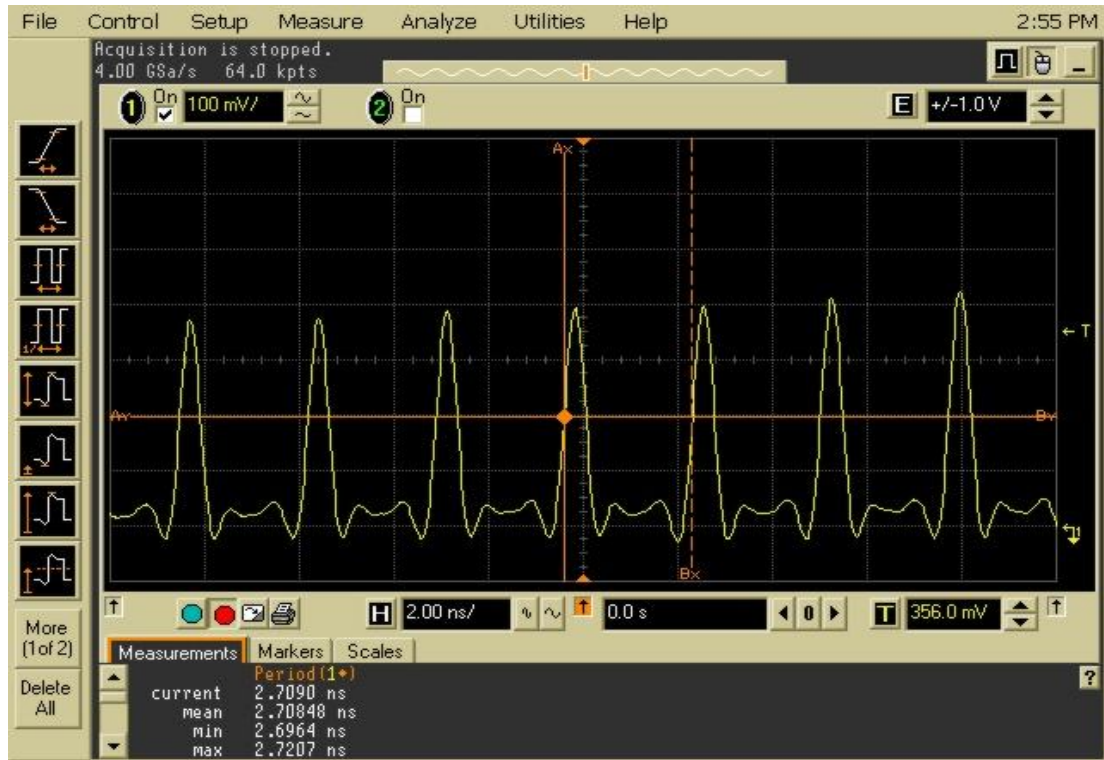


(b)



(c)





(d)

圖 3-11 示波器所觀測之 Q 開關鎖模 (a) 脈衝列 (b) 週期 (c) 封包寬度 (d) 鎖模週期

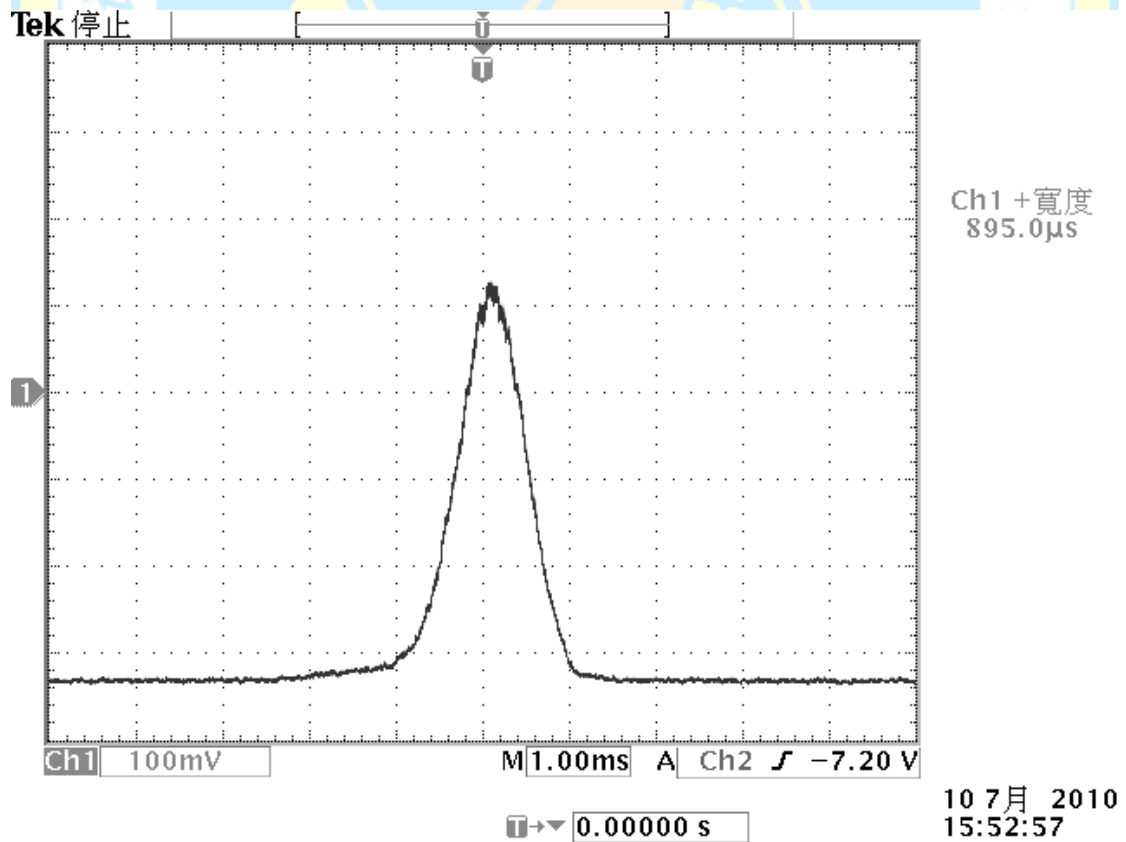


圖 3-12 自相關干涉儀所觀測之鎖模脈衝寬度圖形

### 3.5 結果與討論

在本實驗中，利用飽和吸收為 2 %、1 % 以及 0.5 % 的半導體飽和吸收鏡置於平凹共振腔中當做反射鏡，使用 2 % 的可獲得一重覆率為 369 MHz，最大輸出功率 240 mW，脈衝寬度為 11 ps，最大峰值功率約 60.25 W 之連續波鎖模。我們發現所觀測到的鎖模脈衝雷射並非為單一脈衝，在大部分的區間內都是以多脈衝的形式存在，只有在特定的共振腔長度之下才會觀測到單一脈衝的出現，並且隨著輸入功率的改變，其區間也會跟著改變。而飽和吸收分別為 0.5 % 以及 1 % 的半導體飽和吸收鏡可產生穩定的 Q 開關鎖模，前者在輸入電流為 4200 mA 時可得到 1.3 kW 的最大峰值功率，後者可得 617 W 之最大峰值功率。

依照第二章第一節的理論部分，我們知道若欲產生穩定之連續波鎖模，則位於雷射晶體和半導體飽和吸收鏡上之光點大小需愈小，但本實驗中所量測到之數據，其穩定的共振腔長度較我們在第二章所計算的部分為長，疑似是熱透鏡效應所造成的影響。不過若依照第二章第二節所計算的光點大小來看，在共振腔邊緣的位置的確能在雷射晶體和飽和吸收鏡上都有著較小的光點，但是在我們的雷射系統中，光束並不是垂直入射於飽和吸收鏡上，導致半導體飽和吸收鏡上的光點並非圓形而是橢圓，這也使得位於入射在飽和吸收鏡上的能量分佈並不

均勻，或者是因為半導體飽和吸收鏡非用在端面使用，這是否直接影響到多脈衝形成的原因，值得深入探討。

而依照第二章所介紹之共振腔內臨界功率的關係來看， $\Delta R$  愈小者所需的臨界功率愈小，也就是說在相同電流源之下應更容易產生連續波鎖模，但是比較 3.3、.3.4 的實驗結果和 3.2 的結果卻發現和理論相違背，這是否意味著我們所使用的 SESAM 原先是設計取向是讓光源垂直入射，而我們的實驗是以接近  $45^\circ$  角的入射角入射，斜向入射的結果也可能造成飽和吸收鏡上最大反射率的中心波長產生藍移 (Blue shift) 的現象，而導致 SESAM 的部分參數也隨之變動，這個部分也值得再深入探討。

## 第四章 五鏡式長腔

本章節我們將討論使用五鏡式的直式共振腔，利用曲率半徑無窮大，反射率為 98 % 的平面鏡為輸出耦合鏡，分別測試飽和吸收為 2 %、0.5 % 以及 1 % 的半導體飽和吸收鏡所產生的被動鎖模雷射。

