

# 國立交通大學

理學院應用科技學程

碩士論文



Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式 Q-開關種子源光纖放大器雷射

Master Oscillator of Fiber Power Amplifier Seeded by

Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG Passively Q-Switched Laser

研究生：黃金豪

指導教授：陳永富 教授

中華民國一百年七月

Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式 Q-開關種子源光纖放大器雷射

Master Oscillator of Fiber Power Amplifier Seeded by  
Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG Passively Q-Switched Laser

研究生：黃金豪

Student : Chin-Hao Huang

指導教授：陳永富 教授

Advisor : Yung-Fu Chen

國立交通大學

理學院應用科技學程



Submitted to Degree Program of Applied Science and Technology

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Degree Program of Applied Science and Technology

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

# Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式 Q-開關種子源光纖放大器雷射

學生：黃金豪

指導教授：陳永富 教授

國立交通大學理學院應用科技學程碩士班

## 摘 要



本篇論文將試著探討「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式 Q-開關-光纖放大器雷射」(Master of Fiber Power Amplifier Seeded by Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG Passively Q-Switch Laser)。在找出符合共振腔穩定及最佳化條件的前提下，我們將種子雷射實驗的共振腔體架構設計為「半球共振腔」，並藉由更換不同初始穿透率的「摻鉻鈮鋁石榴石晶體(Cr<sup>4+</sup>:YAG)」飽和吸收體，得到不同能量值的種子源光束，之後將實驗結果導入後續單級放大、高脈衝能量、線性偏振的「摻鏡光纖放大器」實驗中。當種子雷射脈衝重複率為 50 kHz(Cr<sup>4+</sup>:YAG 初始穿透率 T<sub>0</sub>=70%)，激發光源為 16W 時，所得到的脈衝能量為 178 μJ、峰值功率為 37 kW；當種子雷射脈衝重複率為 25 kHz(Cr<sup>4+</sup>:YAG 初始穿透率 T<sub>0</sub>=40%)，激發光源為

10W(激發光源 10W - 已達光纖端面毀損臨界值)時，所得到的脈衝能量為  $192 \mu\text{J}$ 、峰值功率為  $113 \text{ kW}$ 。



Master Oscillator of Fiber Power Amplifier Seeded by  
Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG Passively Q-Switched Laser

Student: Chin-Hao Huang

Advisor: Yung-Fu Chen

Department of Degree Program of  
Applied Science and Technology Course  
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem. It features a central shield with a book and a quill pen. The letters 'ES' are on the left and 'A' is on the right of the shield. Below the shield, the year '1896' is inscribed. The entire emblem is surrounded by a gear-like border.

We report on an analysis of the design guideline of a hemispherical resonator Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-Switched (PQS) laser by optimization of the mode matching condition and agreement with the good PQS criterion. Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorbers with various initial transmission were used to investigate the performances of the laser configuration. Then we inject these high-peak-power PQS laser to realize the single-stage, linear-polarized fiber amplifier. With the seed laser of pulse repetition rate (PRR) of 50 kHz, the amplifier emits pulse energy of 178 and peak power of 37 kW under the pump power of 16 W. With the seed laser of PRR of 25 kHz, we can attain the amplifier with pulse energy of 192 and peak power of 113 kW under the pump power of 10 W which is restricted by the fiber facet damage.

## 致 謝

首先 還是要對我的指導老師 陳永富老師，特別的致上十二萬分的感謝。謝謝老師在這段期間的包容、忍耐，我的學習情況並不算是太好，可是老師還是一再的給我機會，用心、細心的給予我學業上，生活上的觀念以及態度的指導。設身處地的針對我的情況，給予我適時必要的作法，這真的是在我求學過程中前所未有的學習感受，因此我真的特別謝謝老師在這個階段，這段期間內所給予的指導。接著感謝口試委員蘇冠暉 老師、梁興弛 老師，謝謝你們給予我的指導，以及需要修正的方向。最後感謝威哲學長，沒有你騰出這麼大量的時間在學業上給予我更細部的討論以及指正，我想這份論文可能又不知道要難產到何年何月才能完成，還有謝謝實驗室裡的學長、學姐、學弟妹，謝謝你們有時候讓我霸占你們的課桌椅、謝謝你們幫我查找的資料…還有所有我們在實驗室裡的一切互動。

這是一個回憶，雖然短暫，卻很有意義。

謝謝大家

# 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
致謝.....	IV
目錄.....	V
圖表目錄.....	VII
第一章 簡介.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 本論文架構.....	2
第二章 被動式 Q-開關雷射理論以及飽和吸收體 .....	3
2.1 導論 .....	3
2.2 Q-開關理論模型 .....	6
2.3 被動式 Q-開關動作機制 .....	15
2.4 飽和吸收體.....	16
2.4.1 摻鉻鈮鋁石榴石晶體( $\text{Cr}^{4+}$ :YAG).....	19
第三章 被動式 Q-開關種子雷射 .....	23



3.1 導論 .....	23
3.2 摻釹釩酸鈮晶體增益介質與熱透鏡效應 .....	24
3.2.1 熱透鏡效應(Thermal Lens Effect) .....	31
3.3 Nd:YVO <sub>4</sub> /Cr <sup>4+</sup> :YAG - 被動式 Q-開關種子雷射 .....	33
3.3.1 半球共振腔體架構設計 .....	34
3.3.2 實驗裝置架構 .....	44
3.3.3 實驗結果 .....	46
第四章 光纖放大器 .....	50
4.1 導論 .....	50
4.2 被動式 Q-開關種子雷射光纖放大器 .....	51
4.2.1 實驗裝置 .....	52
4.2.2 實驗結果 .....	54
第五章 結論與未來工作 .....	61
參考文獻 .....	63



## 圖表目錄

圖 2.1 Q-開關機制產生雷射脈衝腔內能量變化示意圖.....	5
圖 2.2.1 $x_{opt}$ 對應 z 參數變化圖 .....	10
圖 2.2.2 峰值功率(peak power)對應 z 參數變化圖 .....	11
圖 2.2.3 輸出脈衝能量(pulse energy)對應 z 參數變化圖 .....	12
圖 2.2.4 脈衝半高寬(FWHM)對應 z 參數對應圖 .....	14
圖 2.2.5 脈衝能量對應時間圖示意圖 .....	14
圖 2.3 被動式 Q-開關動作機制示意圖 .....	16
圖 2.4 四能階飽和吸收體能量轉換示意圖 .....	18
圖 2.5 參數 xyz 均一化對應圖表 .....	22
圖 2.6 光源強度對應飽和吸收體穿透率圖 .....	22
圖 3.1 準 3 階與 4 階系統示意圖 .....	25
圖 3.2 Nd:YVO <sub>4</sub> 晶體吸收波長光譜圖 .....	27
圖 3.3 Nd:YVO <sub>4</sub> 在波長 808 nm 吸收效應常數圖 .....	28
圖 3.4 Nd:YVO <sub>4</sub> 電子躍遷能階圖.....	30
圖 3.5.1 透鏡共振腔設計示意圖 .....	36

圖 3.5.2 共振腔穩定態區域圖(g 參數) .....	36
圖 3.5.3 半球共振腔的 Nd:YVO <sub>4</sub> /Cr <sup>4+</sup> :YAG 被動式 Q-開關雷射示意圖 .....	39
圖 3.6.1 前鏡曲率半徑對應最大激發功率圖 .....	41
圖 3.6.2 激發光功率對應光徑作用半徑比 .....	42
圖 3.7 激發功率對應「被動式 Q-開關」最佳化條件圖 .....	43
圖 3.8 Nd:YVO <sub>4</sub> /Cr <sup>4+</sup> :YAG - 被動式 Q-開關種子雷射實驗架構...	45
圖 3.9.1 Cr <sup>4+</sup> :YAG 不同初始穿透率對應雷射脈衝重複率與脈衝能量 .....	47
圖 3.9.2 Cr <sup>4+</sup> :YAG 不同初始穿透率對應雷射脈衝寬度與峰值功率.	47
圖 3.10.1 Cr <sup>4+</sup> :YAG T <sub>0</sub> =70% 單發雷射脈衝波形圖 .....	49
圖 3.10.2 Cr <sup>4+</sup> :YAG T <sub>0</sub> =40% 單發雷射脈衝波形圖 .....	49
圖 4.1.1 「Nd:YVO <sub>4</sub> /Cr <sup>4+</sup> :YAG-被動式 Q-開關光纖放大器」雷射實驗 裝置圖.....	53
圖 4.1.2 摻鏡光纖截面圖(Panda-style PM fiber).....	54
圖 4.2.1 激發光功率對應平均功率以及峰值功率圖 .....	55
圖 4.2.2 最大峰值功率 37 kW,脈衝寬度為 4.8 ns .....	56

圖 4.2.3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ $T_0=70\%$ 脈衝放大重覆率圖 .....	56
圖 4.3.1 激發光源功率對應平均功率與峰值功率圖 .....	57
圖 4.3.2 最大峰值功率 113 KW,脈衝寬度為 1.6 ns.....	58
圖 4.3.3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ $T_0=40\%$ 脈衝放大重覆率圖 .....	58
圖 4.4 光纖超過最大耐受能量端面破壞圖 .....	59
圖 4.5.1 激發光源功率 16W 時 MOPA1 頻譜圖 .....	60
圖 4.5.2 激發光源功率 10W 時 MOPA2 頻譜圖.....	60
圖 4.6 傳統 LMA 光纖與 PCF 截面積圖 .....	62
圖 4.6 PCF 光纖放大器實驗架構 .....	62
表 2.1 Q 值與雷射激發比較表 .....	4
表 3.1 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶體規格特性.....	26
表 3.2 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 與 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 光學特性比較表 .....	26

# 第一章 簡介

## 1.1 研究動機

就文獻參考所知，要獲得穩定、高能量脈衝的「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式 Q-開關」雷射光束有其實驗上一定的困難度。因此 我們的第一步就是學習如何獲得穩定且高能脈衝的雷射光束。在考慮過實驗用晶體在高能激發光源作用下所產生的「熱透鏡效應」(Thermal Lens Effect)；以及為了讓「被動式 Q-開關」雷射的共振腔體架構有其最佳化的條件，我們試著學習在雷射共振腔體的設計上，採用類似「半球共振腔」的短共振腔設計。以達到「獲得穩定、高能短脈衝的雷射光束」為目標。其次，我們在「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式 Q-開關種子源雷射」的實驗中，藉由更換不同初始穿透率的「摻鉻鈮鋁石榴石(Cr<sup>4+</sup>:YAG)」飽和吸收體晶體，觀察其雷射輸出能量值的變化，得到數組種子光束的實驗數據，並選取特定條件的種子光束，導入後續的「摻鏡光纖放大器(Master Oscillator of Fiber Power Amplifier)」實驗中。透過單級放大、線性極化維持的「摻鏡光纖放大器」實驗，將所選取的種子雷射光束能量值放大，除了探討一系列的相關實驗數據結果外，並經由實驗數據、圖表討論實驗過程中，所遇到的「自發性輻射效應」(Amplified spontaneous emission ASE)。透過一系列的實驗過程與數據的探討，尋求問題的解答亦或是解決的方法。

## 1.2 本論文架構

本文共分為 5 個章節，除上述的第一章節討論本文的簡介架構以及研究動機外，第二 ~ 第五章節大綱如下：

第二章節：本章節主要探討與研習的方向由「Q-開關理論」模型開始，之後將介紹利用 Q-開關理論應用在「被動式 Q-開關」(Passively Q-Switch)的動作機制，以及論述「摻鉻釷鋁石榴石晶體( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )」在「被動式 Q-開關」系統中的相關選用條件。

