

東海大學物理學系  
碩士論文

指導教授: 吳小華 教授

混和主被動機制的 Q 開關鎖模摻釹鈮鋁石榴石雷射的研究

Q-switched mode locking of Nd:YAG lasers by hybrid  
active and passive mechanisms

研究生: 蘇桓銳

中華民國一〇一年七月二十六日

東海大學物理學系

碩士論文

混和主被動機制的 Q 開關鎖模摻釹鈮鋁石榴石雷射的研究

Q-switched mode locking of Nd:YAG lasers by hybrid active  
and passive mechanism

指導教授：吳小華 教授

研究生：蘇桓銳

中華民國一百年七月二十六日

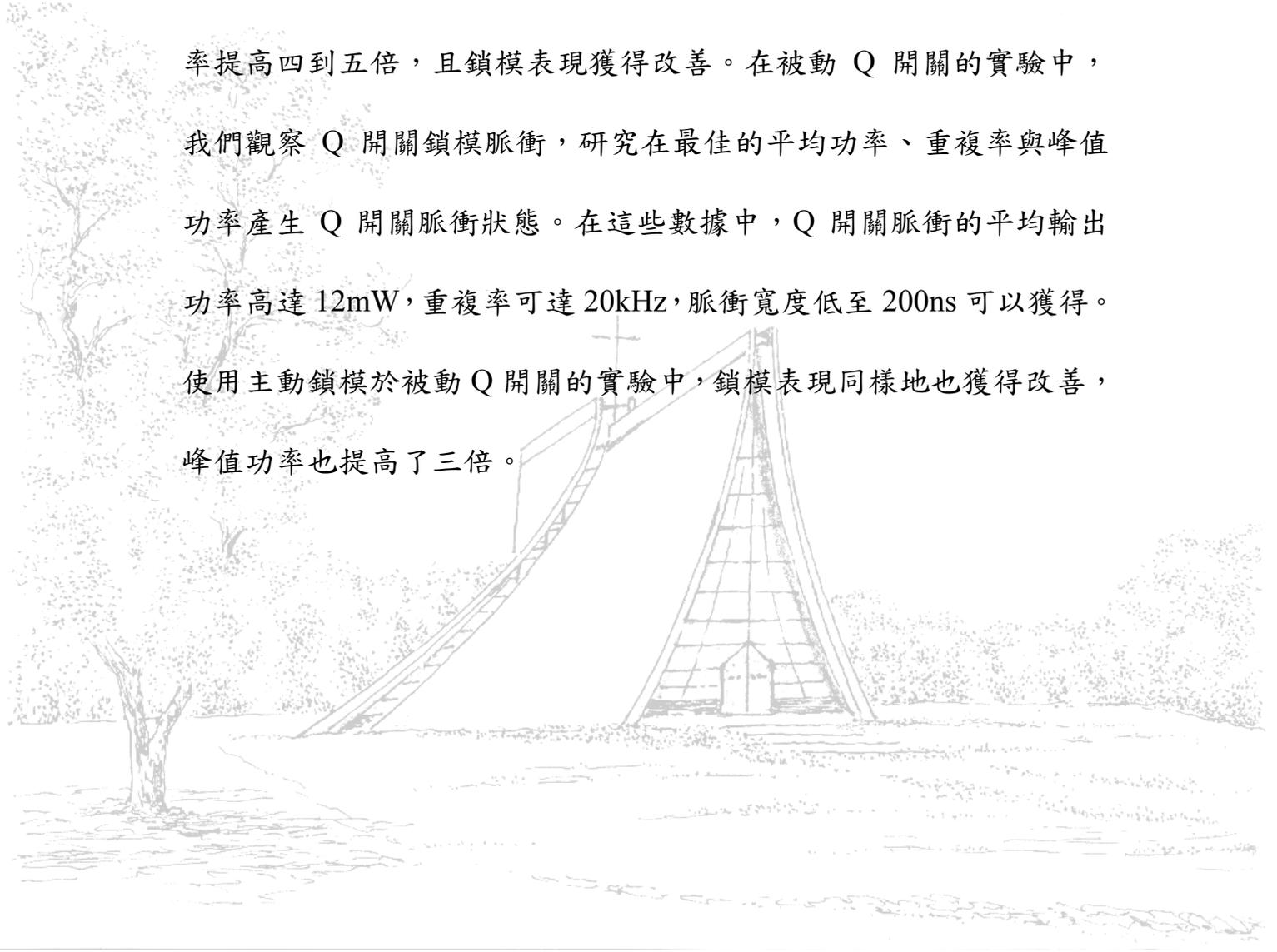
## 誌謝

謝謝我的父親與母親，與吳小華老師教導與鼓勵，和林宗興老師、苗新元老師的協助，讓我論文可以完成。



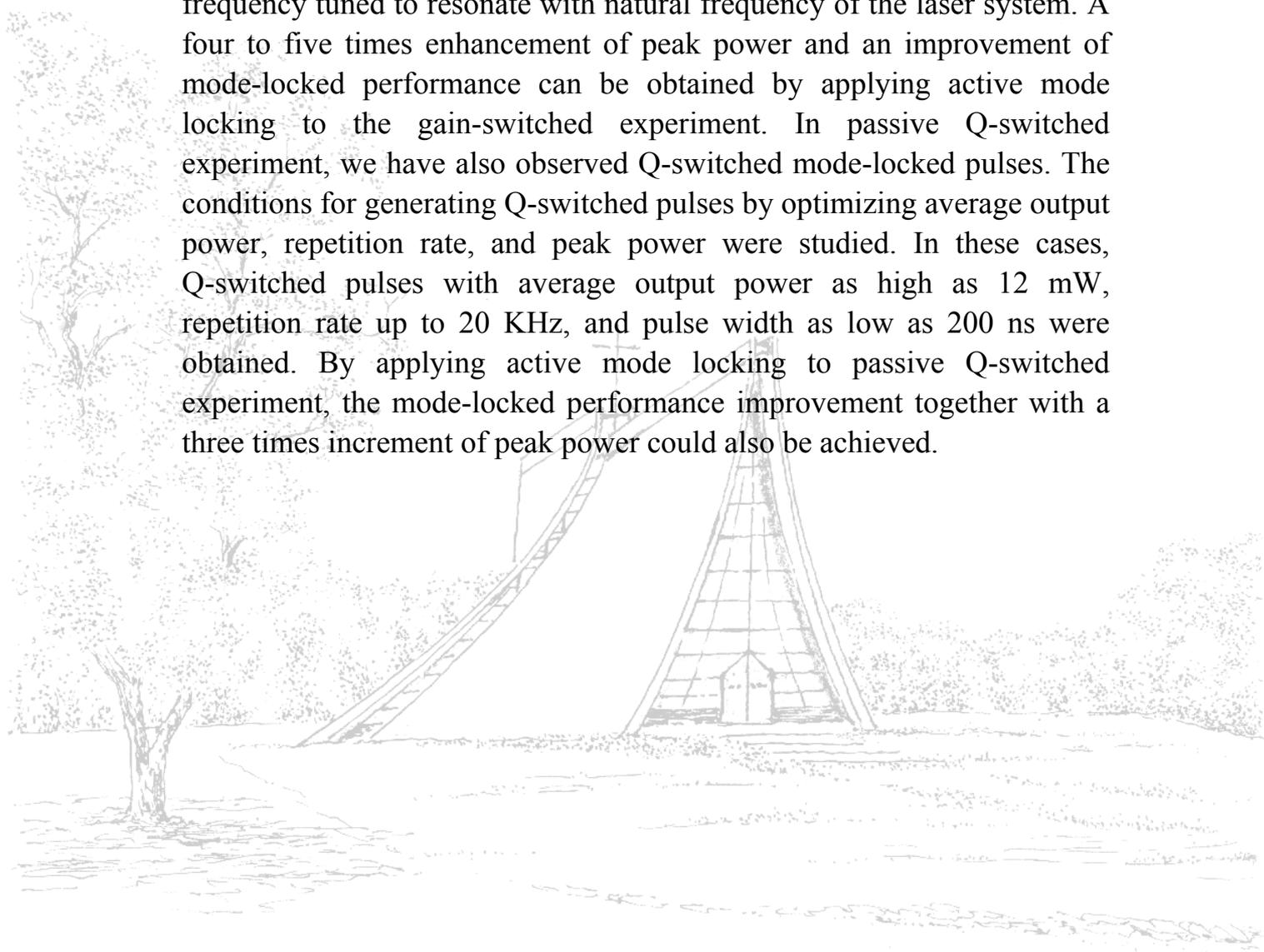
## 中文摘要

本論文使用主動鎖模技術結合增益 Q 開關或結合被動 Q 開關技術來研究 Q 開關鎖模。在增益開關的實驗中，把主動鎖模加入增益 Q 開關，當調制頻率調為共振自然頻率，其 Q 開關鎖模脈衝的峰值功率提高四到五倍，且鎖模表現獲得改善。在被動 Q 開關的實驗中，我們觀察 Q 開關鎖模脈衝，研究在最佳的平均功率、重複率與峰值功率產生 Q 開關脈衝狀態。在這些數據中，Q 開關脈衝的平均輸出功率高達 12mW，重複率可達 20kHz，脈衝寬度低至 200ns 可以獲得。使用主動鎖模於被動 Q 開關的實驗中，鎖模表現同樣地也獲得改善，峰值功率也提高了三倍。



## Abstract

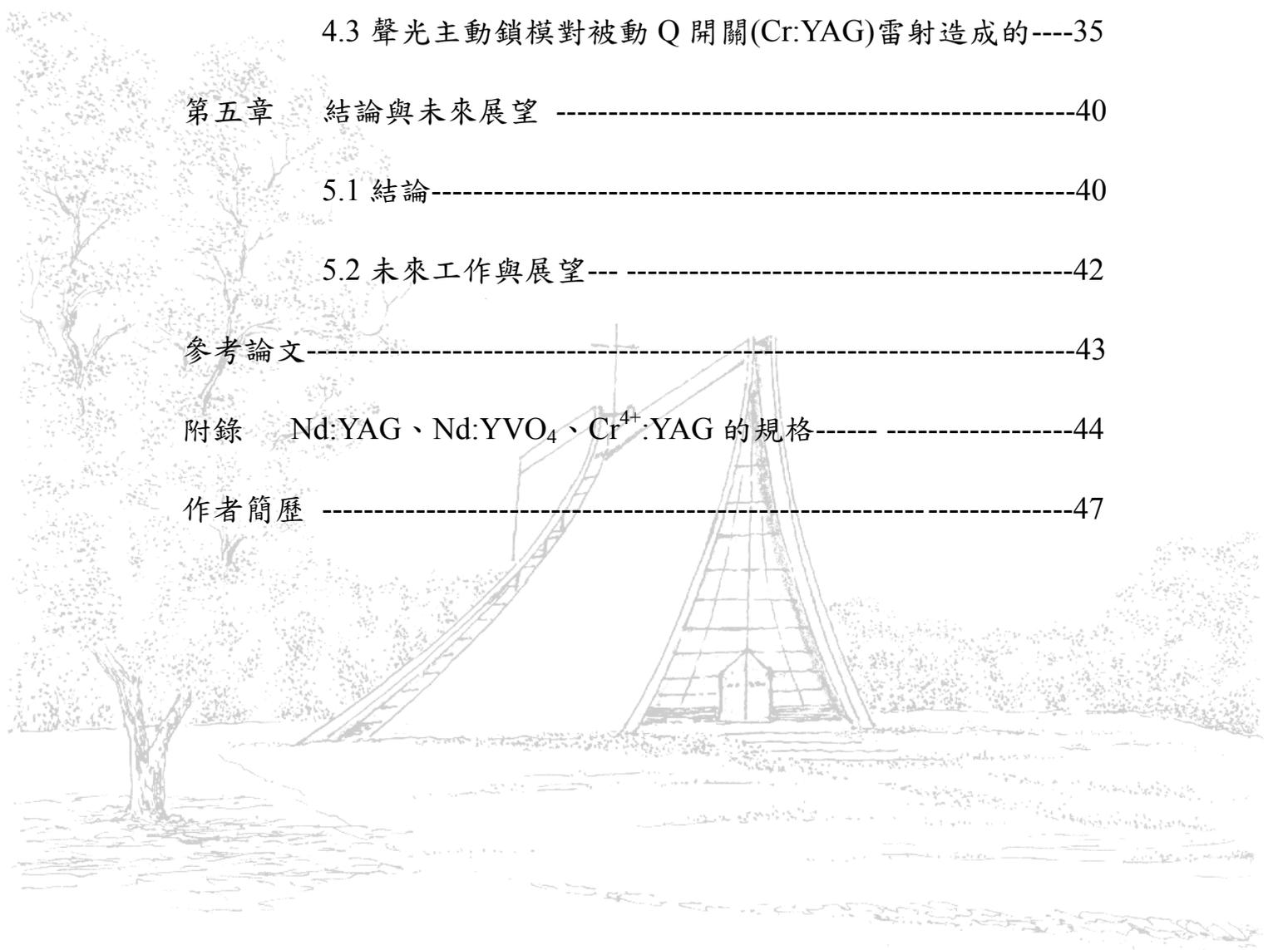
This thesis studies Q-switched mode locking of Nd:YAG lasers by using active mode-locked technique in combination of gain switched or passive Q-switched technique. In the gain-switched experiment, Q-switched mode-locked pulses were observed when the modulation frequency tuned to resonate with natural frequency of the laser system. A four to five times enhancement of peak power and an improvement of mode-locked performance can be obtained by applying active mode locking to the gain-switched experiment. In passive Q-switched experiment, we have also observed Q-switched mode-locked pulses. The conditions for generating Q-switched pulses by optimizing average output power, repetition rate, and peak power were studied. In these cases, Q-switched pulses with average output power as high as 12 mW, repetition rate up to 20 KHz, and pulse width as low as 200 ns were obtained. By applying active mode locking to passive Q-switched experiment, the mode-locked performance improvement together with a three times increment of peak power could also be achieved.



# 目錄

誌謝	i
中文摘要	ii
英文摘要	iii
目錄	iv
圖表目錄	vi
第一章 序論	1
第二章 理論	5
2.1 腔內光束分佈的計算	7
2.2 增益調制理論	9
2.3 被動 Q 開關理論	10
第三章 主動鎖模外加增益調制雷射	11
3.1 前言	11
3.2 驗架構與方法	12
3.3 聲光主動鎖模雷射	14
3.4 增益調制雷射	18
3.5 聲光主動鎖模對增益調制摻鉍釩酸鈣雷射造成的影響	

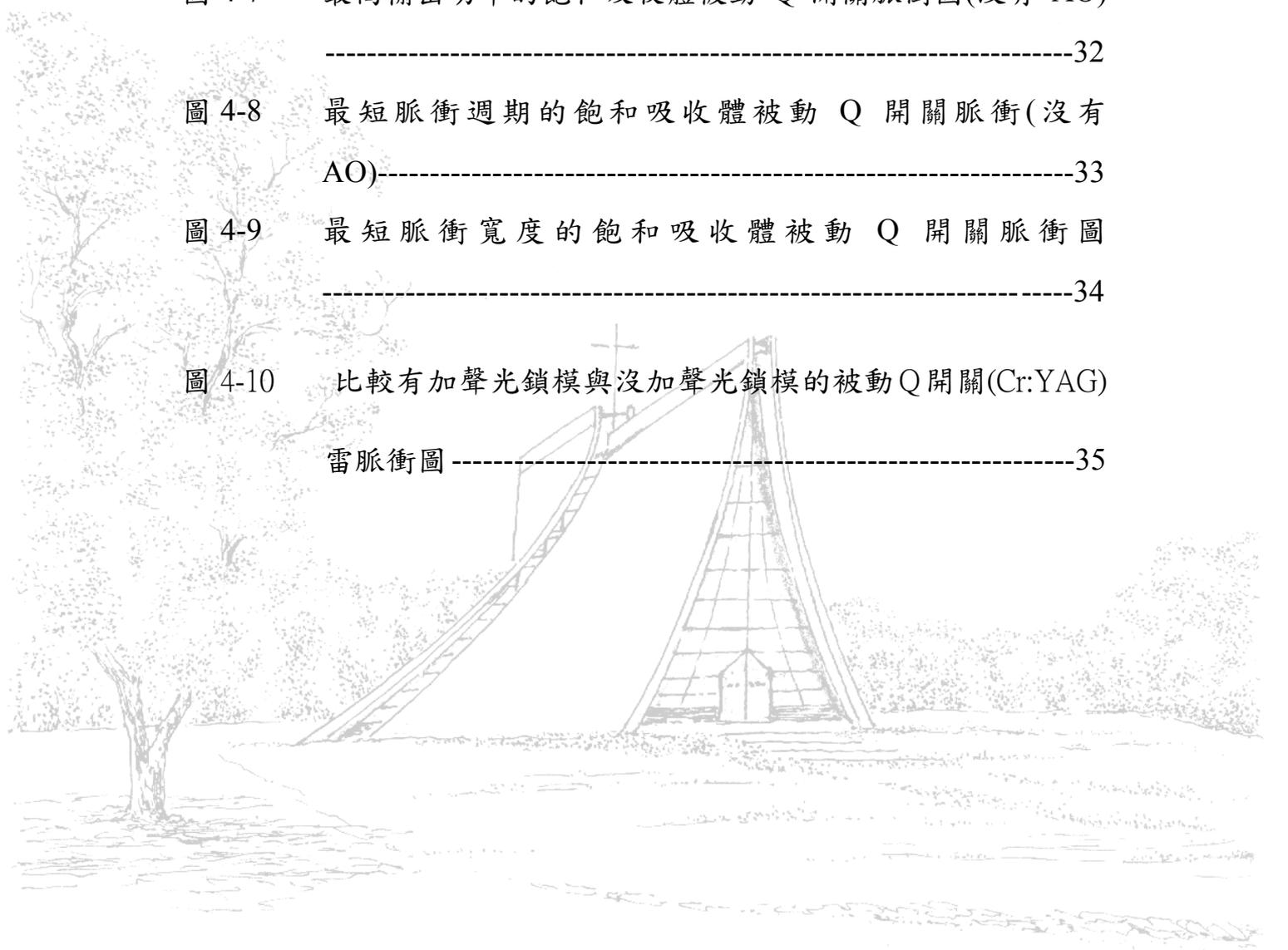
-----	-----	21
第四章	被動 Q 開關外加主動鎖模雷射-----	25
4.1	前言-----	25
4.2	被動 Q 開關(Cr:YAG)雷射-----	26
4.3	聲光主動鎖模對被動 Q 開關(Cr:YAG)雷射造成的-----	35
第五章	結論與未來展望 -----	40
5.1	結論-----	40
5.2	未來工作與展望-----	42
參考論文	-----	43
附錄	Nd:YAG、Nd:YVO <sub>4</sub> 、Cr <sup>4+</sup> :YAG 的規格-----	44
作者簡歷	-----	47