### 4.1 實驗架構

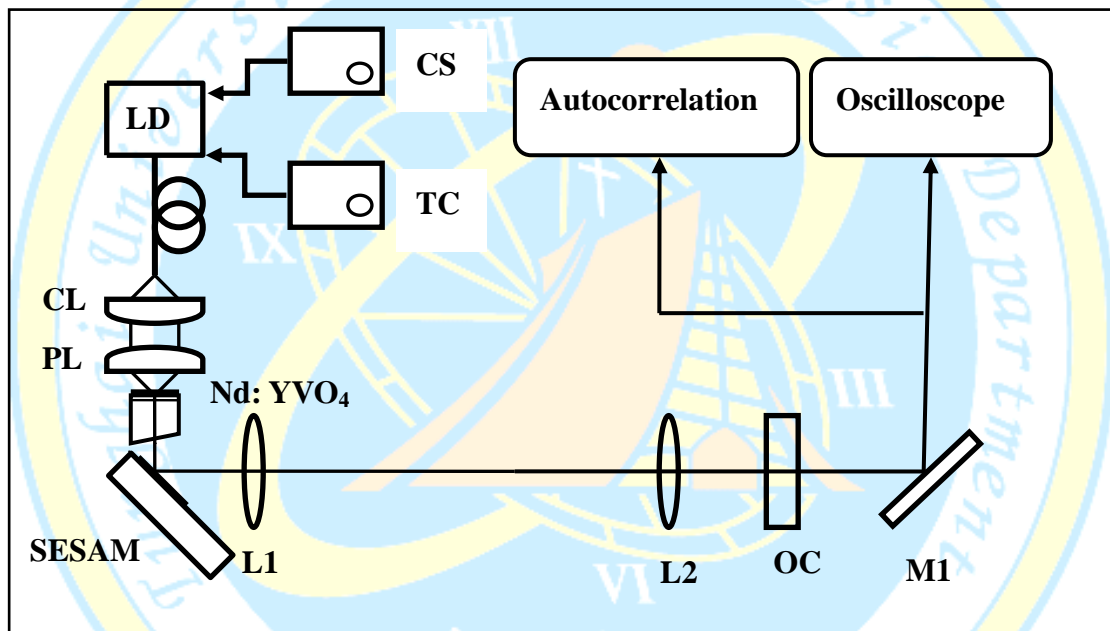


圖 4-1 實驗裝置圖

CS：電流源      TC：溫控器      LD：雷射二極體      CL：準直透鏡

PL：聚焦透鏡      Nd:YVO<sub>4</sub>：雷射晶體

SESAM：半導體飽和吸收鏡      L1：透鏡 1      L2：透鏡 2

OC：輸出耦合鏡      M1：反射鏡

Autocorrelator：自相關干涉儀      Oscilloscope：示波器



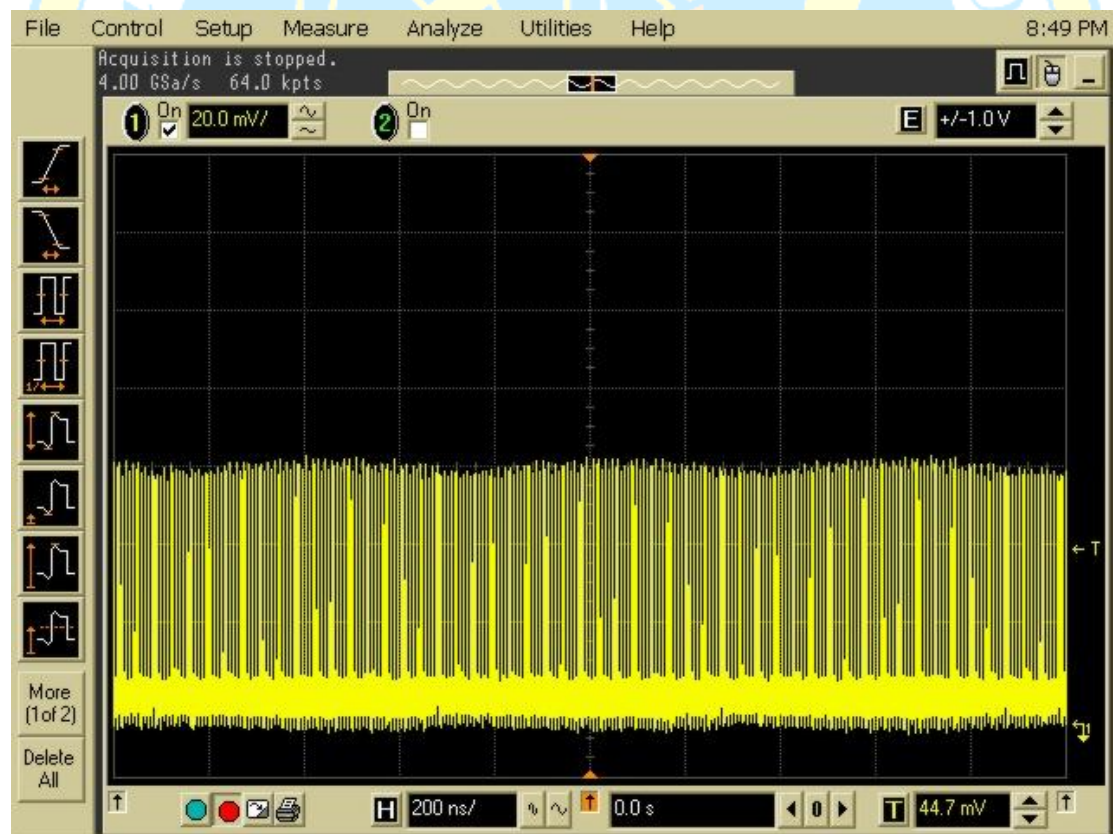
實驗裝置如圖 4-1 所示，我們將原先曲率半徑 40 cm，反射率 98 % 的輸出耦合鏡換成反射率 98 % 的平面鏡，將共振腔長拉長至 100 cm，然後我們使用兩面焦距為 7 cm 的平凸透鏡，其中一面架於半導體飽和吸收鏡後方之平移台上，另一面則架設在輸出耦合鏡前方之平移台上形成五鏡式之直形共振腔。

首先我們先置輸出耦合鏡於距飽和吸收鏡 40 cm 處，將透鏡 1 架設在距飽和吸收鏡 7 cm 處，也就是約為焦距的位置，調整透鏡 1 的高度，使經透鏡 1 聚焦後之光束能打在已調整過高度之輸出耦合鏡的中央。固定好透鏡 1 之後，我們調整輸出耦合鏡的角度，使經過輸出耦合鏡反射後的光束能與入射光束重合以產生雷射。之後我們逐漸將輸出耦合鏡往長腔方向移動，移動過程中調整輸出耦合鏡的角度使之產生雷射，最後到達我們預定的腔長位置後，調整透鏡 1 的角度讓輸出的雷射光為單一光點，之後加上透鏡 2 於輸出耦合鏡前約 7 cm 的位置，然後調整透鏡 2 的高度使光束能打在面鏡的中央，接著調整面鏡的角度使之產生雷射，產生雷射後我們一樣調整透鏡 2 的角度讓雷射光點保持圓形，然後在 OC 的後方加上一濾鏡，以濾掉 808 nm 的激發光源，之後固定住所有元件，只更換半導體飽和吸收鏡。



## 4.2 飽和吸收為 2 % 的半導體飽和吸收鏡

首先我們選用飽和吸收為 2 % 的半導體飽和吸收鏡，將受激輻射光打在飽和吸收鏡的中央，調整飽和吸收鏡的角度，當置於 OC 後方的 IR card 上出現雷射光點之後，固定飽和吸收鏡之鏡架，調整 OC 的角度讓光點為圓形。接著我們使用示波器觀看其波形，如圖 4-2 所示：



(a)

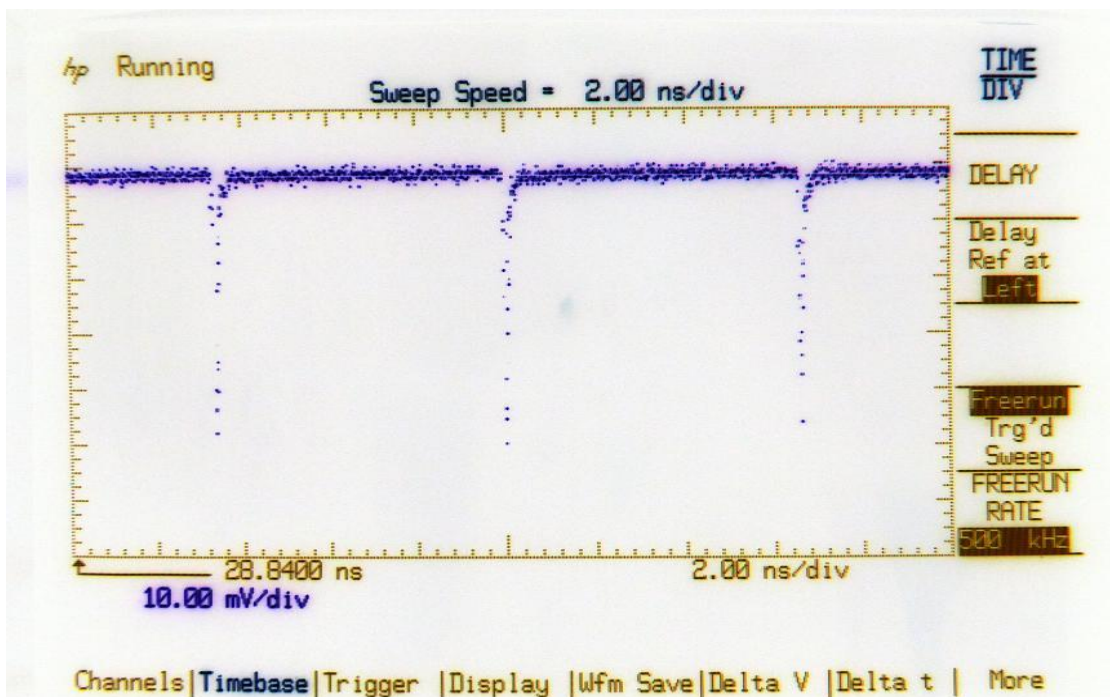


(b)

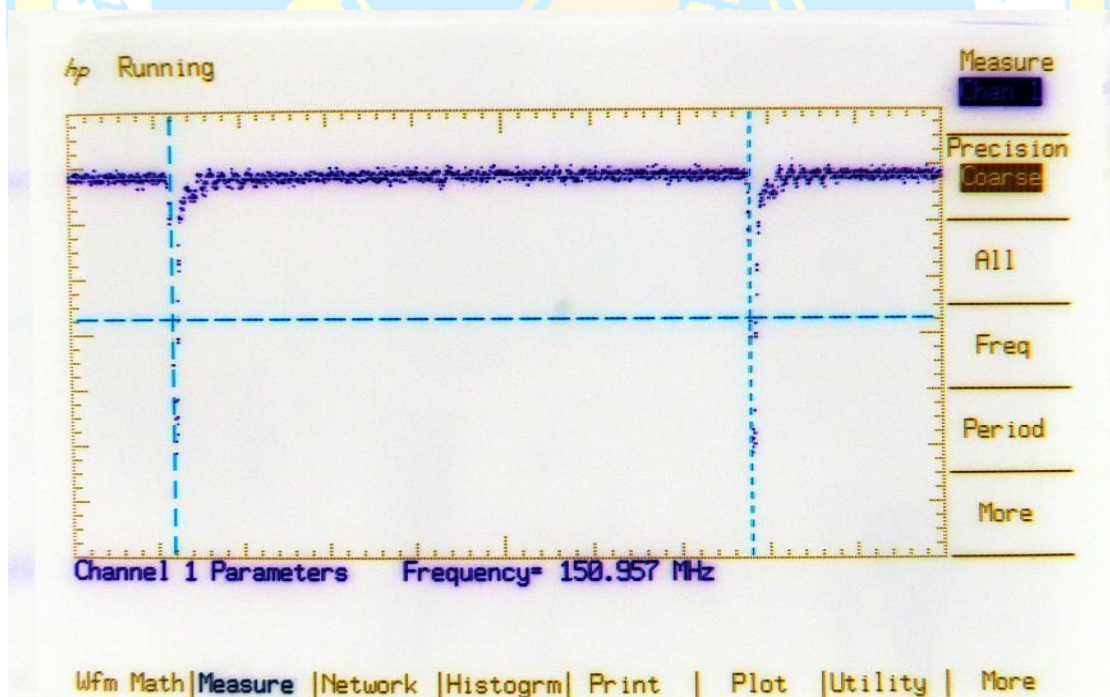


(c)