第三章節：「被動式 Q-開關種子雷射」，內容包含如何設計架構穩定且高能量的最佳化共振腔，以達成「獲得穩定且高能的雷射種子光束」為目的，完整介紹整個「被動式 Q-開關種子雷射」實驗裝置、實驗相關數據以及圖表。另外，章節內容中亦會針對實驗所選用的增益介質「摻釷釷酸釷晶體( $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ )」晶體做相關論述。

第四章節：延續第三章節所論述「被動式 Q-開關種子雷射」所激發出的種子源光束，透過「摻鏡光纖放大器」(MOPA)的實驗架構將其雷射能量放大。章節內容除完整論述實驗裝置、過程、以及數據結果外，並討論藉由實驗所觀察到的相關效益及問題。

第五章節：將就本文的結論和未來的工作方向做論述。

## 第二章 被動式 Q-開關雷射理論以及飽和吸收體

### 2.1 導論

一般傳統的固態雷射，我們將雷射光束，以連續波雷射光束(CW laser)的形式釋放，然而連續波形式的雷射光束，所輸出的能量均為定值，若想激發出高能雷射，則勢必然需要提供一更高的激發光源(pumping source light)，如此一來想要得到一高能型態的雷射激發光束，此舉既不符合經濟效益，其實驗裝置執行上亦有其特定的困難度。近年來，在固態雷射的領域中，能夠在更短的時間內，將能量壓縮成更高能量，形成所謂的脈衝雷射的「Q-開關」技術，廣泛的為學術研究以及工業界所應用。

「Q-開關」技術，主要目的是藉由雷射共振腔內晶體材料本身特性；或是外部電子信號觸發機制，讓雷射光束能以更短脈衝、更高功率的形式，形成所謂的高能脈衝雷射。顧名思義，藉由雷射共振腔內增益能量「儲存」、「耗損」週期性的變化大小，將雷射光束做間歇性的放射，由此動作機制看來，「Q-開關」技術將類似於一個開關的作用，將雷射光束以高功率的雷射脈衝波形式激發放射。而將共振腔內能量變化相對關係定義的式子，可以稱之為「Q-值」(Q-Factor)，在此我們可以將 Q-Factor 用以下簡化的式子示意表達之。

$$Q=2\pi\left(\frac{\text{共振腔內儲存能量}}{\text{共振腔內耗損能量}}\right)\cong 2\pi\nu_0\tau_0$$

其中

$$2\pi\nu_0 = 2\pi / T$$

$\tau_0$  : 光子生命週期

$L$  : 共振腔腔長

$T$  : 飽和吸收體穿透率

$\delta$  : 共振腔內耗損參數

我們利用下表將 Q 值變化與雷射激發關係做簡易的說明：

Q 值	共振腔能量變化	雷射激發
High Q 值	增益大於耗損	激發放射
Low Q 值	耗損大於增益	無激發

表2.1 Q值與雷射激發比較表

由以下圖2.1 Q-開關機制產生雷射脈衝腔內能量變化示意圖中，則可更進一步的說明Q-開關動作機制時，雷射共振腔內能量增益與耗損的能量變化。(下圖中黑色虛線處代表同一時間軸)

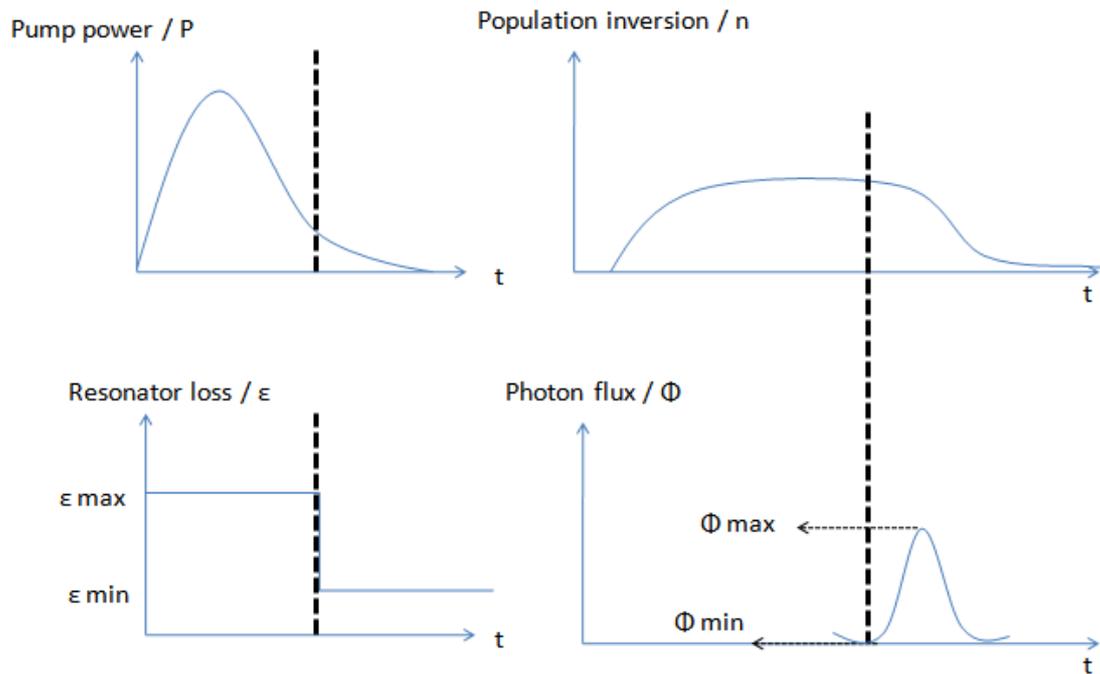


圖2.1 Q-開關機制產生雷射脈衝腔內能量變化示意圖

在前一段落所提及的「Q-開關」控制機制可將Q-開關分為：「主動式Q-開關雷射」--- 主要為利用電光(Electro-optic 簡稱EO)或是聲光(Acousto-optic 簡稱AO)…等驅動電路信號做為其外部觸發機制，控制/觸發雷射脈衝的產生，其優點在於能夠利用外部提供的信號，觸發控制雷射激發光束的輸出，能夠有更精確的重複率以及相對高的能量。「被動式Q-開關雷射」--- 利用光學晶體(Ex:  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )或是適當可使用之材料(Ex: 半導體材料AlGaInAs)，做為控制共振腔內增益能量變化的機制。由於「被動式Q-開關」係使用晶體或是其它可供調控特性的材料做為共振腔內增益能量變化(儲存/消耗)的控制部分；因此共振腔內能量增益變化將控制於晶體材

料或是雷射本身的特性，無法自行控制觸發雷射脈衝的產生或是調控脈衝生成的頻率。但是因為「被動式Q-開關」實驗架構較「主動式Q-開關」容易架設；且無需提供高電壓或是快速的光電晶體做為外部觸發的機制、器材架構費用相對於「主動式Q-開關」低廉…等特性，因此相較之下「被動式Q-開關」是一個較小較經濟，也較耐用的系統，所以目前仍為廣泛的應用在高功率雷射…等各項實驗研究。



## 2.2 「Q-開關」理論模型

由J. J. Degnan 所推導的「Q-開關」理論[1]模型中可得知雷射脈衝波輸出的能量，會與增益晶體「居量反轉粒子密度」有關，其方程式如下：

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (1)$$

為了瞭解上述的雷射脈衝能量方程式，我們先從以下式子(2)(3)開始討論：

(2)式為雷射共振腔內光子密度方程式

(3)式為雷射共振腔內居量反轉電子密度方程式

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\sigma n l \phi}{t_r} - \frac{\phi}{t_c} \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma \sigma c \phi n \quad (3)$$

其中參數定義如下：

$\phi$ ：光子密度

$\sigma$ ：增益介質受激輻射有效截面積

$n$ ：居量反轉電子密度

$l$ ：增益介質晶體長度

$c$ ：光速

$t_r = \frac{2l'}{c}$ ：光子在共振腔內來回一趟所需時間；其中  $l'$  為共振腔腔長

$t_c = \frac{t_r}{[\ln(\frac{1}{R}) + L]}$ ：光子生命週期

$R$ ：輸出耦合鏡的反射率

$L$ ：光子在共振腔內的能量耗損

由上面(2)/(3) 式計算後可得到關係式

$$\frac{d\phi}{dn} = -\frac{l}{l'\gamma} \left(1 - \frac{n_i}{n}\right) \quad (4)$$

由上式(4) 經過積分計算整理可以得知

$$\phi(t) = \frac{l}{l'\gamma} \left[ n_i - n_f - n_i \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \right] \quad (5)$$

其中參數定義如下：

$n_i$ ：初始居量反轉電子密度

$n_f$  : 最後居量反轉電子密度

$n_i$  : 出光臨界值時居量反轉電子濃度

其中

$$\phi(\max) = \frac{l}{l'\gamma} \left\{ n_i - n_f \left[ 1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \right] \right\} \quad (6)$$

當共振腔內達到激發放射的臨界條件，激發出雷射光束後，此時共振腔內光子密度為0。將上述條件代入(5)式中，可得到：

$$\phi(t) = 0 = \frac{l}{l'\gamma} [n_i - n_f - n_i \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right)] \quad (7)$$

滿足上式的條件即：

$$n_i - n_f - n_i \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) = 0 \quad (8)$$

整理可得

$$n_i - n_f = n_i \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (9)$$

接著，我們開始討論關於「Q-開關」雷射的相關速率方程式：

首先 利用Lagrange multiplier method運算法，在上述(9)式成立的限

定條件下，我們重新定義相關參數如下：

$$x = \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad (10)$$

$$y = \left( \frac{n_f}{n_i} \right) \quad (11)$$

由上述(1)式  $E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right)$

將(10)(11)式中的x,y代入我們可以得到

$$E_{(x,y)} = -\frac{Vh\nu}{2\sigma\gamma l} x \ln y \quad (12)$$

其中  $V = Al$

將x, y 代入又整理上(9)式，可以得到

$$\varphi_{(x,y)} = 1 - y + \frac{(x+L)\ln y}{2\sigma n_i l} = 0 \quad (13)$$

(Lagrange multiplier method 限定條件式)

將上述(12)、(13)利用Lagrange multiplier method運算後，得知

$$\lambda = \frac{Vh\nu n_i}{\gamma} \quad (14)$$

$$y = \frac{L}{2\sigma n_i l} \equiv \frac{L}{2g_0 l} \equiv \frac{1}{z} \quad (15)$$

在此我們進一步將下列參數定義：

$\sigma n_i = g_0$ ：為非飽和狀態時，微小訊號增益效應  $\sigma n_i$

$z$ ：微小訊號於共振腔內增益對應耗損比值

將所得知 y 關係式 代入 Lagrange multiplier method 限定條件式(13)

中，解得

$$x_{opt} = \ln\left(\frac{1}{R_{opt}}\right) = L \left[ \frac{z-1-\ln z}{\ln z} \right] \quad (16)$$