## 圖表目錄

圖 2-1	實驗架構的轉移矩陣示意圖-----	5
圖 2-2	雷射晶體與輸出鏡上光數大小對 $L_3$ 的關係圖--	7
圖 2-3	雷射晶體與輸出鏡上光數大小對 $L_1$ 的關係圖--	8
圖 3-1	實驗架構圖-----	12
圖 3-2	輸出功率對晶體吸收的功率的關係圖-----	14
圖 3-3	鎖模寬度和鎖模振幅對聲光調制頻率的關係圖-----	15
圖 3-4	聲光調制振幅與鎖模寬度的關係-----	16
圖 3-5	典型的聲光鎖模脈衝-----	17
圖 3-6	出功率對輸入電流的關係圖-----	18
圖 3-7	制脈衝與增益調制頻率的關係圖-----	19
圖 3-8	共振頻率與調制電壓關係圖-----	20
圖 3-9	有加聲光鎖模的增益調制共振時的 Nd:YAG 雷射鎖模脈衝 圖-----	21
圖 4-1	實驗架構圖-----	25
圖 4-2	輸出功率對晶體吸收的功率的關係圖-----	26
圖 4-3	被動 Q 開關頻率與周期對晶體的吸收功率關係圖-----	27
圖 4-4	被動 Q 開關寬度與峰值功率對於晶體吸收功率的關係圖	

	-----	28
圖 4-5	典型的 Cr:YAG 飽和吸收體被動 Q 開關脈衝圖-----	29
圖 4-6	所量測的最長脈衝週期，最高的峰值功率被動 Q 開關脈衝 -----	31
圖 4-7	最高輸出功率的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝圖(沒有 AO) -----	32
圖 4-8	最短脈衝週期的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝(沒有 AO)-----	33
圖 4-9	最短脈衝寬度的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝圖 -----	34
圖 4-10	比較有加聲光鎖模與沒加聲光鎖模的被動 Q 開關(Cr:YAG) 雷脈衝圖-----	35



## 第一章 序論

如何讓一般的脈衝雷射，產生平均功率大或是峰值功率大又穩定的雷射脈衝是當今雷射發展的重點。

短脈衝雷射可利用於分析暫態現象的光源，高時間解析度；且因能量集中很短的時間，故峰值功率高，瞬間電場很強，固有很強的非線性效應，可利用於非線性光學的研究上。短脈衝雷射可應用於許多材料的微加工和材料燒蝕[1]。

產生短脈衝雷射有三種方法，一是增益調制開關，一為 Q 開關，一為鎖模。增益開關乃再增益端加一個開關調制器，調制有分振幅調制，頻率調制以及相位調制。Q 開關乃在共振腔中放一個開關，如一個蓄水的裝置，蓄滿後在瞬間打開開關，就能得到高能量的脈衝。

另一種產生短脈衝的方法叫做鎖模。鎖模的方法分為主動與被動，主動鎖模的方法就式開關打開關掉的時間，剛好都是  $2L/c$ ，故所有的模都剛好都在相位一樣的時候，在打開的瞬間全部通過。主動鎖模的開關速度剛好是脈衝在共振腔中跑一圈所花的時間。

被動鎖模就只用加一塊飽和吸收體或是飽和吸收鏡，它自己就會打開關掉，飽和吸收體具有非線性的吸收特性，它對光的吸收量隨著光強度變強而呈現非線性地變弱，如此使雷射腔內最後僅存脈衝型態的分佈。飽和吸收體有一個鬆弛時間(relaxation time)，若鬆弛時間比脈衝

寬度還長，為慢速飽和吸收體；若鬆弛時間比脈衝寬度還短，為快速飽和吸收體。

利用  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體，也是可形成被動的 Q 開關鎖模。例如 2001 年，Yung-Fu Chen 等人利用  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體於摻釹釩酸鈮雷射，再輸入功率 12.5W 下，產生平均輸出功率 2.7W，Q 開關重複頻率為 18kHz，峰值功率大於 100kW 的 Q 開關鎖模[2]。在 2002 年，Yung-Fu Chen 等人再次利用  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體於摻釹鈮鋁石榴石雷射，產生峰值功率大於 300kW 的 Q 開關鎖模[3]。

聲光調制器可以做成產生主動鎖模的元件，至今運用於各種雷射上，都可以得到極佳穩定的效果。例如 1989 年，G. T. Maker and A. L. Ferguson[4]利用聲光 Q 開關與聲光調制鎖模於摻釹氟化鈮鋰雷射，產生 Q 開關寬度 140ns、鎖模寬度 18ps、平均功率 12mW、脈衝峰值功率為 15kW 的 Q 開關鎖模。1990 年，P. F. Curley and A. I. Ferguson[5]利用聲光調制鎖模於鈦藍寶石雷射上，產生 150fs 極短寬度的鎖模脈衝。1994 年，M. J. P. Dymott 等人[6]利用倍頻的摻釹氟化鈮鋰激發聲光調制鎖模摻鉻氟化鋰鋁雷射，產生 30ps 短的脈衝。在 2010 年，S. Wang 等人利用主動鎖模(AOML)和飽和吸收體  $\text{V}^{3+}$ :YAG 於摻釹鋁酸鈮雷射，產生 Q 開關鎖模[7]。

Q 開關鎖模的脈衝包峰外緣裡面有鎖模，有的方法雖然可以做到

Q 開關鎖模，但有時鎖模的部分沒有很好，有的方法可以達到很好的鎖模。2006 年，Jan K. Jabczyński 利用單一的 AO 鎖模，並在 AO 鎖模調制器上動一手腳，給予一開關的行為，使只用 AO 鎖模就可以達成 Q 開關鎖模[8]。

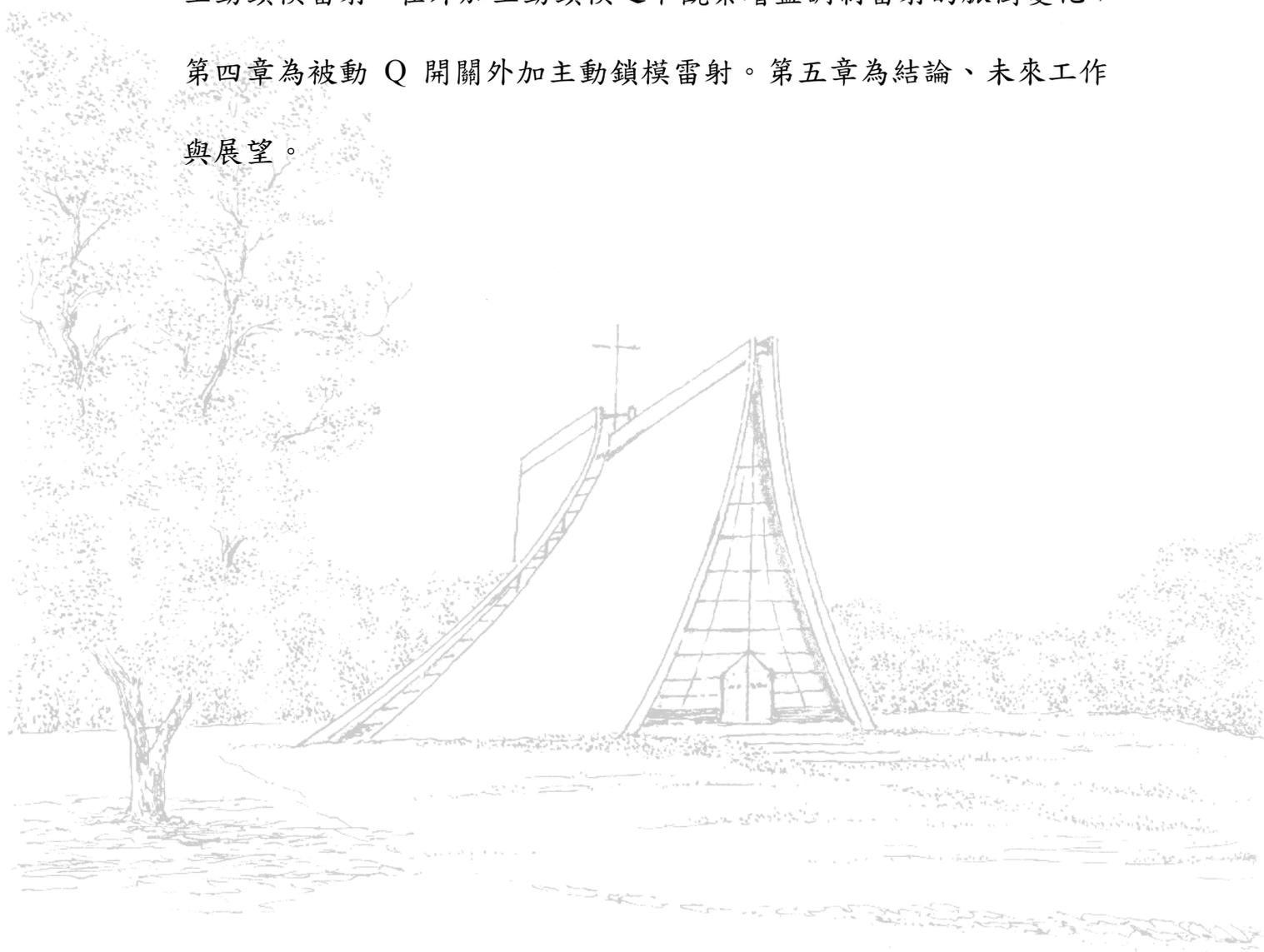
我做這個實驗的動機想法，從兩個角度來看，第一個方向，外加聲光調制器所作的主動鎖模，為連續波鎖模，其特點為鎖模振幅，重複頻率，脈衝寬度都十分的穩定。但是鎖模的峰值功率不是很高，故要想辦法如何把連續波鎖模的鎖模的振幅提高，就是把連續波鎖模變成 Q 開關鎖模。Q 開關鎖模的差別為，它 Q 開關鎖模裡面是連續波鎖模，但外面是一個脈衝的外殼(envelope)，其方法主動鎖模腔的輸出耦合鏡改為飽和吸收體(被動 Q 元件)，讓它產生 Q 鎖模；或是用主動的聲光 Q 開關讓它產生出 Q 的外殼。

用增益端調制讓它達到雷射晶體的鬆弛振盪，並可以產生高峰值功率的 Q 開關脈衝，若外加主動鎖模，可以使增益 Q 開關形成 Q 開關鎖模，並進一步使脈衝的峰值功率提高。

而另一個角度來看，先用被動 Q 開關，產生 Q 開關鎖模的脈衝，但脈衝狀況很十分不穩定，且裡面的鎖模也不完整，帶有雷射連續波的成份，故我們來想辦法怎樣讓此 Q 開關鎖模脈衝達成較穩定或是裡面的鎖模沒有連續波的成份，看看外加主動鎖模或是其他的鎖模元

件看看能達成怎樣的結果。

在第二章中，主要介紹腔內光束分佈的計算、鬆弛振盪的理論、被動鎖模脈衝寬度與周期的計算；第三章主要做的是增益調制外加主動鎖模雷射，在外加主動鎖模之下觀察增益調制雷射的脈衝變化；第四章為被動 Q 開關外加主動鎖模雷射。第五章為結論、未來工作與展望。



## 第二章 理論

理論部份主要為腔內光束分佈的計算和被動 Q 開關的理論主動鎖模理論以及增益調制理論的結果。

### 2-1 腔內光束分佈的計算

我們先把實驗共振腔計算光模的傳播矩陣先找出來

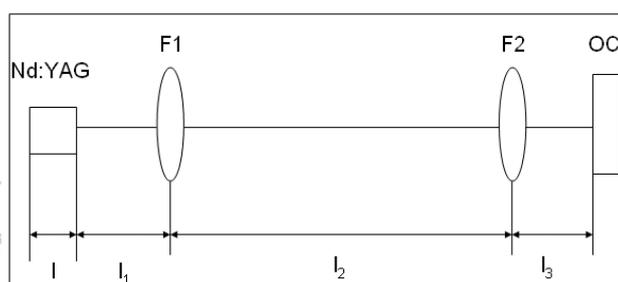


圖 2-1 實驗架構的轉移矩陣示意圖

下為計算 OC 鏡光點大小的傳播矩陣

$$M = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \frac{l}{n} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \frac{l}{n} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

下為計算雷射晶體光模大小的傳播矩陣

$$M = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \frac{l}{n} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \frac{l}{n} \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

我們在計算  $q$  參數

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda_0}{\pi \omega^2(z)} \text{-----(1)}$$

$$\text{再由繞一圈的 } q' \text{ 等於沒繞圈的 } q \text{ } q' = q = \frac{Aq + B}{Cq + D} \text{-----(2)}$$

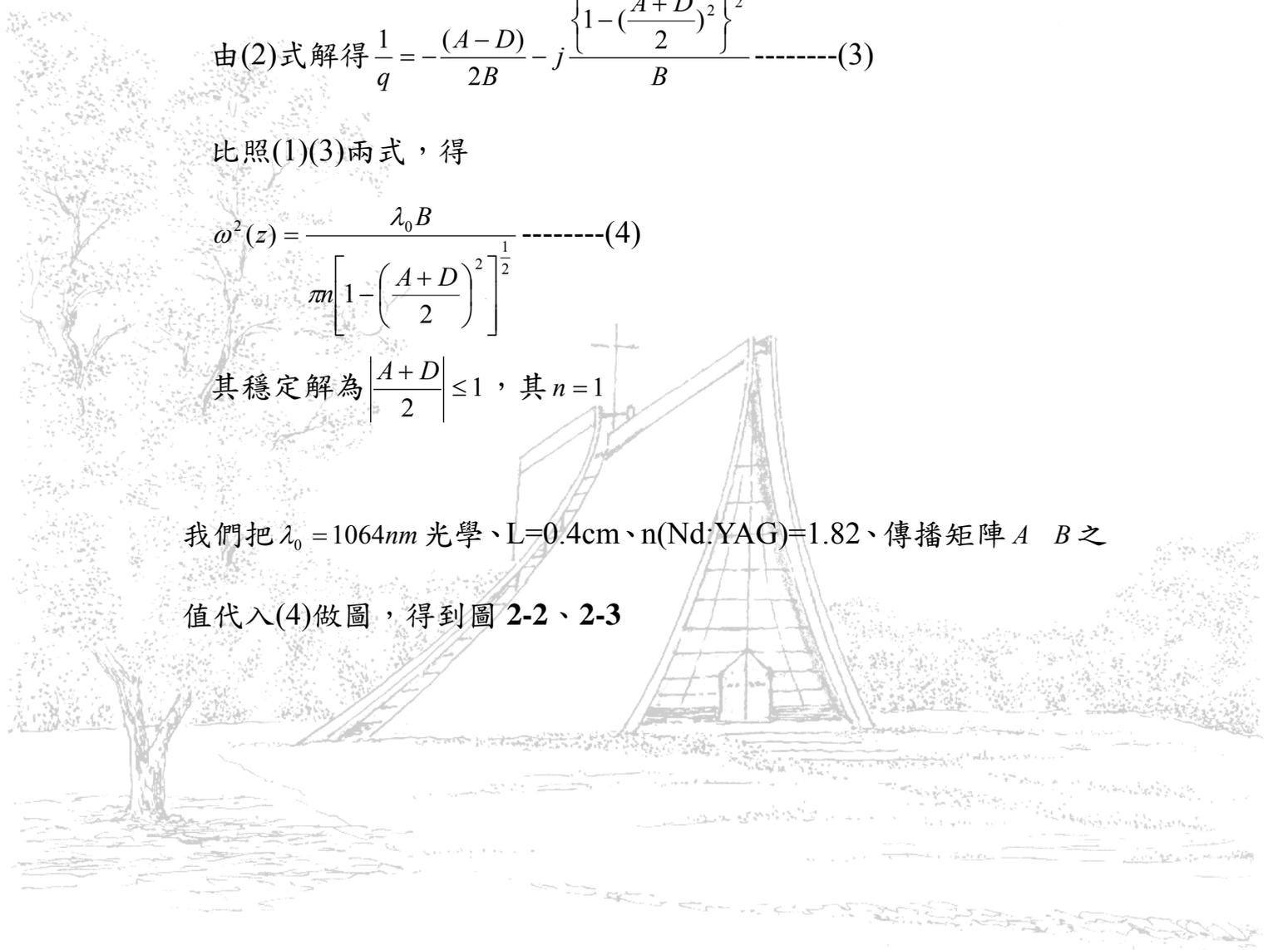
$$\text{由(2)式解得 } \frac{1}{q} = -\frac{(A-D)}{2B} - j \frac{\left\{1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}}{B} \text{-----(3)}$$