圖 4-2 示波器所觀測到之連續波鎖模(a)連續波鎖模(b)脈衝列(c)脈衝間隔

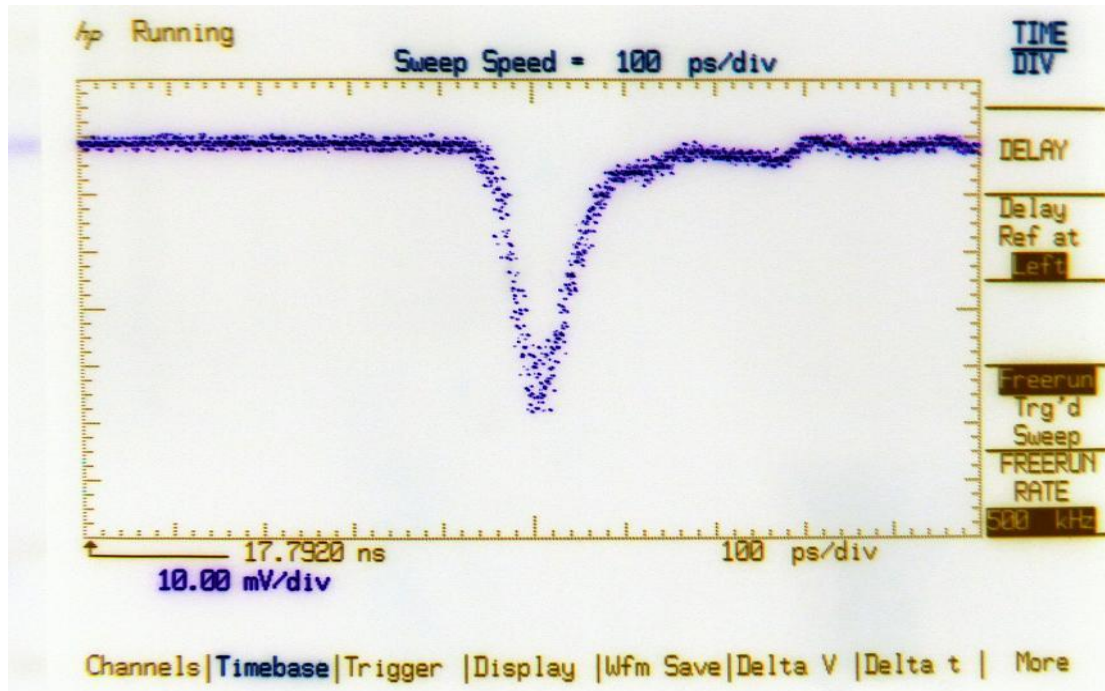


(a)



(b)





(c)

圖 4-3 取樣示波器所觀測到之單一脈衝圖形(a)脈衝列(b)脈衝區間  
(c)單一週期之單脈衝圖形

圖 4-2(a)是我們在示波器上所看到穩定連續波鎖模的圖形，此時輸入的電流為 4200 mA，輸出功率為 140 mW。(b)是脈衝列的圖形，在時序上也是有著穩定週期。(c)顯示脈衝的週期以及重覆率，換算過後可得共振腔長約為 100 cm。

圖 4-3 是在取樣示波器上所觀測到之連續波鎖模之圖形，如同第三章所得到的結果一樣有單一脈衝出現，其脈衝寬度如圖 4-4 所示，約為 11 ps，峰值功率約為 77 W。