將上式(16)整理後可以得到耦合輸出鏡的反射率關係式如下：

$$R_{opt} = \exp[-x_{opt}] \quad \text{即輸出耦合鏡反射率關係式} \quad (17)$$

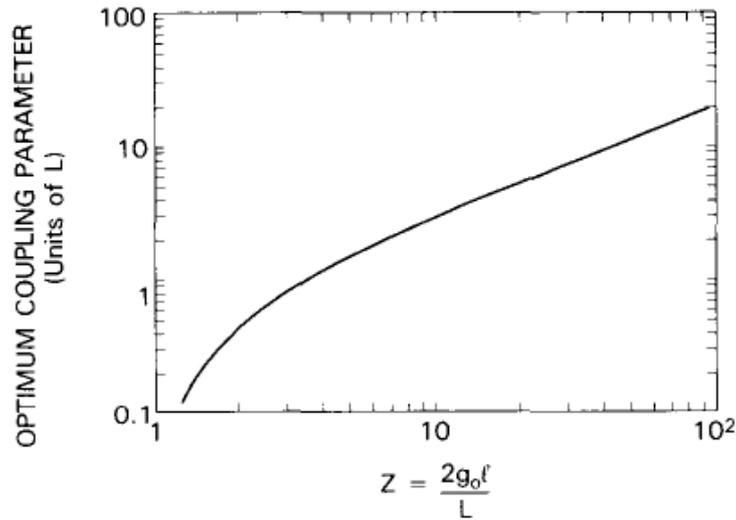


圖2.2.1  $x_{opt}$  對應  $z$  參數變化圖

在利用 Lagrange multiplier method 運算得到相關  $x, y$  等關係式後，我們開始整理得到「Q-開關」雷射的脈衝能量(Pulse energy)、峰值功率(Peak power)、以及脈衝半高寬(FWHM)速率方程式如下：

(a) 峰值功率(Peak power):

當得到峰值功率時，即瞬間腔內光子密度為 0 整理(4)式可以得到：

$$\phi(\max) = \frac{l}{l\gamma} \left\{ n_i - n_f \left[ 1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \right] \right\} = 0 \quad (18)$$

滿足式(18)的條件即

$$n_i - n_f - n_i \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) = 0, \quad \text{並利用 } x = \ln\left(\frac{1}{R}\right) \text{ 帶入}$$

可以解得知關係式：

$$n_i = \frac{1}{2\sigma l} \left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \quad (19)$$

因此

$$P_{(t)} = -h\nu A l' \frac{d\phi}{dt} \Big|_R = \frac{h\nu A l' \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{t_r} \phi(t) \quad (20)$$

將(2)式整理成  $\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[ 2\sigma n l - \left( \ln\frac{1}{R} + L \right) \right]$  並將(19)式代入上述(20)式後整

理可得：

$$P_{(\max)} = P_{(t)} \Big|_{\phi \max} = \frac{h\nu A l' \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\gamma t_r} \left\{ n_i - n_i \left[ 1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \right] \right\} \quad (21)$$

將上式整理成與腔內微小耗損  $z$  關聯的等式如下：

$$P_{(\max)} = \frac{Ah\nu L^2}{2\sigma\gamma t_r} \left[ \frac{z-1-\ln z}{\ln z} \right] \left\{ z - \left[ \frac{z-1}{\ln z} \right] \left[ 1 + \ln\left(\frac{z \ln z}{z-1}\right) \right] \right\} \quad (22)$$

其中  $0 \leq \gamma \leq 2$  定義為衰竭因子(Degeneracy factor) by Koechner

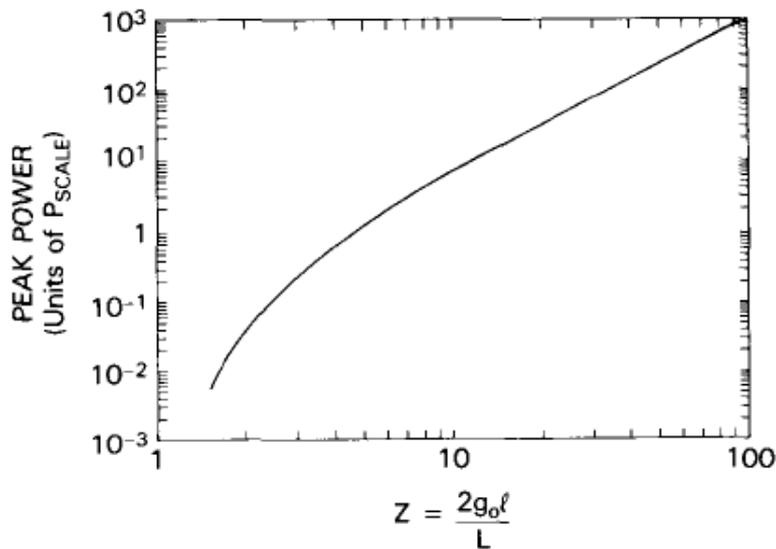


圖2.2.2 峰值功率(peak power)對應 $z$ 參數變化圖

(b) 脈衝能量(Pulse energy):

$$\text{由 } E = \int_0^{\infty} p(t) dt = \frac{h\nu A l' \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{t_r} \int_0^{\infty} \phi(t) dt \quad (23)$$

我們先將(3)式整理成  $dt = \frac{-dn}{r\sigma c\phi n}$ ，再將上述峰值功率式(21)，代入式(23)

中，計算後則可得到以下

$$E = \frac{1}{\gamma} V h\nu (n_i - n_f) \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L} \quad (24)$$

其中  $V = Al$  為一對應增益介質長度的參數；將相關參數代換後可得到

與  $z$  參數關聯的等式如下：

$$E_{\max} = \frac{Ah\nu L}{2\sigma\gamma} [z - 1 - \ln z] \quad (25)$$

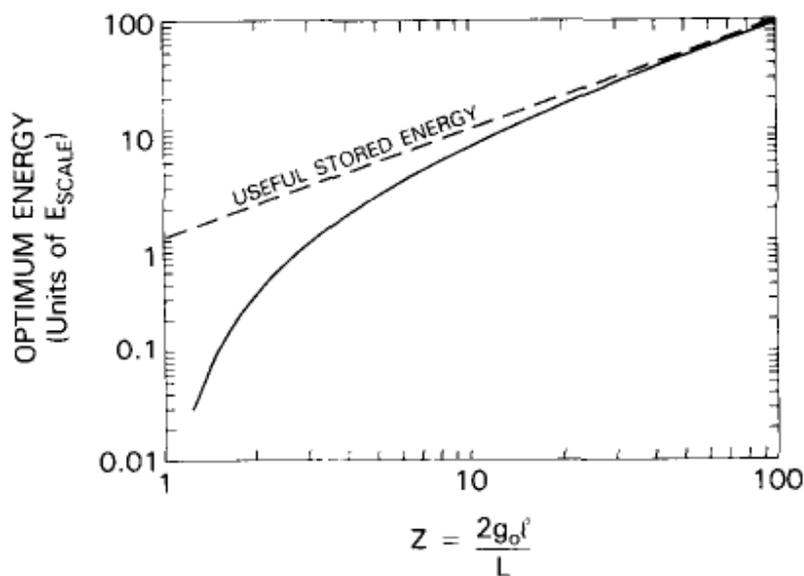


圖2.2.3輸出脈衝能量(pulse energy)對應 $z$ 參數變化圖

(c) 脈衝半高寬(FWHM):

脈衝半高寬  $t_p$  (FWHM)，我們利用下圖 2.2.4 及 2.2.5 分別將脈衝半高寬對應  $z$  參數對應圖以及能量對應時間示意圖，將計算雷射脈衝半高寬做以下簡述：

$$E = \frac{1}{2} t_b * P_{\max}$$

$$\text{又 } t_p = \frac{t_b}{2}$$

將上述脈衝能量  $E$  以及 脈衝峰值功率  $P$  式 做相關計算，並利用式 (2)、(3) 裡對參數的相關定義可以得知脈衝半高寬  $t_p$  與居量反轉電子密度間的關係式如下：

$$t_p = t_c \left( \frac{n_i - n_f}{n_i - n_t \left[ 1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \right]} \right) \quad (26)$$

利用 Lagrange multiplier method 運算式，並將  $x, y$  相關參數代入整理後可得與共振腔內耗損  $z$  參數關聯的等式如下：

$$t_p = \frac{t_r}{L} \left\{ \frac{1}{1 - \left[ \frac{z-1}{\ln z} \right] \left[ 1 + \ln \left[ \frac{z \ln z}{z-1} \right] \right]} \right\} \quad (27)$$

$t_r = \frac{2l'}{c}$ ：為光子在共振腔內來回一趟所需時間；其中  $l'$  為共振腔腔長

$t_c = \frac{t_r}{\left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right]}$ ：定義為光子生命週期

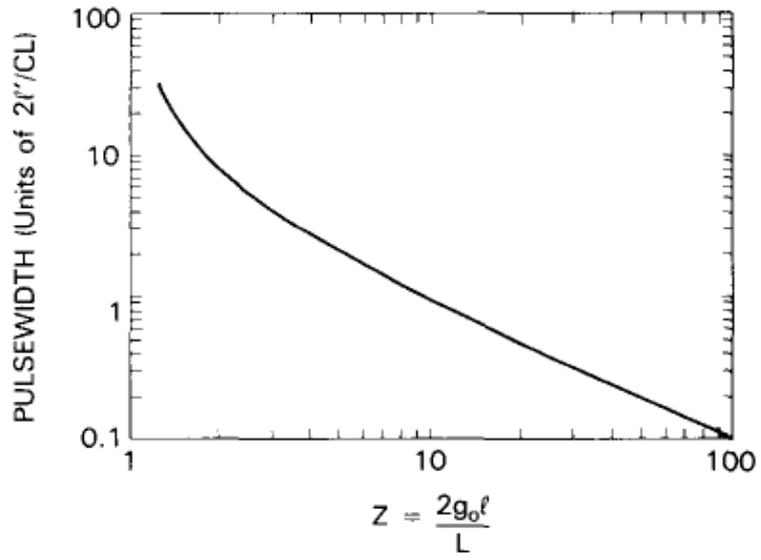


圖2.2.4脈衝半高寬(FWHM)對應z參數對應圖

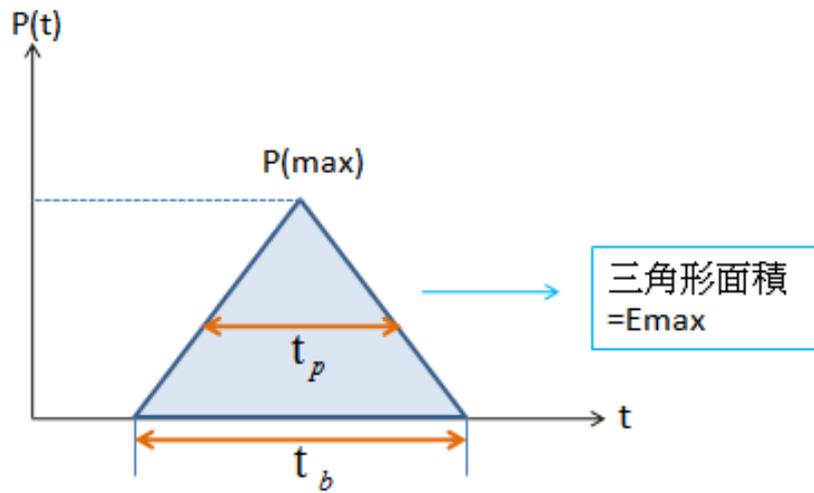


圖2.2.5 脈衝能量對應時間圖示意圖

## 2.3 「被動式Q-開關」動作機制

「被動式Q-開關」即所謂的(Passively Q-Switch PQS)雷射[2]，主要是利用有機染料或是有摻雜游離元素的晶體或半導體材料光學元件，當作飽和吸收體(Saturable absorber SA)介質裝置於雷射共振腔內，當飽和吸收體吸收增益能量，其晶體穿透率也開始變高，進而達到”飽和”時，晶體將變的透明而能讓雷射光束穿透。透過裝置在共振腔內飽和吸收體，能量週期性的變化，輸出高功率的「脈衝雷射」。