比照(1)(3)兩式，得

$$\omega^2(z) = \frac{\lambda_0 B}{\pi \left[1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \text{-----(4)}$$

其穩定解為  $\left|\frac{A+D}{2}\right| \leq 1$ ，其  $n=1$

我們把  $\lambda_0 = 1064nm$  光學、 $L=0.4cm$ 、 $n(Nd:YAG)=1.82$ 、傳播矩陣  $A$   $B$  之  
值代入(4)做圖，得到圖 2-2、2-3



下圖為推動(SA or OC)的平移台進而改變  $L_3$  的範圍，其他元件 or 參數都如上頁值固定不變， $l_1$  的固定為 4.9cm

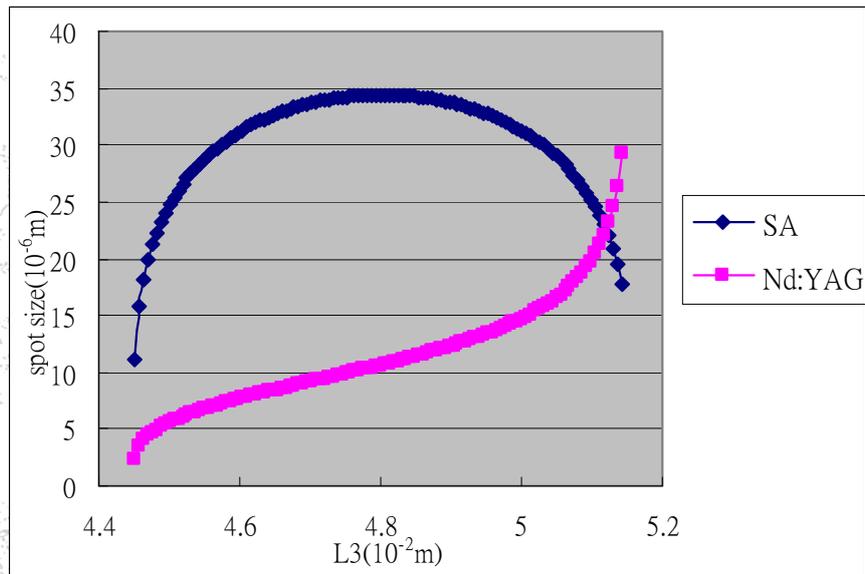


圖 2-2 雷射晶體與輸出鏡上光點大小對  $L_3$  的關係圖

我們發現當  $L_3=4.7997\text{cm}$  時，SA 的光點最大，其  $\omega$  極大值為  $34.407 (10^{-6}\text{m})$ ， $L_3$  長度越長，雷射晶體的光點越大。 $L_3$  改變範圍為  $4.452\text{cm}\sim 5.1413\text{cm}$ 。

下圖為推動雷射晶體後 5cm 聚焦透鏡的平移台進而改變  $L_1$  的範圍，其他元件 or 參數都如上頁值固定不變， $l_3$  的固定為 4.9cm，腔長為 183cm

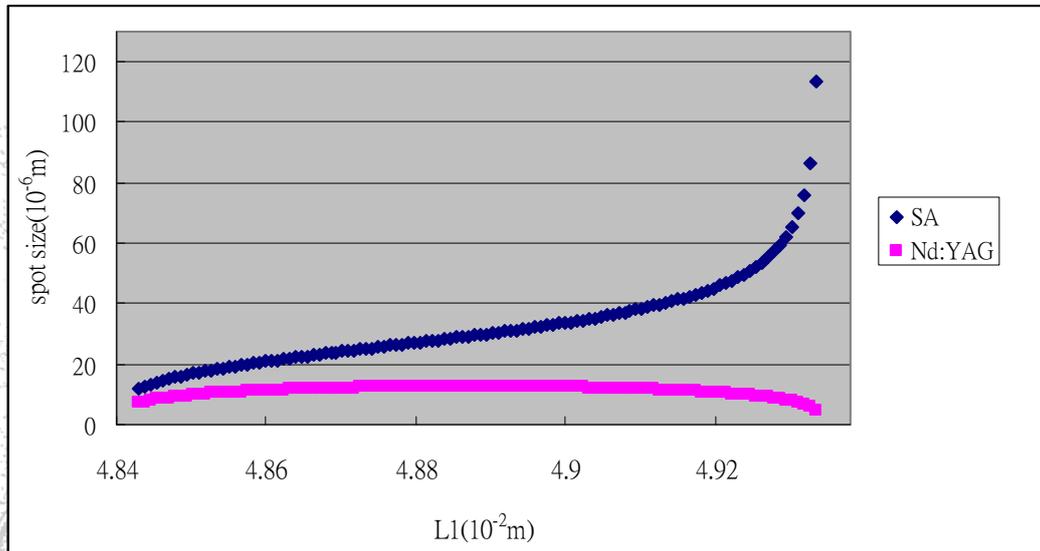


圖 2-3 雷射晶體與輸出鏡上光點大小對  $L_1$  的關係圖

在飽和吸收體上的光點大小隨著  $L_1$  增加而變大。在  $L_1=4.884\text{cm}$  時，摻鉍釷鋁石榴石上光點半徑有一極大值，其的極大值為  $12.548(10^{-6}\text{m})$ 。當  $L_3=4.9\text{cm}$ ， $L_1$  改變的穩定區範圍為  $4.847 \text{ cm} \sim 4.9334\text{cm}$ 。

## 2-2 鬆弛振盪(Relaxion Oscillation) 理論

鬆弛振盪理論[9]，可以得到鬆弛振盪頻率  $\omega_{sp}$ ，可表式成

$$\omega_{sp} = \sqrt{(r-1)\gamma_2\gamma_c}$$

$$\text{其中 } \gamma_c = \frac{1}{\tau_c} \quad \gamma_2 = \frac{1}{\tau_2}$$

$\omega_{sp}$ : 鬆弛振盪頻率

$r$ : 輸入功率/臨界功率

$\gamma_c$ : 腔體內儲存能量的衰退速率

$\tau_c$ : 腔體衰退時間

$\gamma_2$ : 原子的衰退速率

$\tau_2$ : 原子的生命週期

由上式可知，腔內損失能量速度愈快或是增益介質的反轉粒子衰退速度愈快，則鬆弛振盪頻率也就愈大，這跟共振腔有沒有調好有關。其次，輸入功率愈大，則鬆弛振盪頻率也就愈大。

## 2-3 被動 Q 開關的理論

被動 Q 開關的理論[10][11]，得到被動 Q 開關的寬度和周期的式子。飽和吸收體被動 Q 開關可以用下面兩個式子推出被動 Q 開關的脈衝週期與脈衝寬度。

$$t_w = \frac{S_p t_{rt}}{\gamma_{sat-rt}} \left[ \frac{\delta(1+\delta)\eta}{\delta - \ln(1+\delta)} \right] \text{-----}(1)$$

$t_w$ :脈衝寬度  $S_p$ :脈衝形狀係數  $t_{rt}$ :光在共振腔中繞一圈的時間

$\eta$ :雷射脈衝的能量抽出效率

$\delta$ :飽和時腔體損失/未飽和時的腔體損失

$\gamma_{sat-rt}$ :來回一圈飽和吸收常數

$$t_p = \frac{\tau P_{abs,thresh}}{P_{abs}} \text{-----}(2)$$

$t_p$ :脈衝週期  $\tau$ :增益介質粒子的生命期  $P_{abs}$ :激發吸收功率

$P_{abs,thresh}$ :要求達到雷射反轉密度閾值的激發功率

實驗的  $\tau = 550 \text{ us}$   $P_{abs} = 428.3 \text{ mW}$  ,  $P_{abs,thresh} = 200 \text{ mW}$

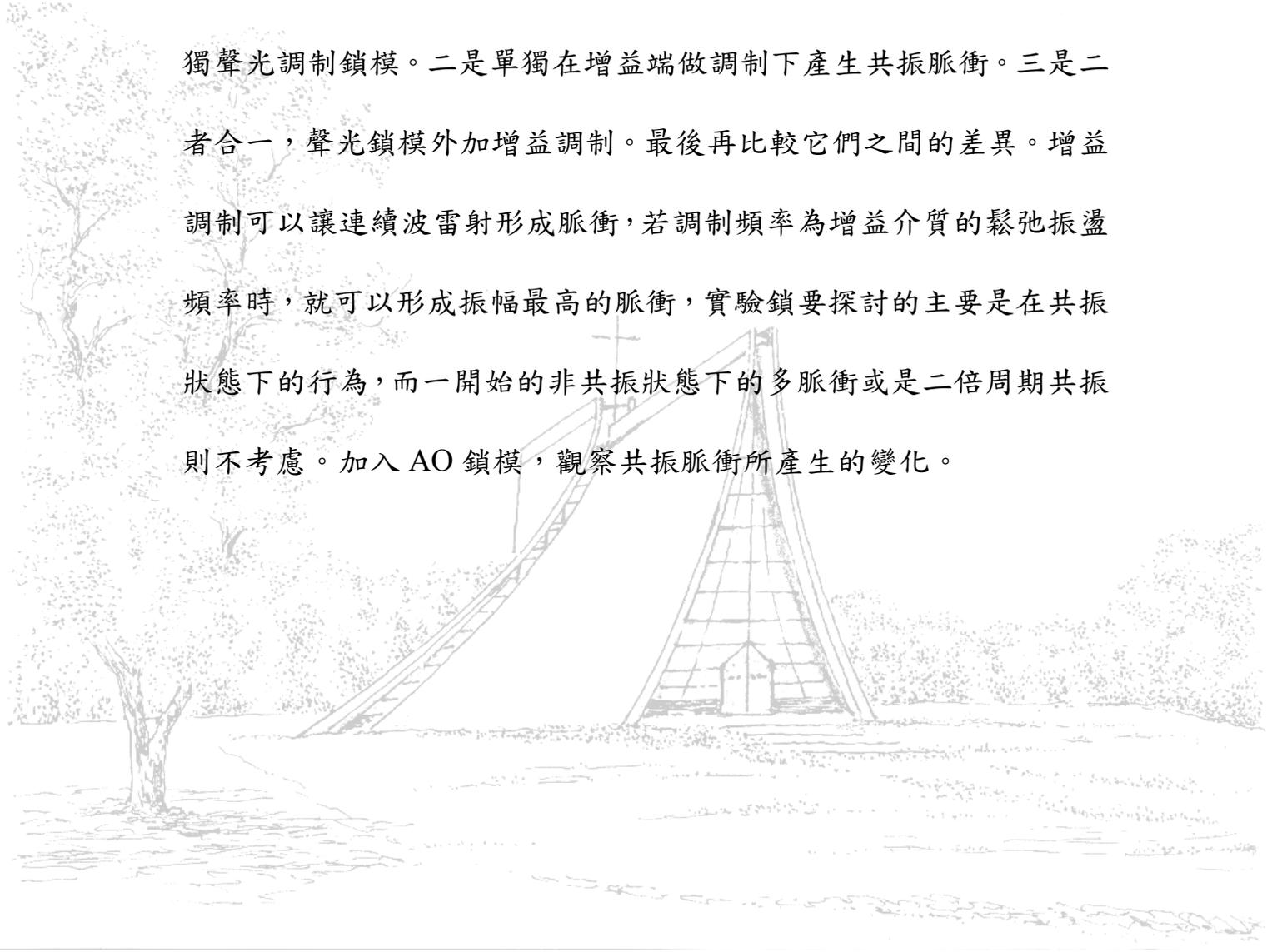
故理論的  $t_p = 256.8 \text{ us}$

在同樣參數下所做的實驗得到數據為  $t_p(\text{實驗}) = 440 \text{ us}$

## 第三章 主動鎖模外加增益調制雷射

### 3-1 前言

本章討論主動鎖模外加增益調制雷射，此章共分三部份，一是單獨聲光調制鎖模。二是單獨在增益端做調制下產生共振脈衝。三是二者合一，聲光鎖模外加增益調制。最後再比較它們之間的差異。增益調制可以讓連續波雷射形成脈衝，若調制頻率為增益介質的鬆弛振盪頻率時，就可以形成振幅最高的脈衝，實驗鎖模要探討的主要是在共振狀態下的行為，而一開始的非共振狀態下的多脈衝或是二倍周期共振則不考慮。加入 AO 鎖模，觀察共振脈衝所產生的變化。



### 3.2 驗架構與方法

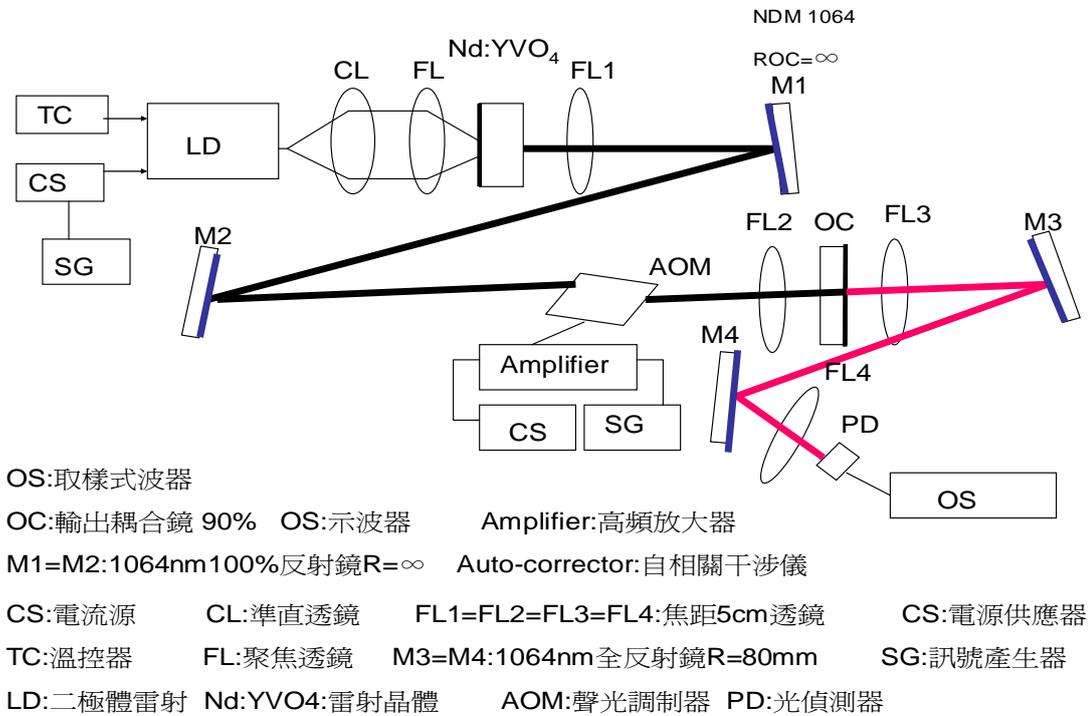


圖 3-1 實驗架構圖

此實驗我們用摻鈮鋁石榴石(Nd:YAG)晶體晶體(4×4×4mm)，摻鈮量為 1%，實驗架設如圖 3-1。我們使用的雷射二極體，最大輸出功率為 1.5W，操作時之峰值波長為 808nm。半導體雷射的電流由一穩定電流源來供應，並且以溫度控制器對雷射二極體作溫度控制在 25°C，使雷射二極體能產生穩定的輸出功率和波長。共振腔為四鏡式直腔。輸出耦合鏡穿射率為 90%。