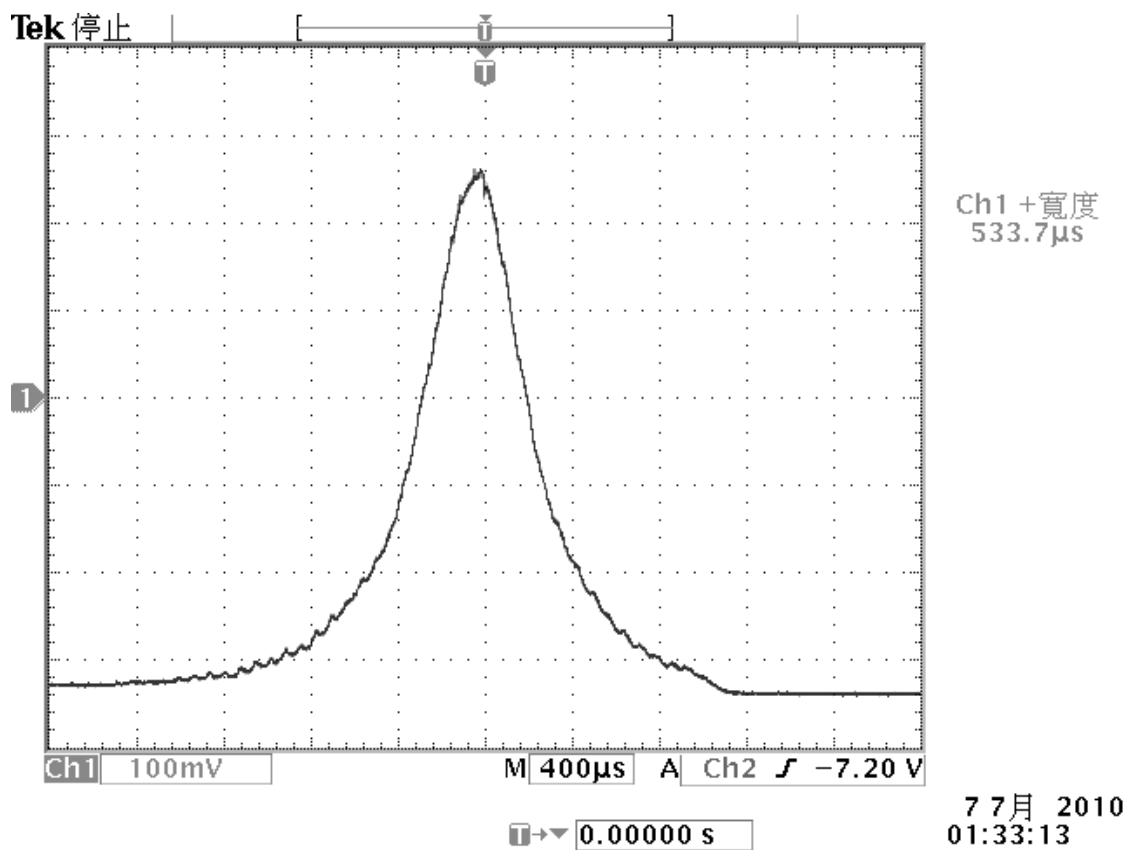


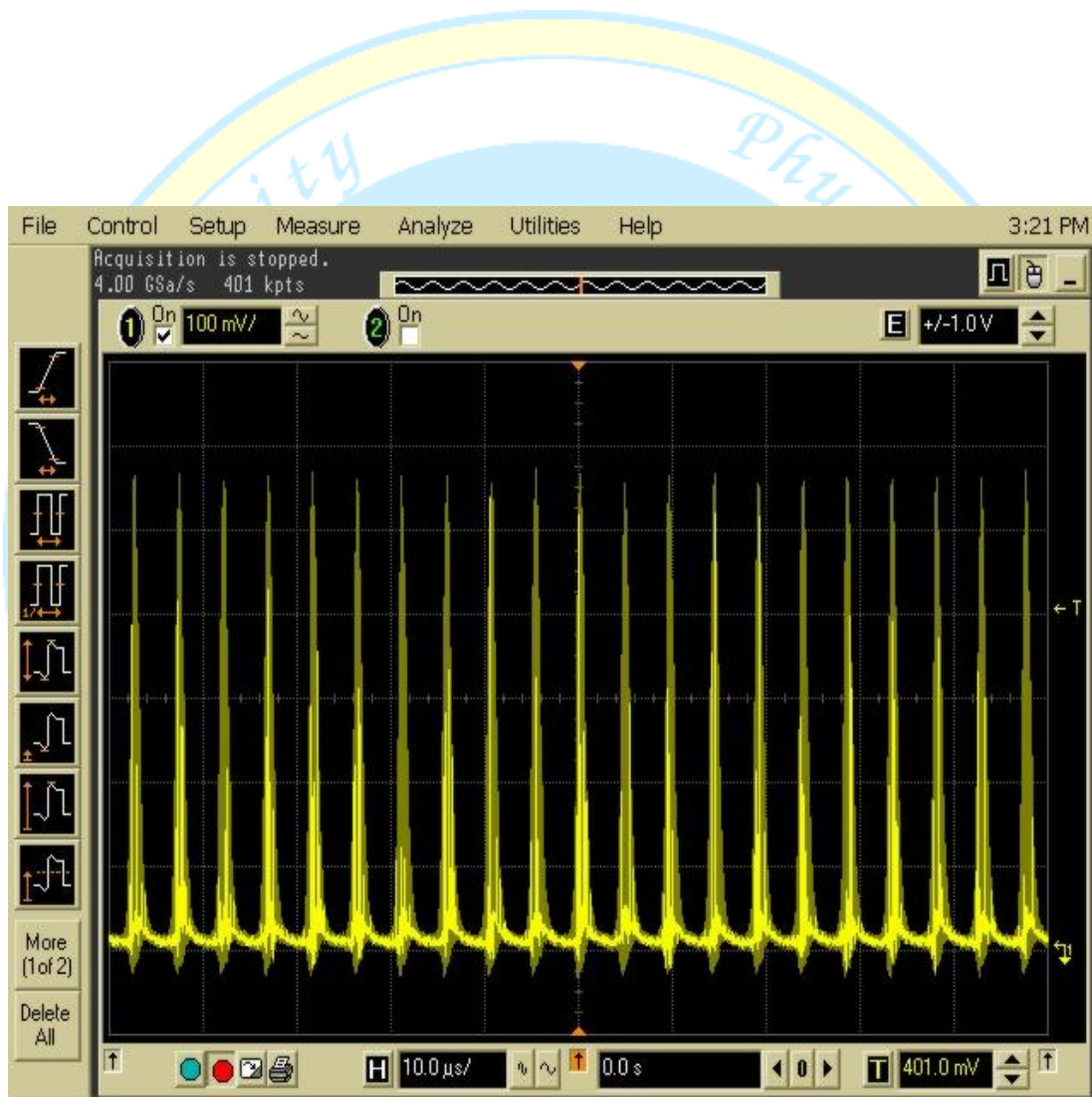
圖 4-4 自相關干涉儀所觀測到之連續波鎖模脈衝圖



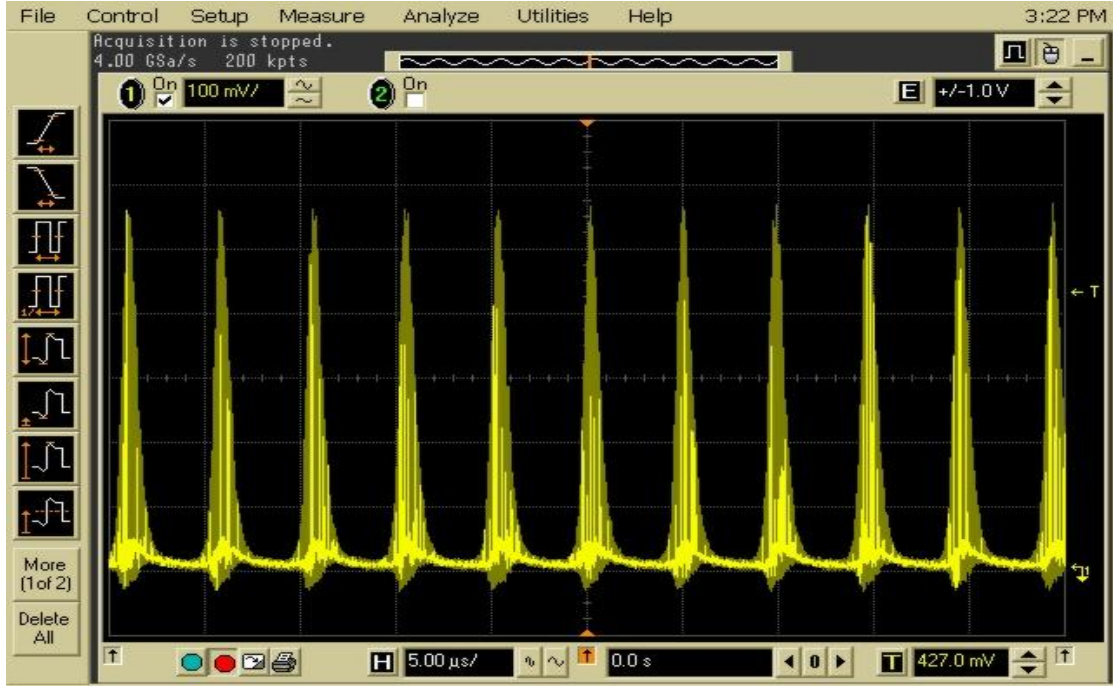


### 4.3 飽和吸收為 0.5 %之半導體飽和吸收鏡

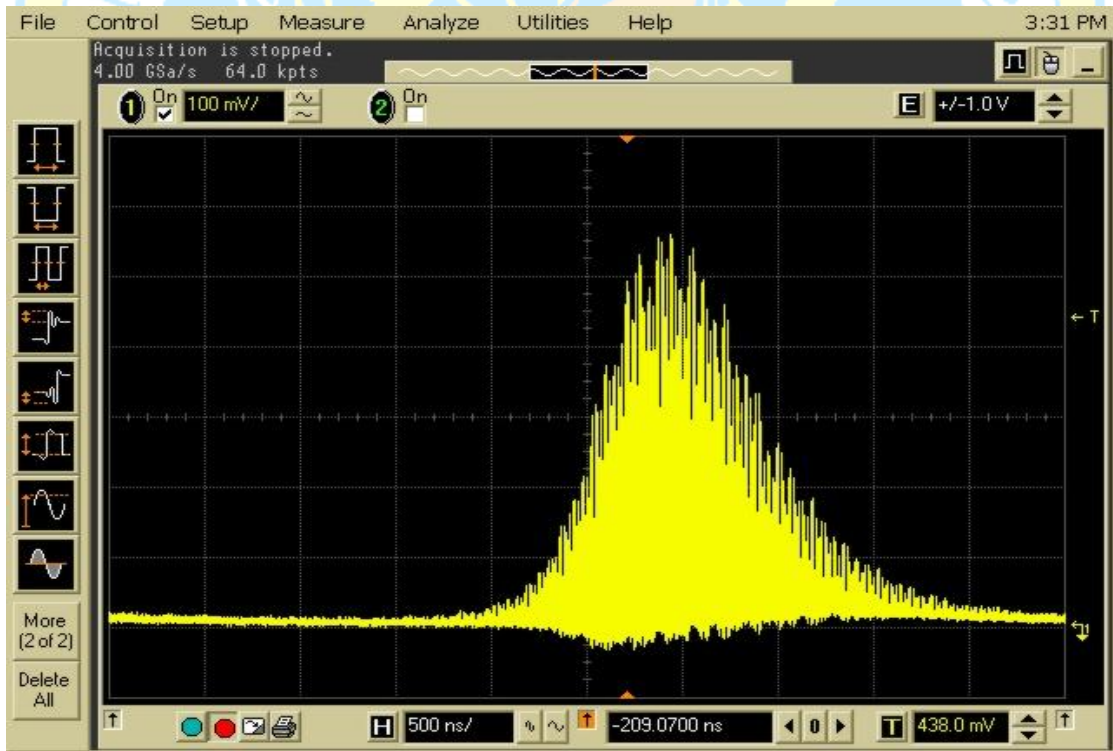
接著我們換上飽和吸收為 0.5 %的半導體飽和吸收鏡，重覆上述步驟，使用示波器觀測其脈衝圖形，如圖 4-5 所示：



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-5 示波器所觀測到 Q 開關鎖模(a)脈衝列(b)脈衝週期(c)封包(d)鎖模脈衝

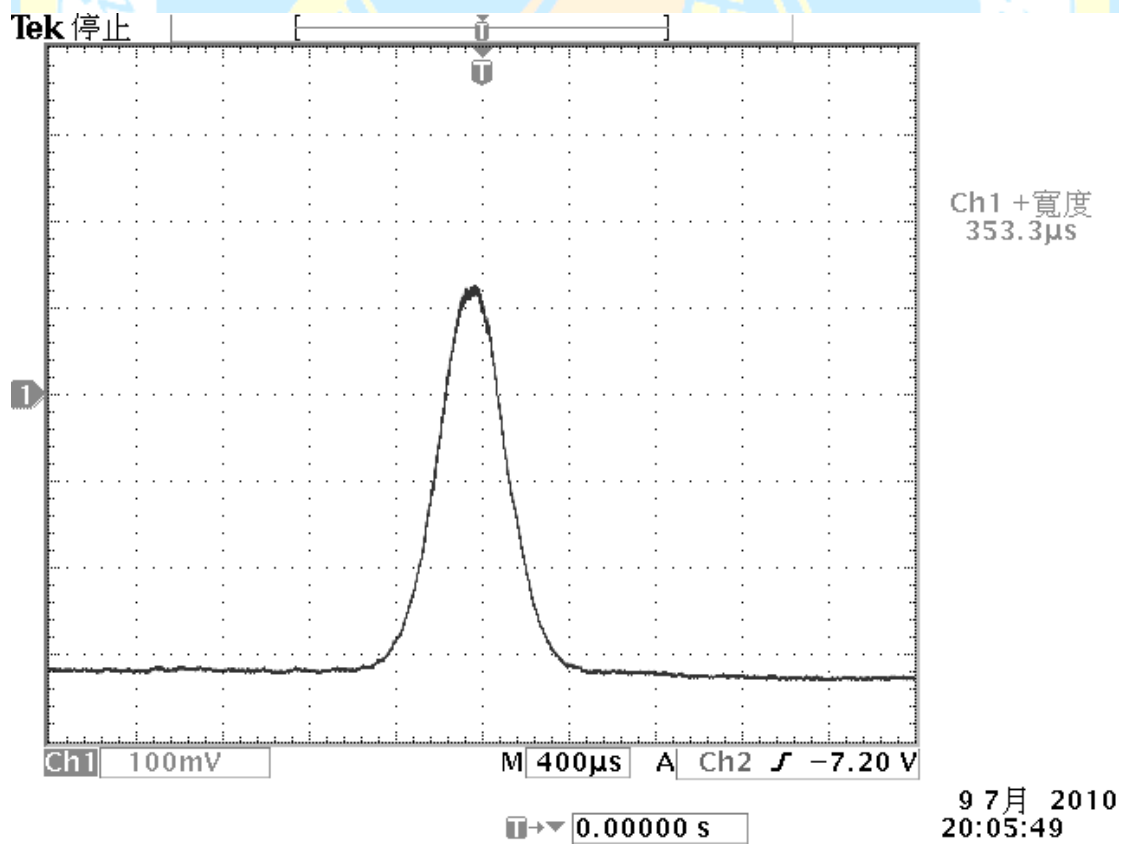
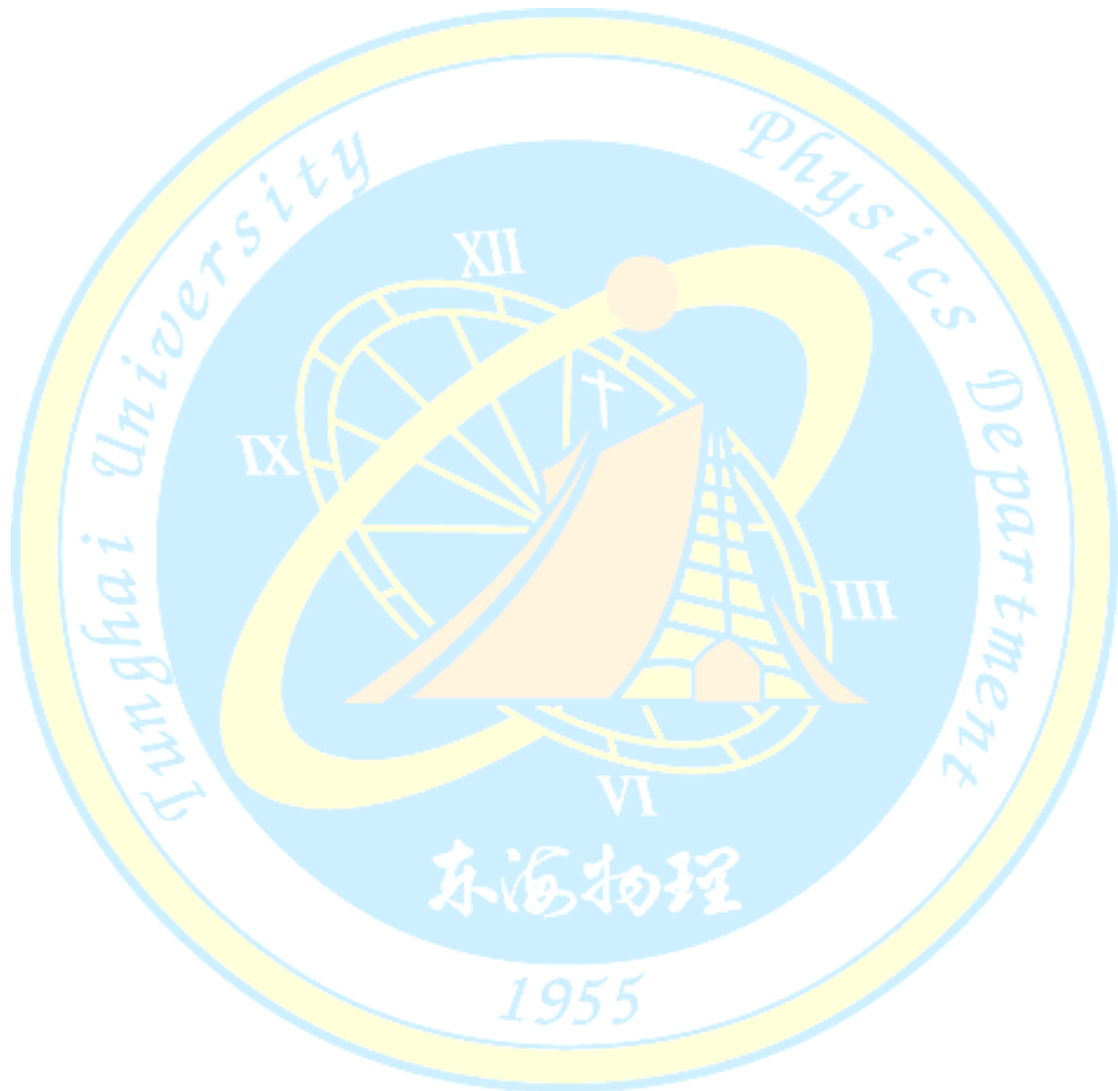