進一步說明，初期激發光提供的增益效益小於共振腔內總耗損時(共振腔自發耗損+飽和吸收體耗損)，此時將無法激發放射出雷射光。當激發光利用增益介質讓光子來回反覆增益使能量放大，而光子能量大於共振腔內耗損時，此時亦會讓飽和吸收體吸收光子能量，而低能階粒子開始躍遷至高能階激發態。「飽和吸收體」持續吸收光子能量，此過程將使得耗損快速減小，而晶體內低能階粒子持續躍遷至激發態高能階，由於飽和吸收體內高能階粒子生命週期較長；且高能階粒子衰竭速率小於低能階粒子躍遷速率，這將使得飽和吸收體漸漸變成透明，直到絕大多數低能階粒子躍遷至高能階激發態；此時飽和吸收體將完全變成透明，進而增益的雷射光子將完全穿過飽和吸收體，激發放射，即形成「脈衝雷射」。

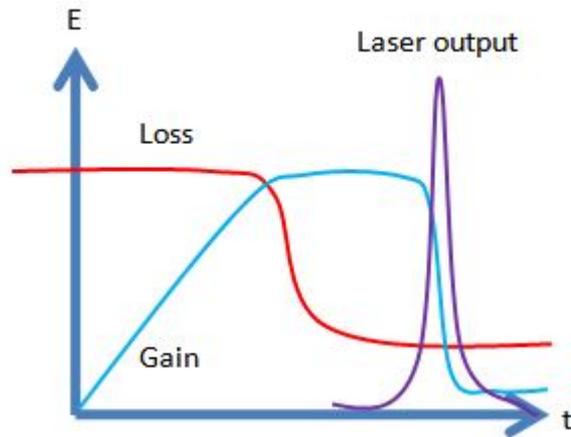


圖2.3 被動式Q-開關動作機制示意圖



## 2.4 飽和吸收體

最先開始應用在「Q-開關」雷射的飽和吸收體，係利用有機染料 (Dye-cell) 染色在含有醋酸鹽基的植物類細胞膜質中 (cellulose acetate)[2]。但這類有機染料材料有其使用上的缺點，諸如：耐久性不佳所造成對光的感應度下降、耐熱性偏低…等，在在都限制在Q-開關雷射上的發展與應用。隨著新材料的開發，出現一種摻雜可吸收特定波段光譜離子或是含有色中心的新材料，大大改善了之前有機染料材料耐久性不佳的缺點。此類新材料，第一個應用的就是  $F_2^-:LiF$  color center crystal，其色中心晶體構造後續陸陸續續被使用在有關光、電、或是中子激發光源的實驗中。時至今日，最為廣泛應

用在「被動式Q-開關」的飽和吸收體為「摻鉻鈮鋁石榴石晶體(Cr<sup>4+</sup>:YAG)」，其最主要的原因在於Cr<sup>4+</sup>離子對於雷射光束的波長有著相對較高的吸收截面積；且YAG晶格無論是基本物性、化性、或熱物理的特性，對於雷射實驗有著較為堅固耐用、耐久、耐受性，由於此種種特點，因此「摻鉻鈮鋁石榴石晶體(Cr<sup>4+</sup>:YAG)」成為目前最廣為應用於「被動式Q-開關」飽和吸收體的材料之一。

利用「飽和吸收體」裝置於雷射共振腔內，將持續吸收激發源光子能量，此過程將使得耗損快速減小，而晶體內低能階粒子持續躍遷至高能階激發態，由於飽和吸收體內高能階粒子生命週期較長；且高能階粒子衰竭速率小於低能階粒子躍遷速率，這將使得飽和吸收體漸漸變成透明，直到絕大多數低能階粒子躍遷至高能階激發態；此時飽和吸收體將完全變成透明，進而增益的雷射光子將完全穿過飽和吸收體，激發放射即形成「脈衝雷射」。在此我們可以利用「摻鉻鈮鋁石榴石晶體(Cr<sup>4+</sup>:YAG)」的能階示意圖對上述做進一步的解釋：

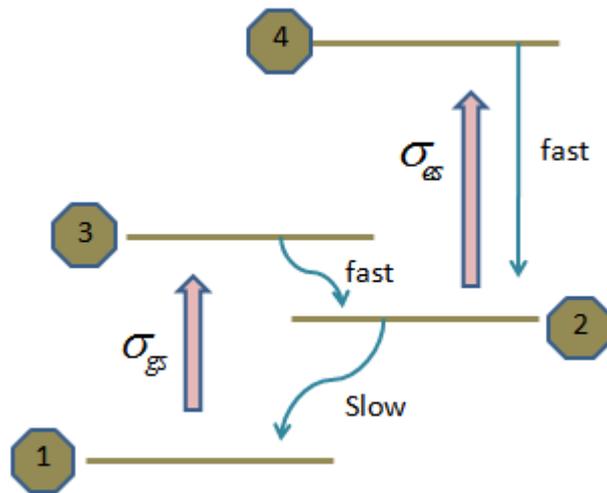


圖2.4 四能階飽和吸收體能量轉換示意圖



由上圖2.4 簡易的4能階「飽和吸收體」能量轉換示意圖將飽和吸收體在「被動式Q-開關」共振腔內的動作機制，做進一步的說明：

首先我們考慮能階1-3階之間，電子能階躍遷的變化情形；如上圖，飽和吸收體吸收了激發光束能量後，讓電子從基態能階1躍遷至激發態能階3；且電子將快速的從激發態能階3，躍遷至激發態能階2。且在此同時，選用一個適合的「被動式Q-開關」飽和吸收體，其晶體需要有足夠大的基態吸收截面積，以及電子在激發態能階2的生命週期將要大於基態電子躍遷的速率。如此動作機制，將使得基態電子數量遠小於激發態能階2的電子數量，當隨著激發光源的能量增強，將使得裝置於共振腔內的飽和吸收體，基態電子數趨近於0即達到

「飽和」，而飽和吸收體也將因為飽和，而變的透明進而讓共振腔內的增益雷射光束完全穿透，激發放射出雷射光束，形成「脈衝雷射」。

### 2.4.1 摻鉻鈮鋁石榴石晶體( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )

如前章節2.4中所提及 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶體為4能階晶體其本身除了可以當作增益介質外(當 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶體當做增益介質時，可放射出雷射光束波長範圍在 $1.34\sim 1.58\ \mu\text{m}$ 之間)，亦可當作「被動式Q-開關」雷射架構中的飽和吸收體。由於「摻鉻鈮鋁石榴石晶體( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )」是目前最廣為應用在「被動式Q-開關」雷射實驗中的飽和吸收體，其主要的因素除了 $\text{Cr}^{4+}$ 離子對於雷射光束的中心波長有著相對較高的吸收截面積；且YAG晶格無論是基本物性、化性、或熱物理的特性，對於雷射實驗有著較有機染料材料堅固耐用、耐久、更高的熱耐受性…種種特點外，我們也將簡單整理 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 相關光學規格，以說明其被廣泛應用的原因[2][3]:

晶格架構: cubic

吸收波長寬範圍: 900 nm ~ 1150 nm

初始穿透率: 可介於5% ~ 95% 之間

晶體損壞極限： $\geq 500 \text{ MW/cm}^2$

實際晶體厚度：1 ~ 5 mm之間

微小信號吸收效益  $\alpha_0$  值：介於  $3 \sim 6 \text{ cm}^{-1}$

其次，由參考文獻實驗中的實際量測值可得到：

基態吸收面積： $(7 \pm 0.5) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$

激發態吸收面積： $(2 \pm 0.5) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$

激發態能階2電子生命週期：約略為  $4.1 \mu\text{s}$

激發態能階4電子生命週期：約略為  $0.5 \text{ ns}$

(實驗以Nd:YVO<sub>4</sub>作為增益介質 \  $h\nu = 1.87 \times 10^{-19} \text{ @1060 nm}$  \ 飽和吸收能量約略為： $E_s = 27 \text{ mJ/cm}^2$ )。

在條列了上述的基本「摻鉻鈮鋁石榴石晶體(Cr<sup>4+</sup>:YAG)」各項規格後，在後續討論到「被動式Q-開關」雷射最佳化條件時，我們需要特別注意一個很重要的特徵值，即是飽和吸收體的初始穿透率(Initial Transmission  $T_0$ )。

在考慮共振腔內尚未達到飽和狀態的條件下，由章節2.2中「Q-開關」理論模型中，經過Lagrange multiplier method運算整理後所得到一系列的關係式如下：

$$x_{opt} = \frac{1}{\delta} \ln \left( \frac{1}{R_{opt}} \right)$$

$$y = \frac{-\ln T_0}{\ln G_0}$$

$$z = \frac{\ln G_0^2}{\delta}$$

其中

$$\delta = \delta_R + 2\sigma_{es} l n_g$$

即能量總耗損=共振腔內耗損+飽和吸收體吸收耗損

重新解釋上述參數的定義值：

$T_0$ ：飽和吸收體初始穿透率

$R_{opt}$ ：輸出耦合鏡反射率

$G_0$ ：微小增益效應值



當「被動式Q-開關」達到最佳化條件時，我們可以整理上述式子為

以下關係式：

$$R_{opt} = \exp(-x_{opt} \delta) \tag{28}$$

$$T_{opt} = \exp(-y_{opt} \ln G_0) \tag{29}$$

下圖2.5 為上述在最佳化「被動式Q-開關」條件下，參數x(對應最佳化出光耦合鏡反射率)、y(對應飽和吸收體初始穿透率)、以及z(共振腔內增益耗損參數)的均一化對應圖。由以下圖2.6 示意圖可以說明將上述式子，當光強度漸漸增加時，晶體初始穿透率的變化值。