我們依次序架好半導體雷射，半導體雷射後物鏡，菱鏡對，雷射晶體前聚焦透鏡，雷射晶體，並使光點聚焦後打在雷射晶體上使其後

方出現黃色小亮點，在依次先用 10cm 凹面聚輸出鏡架二鏡式，架好在使單橫模範圍最大化，再調整 pump 位置使其最佳化。接著，改二鏡式腔為三鏡式腔，並利用兩面反射鏡架 Z 行腔來增加腔長，拉長腔為約 183cm 左右皆可 lasing 以後，放入聲光調制器，再做對光動作，使之再次 lasing。

我們先在輸出鏡靜候觀察出來光點是否為單一橫模，我們期望是一個又圓又大的單一光點，且推動腔中兩個平移台時(一為架在雷射晶體後聚焦透鏡，一是架在輸出耦合鏡上)都能使光點盡可能保持一個又圓又大的光點(因大的光點比較好看得出來是單橫模還是多橫模，小的光點就比較看不出來)，調好以後，就開始打開聲光的訊號產生器和訊號放大器的電流供應器電源，調整 AO 頻率使其等於光來反一圈的  $1/2$  頻率，使其產生鎖模，產生出鎖模以後，調整腔體使其鎖模穩定，就可以開始作取圖和量測的動作。

若我們要做增益調制雷射，是用相同的實驗架構，只是在 LD 半導體雷射端多加一個波形訊號產生器。同理，我們若是要做增益調制主動鎖模雷射，也是用相同的實驗架構。

### 3.3 聲光主動鎖模雷射

以下是輸出功率對晶體吸收的功率做圖

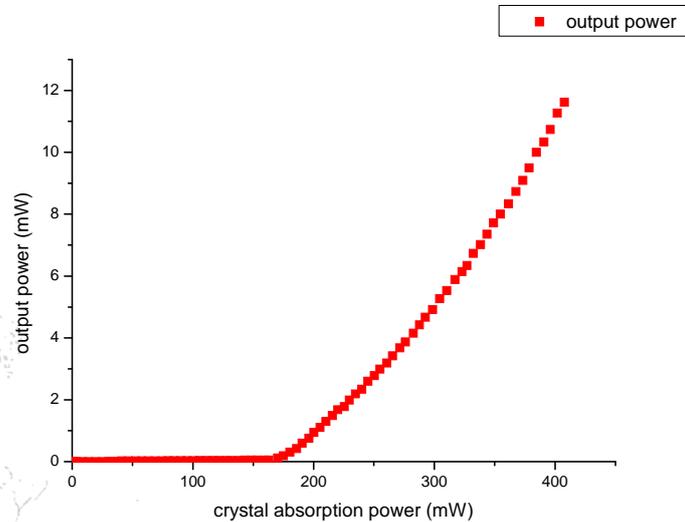


圖 3-2 輸出功率對晶體吸收的功率的關係圖

晶體吸收功率為在雷射晶體前後各測一次 808nm 的功率，再前面所測得的減掉後面所測得的，就為雷射晶體的吸收功率。圖 3-2 當晶體吸收功率約為 170 mW，則開始有輸出功率，其增長關係為一直線。

我們變動的參數有，輸入電流(改變雷射晶體的吸收功率，為真正的輸入功率)，聲光調制頻率，聲光調制振幅。觀察的應變參數有，鎖模寬度，鎖模振幅和輸出功率，因為鎖模重複率以固定了就為光走腔體來回一圈時間，故應沒有什麼變化。

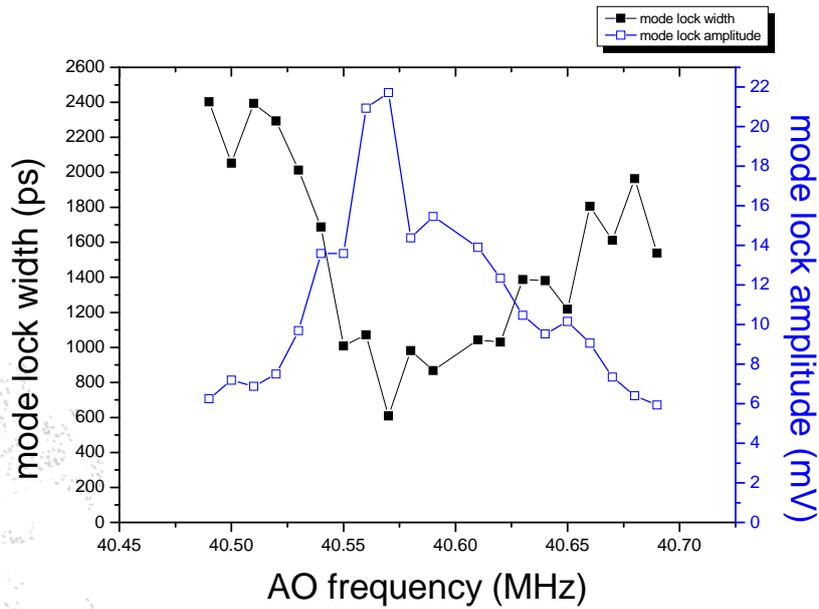


圖 3-3 鎖模脈衝寬度和鎖模振幅對聲光調制頻率的關係圖

圖 3-3 聲光調制頻率對鎖模寬度的影響。鎖模寬度為取樣示波器鎖量測到的；晶體吸收功率 539mW、溫度 25.05C、聲光振幅+3 dBm，我在有形成鎖模的頻率範圍之下做的，範圍在 40.49MHz-40.69MHz 之間。我測得同一個調制頻率位置上的鎖模振幅和鎖模寬度是不同時間下測得。因為取樣是波器沒辦法同時顯示兩個值。由圖可知，鎖模寬度對於聲光調制頻率改變下會有一個最窄的極值，當脈衝越窄時相對的振幅也就越高。越往極值兩側，其鎖模的效果越差(由黑線可知)，振幅越低，寬度越寬，越不穩定，上下起伏大，越難測到精準的數據。

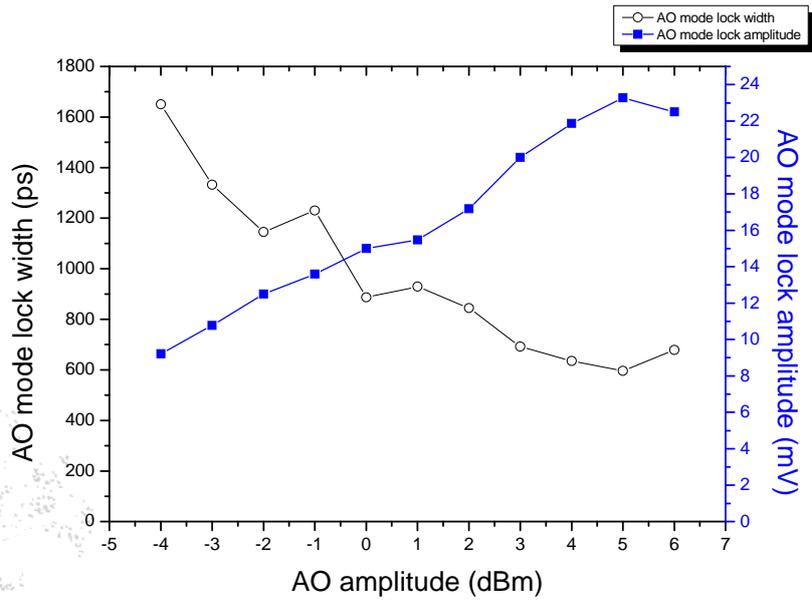


圖 3-4 聲光調制振幅與鎖模寬度的關係

圖 3-4 聲光調制振幅對鎖模寬度的影響。我們理當可推知，調制振幅越大，其鎖模的振幅也會越大，若振幅越大，則代表了鎖模寬度越窄，故其推測與實驗數據應是符合的。但可能鎖模不穩定，鎖模寬度沒有測得很準。導致黑線在-1dBm 的位置有走高的趨向。此圖的晶體吸收功率 539mW 、溫度 25.05C 、聲光調制頻率 40.594M Hz

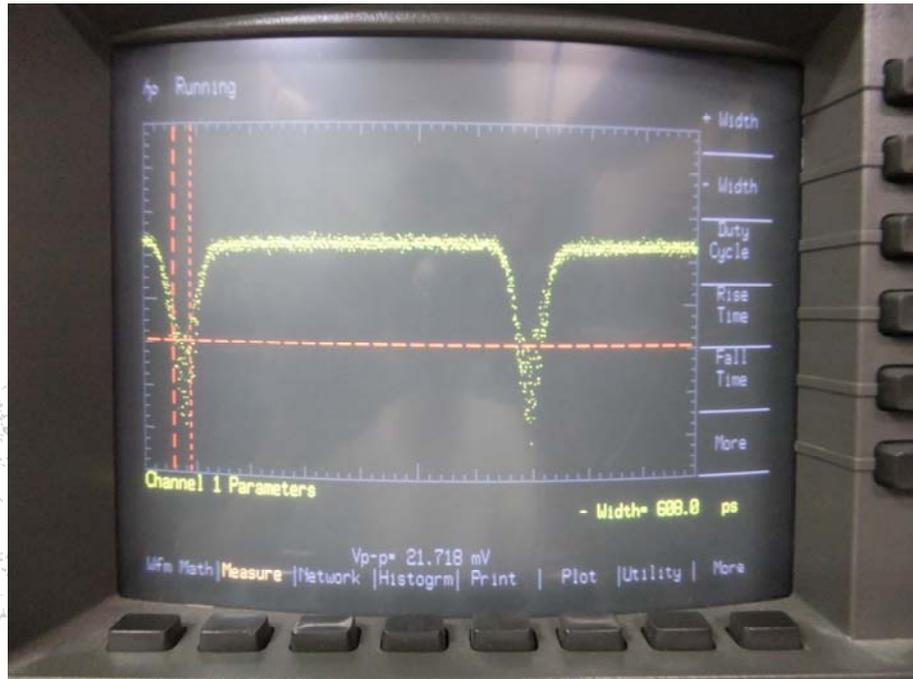


圖 3-5 典型的聲光鎖模脈衝

圖 3-5 取樣示波器所量測的聲光鎖模脈衝，此張為改變聲光調制頻率，使的脈衝振幅最大，寬度最窄所量測到最佳的聲光脈衝圖。輸入電流為 1134.9mA，晶體吸收功率為 539Mw，AO 調制振幅為 +3dBm，AO 調制頻率為 40.57MHz，脈衝寬度為 608ps，脈衝振幅為 21.718mV

### 3.3 增益調制雷射

此節為討論在增益端做調制對摻釹鈮酸鈣雷射的影響，實驗架構如圖 3-1，腔長為 183 公分，輸出耦合鏡穿射率為 90%。主要在輸入電流源做訊號調制，使雷射光經調變後形成脈衝。

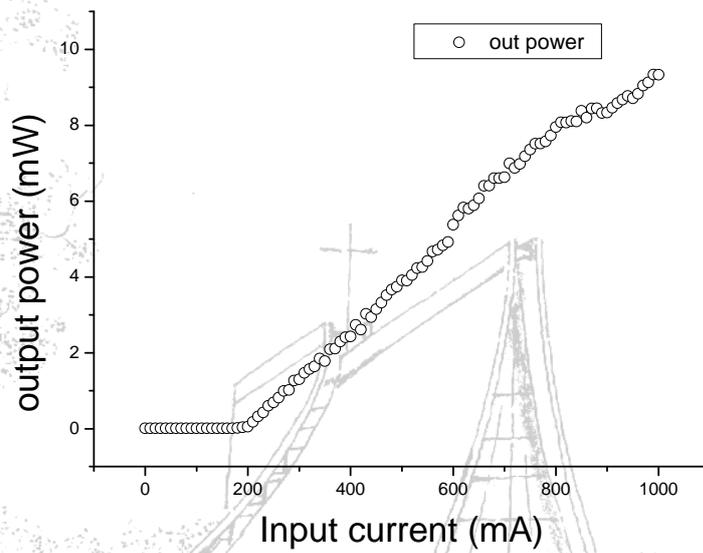


圖 3-6 出功率對輸入電流的關係圖

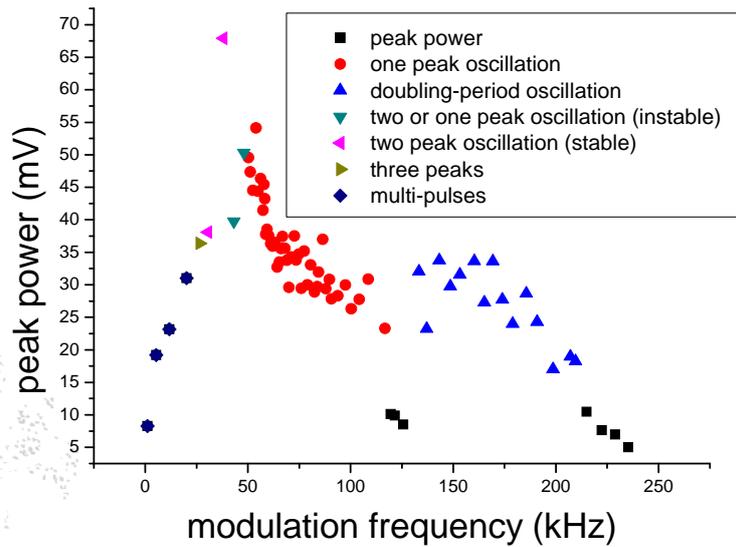


圖 3-7 制脈衝與增益調制頻率的關係圖

圖 3-7 為固定調制電壓為 900mV，輸入電流為 700m A，脈衝振幅對調制頻率的關係，並記錄脈衝的變化，由圖可知，一開始還沒 0~50.32kHz，為多脈衝。起先為很多跟脈衝，隨著調制頻率的往上加，脈衝數目會越減越少，振幅則會越來越大，到達只剩二根脈衝或者為單一脈衝時，其振幅有時會比單一還來的大，但是很不穩定，此時已接近達到共振頻率了。達到鬆弛振盪頻率時，脈衝會為單一脈衝，且振幅為最大。隨著調制頻率繼續向上調，單一脈衝振幅開始往下降，但有機會會出現兩倍周期的共振或三倍周期的共振(在調制電壓更大時會發生)，最後才變為一般的旋波(無脈衝)。

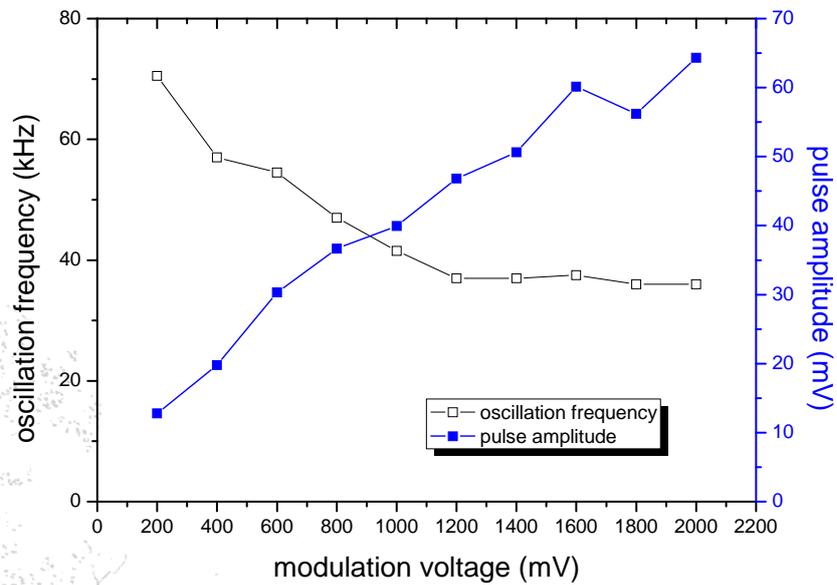
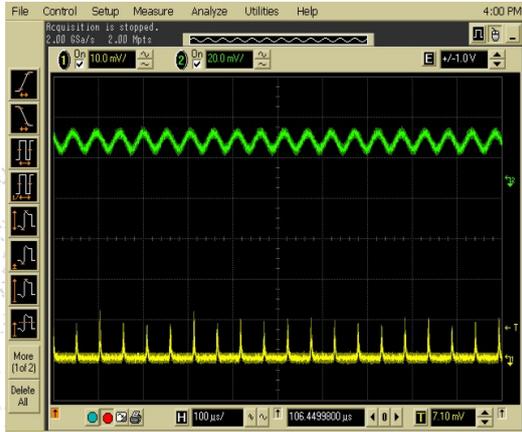