圖 4-6 自相關干涉儀所觀測到之 Q 開關鎖模圖形

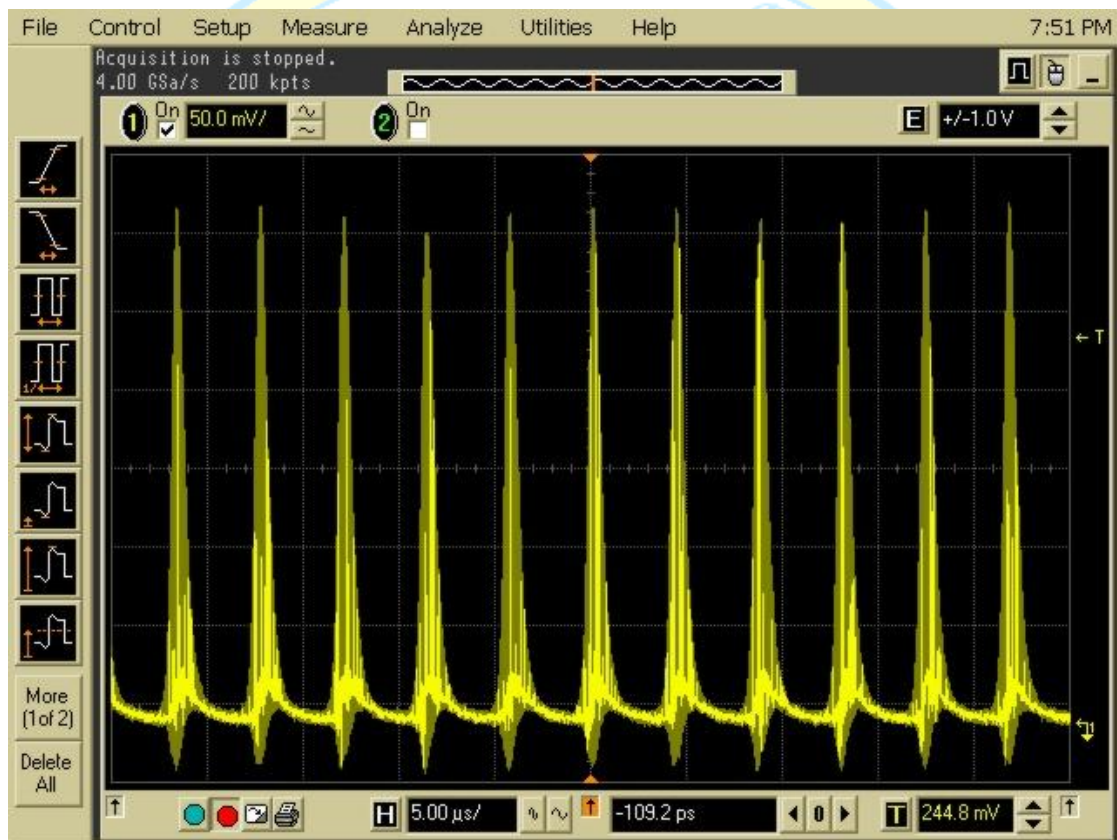
由圖 4-5 我們可以看到穩定的 Q 開關鎖模，其脈衝週期為  $4.9 \mu\text{s}$ ，脈衝寬度約為  $1 \mu\text{s}$ ，連續波鎖模的週期為  $6.6 \text{ ns}$  最大輸出功率為  $245 \text{ mW}$ 。而由圖 4-6 之自相關干涉儀圖形可以換算出其鎖模寬度為  $8 \text{ ps}$ ，其最大峰值功率約為  $983 \text{ W}$ 。