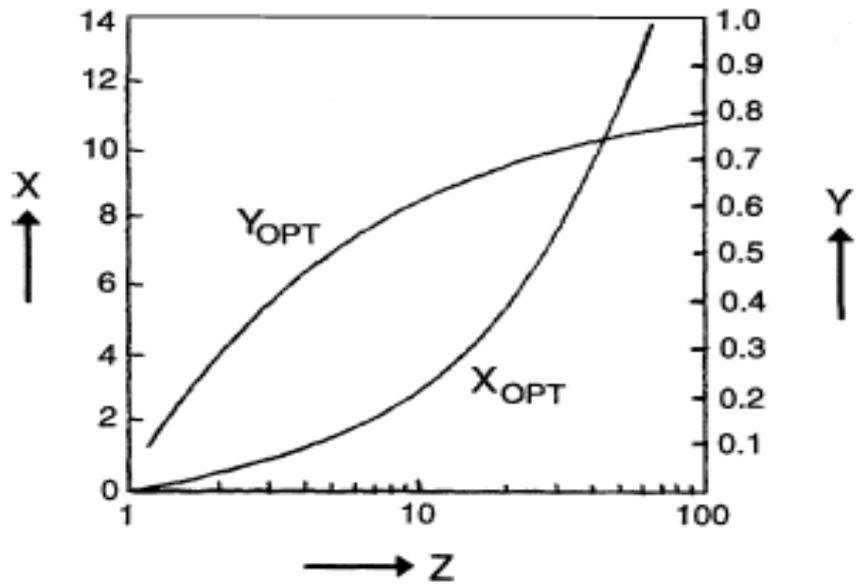


圖2.5 參數xyz 均一化對應圖表

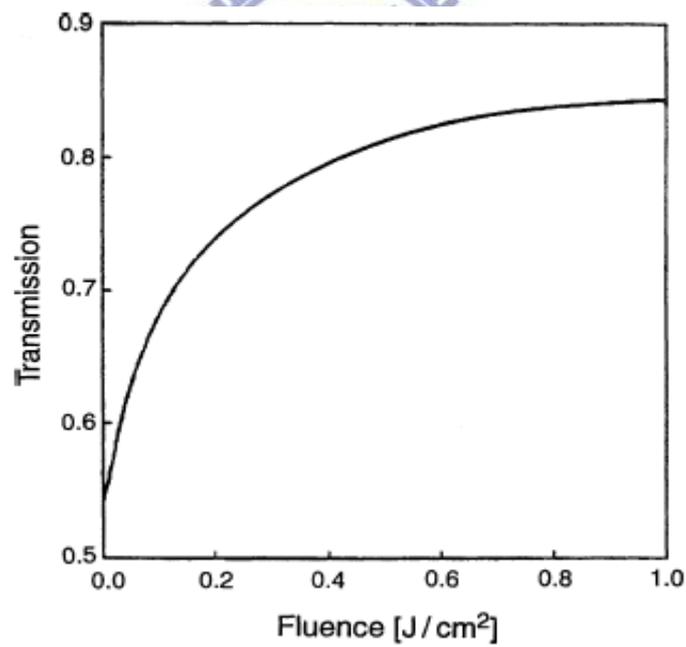


圖2.6 光源強度對應飽和吸收體穿透率圖

## 第三章 被動式Q開關種子雷射

### 3.1 導論

此章節將開始介紹「被動式Q-開關種子雷射」(Passively Q-Switched of Seeded Laser)；我們將討論一個「半球共振腔」(Hemispherical resonator)設計的「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式Q-開關」雷射架構。此次「被動式Q-開關種子雷射」實驗是使用「摻釹釩酸鈮晶體(Nd:YVO<sub>4</sub>)」作為增益介質；並分別以4種不同初始穿透率(Initial transmission)的「摻鉻鈮鋁石榴石晶體(Cr<sup>4+</sup>:YAG)」作為飽和吸收體。在章節3.2 中將先針對Nd:YVO<sub>4</sub>相關特性做簡介，而由於Nd:YVO<sub>4</sub>晶體在高能激發光源實驗過程中有明顯的「熱透鏡效應」(Thermal Lens Effect)，而此「熱透鏡效應」將顯著的影響雷射共振腔的穩定性，因此考慮此一效應的影響 我們將先在章節3.2.1中試著探討之並尋求相關解決的方法。之後搭配「被動式Q-開關」雷射最佳化品質等因素，我們開始討論如何設計出符合實驗精確度的最佳化「半球共振腔」。因此 將在此章節3.3.1中討論考量「熱透鏡效應」以及符合最佳化「被動式Q-開關」條件時，「半球共振腔」的最佳化條件以及實驗架構設計。之後在章節3.3.2 以及3.3.3 中則將分別對「被動式Q-開關種子雷射」的相關實驗裝置以及實驗結果，做完整的整理說明。實驗所得到的結果，亦將成為後續「光纖放大器」實驗中的

種子源光束。

### 3.2 摻釹釩酸鈮晶體增益介質特性與熱透鏡效應

Nd:YVO<sub>4</sub>晶體是一個能以準3階以及4階能階系統模式下工作的晶體(圖3.1)，其化學組成成分是以摻雜濃度約0.1-3%的Nd<sup>3+</sup>離子摻雜於YVO<sub>4</sub>晶格(隸屬四方晶系)內。由於其具有良好的物理、光學特性，因此被廣泛地應用於各種固態雷射學術研究以及論文發表中。

雖然較高的Nd<sup>3+</sup>離子摻雜濃度可以提高其應用於固態雷射實驗的增益效果，然而過高的摻雜濃度也容易造成晶格的變形，使得其光學的特性劣化。Nd:YVO<sub>4</sub>晶體相較於其它Nd<sup>3+</sup>離子摻雜晶體具有較佳的有效輻射截面積(Stimulated emission cross-section  $25 \times 10^{-19} \text{cm}^2$  / 放射波長1064nm)、吸收係數(Absorption coefficient  $34 \text{cm}^{-1}$  / 吸收波段808.5nm)、較小的自發輻射生命週期(Fluorescent lifetime  $90 \mu\text{s}$ )…等特點[4]，因此在固態雷射實驗中是一個絕佳的增益介質選用材料。

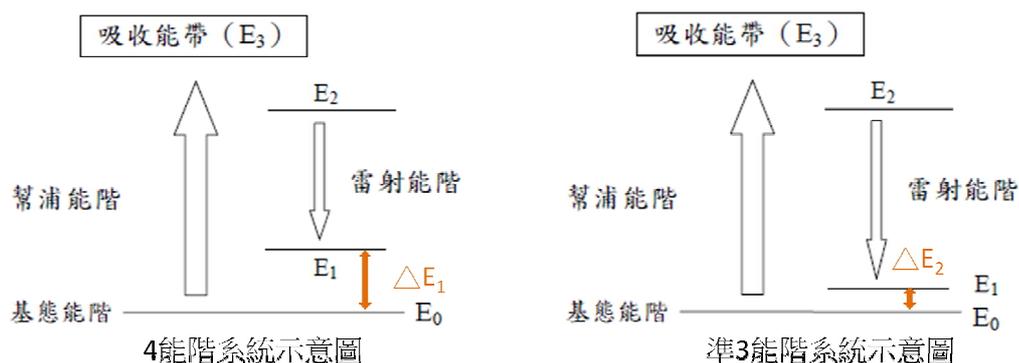


圖3.1 準3階與4階系統示意圖

「摻釹鈮酸鈮晶體」(Nd:YVO<sub>4</sub>)被當作增益介質材料，首先被應用於1966年，但由於當時晶體的散射中心以及吸收色中心都有其缺陷，因此並未能滿足光學實驗的需求；且受限於晶體成品體積過大，更是未能被廣泛的應用於雷射的實驗，時至今日Nd:YVO<sub>4</sub>晶體已經有許多光學特性是優於其他光學晶體，而廣泛地被雷射實驗所使用當作增益介質。而最主要的兩大特點即是「有較大的激發放射截面積」、

「在激發光源808 nm波段很強的峰值效益吸收常數」。

我們先於下表3.1 表列出目前廣泛使用的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體規格特性；並且我們接著利用下表3.2 比較目前另一廣泛使用的Nd<sup>3+</sup>離子摻雜的晶體Nd:YAG，利用幾個較為重要的光學參數特性，說明此次實驗中選用Nd:YVO<sub>4</sub>晶體做為增益介質的原因。

項目	名稱 / 數值	單位
晶體名稱	<b>Nd:YVO<sub>4</sub></b>	
中文名稱	<b>摻釹釩酸鈮</b>	
晶格結構	<b>Zircon Tetragonal</b>	
激發放射截面積	<b>≥15.6x10<sup>-19</sup></b>	cm <sup>2</sup>
激發放射波長	<b>1064.3 / 1342</b>	nm
頻譜寬度	<b>~ 0.8 @1064</b>	nm
自發輻射生命週期	<b>~ 90</b>	μs
激發光源中心波長	<b>808.5</b>	nm
峰值吸收效益常數	<b>34</b>	π Polarization
at 808 nm	<b>10</b>	σ Polarization
Nd ions doping	<b>1% - 3%</b>	
熱傳導係數	<b>平行 c 軸: 0.05</b>	W/cmK
熱光學係數@300K	<b>Dn<sub>o</sub>/dT=8.5x10<sup>-6</sup></b>	K
熱光學係數@300K	<b>dne/dT=2.9x10<sup>-6</sup></b>	K
Poisson ratio	<b>0.33</b>	

表3.1 Nd:YVO<sub>4</sub>晶體規格特性

晶體名稱	Nd:YVO <sub>4</sub>	Nd:YAG
中文名稱	<b>摻釹釩酸鈮</b>	<b>摻釹釩鋁石榴石</b>
晶格結構	<b>Zircon Tetragonal</b>	<b>Cubic</b>
激發放射截面積	<b>25.6x10<sup>-19</sup> @1064 nm</b>	<b>2.8x10<sup>-19</sup> @1064 nm</b>
頻譜寬度	<b>0.8 nm</b>	<b>0.6 nm</b>
自發輻射生命週期	<b>90μs</b>	<b>230μs</b>
激發光源中心波長	<b>808.5 nm</b>	<b>807.5 nm</b>
峰值吸收效益常數	<b>34 cm<sup>-1</sup> (π) / 10 cm<sup>-1</sup> (σ)</b>	<b>10 cm<sup>-1</sup> @ 808 nm</b>
Nd ions doping	<b>1.1%</b>	<b>1%</b>
熱傳導係數	<b>平行 c 軸: 0.05 W/cmK</b>	<b>0.12 W/cmK</b>
熱光學係數@300K	<b>dn<sub>a</sub>/dT=8.5x10<sup>-6</sup> K</b>	<b>7.3x10<sup>-6</sup> K</b>
熱光學係數@300K	<b>dn<sub>c</sub>/dT=2.9x10<sup>-6</sup> K</b>	

表3.2 Nd:YVO<sub>4</sub>與Nd:YAG光學特性比較表

由於我們希望實驗能夠得到高重複率(大於10 kHz)、高能脈衝的雷射。因此雖然Nd:YAG晶體有其較優異的熱傳導率，在高能雷射實驗中能夠維持在較低的溫度下工作；且其有較高的晶體損害極限值。但由上表2 中可以明顯看出Nd:YVO<sub>4</sub>的自發輻射生命週期(~90 μs)小於Nd:YAG，這代表著在實驗的過程中使用Nd:YVO<sub>4</sub>做為增益介質，可以較容易獲得高的脈衝重複率，其次在「激發放射截面積」、以及在808 nm 波長激發光源下的「峰值吸收效益」Nd:YVO<sub>4</sub>晶體均優於Nd:YAG晶體的表現，因此雖然Nd:YVO<sub>4</sub>與Nd:YAG雖然各有其選用的特點，但對於高脈衝重複率的實驗以Nd:YVO<sub>4</sub>晶體做為增益介質是一個較為適當的選擇。