圖 3-8 共振頻率與調制電壓關係圖

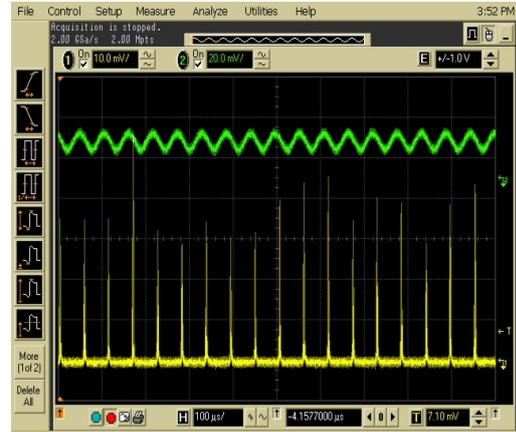
圖 3-8 為調制電壓對共振頻率與共振時脈衝振幅的影響。當增益調制電壓加大時，鬆弛振盪頻率會減少，減少的幅度會隨著電壓值越大而變小。發生共振時，脈衝振幅會隨著調制電壓上升而增加。有圖可知，輸入電流為 804.8Ma，輸出功率為 8.02mW。

### 3.5 聲光主動鎖模對增益調制摻釹鈮酸鈣雷射的效應

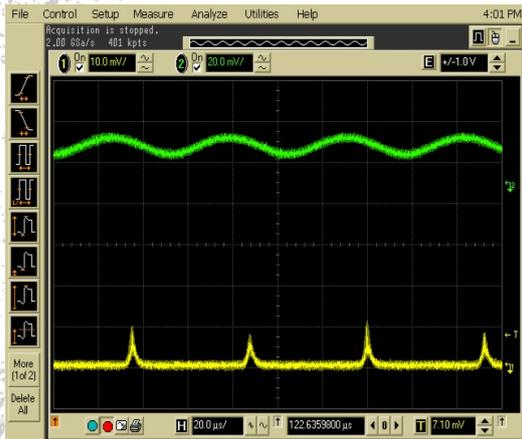
再來為增益調制摻釹鈮鋁石榴石雷射(非摻釹鈮酸鈣雷射)，加入聲光主動鎖模，比較有加時和沒加時之間的差異。



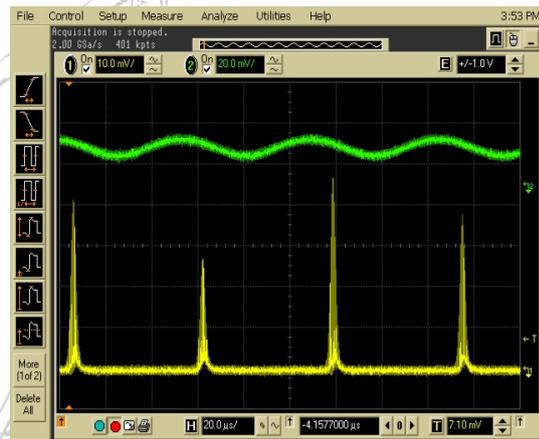
(a)



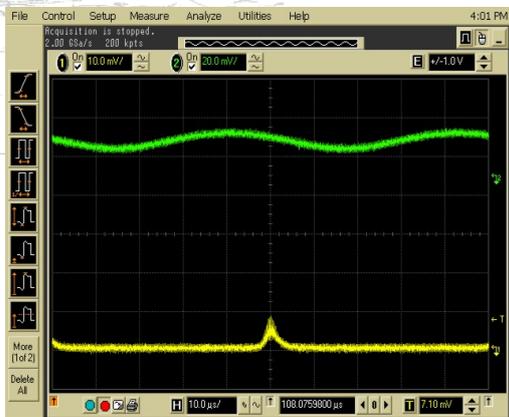
(b)



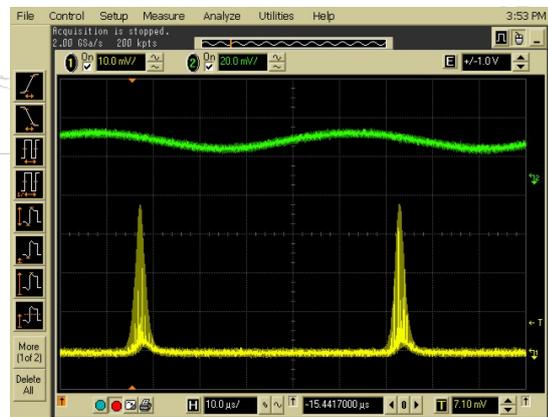
(c)



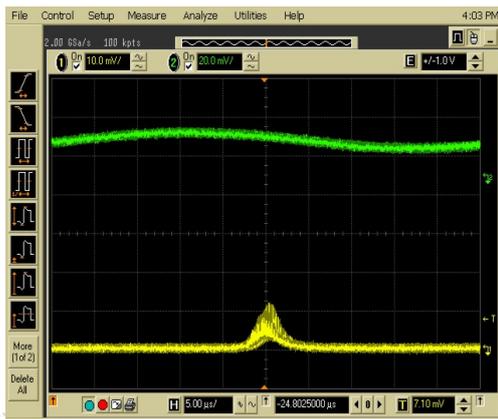
(d)



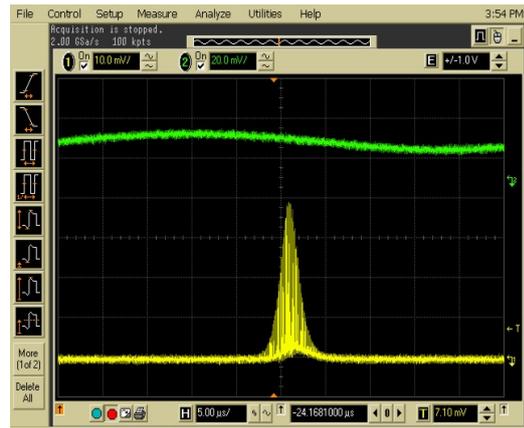
(e)



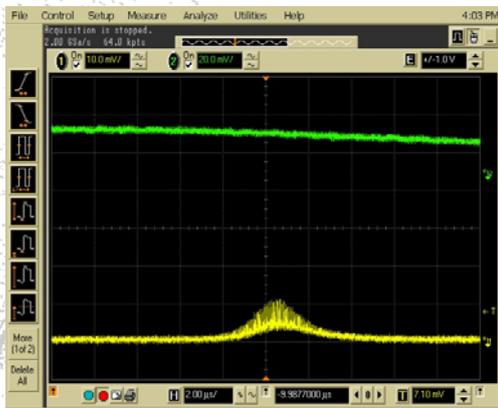
(f)



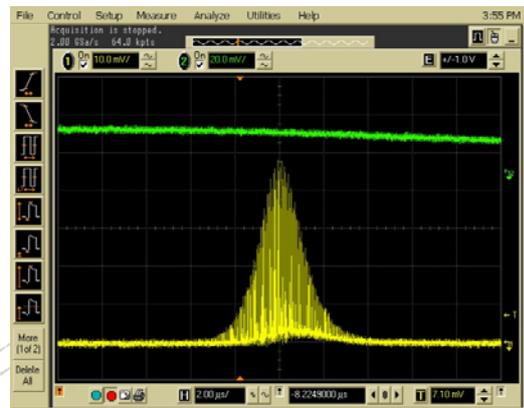
(g)



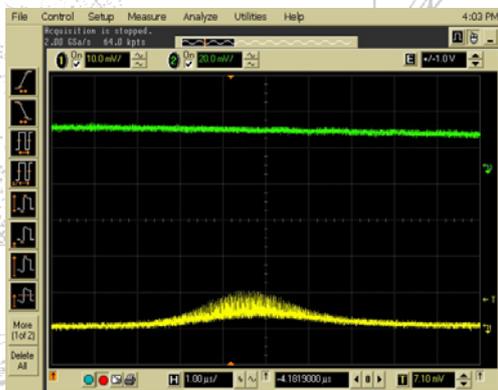
(h)



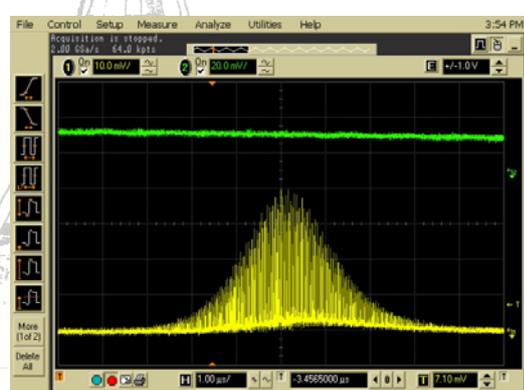
(i)



(j)



(k)

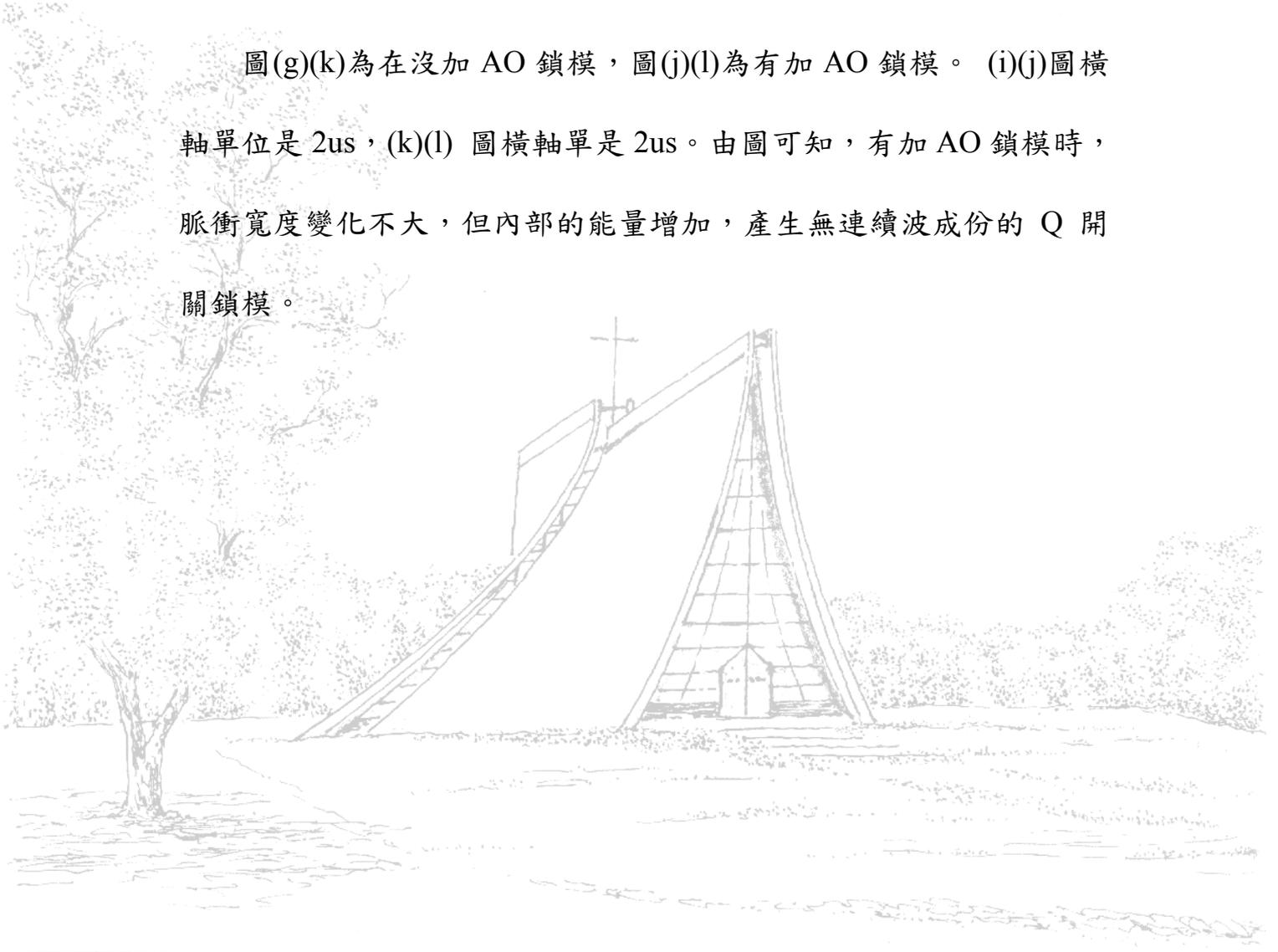


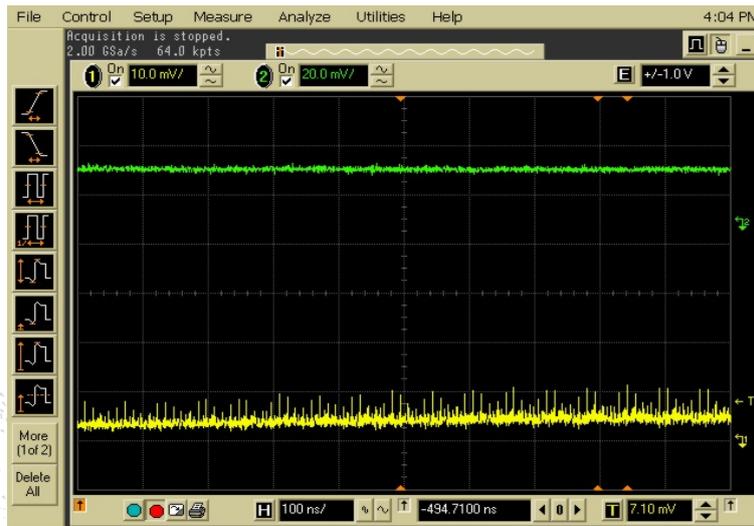
(l)

圖 3-9 為示波器在大尺寸下，比較有加與沒加聲光主動鎖模的增益調制摻釹鈮酸鈮雷射的情形。示波器圖的綠線為被調制的激發光波，黃線為雷射光。已知輸出電流為 800.2mA，輸出功率為 7.95mW，增益調制電壓為 700mV，共振頻率為 19.1kHz，增益調制的脈衝週期

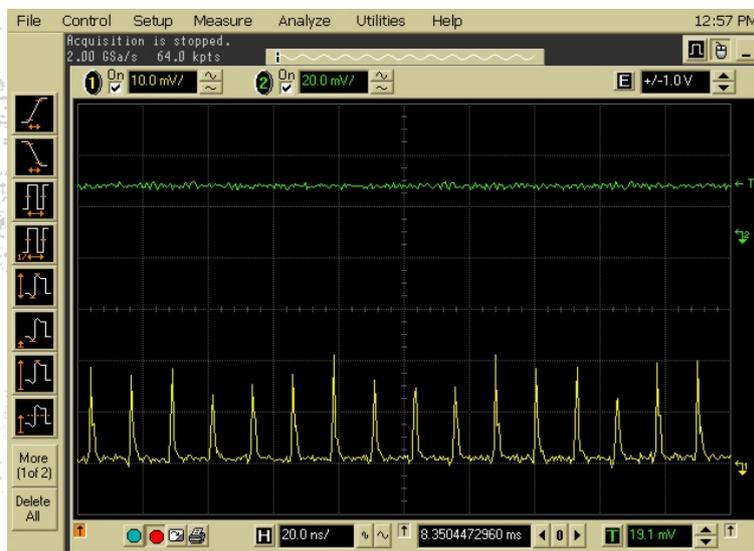
為  $52\mu\text{s}$ ，(a)(b)圖橫軸單位是  $100\mu\text{s}$ ，(c)(d)圖橫軸單位是  $20\mu\text{s}$ ，(e)(f)圖橫軸單位是  $10\mu\text{s}$ ，(g)(h)圖橫軸單位是  $5\mu\text{s}$ 。(a)(c)(e)圖為沒加 AO 鎖模，(b)(d)(f)圖為有加 AO 鎖模。由圖可知，加入 AO 鎖模會使增益調制共振時的脈衝振幅上升 4~5 倍，對於脈衝週期不會造成影響

圖(g)(k)為在沒加 AO 鎖模，圖(j)(l)為有加 AO 鎖模。(i)(j)圖橫軸單位是  $2\mu\text{s}$ ，(k)(l)圖橫軸單位是  $2\mu\text{s}$ 。由圖可知，有加 AO 鎖模時，脈衝寬度變化不大，但內部的能量增加，產生無連續波成份的 Q 開關鎖模。





(m)



(n)