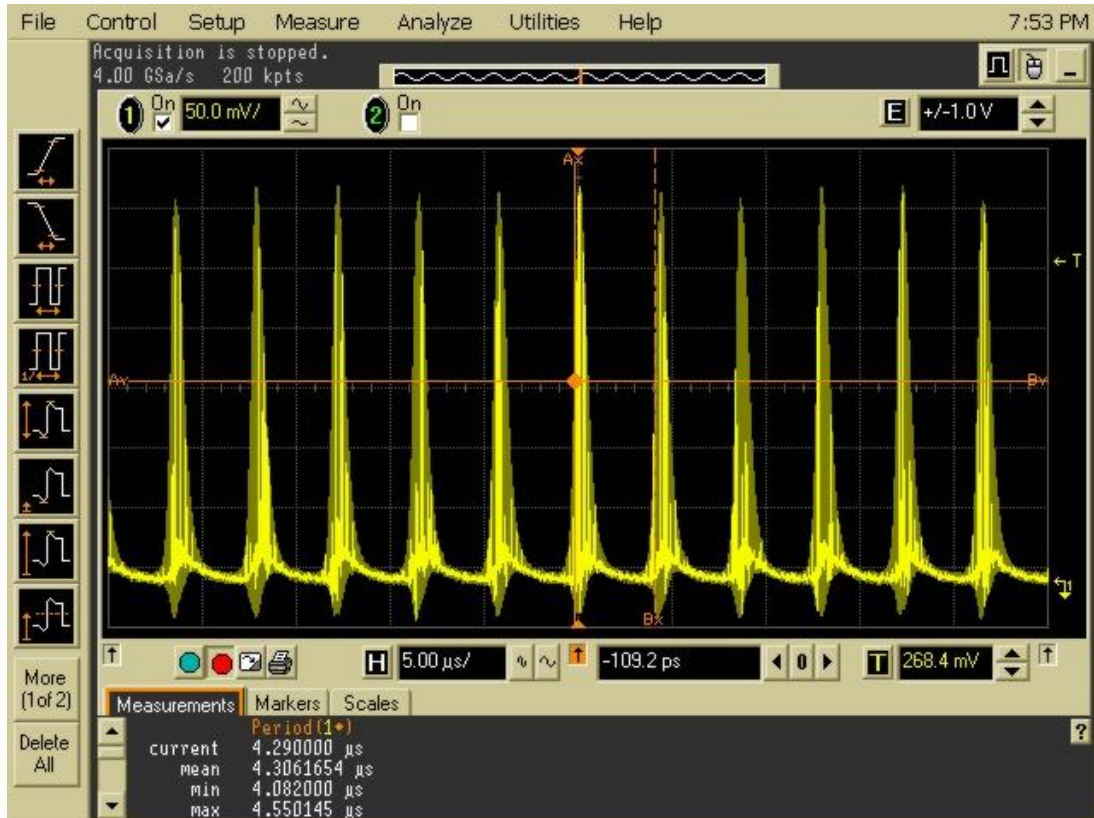
#### 4.4 飽和吸收為 1 %之半導體飽和吸收鏡

最後我們換上飽和吸收為 1 %的半導體飽和吸收鏡，觀測其產生的鎖模脈衝圖形，如圖 4-7 所示：

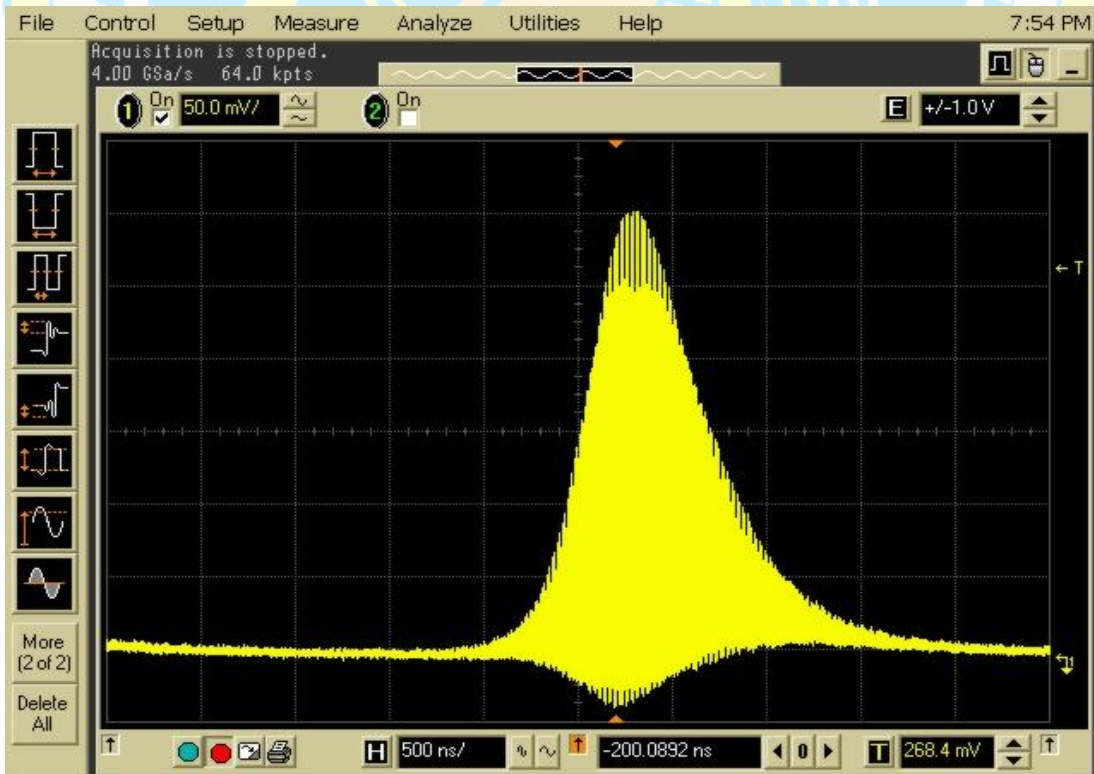


(a)

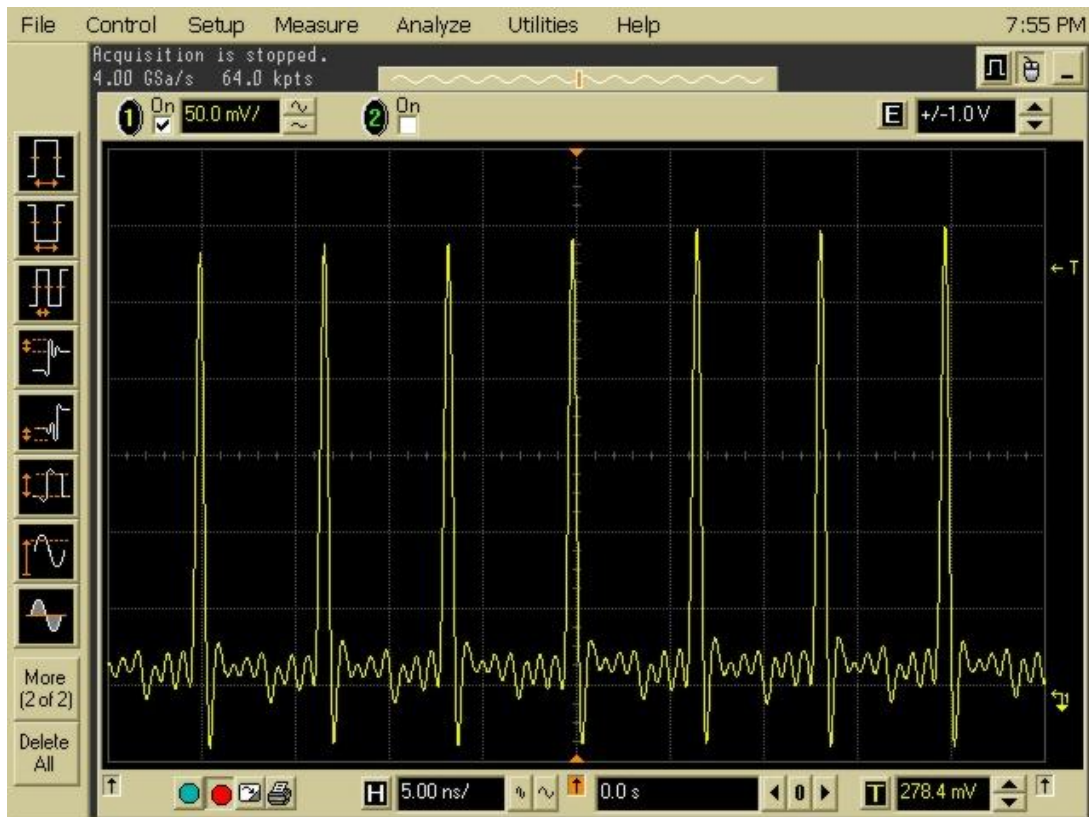




(b)



(c)



(d)

圖 4-7 示波器所觀測 Q 開關鎖模(a)脈衝列(b)區間(c)封包(d)鎖模區間

從示波器上我們可以看到穩定的 Q 開關鎖模圖形，如圖 4-7(a) 所示最大輸出功率為 233 mW，Q 開關鎖模的週期如圖 4-7(b)所示約為  $4.3 \mu\text{s}$ ，其 Q 開關脈衝寬度如圖 4-7(c)所示約為 700 ns，而鎖模週期為 6.6 ns。

接著我們使用自相關干涉儀測量其鎖模的寬度，如圖 4-8 所示，其脈衝寬度約為 10 ps。經過換算後可得最大峰值功率約為 935 W。

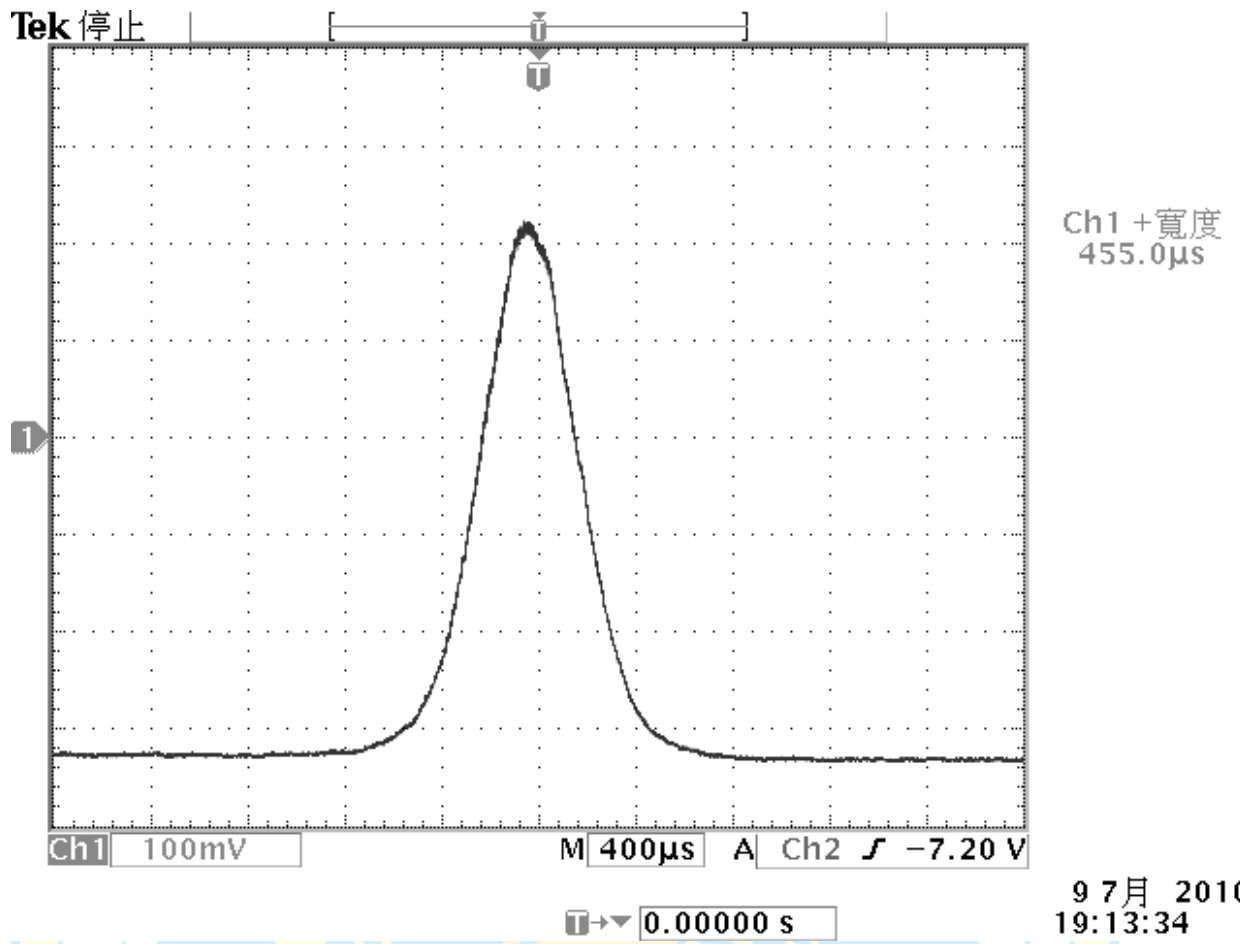


圖 4-8 自相關干涉儀所觀測到之鎖模脈衝圖形



## 4.5 結果與討論

在本實驗中，在五鏡式長腔中分別使用飽和吸收為 2 %、0.5 % 以及 1 % 的半導體飽和吸收鏡來產生被動鎖模，飽和吸收為 2 % 的 SESAM 我們可以得到穩定的連續波鎖模，其脈衝寬度為 11 ps，最大輸出功率為 140 mW，最大峰值功率為 77 W。飽和吸收為 0.5 % 及 1 % 的 SESAM 可得到穩定 Q 開關鎖模，前者峰值功率約為 983 W，後者約為 935 W。