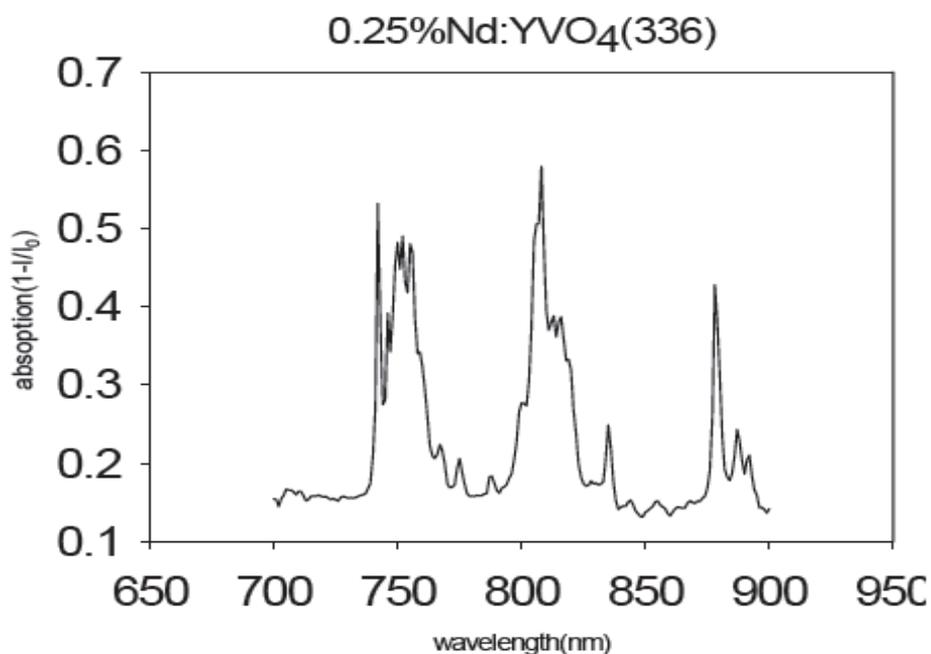


圖3.2 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體吸收波長光譜圖

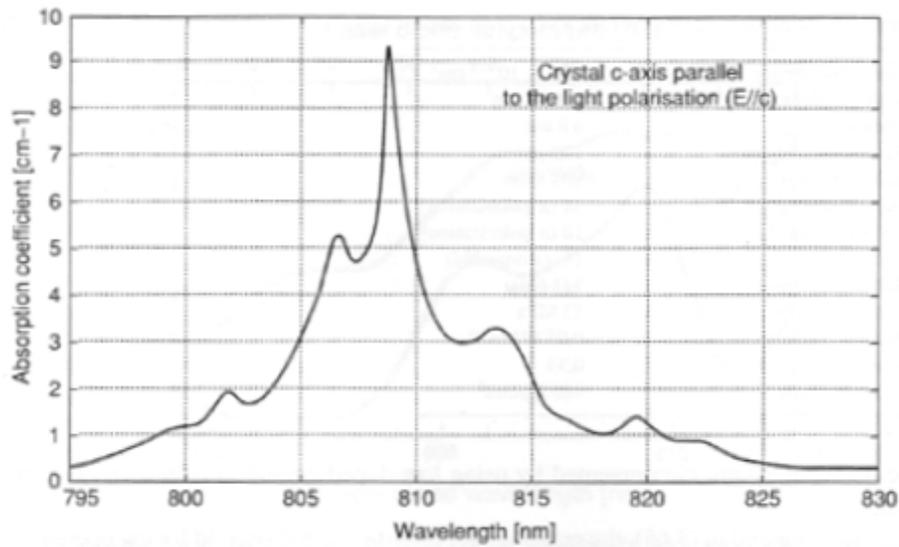


圖3.3 Nd:YVO<sub>4</sub> 在波長808 nm吸收效應常數圖

釩酸鈮晶體本身即為一「雙折射晶體」，其所受激放射的線性偏振雷射光束，將沿著晶體特殊的 $\pi$ 軸向，以一線性偏振輸出的特性將可以避免實驗過程中，因為熱效應所產生的雙折射現象，而利用鈮鋁石榴石晶格所摻雜的Nd:YAG晶體為一非極化晶體，因而實驗過程中，容易因為高能激發產生的熱效應，產生雙折射現象，進而造成雷射品質的不穩定。雖然「Nd:YVO<sub>4</sub>晶體」有著上述種種利用於固態雷射實驗的優點，然而我們也發現到其對於高能激發光源的相關應用，所產生高熱效應的散熱表現還是無法提供一滿意表現。這將使得實驗中晶體出現一些熱效應或是因為熱所衍伸內部應力效應，這些結果都將微小改變晶體的特性，進而影響到實驗的雷射共振腔內穩定

度。從參考文獻中更發現Nd:YVO<sub>4</sub>晶體，在高功率激發光源實驗的熱耐受性極限，更會隨著摻雜Nd離子濃度增加呈現反比例的下降。也因此 針對於高功率激發入射光源的光學實驗(通常為大於30W)，其晶體的Nd離子摻雜濃度，反而會是下降至0.25% - 0.4% 之間。

由下圖3.3 可以看出Nd:YVO<sub>4</sub>晶體內電子受激躍遷的情形，我們可以知道要輻射出1064 nm的波長的激發光束，電子是從高能階態<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>(R1) -> 低能階態<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>(Y1)。一般傳統的做法，我們利用Nd:YVO<sub>4</sub>晶體對於808 nm 波段的高吸收係數特性，將電子利用808 nm波段的激發光源，將電子由低能階態激發至高能階激發態<sup>4</sup>F<sub>5/2</sub>，接著透過電子自發性輻射的過程(<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>(R1) -> <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>(Y1) 約略大於60%)，激發放射出1064 nm。然而，我們還可以選擇另一種激發的型式，即利用880 nm波段的激發光，將電子由低能階態的<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>(Y1)直接激發至高能階態的<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>(R1)，接著電子自發性輻射，放射出1064 nm波段[5]。

由於我們發現電子躍遷的過程中，無論受激發躍遷至高能階或是輻射放射躍遷至低能階，當躍遷的波長越長所遇到的「量子缺陷效應」(Quantum defect efficiency)越顯著，由於此一原因，我們思考如何讓躍遷的波長變短，因此 我們讓激發光源由808 nm -> 880 nm；讓躍遷輻射直接由<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>(R1) -> <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>(Y1)。藉由微小改變激發以及放射的波長，降低由「量子缺陷效應」所造成的量子缺陷熱影響。我們

可以由參考的文獻中記載的例子來說明：當利用較長的波長來激發電紫躍遷時，所記錄的「量子缺陷效應」(Stokes factor  $\eta_s$ )從0.76 → 0.83。(實驗激發光束:880 nm / 1 mm Nd:YVO<sub>4</sub>晶體 / Nd<sup>3+</sup> doping 1% / 增益效益~75%)

如同大多數摻雜Nd離子的晶體一般，Nd:YVO<sub>4</sub>晶體也可以激發放射出1032 nm波段的激發光束，但相對於激發放射出1064 nm波段的使用，由於增益效益較差(~ 40%)，因此將會因為「量子缺陷效應」更為顯著而有更多的熱負載，進而不利於實驗的精確以及穩定度。

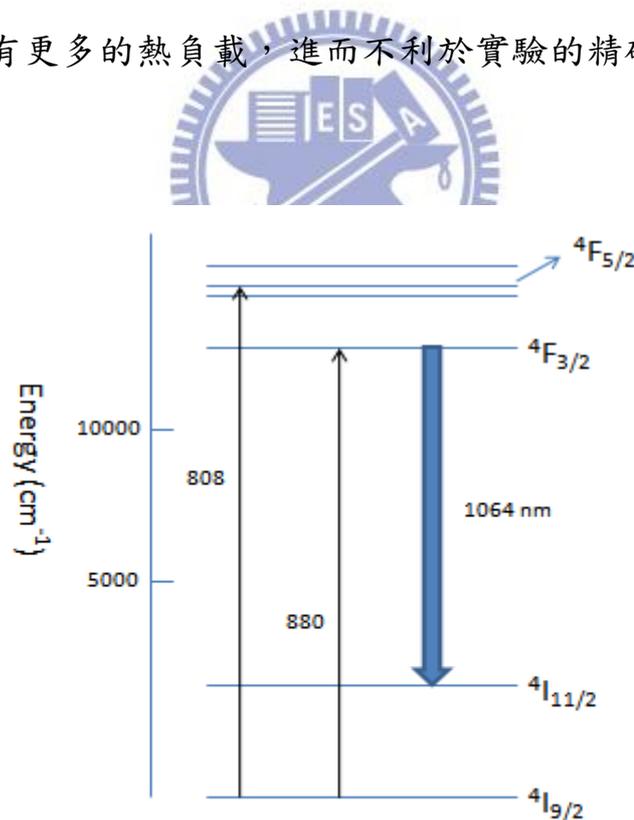


圖3.4 Nd:YVO<sub>4</sub>電子躍遷能階圖

### 3.2.1 「熱透鏡效應」(Thermal Lens Effect)

近年來，固態雷射的發展，隨著高能激發光源的應用(AlGaAs/GaAs雷射二極體)，使得輸出功率或能量有著快速和顯著的提升。然而，高功率的激發光源，對雷射共振腔內的晶體以及增益介質間所產生的「熱透鏡效應」卻也大大的影響了雷射共振腔內的穩定性、腔內共振膜態的光斑大小(Oscillation mode size)、雷射光束最大輸出能量、效益、以及輸出雷射光束的品質…等特性，因此在研究相關實驗的過程中，「熱透鏡效應」是一個絕對必需要去考量的因素[6]。而晶體或是增益介質產生熱效應的原因有：

- i. 介質離子自發性放射躍遷時，其能量轉化為基質材料的熱能。
- ii. 增益介質受激輻射時「重覆吸收效應」。
- iii. 激發光源除提供特定可吸收光譜能量外，尚有少部分能帶光譜可供基態材料吸收。

而此熱分佈的效應可由一拋物曲線對應式表示；由式子中可以明顯觀察「熱透鏡效應」會對於共振腔穩定g參數隨著受熱而變化，且腔內實驗晶體因受熱而造成晶體的表面曲率改變，進而產生類似透鏡曲率改變的形變效應。1970年由W.Koechner首次提出固態雷射實驗中「熱透鏡效應」，並且提供了可供解決的理論架構；將激發光源做高斯分佈後，其焦距長度可由下式表示之[13]:

$$\frac{1}{f_{th}} = \int_0^l \frac{\xi P_{in}}{2\pi K_c} \frac{\alpha e^{-\alpha z}}{1 - e^{-\alpha l}} \frac{[dn/dT + (n-1)\alpha_T]}{\omega_p^2 \{1 + [\lambda_p M_p^2 (z - z_0) / n\pi\omega_p^2]^2\}} dz \quad (1)$$

其中參數定義：

$K_c$ ：熱傳導係數

$\omega_p$ ：激發光源點徑大小

$P_{in}$ ：入射激發光源功率大小(單位:W)

$\zeta$ ：部分熱負載

$n$ ：晶體延c軸向(c-axis)折射率係數

$dn/dT$ ：對應晶體 $n$ 係數函數

$\alpha$ ：增益介質吸收係數

$l_c$ ：增益介質長度

$C$ ：比例常數

在考慮過上述的共振腔內「熱透鏡效應」後，我們也將在後續的實驗中做更進一步的探討，以便設計出一最佳化的雷射共振腔，進而增加實驗精確度，以及輸出雷射品質的穩定度。

### 3.3 Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG-被動式Q-開關種子雷射

由前面章節3.2我們論述選用Nd:YVO<sub>4</sub>晶體做為實驗用的增益介質原因，並且利用Cr<sup>4+</sup>:YAG當作「被動式Q-開關雷射」的飽和吸收體，但由參考文獻上我們知道要利用此實驗架構得到穩定且高重複率的高能脈衝雷射並不容易。因此在考慮過高功率激發的實驗對於共振腔內穩定度以及實驗晶體所產生的「熱透鏡效應」以及滿足「被動式Q-開關」最佳化條件後，將實驗共振腔結構設計成「半球共振腔」(Hemispherical resonator)架構，之後更換4種不同初始穿透率(Initial transmission)的飽和吸收體Cr<sup>4+</sup>:YAG晶體(40%~70%)，透過實驗數據分析我們知道實驗所獲得的脈衝雷射是一個相較於以往穩定的高能脈衝。最後我們從中選取兩種條件，做為此次被動式Q-開關雷射的種子源雷射光束。

由實驗中選取出的種子雷射光束分別為：

- i. 最高重複率 Cr<sup>4+</sup>:YAG 初始穿透率  $T_0=70\%$ 、重複率 = 50 kHz、  
峰值功率 = 4.5 kW
- ii. 最高峰值功率Cr<sup>4+</sup>:YAG 初始穿透率  $T_0=40\%$ 、重複率 = 25 kHz、  
峰值功率 = 21.2 kW

### 3.3.1 半球共振腔體架構設計

為了使「被動式Q-開關」雷射光束有其最佳化品質條件；飽和吸收體內部的「吸收飽和」機制將要快於其自身的「增益飽和」機制。  
[7]參考文獻說明設計，為了達到一個最佳化的「被動式Q-開關」條件，可以由下列的速率方程式，討論共振腔內增益介質與飽和吸收體晶體間的相對關係：

$$\frac{\ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right)}{\ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right) + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L} \frac{\sigma_{gs}}{\sigma} \frac{A}{A_s} \gg \frac{\gamma}{1-\beta} \quad (2)$$