圖 3-9 有加聲光鎖模的增益調制共振時的 Nd:YAG 雷射鎖模脈衝

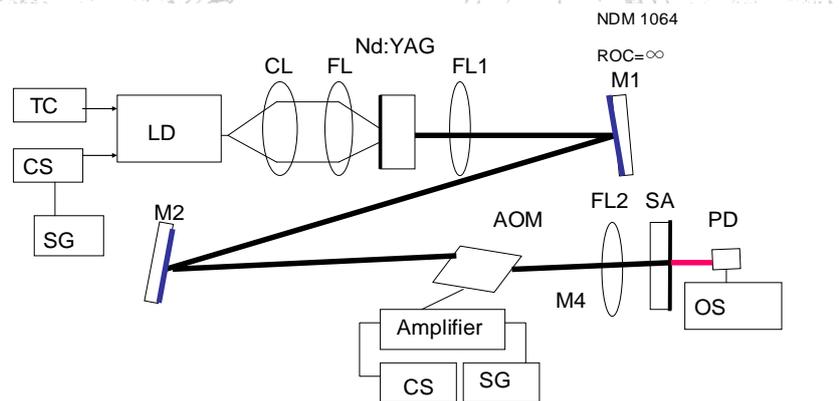
圖 3-9(m)為沒加聲光鎖模時共振頻率下的 Q 開關鎖模，有圖可知，鎖模的振幅較低，且振幅也不穩定，(m)圖橫軸單位是 100ns。圖 3-9(n) 為有加聲光鎖模時共振頻率下的 Q 開關鎖模可看出有加 AOML 的增益調制下 Q 開關鎖模的鎖模脈衝，鎖模周期約 13ns 且鎖模脈衝從底線產生，(n)圖橫軸單位是 100ns。

## 第四章 被動 Q 開關外加主動鎖模雷射

### 4.1 前言

本章討論混合飽和吸收體( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )產生被動 Q 開關與聲光鎖模雙機制，產生主動鎖模被動 Q 開關的摻釹鈮鋁石榴石雷射，本章共分兩節，一是利用飽和吸收體產生被動 Q 開關。二是被動 Q 開關外加主動鎖模產生 Q 開關鎖模。最後再比較它們之間的差異。

本實驗所用的飽和吸收體( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )因回復時間慢，回復時間(recovery time)為  $8.5\mu\text{s}$ [12]，故不適合做鎖模較適合做 Q 開關，即使有辦法形成 Q 鎖模，其鎖模也不太漂亮。故我們利用外加主動鎖模使的被動 Q 鎖模的鎖模鎖得更漂亮，並可進一步提高 Q 開關鎖模的峰值功率。



SA:飽和吸收體 $T=80\%$   $PR=95\%$  OS:示波器 Amplifier:高頻放大器 PD:光偵測器  
M1=M2:1064nm 100%反射鏡 $R=\infty$  Auto-corrector:自相關干涉儀  
CS:電流源 CL:準直透鏡 FL1=FL2=FL3:焦距5cm透鏡 CS:電源供應器  
TC:溫控器 FL:聚焦透鏡 NDM:1064nm全反射鏡 SG:訊號產生器  
LD:二極體雷射 Nd:YVO4:雷射晶體 AOM:聲光調制器

圖 4-1 實驗架構圖

## 4-2 被動 Q 開關飽和吸收體(Cr:YAG)雷射

以下是晶體吸收的功率對輸出功率做圖

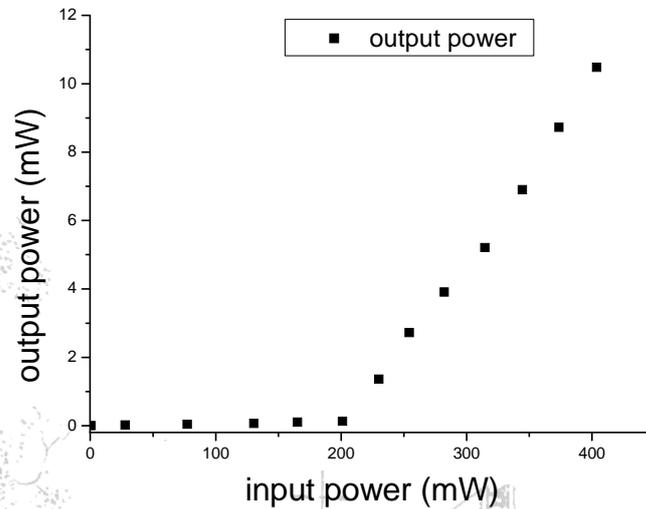


圖 4-2 輸出功率對晶體吸收的功率的關係圖

圖 4-2 當晶體吸收功率約為 201.1mW，則開始有輸出功率，增長關係為一直線。

我的被動 Q 開關雷射實驗，腔長約 183 公分，為長腔的被動 Q 開關改變參數有，輸入功率(實際為晶體的吸收功率)。觀測到相對變動的結果有:Q 開關的頻率與周期，脈衝寬度，脈衝的峰值功率，輸出功率。實驗架構跟圖 3-1 大致雷同，差別只是把穿透率 90%的輸出耦合鏡改成穿透率 80%反射率 PR=95%，Cr:YAG 的飽和吸收體。

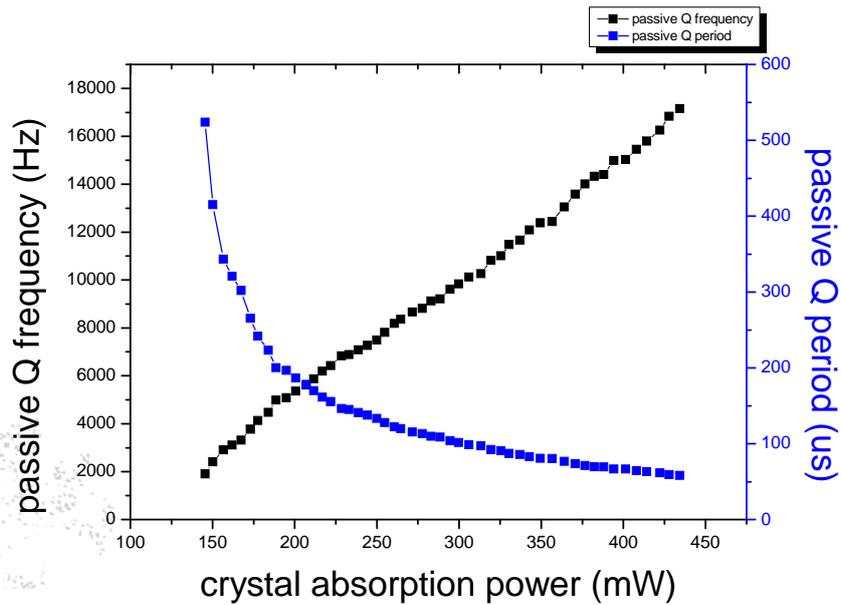


圖 4-3 被動 Q 開關頻率與周期對晶體的吸收功率關係圖

圖 4-3 為晶體吸收功率對飽和吸收體的被動 Q 開關脈衝頻率與周期的影響。由圖可看出當晶體吸收功率(輸入功率)越大，則 Q 的周期也就越大，Q 的頻率也就越小，因為脈衝頻率的倒數就是脈衝周期，當晶體吸收功率 434.2m W 時，Q 脈衝周期為 58.3 $\mu$ s。當晶體吸收功率 145.38m W 時，Q 脈衝周期為 523.8 $\mu$ s。故因此推測，光強度越弱(輸入功率弱)時，腔體內儲蓄能量需要花上更久的時間，才能儲蓄足夠的強度，才能通過飽和吸收體產生脈衝光。與光強時(輸入功率大)比較。故晶體吸收功率越大，脈衝周期越短；晶體吸收功率越小，脈衝周期越長。

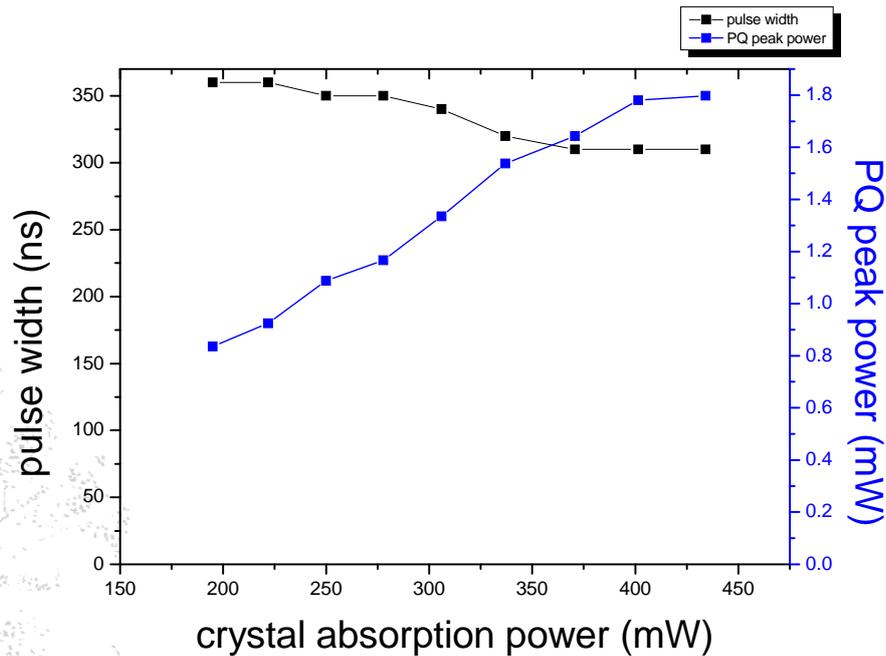


圖 4-4 被動 Q 開關寬度與峰值功率對於晶體吸收功率的關係圖

晶體吸收功率對於被動 Q 開關的脈衝寬度，會造成小幅度的變化；當吸收功率上升時(圖中為相鄰二點差為 50m A)，Q 開關的脈衝寬度也會微幅的下降。我大概是由目測來估計脈衝辦高寬度，故可能會有一些誤差，但實質為這樣的變化。我們再用目測脈衝圖兒估計得到脈衝寬度，所量測到 1064nm 的平均功率，圖 4-2 示波器所量到的脈衝周期，進而推算被動 Q 開關脈衝的峰值功率。如上圖 4-3 所示，Q 脈衝的峰值功率為推算得到的，當輸入功率(晶體吸收功率)上升時，峰值功率也隨之上升。

我所做的飽和吸收體(Cr:YAG，T=80%，PR=95%)最極值的數據此節為展現我所做的被動 Q 開關，調整共振腔的組態，得到的最極值最佳的數據。調整  $L_1$  與  $L_3$  長度，飽和吸收體的光點大小也會改變，

故造成 Q 開關的重複率與振幅也會改變。

以下是典型的被動 Q 開鎖模，沒有加聲光调制器時，在不同示波器時間尺度下的圖。

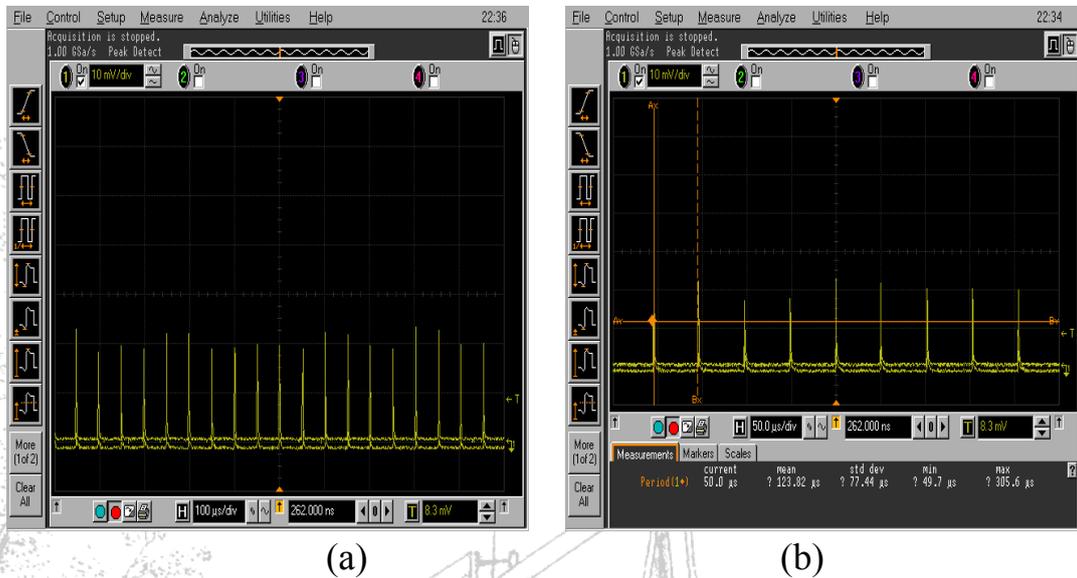
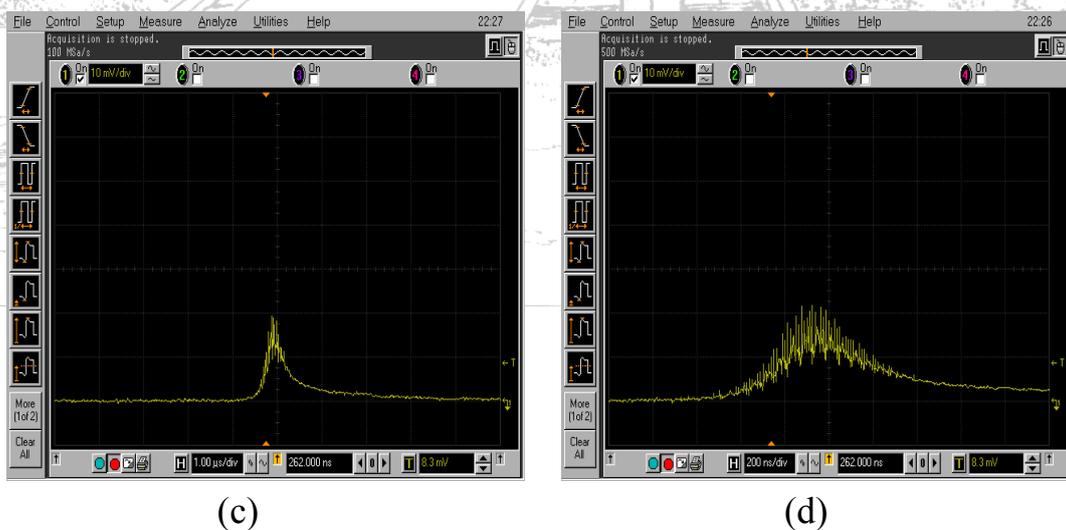


圖 4-5 為典型的飽和吸收體(Cr:YAG)被動 Q 開關脈衝，輸入功率 428.3 m W，輸出功率 4.34 m W，Q 開關周期為 52.2 $\mu\text{s}$ ，Q 開關峰值功率為 0.571W。(a)圖橫軸單位是 100 $\mu\text{s}$ ，(b)圖橫軸單位是 50 $\mu\text{s}$ 。





(e)

圖 4-5 典型的 Cr:YAG 飽和吸收體被動 Q 開關脈衝圖

圖 4-4 為典型的飽和吸收體(Cr:YAG)被動 Q 開關脈衝，輸入功率 428.3 m W，輸出功率 4.34 m W，Q 開關周期為 52.2us，Q 開關峰值功率為 0.571W。(c)圖橫軸單位是 1us，(d)圖橫軸單位是 200ns。(e)圖橫軸單位是 50ns。

以下為所調整共振腔組態，所得到輸出功率最高、峰值功率最高、脈衝週期最短、脈衝週期最長、脈衝寬度最寬、脈衝寬度最短的被動 Q 開關(沒有加聲光調制器)