如同第三章所提到，利用半導體飽和吸收鏡為反射鏡的共振腔架構在短腔中可得到穩定連續波鎖模及 Q 開關鎖模，在這個部分本章裡也驗證了在長腔中此系統也能穩定運作。但五鏡式長腔在架設上的難度較平凹共振腔高出許多，容易產生不穩定的多橫模，進而影響脈衝的穩定，不過這個部分在技術上是可以克服的。而在使用飽和吸收為 0.5% 和 1% 的飽和吸收鏡時，增加輸入的功率是否能產生連續波鎖模也是值得加以驗證。



## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

本篇論文主要探討將半導體飽和吸收鏡置入平凹共振腔中，以 Nd:YVO<sub>4</sub> 為雷射晶體，曲率半徑 40 cm 之凹面鏡為輸出耦合鏡來產生被動鎖模脈衝雷射。在使用飽和吸收為 2 % 的半導體飽和吸收鏡時可獲得一穩定之連續波鎖模，在吸收功率為 1.3 W，輸出為單一脈衝時之最大輸出功率為 240 mW，重覆率為 369 MHz，脈衝寬度為 11 ps，最大峰值功率為 60 W。而在使用飽和吸收為 0.5 % 和 1 % 之半導體飽和吸收鏡時，兩者皆可獲得穩定之 Q 開關鎖模，在吸收功率為 1.3 W 時，前者之最大峰值功率為 1.3 kW，後者為 617 W。

在使用飽和吸收為 2 % 的飽和吸收鏡時，我們發現所產生的連續波鎖模會有多脈衝的現象，也就是在同一週期內並非只有單一脈衝，而只有在特定的某些區間內才會觀察到單一脈衝，且這個區間會隨著輸入功率的改變而跟著變動，這個區間大約是位在共振腔的穩定邊緣區，且在輸入電流為 3600 mA 及 3800 mA 時其範圍最廣，而輸入的電流降至 3200 mA 以下時就觀測不到單一脈衝鎖的連續波鎖模。其主要原因或許和我們使用飽和吸收鏡的方式與其原本的設計取向有所出入所造成的現象，原本飽和吸收鏡的設計是為了讓以 0° 入射角入射，而本實驗中是以約 45° 角入射，這種方式或許會讓飽和吸收鏡上多層



反射膜的厚度發生相對性的變化，使得入射光經反射後的性質有所改變，甚至反射的中心波長會發生藍移的現象，SESAM 的調制深度可能也因此要加以修正，加上因為斜向入射的關係，使得打在飽和吸收鏡上的光點面積較大，能量分佈也會不平均，進而造成多脈衝的形成，而調制深度的改變也可能是造成 Q 開關鎖模的主要成因。使用飽和吸收較小，調制深度也較小的飽和吸收鏡時卻出現 Q 開關鎖模，明顯和理論不符合，不過我們卻能得到穩定的 Q 開關鎖模，穩定的區間也是在穩定區邊緣。而在鎖模脈衝寬度的部分，因為在測量上我們經過多次的反射才打入自相關干涉儀當中，所以面鏡的像散可能會影響光束的品質，也可能是雷射光的模態還不夠好，所以這方面應該還能再改善。

我們也利用五鏡式的共振腔來拉長腔長至 100 cm，在使用飽和吸收為 2 % 的半導體飽和吸收鏡時可獲得一穩定之連續波鎖模，在吸收功率為 1.3 W，輸出為單一脈衝時，其最大輸出功率為 140 mW，脈衝寬度為 11.9 ps，最大峰值功率約為 77 W。而飽和吸收為 0.5 % 和 1 % 之半導體飽吸收鏡皆可獲得一穩定之 Q 開關鎖模，在吸收功率為 1.3 W 時，前者其最大峰值功率為 982.5 W，後者約為 935.3 W。證明了在長腔時本系統也適用。

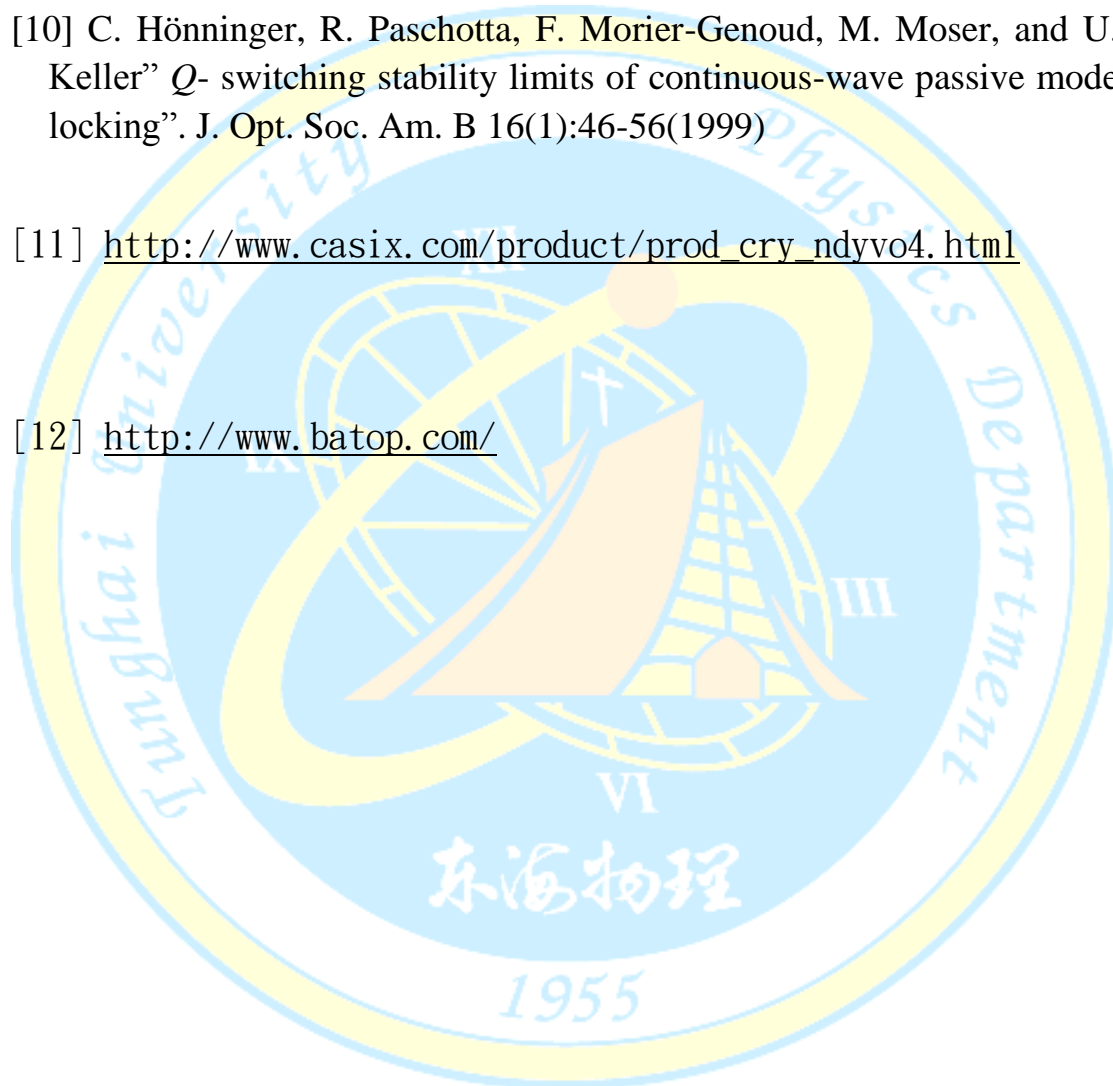
## 5.2 未來展望

在未來的工作中，首先我們可以計算在以  $45^\circ$  入射時對於飽和吸收鏡最大反射率的中心波長發生了多少的改變，也可以用實驗的方法量測中心波長實際上位移了多少，這樣一來或許可以計算在這個架構下半導體飽和吸收鏡的調制深度是否發生變動。而我們也可以調整雷射晶體和飽和吸收鏡的相對位置，使得共振腔的型態依然是平凹腔，但是激發光束是垂直入射飽和吸收鏡，這樣一來便可比較光束是否垂直入射飽和吸收鏡所造成的影響。我們也可以改變輸出耦合鏡的曲率半徑，測試在更短的共振腔長度之下能產生連續波鎖模的極限，我們相信這種簡單二鏡式的平凹共振腔是相當具有潛力的。

## 參考文獻

- [1] U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd, T. H. Chiu, J. F. Ferguson, and M. T. Asom, "Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber". *Opt. Lett.* 17(7):505-507(1992).
- [2] U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kärtner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Hönninger, N. Matuschek, and J. Aus der Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quant.* 2, 435-453 (1996).
- [3] T. R. Schibli, K. Minoshima, H. Kataura, E. Itoga, N. Minami, S. Kazaoui, K. Miyashita, M. Tokumoto, Y. Sakakibara, "Ultrashort pulse-generation by saturable absorber mirrors based on polymer-embedded carbon nanotubes". *Opt. Express*, 13(20):8025-8031(2005).
- [4] Tao Li, Shenzhi Zhao, Zhuang Zhuo, Kejian Yang, Guiqiu Li, and Dechun Li, "Diode-Pumped Passively Mode-Locked Nd : LuVO<sub>4</sub> Laser With a Semiconductor Saturable Absorber Mirror". *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, 21(13):836-838.
- [5] H.R. Chen · J.H. Lin · K.T. Song · K.H. Lin · W.F. Hsieh, "Passive mode-locking in diode-pumped c-cut Nd:LuVO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable-absorber mirror" *Appl Phys B* 96: 19–23 (2009)
- [6] Y. F. Chen, S. W. Tsai, Y. P. Lan, and S. C. Wang, and K. F. Huang, "Diode-end-pumped passively mode-locked high-power Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a relaxed saturable Bragg reflector". *Opt. Lett.* 26(4):199-201 (2001)
- [7] R. Fluck, G. Zhang, and U. Keller, K. J. Weingarten, and M. Moser, "Diode-pumped passively mode-locked 1.3- $\mu$ m Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YLF lasers by use of semiconductor saturable absorbers". *Opt. Lett.* 21(17):1378-1380 (1996)