其中參數定義：

$T_0$ ：飽和吸收體初始穿透率

$R$ ：輸出耦合鏡反射率

$\sigma$  &  $\sigma_{gs}$ ：增益介質受激放射截面積 & 飽和吸收體基態吸收截面積

$L$ ：共振腔未飽和狀態內部份耗損 (Nonsaturable intra-cavity round-trip dissipative optical loss)

$\frac{A}{A_s}$ ：增益介質有效面積  $A$  / 飽和吸收體有效面積  $A_s$  的比值

$\gamma$ ：居量反轉減少因子 (Inversion reduction factor); 介於 0 ~ 2 之間 [8]

$\beta$ ：飽和吸收體激發態吸收截面積 / 基態吸收截面積比值

實驗中所使用的晶體為：

a. Nd:YVO<sub>4</sub> 增益介質放射截面積 ( $\sim 2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ) [4]

b.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  飽和吸收體 - 基態吸收截面積( $\sim(2\pm 0.5)\times 10^{-18} \text{ cm}^2$  [9])

參考相關文獻探討以及由上式(2)中可以得知，為了達到良好的「被動式Q-開關」條件，我們需要將增益介質對飽和吸收體的有效面積  $\frac{A}{A_s}$  比值設計大於10。 [11] 參考之前文獻所知些若短共振腔設計的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  - 被動式Q-開關雷射中，如果未能將上述  $\frac{A}{A_s}$  比值設計大於特定值時(增益介質光束有效面積大於飽和吸收體光束有效面積)，將會造成「被動式Q-開關」共振腔內雷射品質不穩定；而此不穩定以及壓縮不緊密的雷射品質，將伴隨著一系列不穩定的脈衝形成，我們亦可在實驗中觀察到一不穩定且伴隨雜訊的脈衝產生 [10][11]。雖然我們知道在現今的「被動式Q-開關」短共振腔設計中，可以透過一系列透鏡重新聚焦投射、耦合等，讓增益介質以及飽和吸收體的增益作用面積比值  $\frac{A}{A_s}$  達到符合穩定條件  $>10$  以上 [11]；但是對於要輸出穩定以及緊實的短脈衝雷射，此一討論說明尚嫌不夠嚴謹，因此我們參考相關文獻並利用下圖3.5.1~3 將半球短共振腔的設計，做以下更嚴謹的考量說明：

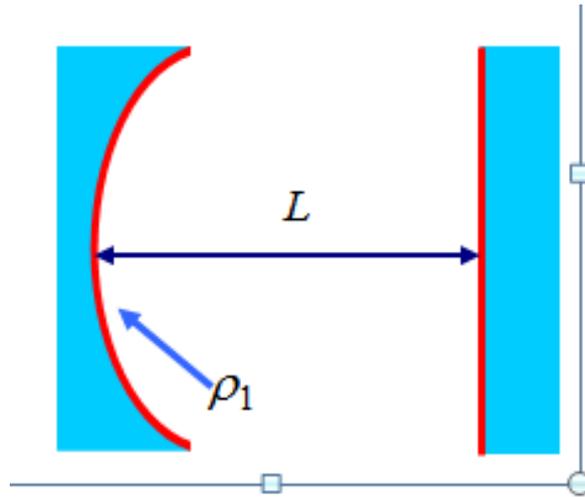


圖3.5.1 透鏡共振腔設計示意圖

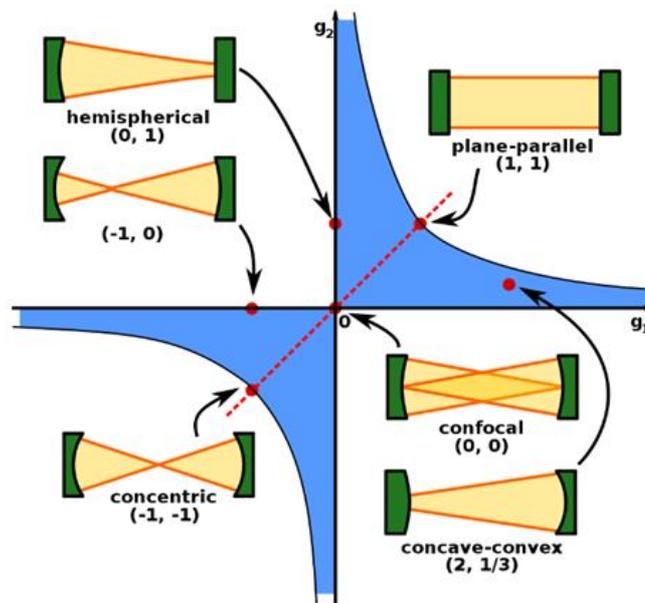


圖3.5.2 共振腔穩定態區域圖(g參數)

由上圖3.5.1我們先考量組合數個透鏡後的情形下所設計的共振腔結構，將一些參數做以下定義。在共振腔體內兩透鏡間的距離(可視為共振腔體長)定義為 $L$ ，前鏡曲率為 $\rho_1$ 的情況下，將 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 分別定義為激發光源光束投射作用在前鏡以及輸出耦合鏡的作用面積半徑。由參考相關文獻上可以得知g參數以及 $\omega$ 在共振腔內的關係式

為[12]:

$$g_i = 1 - \frac{L}{\rho_i} \quad (3)$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi} \sqrt{\frac{g_j}{g_i(1-g_1g_2)}}} \quad i, j = 1, 2; i \neq j \quad (4)$$

其中，在短共振腔的設計下，我們將增益介質以及飽和吸收體的架設位置盡可能的貼近於前鏡，因此我們可以將符合最佳化條件的作用面積比值  $\frac{A}{A_s}$  與激發光束投射半徑以及共振腔透鏡、腔長間的關係

等效的化簡如下式:

$$\frac{A}{A_s} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{\rho_1}{\rho_1 - L} \quad (5)$$



由前段落所描述要符合最佳化的條件為  $\frac{A}{A_s}$  比值要大於10 因此我們將共振腔長設計長度大約為  $L = 0.9\rho_1$ 。且  $g$  參數乘積值須符合共振腔穩定條件為  $0 < g_1g_2 < 1$  (圖3.5.2 所示藍色區塊)。我們將此一由凹透鏡及平面鏡所組成共振腔長近似於透鏡曲率半徑的結構，稱之為「半球腔共振腔」。

就「被動式Q-開關」實驗而言，設計「最佳化的半球共振腔」時，如果只考慮共振腔內最佳化的條件仍然未能足夠條件產生穩定且短脈衝雷射光束。由章節3.2所提及，共振腔內晶體在高能激發光源的來回受激增益的過程中將會產生大量的熱，因此 可以明顯觀察到其

物理現象---「熱透鏡效應」。我們知道此熱效應大大影響了雷射共振腔內的穩定性、腔內共振膜態的光斑大小、雷射光束最大輸出能量、以及輸出雷射光束的品質…等特性；因此 實驗共振腔設計時，除了滿足腔內最佳化的種種條件外，「熱透鏡效應」亦將會是我們在本次實驗中設計「半球共振腔」時需要考慮的重點條件。

在高能激發光源雷射實驗，考慮「熱透鏡效應」時，我們將半球共振腔結構設計成類似「半球共振腔」設計，再由下列熱效應的原式中，尋找滿足的條件[13]：

$$\frac{1}{f_{th}} = \int_0^l \frac{\xi P_{in}}{2\pi K_c} \frac{\alpha e^{-\alpha z}}{1 - e^{-\alpha l}} \frac{[dn/dT + (n-1)\alpha_r]}{\omega_p^2 \{1 + [\lambda_p M_p^2 (z - z_0) / n\pi\omega_p^2]^2\}} dz \quad (6)$$

$\xi$ ：部分熱負載

$K_c$ ：熱傳導係數

$P_{in}$ ：入射激發光源功率大小(單位:W)

$\alpha$ ：增益介質吸收係數

$l$ ：增益介質長度

$n$ ：晶體沿c軸向入射(c-axis)折射率係數

$dn/dT$ ：對應晶體  $n$  係數熱-光函數

$\alpha_r$ ：晶體沿a軸向(a-axis)熱膨脹係數

$\omega_p$ ：激發光源點徑大小，我們可以進一步將其表示為下式：

$$\omega_p(z) = \sqrt{\omega_p^2 \left\{ 1 + \left[ \lambda_p M_p^2 (z - z_0) / n\pi\omega_p^2 \right]^2 \right\}} \quad (7)$$

$\lambda_p$  : 激發光源波長

$M_p^2$  : 激發雷射光束品質因數，可表示為：

$$M_p^2 = \pi\omega_p(N.A.) / \lambda_p ; \text{ N.A. 為光纖中心核的數值孔徑 (Numerical Aperture)} \quad (8)$$

$z_0$  : 激發光束聚焦在增益介質投射面積大小

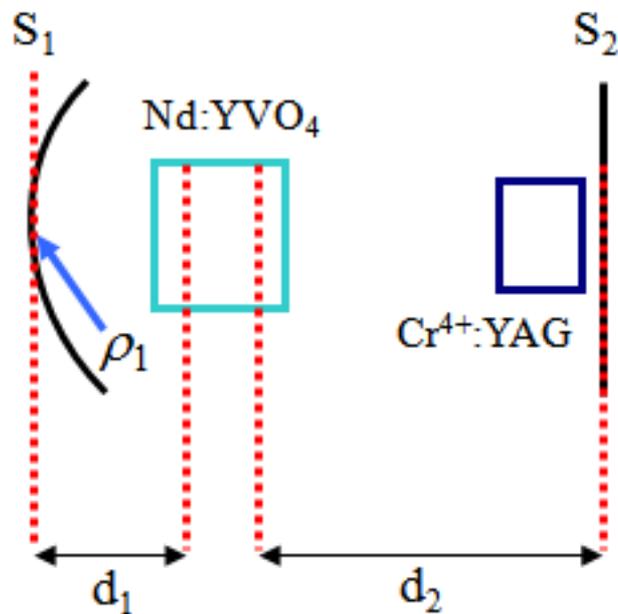


圖3.5.3 半球共振腔的Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG被動式Q-開關雷射示意圖

上圖3.5.3 為此次Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG -被動式Q-開關雷射的半球共振腔架構示意圖，在考慮「熱透鏡效應」的情況下將前鏡頂端面S<sub>1</sub>定義為參考面，則在共振腔內端面S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>間來回增益的雷射光束品質

因數為[16]:

$$M_D = \begin{pmatrix} g_1^* & L^* \\ \frac{g_1^* g_2^* - 1}{L^*} & g_2^* \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$g_i^* = g_i - \frac{d_j}{f_{th}} \left(1 - \frac{d_i}{\rho_i}\right) \quad (10)$$

$$g_i = 1 - \frac{d_1 + d_2}{\rho_i} ; i, j = 1, 2; i \neq j \quad (11)$$

$$L^* = d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f_{th}} \quad (12)$$

其中:

$d_1$ 和 $d_2$ 分別為共振腔兩邊參考端面到晶體主要端面的距離； $f_{th}$ 為熱透鏡效應數值，其相關計算參數值如下：

$$\xi=0.24, K_c=5.23 \text{ W/K m}, M_p^2 \approx 310 (\text{N.A.}=0.22), d_1=2 \text{ mm}, d_2=0.9$$

$$\rho_1=d_1, \rho_2=\infty, n=2.165, l=12 \text{ mm}, dn/dT=3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \alpha=0.6 \text{ mm}^{-1},$$

$$\alpha_T=4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \lambda_p=808 \text{ nm}$$