### 最長脈衝週期，最高的峰值功率被動 Q 開關脈衝

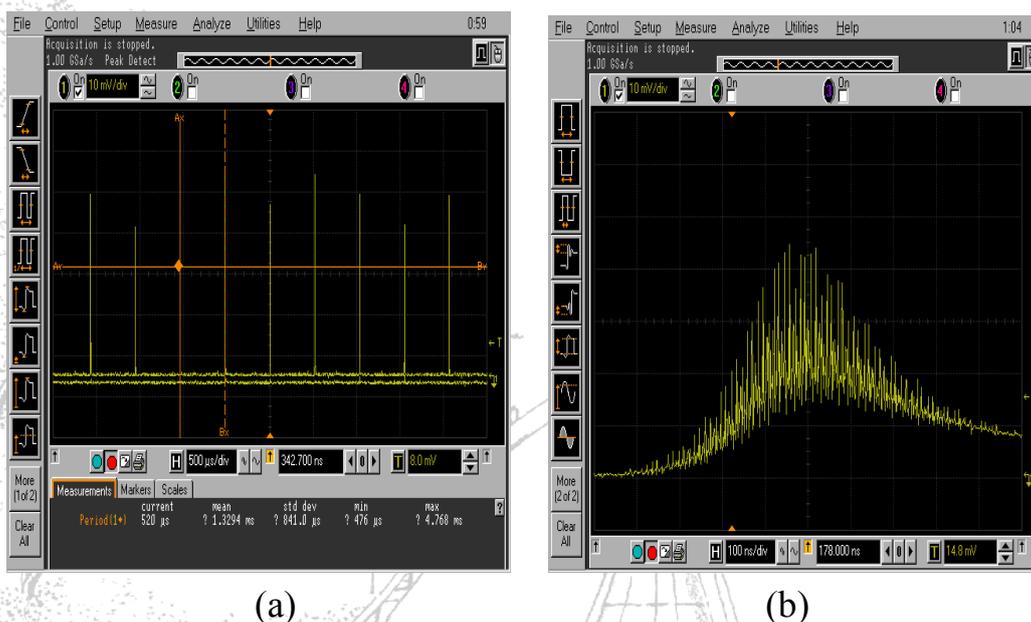
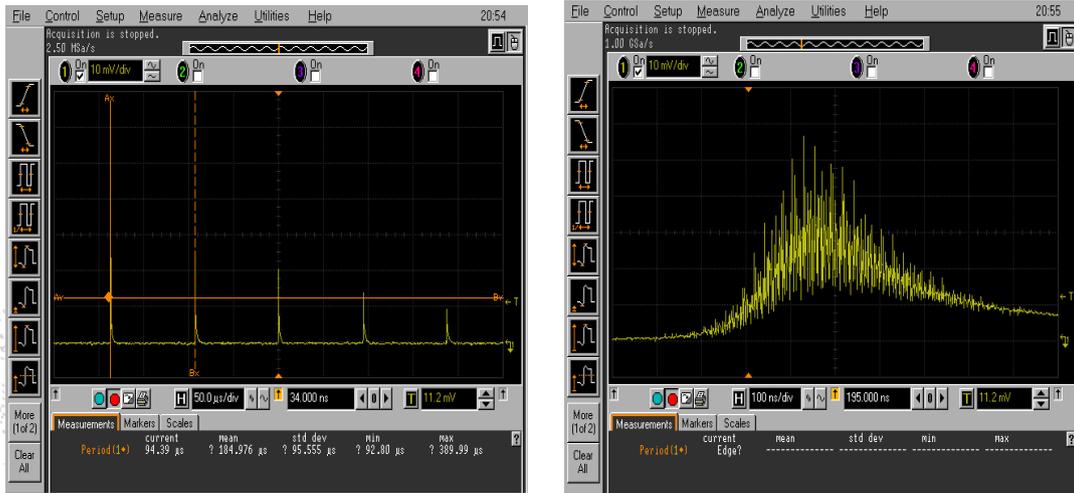


圖 4-6 所量測的最長脈衝週期，最高的峰值功率被動 Q 開關脈衝圖

圖 4-6 為最長脈衝週期，也是最高的峰值功率的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝(沒有加 AO)。Q 開關的脈衝週期為  $520\mu\text{s}$ ，Q 開關的峰值功率為  $7.8\text{W}$ ，半導體雷射輸入電流為  $1000\text{mA}$ ，輸入功率為  $497.1\text{mW}$ ，Q 開關的脈衝寬度為  $320\text{ns}$ ，輸出功率為  $4.8\text{mW}$ 。(a)圖橫軸單位是  $500\mu\text{s}$ ，(b)圖橫軸單位是  $100\text{ns}$ 。

## 最高輸出功率被動 Q 開關脈衝



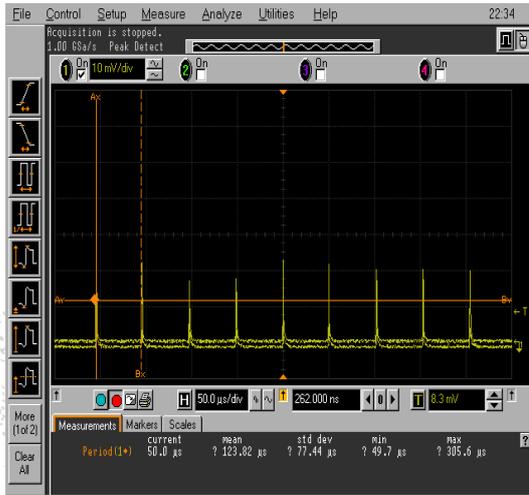
(a)

(b)

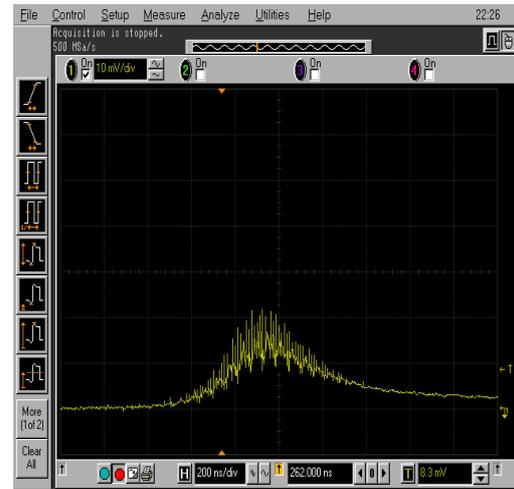
圖 4-7 最高輸出功率的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝圖(沒有聲光調制)

圖 4-7 為最高輸出功率的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝(沒有 AO)。輸出功率為 11.98mW，Q 開關的脈衝週期為 94.39μs，Q 開關的峰值功率為 3.78W，半導體雷射輸入電流為 1000mA，輸入功率為 497.1mW，Q 開關的脈衝寬度為 300ns。(a)圖橫軸單位是 50us，(b)圖橫軸單位是 100ns。

## 最短脈衝週期被動 Q 開關脈衝



(a)



(b)

圖 4-8 最短脈衝週期的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝(沒聲光調制)圖

圖 4-8 為最短脈衝週期的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝(沒有 AO)。輸出功率為 4.34mW，Q 開關的脈衝週期為 50 $\mu$ s，Q 開關的峰值功率為 0.493W，半導體雷射輸入電流為 1000m A，輸入功率為 428.3m W，Q 開關的脈衝寬度為 440ns。 (a)圖橫軸單位是 50 $\mu$ s，(b)圖橫軸單位是 200ns。

## 最短脈衝寬度被動 Q 開關脈衝

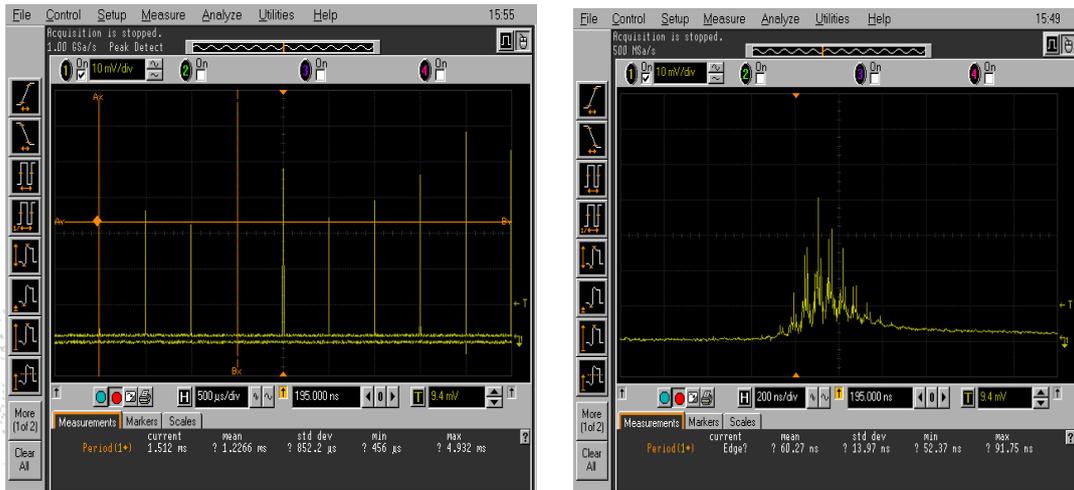


圖 4-9 最短脈衝寬度的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝圖(沒有聲光調制)

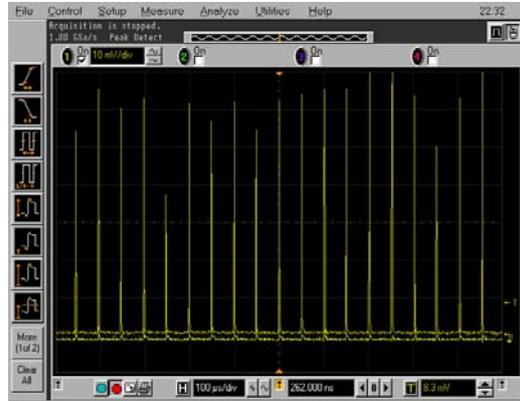
圖 4-9 為最短脈衝寬度的飽和吸收體被動 Q 開關脈衝(沒有 AO)。輸出功率為 2.38mW，Q 開關的脈衝週期為 512 $\mu$ s，Q 開關的峰值功率 5.53W，半導體雷射輸入電流為 1000mA，輸入功率為 419.2mW，Q 開關的脈衝寬度為 200ns。(a)圖橫軸單位是 500 $\mu$ s，(b)圖橫軸單位是 200ns。

### 4.3 聲光主動鎖模對被動 Q 開關(Cr:YAG)雷射效應

再來被動 Q 開關(Cr:YAG)雷射，加入聲光主動鎖模，比較影響。



(a)



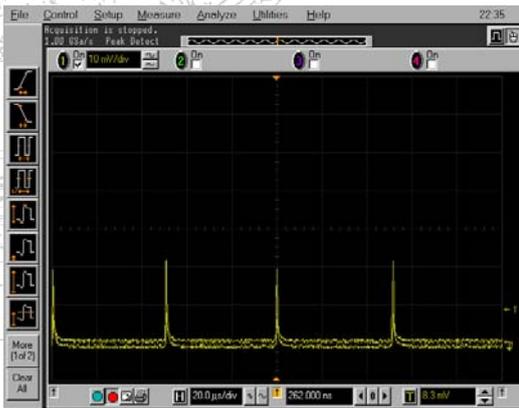
(b)



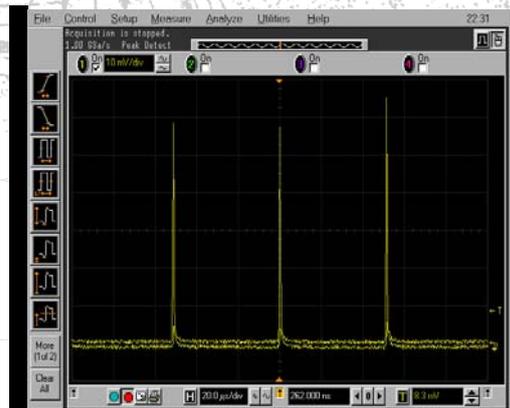
(c)



(d)



(e)



(f)

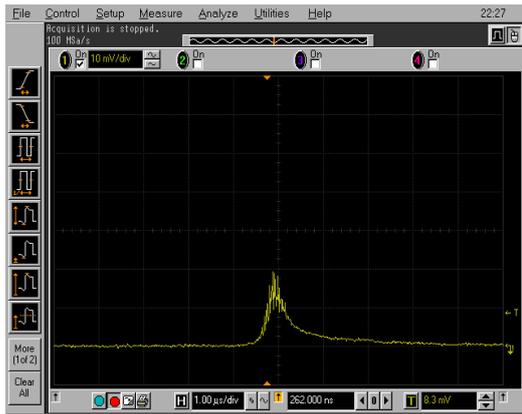
圖 4-10 為示波器在大尺寸下，比較有加與沒加聲光主動鎖模的  
被動 Q 開關(Cr:YAG)雷射的情形。已知輸出功率為 4.34mW，Q 開關  
的脈衝週期為 50 $\mu$ s，Q 開關的峰值功率為 0.493W，半導體雷射輸入  
電流為 1000m A，輸入功率為 428.3m W，Q 開關的脈衝寬度約為  
440 $\mu$ s，AO 調制頻率為 40.223MHz，調制振幅為 2V。(a)(b)圖橫軸單  
位是 100us，(c)(d)圖橫軸單位是 50us，(e)(f) 圖橫軸單位是 20us。  
(a)(c)(e)圖為沒加聲光鎖模，(b)(d)(f) )圖為有加聲光鎖模。

由圖可知，當被動 Q 開關(Cr:YAG)雷射加入 AO 鎖模時，其脈  
衝週期沒有明顯的變化，但是 Q 開關脈衝振幅，約可提高 2~3 倍。

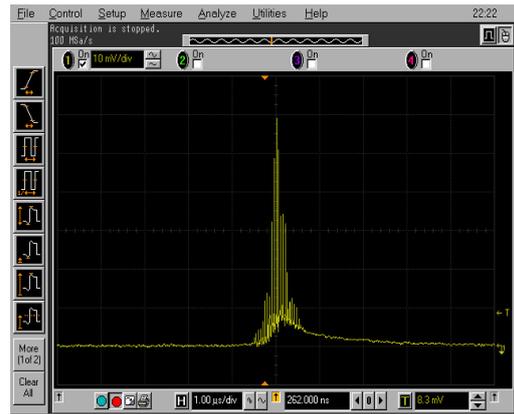


圖 4-10 比較有加聲光鎖模與沒加聲光鎖模的被動 Q 開關(Cr:YAG)

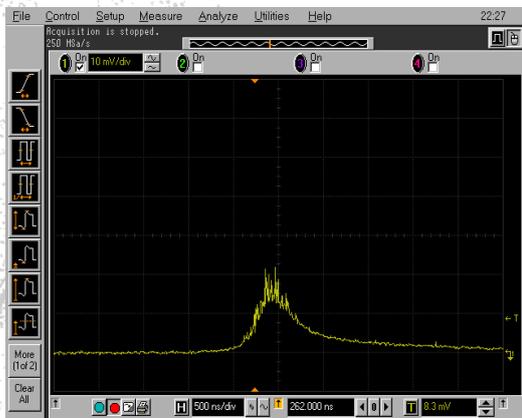
雷脈衝圖



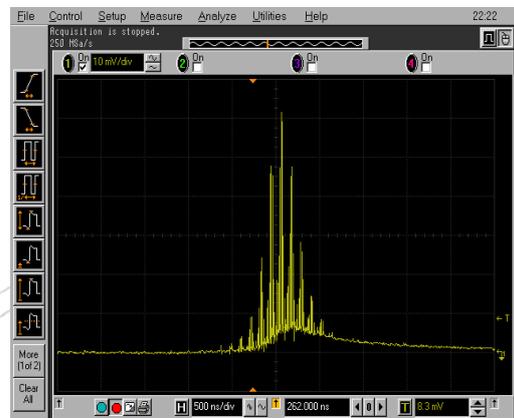
(i)



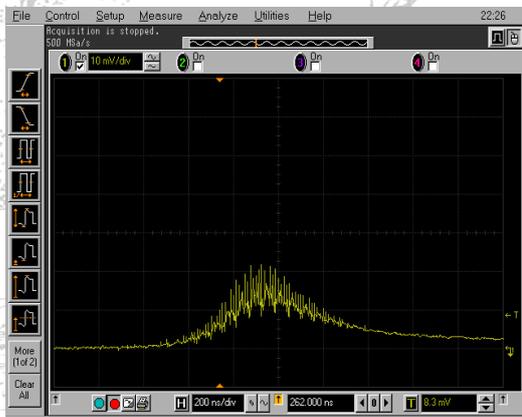
(j)



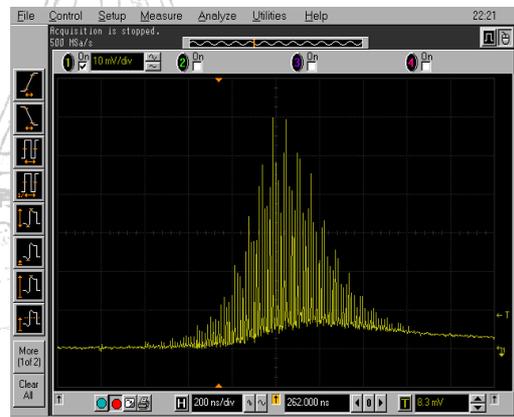
(k)



(l)



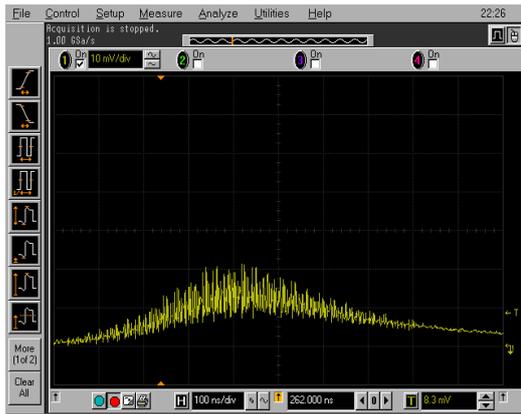
(m)