- [8] F. X. Kärtner, L. R. Brovelli, D. Kopf, M. Kamp, I. Calasso, and U. Keller, “Control of solid-state laser dynamics by semiconductor devices,” *Opt. Eng.* 34(7):2024–2036 (1995).
- [9] H. A. Haus, “Parameter ranges for cw passive modelocking,” *IEEE J. Quantum Electron.* 12(3):169–176 (1976).
- [10] C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller” *Q- switching stability limits of continuous-wave passive mode locking*”. *J. Opt. Soc. Am. B* 16(1):46-56(1999)
- [11] [http://www.casix.com/product/prod\\_cry\\_ndyvo4.html](http://www.casix.com/product/prod_cry_ndyvo4.html)
- [12] <http://www.batop.com/>



## 附錄一

Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體參數 [11]

### I. Basic Properties

(1) Atomic Density:  $\sim 1.37 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup>

(2) Crystal Structure:

Zircon tetragonal, space group D<sub>4h</sub>, a=b=7.12, c=6.29

(3) Density: 4.22g/cm<sup>3</sup>

(4) Mohs Hardness: Glass-like,  $\sim 5$

(5) Thermal Expansion Coefficient:

$$\alpha_a = 4.43 \times 10^{-6} / \text{K}, \quad \alpha_c = 11.37 \times 10^{-6} / \text{K}$$

(6) Thermal Conductivity Coefficient:

$$\parallel C: 5.23 \text{ W/m/K}; \quad \perp C: 5.10 \text{ W/m/K}$$

### II. Optical Properties

(1) Lasing Wavelengths: 914nm, 1064nm, 1342nm

(2) Crystal class: positive uniaxial,  $n_o = n_a = n_b$ ,  $n_e = n_c$

$$n_o = 1.9573, \quad n_e = 2.1652, \quad @1064 \text{ nm}$$

$$n_o = 1.9721, \quad n_e = 2.1858, \quad @808 \text{ nm}$$

$$n_o = 2.0210, \quad n_e = 2.2560, \quad @532 \text{ nm}$$



(3) Stimulated Emission Cross-Section:

$$25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2, @1064 \text{ nm}$$

(4) Thermal Optical Coefficient:

$$dn_a/dT = 8.5 \times 10^{-6} / \text{K}, \quad dn_c/dT = 3.0 \times 10^{-6} / \text{K}$$

(5) Fluorescent Lifetime:

$$90 \mu\text{s} (\text{about } 50 \mu\text{s for } 2 \text{ atm\% Nd doped}), @808 \text{ nm}$$

(6) Absorption Coefficient:  $31.4 \text{ cm}^{-1}$  @808nm

(7) Absorption Length: 0.32mm @808nm

(8) Intrinsic Loss: Less  $0.1\% \text{ cm}^{-1}$  @1064nm

(9) Gain Bandwidth: 0.96nm (257GHz) @1064nm

(10) Polarized Laser Emission:

$\pi$  polarization; parallel to optic axis (c-axis)

(11) Diode Pump Optical to Optical Efficiency: >60%

## 附錄二

### 半導體飽和吸收鏡參數[12]

SAM data sheet SAM-1064-2-25.4s-1ps,  $\lambda = 1064 \text{ nm}$

Laser wavelength  $\lambda = 1064 \text{ nm}$

High reflection band ( $R > 96\%$ )  $\lambda = 1010 \dots 1090 \text{ nm}$

Absorbance  $A_0 = 2 \%$

Modulation depth  $\Delta R = 1.2 \%$

Non-saturable loss  $A_{ns} = 0.8 \%$

Saturation fluence  $\Phi_{sat} = 60 \mu\text{J}/\text{cm}^2$

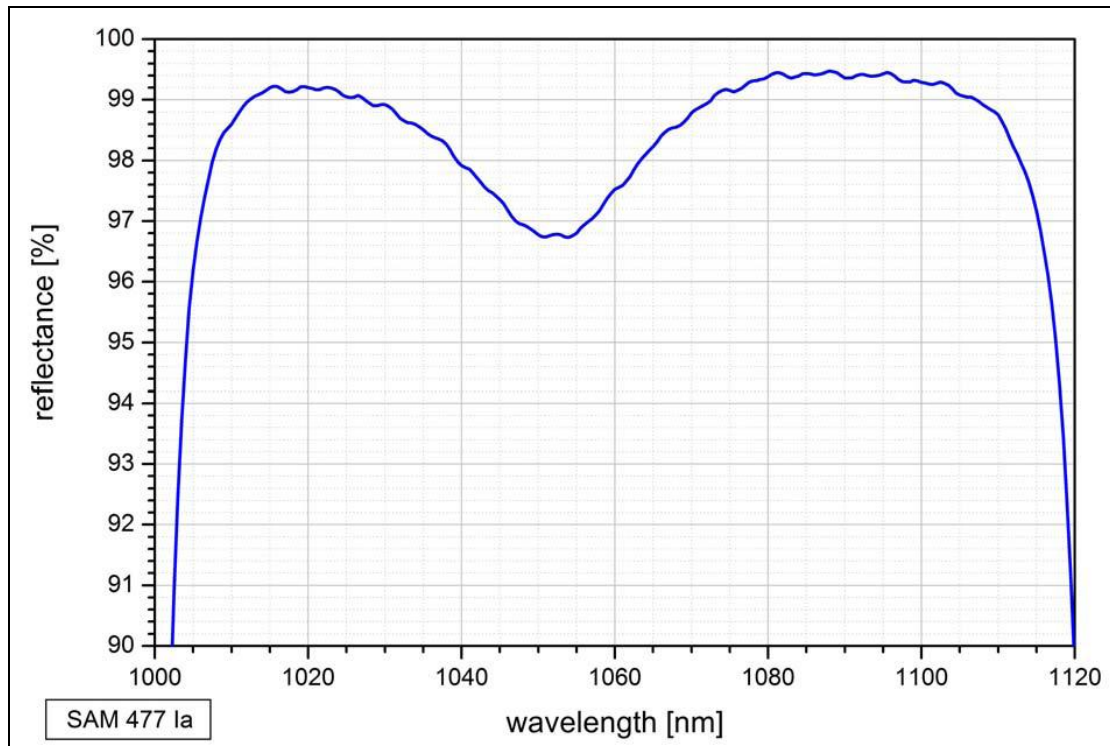
Relaxation time constant  $\tau \sim 1 \text{ ps}$

Damage threshold  $800 \text{ MW}/\text{cm}^2$

Chip area  $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ ; other dimensions on request

Chip thickness  $400 \mu\text{m}$

Protection the SAM is protected with a dielectric front layer



Low intensity spectral reflectance

SAM™ data sheet SAM-1064-1-25.4s-1ps,  $\lambda = 1064$  nm

Laser wavelength  $\lambda = 1064$  nm

High reflection band ( $R > 98\%$ )  $\lambda = 1020 \dots 1100$  nm

Absorbance  $A_0 = 1 \%$

Modulation depth  $\Delta R = 0.6 \%$

Non-saturable loss  $A_{ns} = 0.4 \%$

Saturation fluence  $\Phi_{sat} = 70 \mu\text{J}/\text{cm}^2$

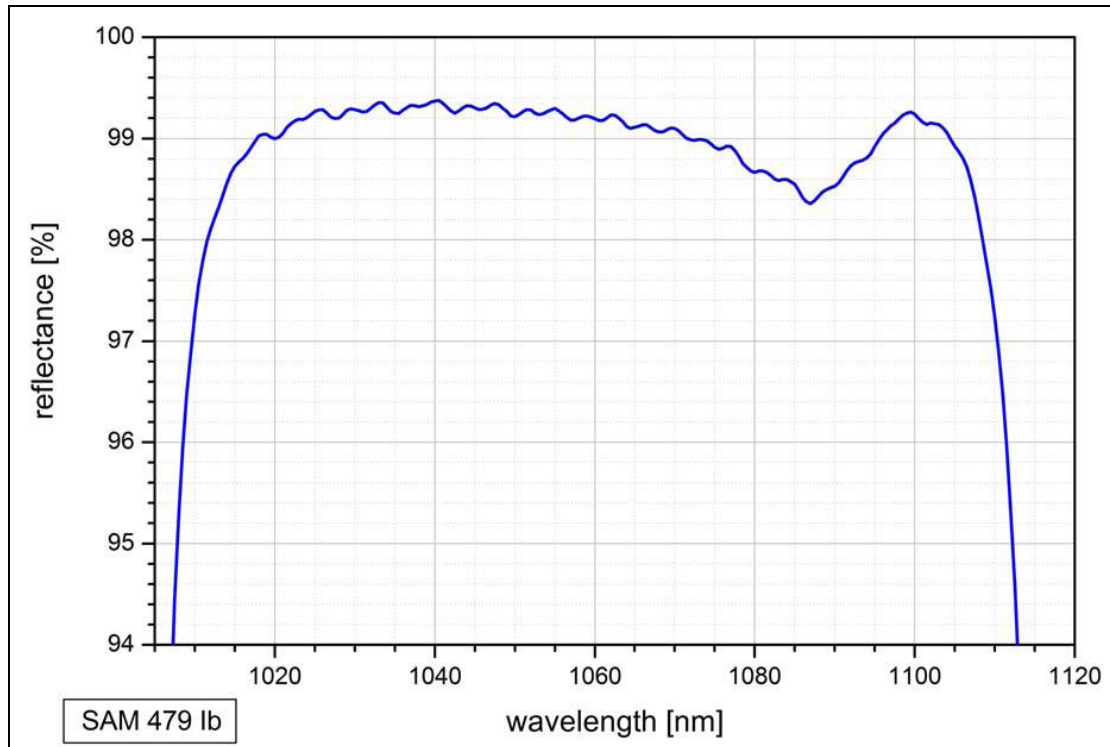
Relaxation time constant  $\tau \sim 1$  ps

Damage threshold  $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$

Chip area  $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ ; other dimensions on request

Chip thickness 400  $\mu\text{m}$

Protection the SAM is protected with a dielectric front layer



Low intensity spectral reflectance