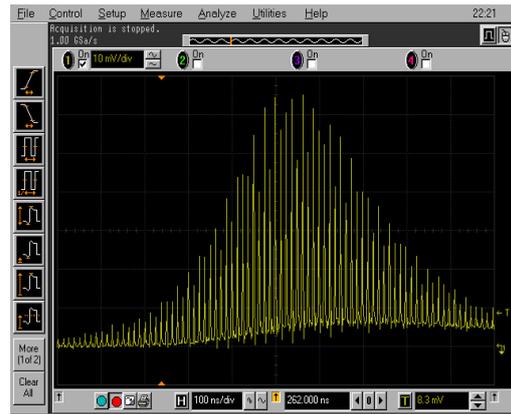
(n)

圖 4-10 比較有加聲光鎖模與沒加聲光鎖模的被动 Q 開關(Cr:YAG)

雷脈衝圖



(o)



(p)

圖 4-10 比較有加聲光鎖模與沒加聲光鎖模的被動 Q 開關(Cr:YAG)

### 雷脈衝圖

上圖為示波器在小尺寸下，比較有加與沒加 AO 主動鎖模的被動 Q 開關(Cr:YAG)雷射的情形。圖(g)(i)(k)(m)(o)為在沒加 AO 鎖模 (h)(j))(l)(n)(p)圖為有加聲光鎖模。(g)(h)圖橫軸單位是 2ns，(i)(j)圖橫軸單位是 1us，(k)(l)圖橫軸單位是 500ns，(m)(n)圖橫軸單位是 200ns，(o)(p)圖橫軸單位是 100ns。由圖可知，有加聲光鎖模時，其 Q 開關內部的鎖模比較漂亮，根根有到底，沒加聲光鎖模的被動 Q 開關鎖模雷射，是只有 Q 開邊緣有部份的鎖模，為帶有連續成份的 Q 鎖模。



(p)



(r)

圖 4-10 比較有加聲光與沒加聲光的被動 Q 開關(Cr:YAG)雷脈衝圖

我們再進一步把鎖模的部分放大來觀察，在 Q 開關鎖模最高點附近截圖。圖 4-10(p)圖為軸單位是 20ns，沒有加聲光鎖模；(r)圖為軸單位是 20ns，有加聲光鎖模。有圖可知，沒加聲光鎖模的被動 Q 開關，其鎖模部分不太明顯能看到清楚的鎖模脈衝，而有加生光鎖模的被動 Q 開關，鎖模脈衝很高很明顯，且鎖模之間的周期不會產生多餘的雜訊脈衝。

## 第五章 結論與未來展望

### 5-1 結論

如何讓一般的 Q 開關脈衝，再次提高它的峰值功率，我們可利用主動鎖模雷射，外加增益調制，看是否能藉此提高峰值功率；我們亦利用飽和吸收體( $\text{Cr}^{4+}$ :YAG)產生被動 Q 開關，此時想要再提升 Q 開關的峰值功率，我們再加主動鎖模，看看主動鎖模會對被動 Q 開關會造成怎樣的改變。

由實驗可知，在只有增益調制，輸入功率為 390 m W，輸出功率為 7.95 m W，增益調制電壓為 700mV，共振頻率為 19.1kHz，得到共振時的脈衝週期為 52 $\mu$ ，脈衝寬度為 2.8 $\mu$ s，峰值功率為 0.147W。若增益調制再外加聲光調制的主動鎖模，其峰值功率可以上升至原本峰值功率 4 倍(由圖 3-9(g)(h)比較可知)，其峰值功率約為 0.588W。

在飽和吸收體( $\text{Cr}^{4+}$ :YAG)被動 Q 開關雷射中，其產生的被動 Q 開關脈衝，輸入功率為 428.3 m W，輸出功率為 4.34mW，Q 開關的脈衝週期為 50 $\mu$ s，Q 開關的峰值功率為 0.493W；若外加聲光調制的主動鎖模，其峰值功率可以上升至原本峰值功率 3 倍(由圖 4-9(e)(f)比較可知)，峰值功率約為 1.479W。故由此可知，因為增益調制所產生的脈衝寬度較寬，故脈衝的峰值功率比被動 Q 脈衝也較小，由此推斷，混合聲光主動鎖模與  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 鉍鈮鋁石榴石雷射比混合 AO 主動鎖

模與增益調制摻釹鋁石榴石雷射可以得到更大的峰值功率。

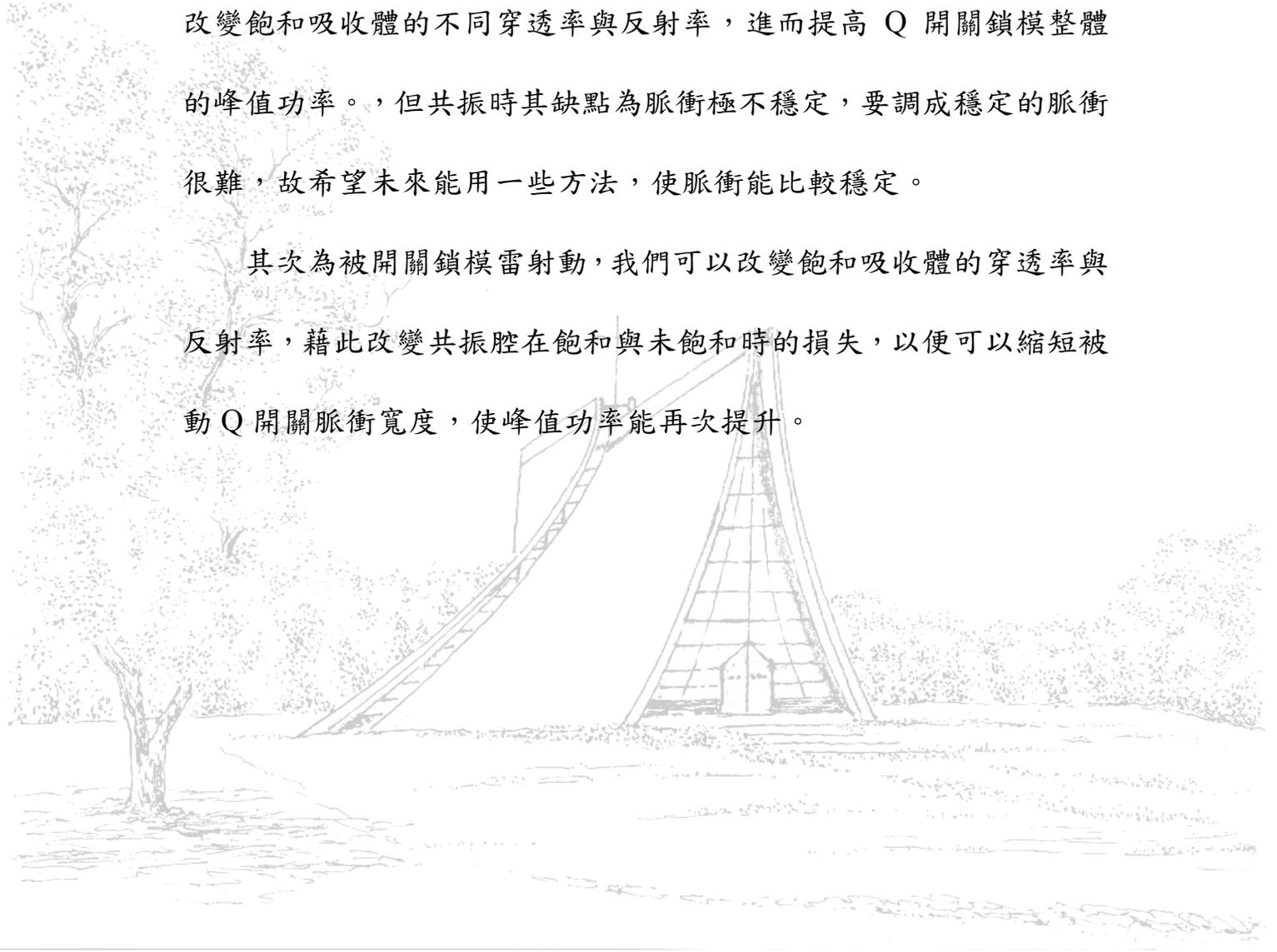
在混和聲光主動鎖模與增益調制摻釹鋁石榴石雷射中，可以利用改變調制電壓與輸入電流，造成增益調制共振頻率改變，進而可以形成能改變脈衝周期的 Q 開關鎖模。

混合聲光主動鎖模與  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被動 Q 開關鋁石榴石雷射，可以達成 Q 開關鎖模，鎖模的部分從基線開始。不會像單純被動 Q 開關鎖模，沒有加聲光調制，只有 Q 開關外殼與不完整的鎖模。若想調整 Q 開關鎖模中 Q 開關的周期與峰值功率，可以調整共振腔或是調整晶體吸收功率而以便達成範圍為  $50\sim 500\mu\text{s}$  周期，峰值功率也隨之變化。推算腔內光束分佈的計算可知，當共振腔調好，改變 5cm 透鏡與飽和吸收體的距離  $L_3$ ，其飽和吸收體上光點大小也會跟著改變，進而會影響被動 Q 開關的周期。

## 5-2 未來工作與展望

我們成功利用結和聲光主動鎖模與增益調制，或是結合聲光主動鎖模與  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ，成功達成 Q 開關鎖模釹鈮鋁石榴石雷射，希望能改變飽和吸收體的不同穿透率與反射率，進而提高 Q 開關鎖模整體的峰值功率。但共振時其缺點為脈衝極不穩定，要調成穩定的脈衝很難，故希望未來能用一些方法，使脈衝能比較穩定。

其次為被開關鎖模雷射動，我們可以改變飽和吸收體的穿透率與反射率，藉此改變共振腔在飽和與未飽和時的損失，以便可以縮短被動 Q 開關脈衝寬度，使峰值功率能再次提升。



## 參考文獻

- [1] X. Liu and Gmourou, Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses. IEEE J. Quantum Electron., vol. 33, pp. 1706-1716 Oct. 1997.
- [2] Yung-Fu Chen and S. W. Tsai., Simultaneous Q-Switching and Mode-Locking in a Diode-Pumped Nd :YVO<sub>4</sub>-Cr<sup>4+</sup> :YAG Laser. IEEE J. Quantum Electron., 2001, vol. 37, pp. 580-586, April. 2001.
- [3] Yung-Fu Chen, Jian-Lung Lee, Hung-Dau Hsieh, and Sheng-Wei Tsai, Analysis of Passively Q-Switched Lasers With Simultaneous Mode-locking. IEEE J. Quantum Electron., vol. 38, pp. 312-317, March. 2002.
- [4] G. T. Maker and A. I. Ferguson, Mode locking and Q switching of a diode laser pumped neodymium-doped yttrium lithium fluoride laser. Appl. Phys Lett, 1989, vol. 54, pp. January. 1989.
- [5] P. F. Curley and A. I. Ferguson, Actively mode-locked Ti:sapphire laser producing transform-limited pulses of 150-fs duration. Opt Lett. vol. 16, pp. 1016-1018. July. 1991.
- [6] M. J. P. Dymott, I. M. Botheroyd, G. J. Hall, J. R. Lincoln, and A. I. Ferguson, All-solid-state actively mode-locked Cr:LiSAF laser. Opt. Lett. vol. 19, pp. 634-636. May. 1994.
- [7] S. Wang, H. Rhee, X. Wang, H.J. Eichler, S. Meister, T. Riesbeck, J. Chen. LD end pumped, actively mode locked and passively Q-switched Nd:YAP laser at 1341nm. Opt Comm, vol. 283, pp. 570-573. 2010.
- [8] Jan K. Jabczyński, Waldemar Zendzian, Jacek Kwiatkowski, Q-switched mode-locking with acousto-optic modulator in a diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser. Opt Express, vol. 14, pp. 2184-2190. March. 2006.
- [9] Siegman, "LASERS" pp. 964.
- [10] J. J. Zayhowski and C. Dill III, Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates. Optics Lett, vol. 17, pp. 1201-1203. Sept. 1992.
- [11] Shouhuan Zhou, K. K. Lee, and Y. C. Chen, et al., Monolithic self-Q-switched Cr,Nd:YAG laser. Opt Lett, vol. 18, pp. 511-512. April. 1993.

## 參考網站

- [12] <http://www.corstec.com/Products/Laser%20crystals/Cr4YAG.html>
- [13] <http://www.corstec.com/Products/Laser%20crystals/NdYAG.html>

## 附錄

以下是 casix 所出的 Nd:YAG 的規格資料[13]

### Basic Properties (1.0 atm% Nd doped)

Chemical Formula	Nd:Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
Crystal Structure	Cubic
Lattice Constants	12.01 Å
Concentration	~ 1.2 x 10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup>
Melting Point	1970 °C
Density	4.56 g/cm <sup>3</sup>
Mohs Hardness	8.5
Refractive Index	1.82
Thermal Expansion Coefficient	7.8 x 10 <sup>-6</sup> /K [111], ̄0250 °C
Thermal Conductivity	14 W/m /K @20 °C, 10.5 W /m /K @100 °C.
Lasing Wavelength	1064 nm
Stimulated Emission Cross Section	2.8x10 <sup>-19</sup> cm <sup>-2</sup>
Relaxation Time of Terminal Lasing Level	30 ns
Radiative Lifetime	550 s
Spontaneous Fluorescence	230 s
Loss Coefficient	0.003 cm <sup>-1</sup> @ 1064 nm
Effective Emission Cross Section	2.8 x 10 <sup>-19</sup> cm <sup>2</sup>
Pump Wavelength	807.5 nm
Absorption band at pump wavelength	1 nm
Linewidth	0.6 nm
Polarized Emission	Unpolarized
Thermal Birefringence	High

以下是 casix 所出的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的規格資料

<b>Basic Properties of Cr<sup>4+</sup>:YAG</b>	
Formula	Cr <sup>4+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
Crystal Structure	Cubic Garnet
Dopant Level	0.5 mol% ~ 3 mol%
Hardness	8.5 (Mohs)
Damage Threshold	> 500 MW/cm <sup>2</sup>
Refractive Index	1.82 @ 1064 nm
<b>Main Specifications</b>	
Flatness	< /8
Wavefront Distortion	< /4
Parallelism	< 30§
Surface quality	20/10 scratch/dig
AR-coating	R<0.2% @ 1064 nm
Standard Aperture	3X3 ~ 10X10 mm

以下是 casix 所出的 Nd:YVO<sub>4</sub> 的規格資料

## Basic Properties

Atomic Density: $\sim 1.37 \times 10^{20}$ atoms/cm <sup>2</sup>
Crystal Structure: Zircon Tetragonal, space group D <sub>4h</sub> , a=b=7.12, c=6.29
Density: 4.22 g/cm <sup>2</sup>
Mohs Hardness: Glass-like, $\sim 5$
Thermal Expansion Coefficient: $\alpha_a = 4.43 \times 10^{-6}/K$ , $\alpha_c = 11.37 \times 10^{-6}/K$
Thermal Conductivity Coefficient: $\kappa_a = 5.23$ W/m/K; $\kappa_c = 5.10$ W/m/K

## 2. Optical Properties (typically for 1.1 atm% Nd:YVO<sub>4</sub>, a-cut crystals)

Lasing Wavelengths	914nm, 1064 nm, 1342 nm
Crystal class	positive uniaxial, $n_o = n_a = n_b$ , $n_e = n_c$ , $n_o = 1.9573$ , $n_e = 2.1652$ , @ 1064nm $n_o = 1.9721$ , $n_e = 2.1858$ , @ 808nm $n_o = 2.0210$ , $n_e = 2.2560$ , @ 532nm
Sellmeier Equation (for pure YVO <sub>4</sub> crystals):	$n_o^2 = 3.77834 + 0.069736 / (\lambda^2 - 0.04724) - 0.0108133 \lambda^2$ $n_e^2 = 4.59905 + 0.110534 / (\lambda^2 - 0.04813) - 0.0122676 \lambda^2$
Thermal Optical Coefficient:	$dn_a/dT = 8.5 \times 10^{-6}/K$ , $dn_c/dT = 3.0 \times 10^{-6}/K$
Stimulated Emission Cross-Section	$25.0 \times 10^{-19}$ cm <sup>2</sup> , @1064 nm
Fluorescent Lifetime	90 ns (about 50 ns for 2 atm% Nd doped) @ 808 nm
Absorption Coefficient	$31.4$ cm <sup>-1</sup> @ 808 nm
Absorption Length	0.32 mm @ 808 nm
Intrinsic Loss	Less 0.1% cm <sup>-1</sup> , @1064 nm
Gain Bandwidth	0.96 nm (257 GHz) @ 1064 nm
Polarized Laser Emission	polarization; parallel to optic axis (c-axis)
Diode Pumped Optical to Optical Efficiency	> 60%

## 作者簡歷

蘇桓銳

1983 出生於台北縣

1996 畢業於台北縣光仁國小

1999 台北縣私立光仁中學畢業，考取光仁高中

2002 台北縣私立光仁中學畢業，考取東海大學物理系

2007 東海大學物理系畢業並考取東海大學物理系碩士班

2011 東海大學物理系碩士班畢業