同時間，在有熱效應的情況下，共振腔內要維持一穩定的系統， $g$ 參數仍舊需要滿足  $0 < g_1^* g_2^* < 1$ 。

由於 $g_1^* g_2^*$ 乘積值會隨著激發光束功率增大而遞減，亦即隨著入射激發光源功率增大，而使得共振腔環境由穩定趨於不穩定狀態。因此我們將 $g_1^* g_2^*$ 乘積值趨近於0時的狀態視為極限條件狀態，在此之後的

激發功率遞增，將相對造成一不穩定的雷射共振腔環境；因此 我們利用  $g_1^* g_2^*$  趨近於0的條件找出雷射共振腔所能保持穩定狀態的最大激發光源功率。

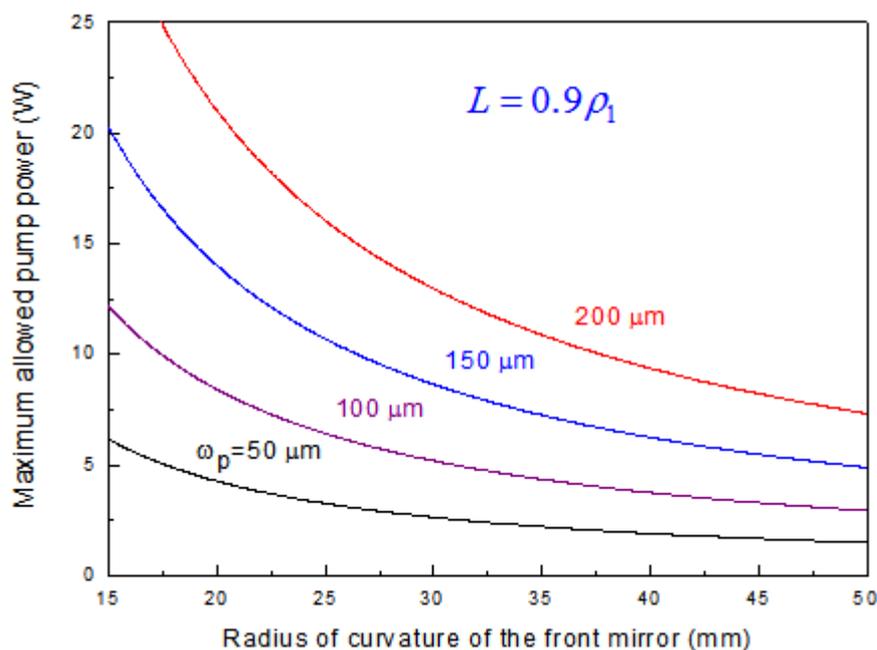


圖3.6.1 前鏡曲率半徑對應最大激發功率圖

由上圖我們將4種不同光徑大小的入射光束，並改變前鏡曲率大小得到相對應最大可接受激發光功率。圖中可以得知在相同入射光徑下前鏡曲率越大，相對可接受的激發入射光束功率將會遞減。而我們也已經知道「半球共振腔」腔長設計為  $L = 0.9\rho_1$ ；且「被動式Q-開關」架構中越短的共振腔長可以產生越短的脈衝雷射光束，進而可以有更高的峰值功率。在考量上述條件以及實際實驗上增益介質、飽和吸收體長度和散熱機構的大小後，我們選取前鏡曲率為 25 mm；共振腔長為 22.5 mm的架構。當考量「熱透鏡效應」下，我們將晶

體(增益介質 $\omega_1$ ；飽和吸收體 $\omega_2$ )在共振腔內作用的投射入光半徑用

以下的式子重新表示之[14]:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{\lambda L^*}{\pi} \sqrt{\frac{g_j^*}{g_i^*(1-g_1^*g_2^*)}}} \quad i, j = 1, 2 ; i \neq j \quad (13)$$

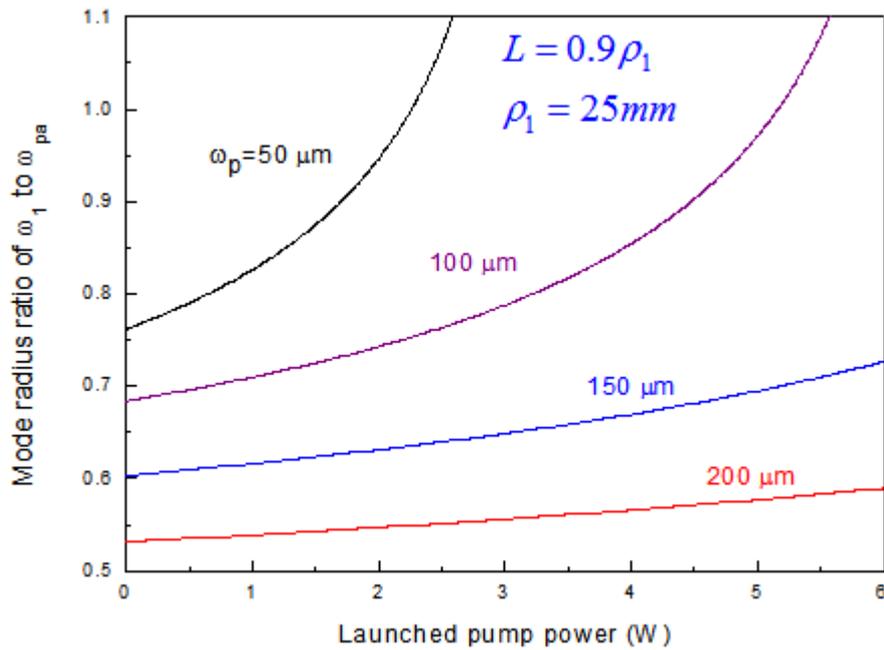


圖3.6.2 激發光功率對應光徑作用半徑比

由上圖3.6.2 我們利用前鏡曲率為 25 mm 的條件下，將不同光徑大小的激發光束入射到共振腔內，隨著入射光功率的增強試著找出其最佳化條件。首先我們將激發入射光束在增益介質晶體內作用的平均光徑大小定義為 $\omega_{pa}$ 則[15]:

$$\omega_{pa} = \int_0^l \omega_p(z) e^{-\alpha z} dz / \int_0^l e^{-\alpha z} dz \quad (14)$$

$\omega_p$ : 激發光源光徑大小

而理想的實驗條件需要符合  $\omega_1 / \omega_{pa}$  比值介於 0.7 ~ 1.1 之間(當  $P_{in} < 10 \text{ W}$ )。[15]

因此 由上圖我們可以明顯得知,當我入射光徑大小選擇  $100 \mu\text{m}$  時, 隨著激發光源功率的增加, 符合理想化條件  $\omega_1 / \omega_{pa}$  比值介於 0.7 ~ 1.1 之間的區間將會最寬, 因此確立實驗選用的激發光束光徑大小為  $100 \mu\text{m}$ 。最後 我們將上述選定的實驗條件, 前徑曲率 25 mm; 激發光徑  $100 \mu\text{m}$  的架構下, 進一步確認「被動式Q-開關」最佳化的條件。我們知道要符合「被動式Q-開關」最佳化條件為  $\frac{A}{A_s}$  比值需大於10, 由實驗結果下圖3.7 可以得知在相關架構下可以完全滿足最佳化條件。

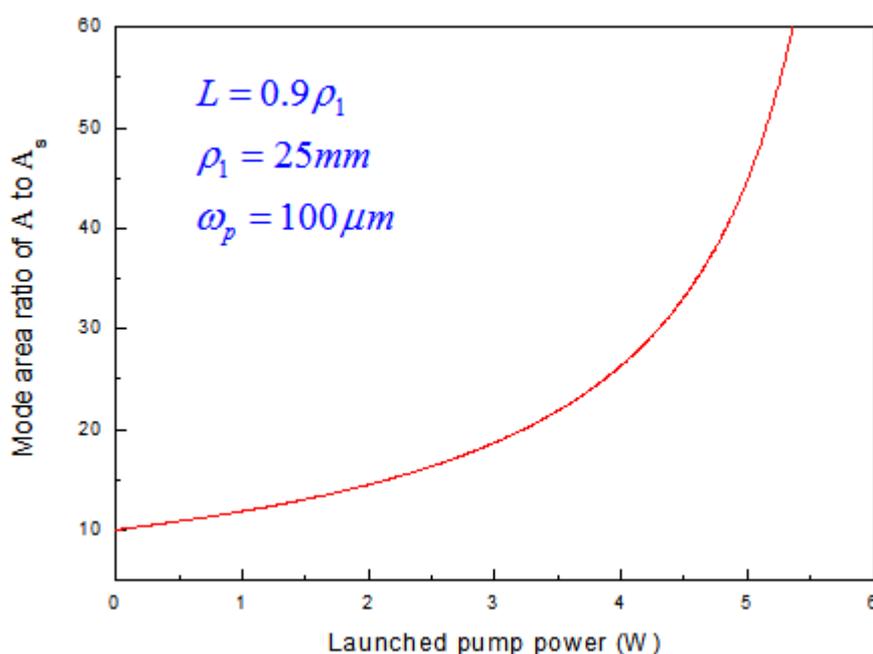


圖3.7 激發功率對應「被動式Q-開關」最佳化條件圖

最後 簡易總結上述相關實驗結果，並選定滿足「半球共振腔」最佳化的實驗條件做為後續「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG -被動式Q-開關種子雷射」實驗設定。

激發光源光徑大小: 100  $\mu\text{m}$

前徑曲率: 25 mm

實際共振腔長: 22.5 mm

### 3.3.2 實驗裝置架構



由下圖3.8 描述了本次「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式Q-開關種子雷射」實驗的架構。實驗裝置的前鏡(Rear mirror)為曲率半徑 25 mm，鏡面塗佈高穿透率( $T \sim 95\% @ 808 \text{ nm}$ ) / 高反射率( $R > 99.8\% @ 1064 \text{ nm}$ ) 的凹面鏡。出光耦合鏡(Output coupler)為鏡面塗佈部份反射，反射率  $R = 60\% @ 1064 \text{ nm}$  的平面鏡；使用的激發光源(Pumping source)為7-W / 808 nm光纖耦合式LD；光源點直徑為200  $\mu\text{m}$ ，光圈數值孔徑為0.22；聚焦透鏡組(Focusing lens)焦距長度為 25 mm 耦合效益為85% 的透鏡組，用於將入射激發光源，聚焦投射到增益介質Nd:YVO<sub>4</sub>。

由章節3.3.1的結論，我們將共振腔長設計在接近前徑曲率半徑25

mm；實際共振腔長為近似 22.5 mm。增益介質：摻釹釩酸鈮晶體 (Nd:YVO<sub>4</sub>) --- a-cut, 0.3 at.%，晶體長度 12 mm，與前鏡距離約略為 0.5~1 mm。飽和吸收體：摻鉻釩鋁石榴石晶體(Cr<sup>4+</sup>:YAG) --- 分別使用初始穿透率(Initial transmission),  $T_0=40\%$ ,  $50\%$ ,  $60\%$ ,  $70\%$ 。其中增益介質以及飽和吸收體晶體兩面均有塗佈抗反射塗料(@1064 nm)，實驗過程以銅薄片包覆散熱，並裝置於水冷設備確保實驗於 19°C 下進行。實驗結果記錄儀器：示波器：Leroy digital oscilloscope (Wavepro 7100; 10G samples/sec; 4 GHz bandwidth --- InGaAs photodiode)。光學頻譜分析儀：Advantest Q8381A (解析度 ~ 0.1 nm)。

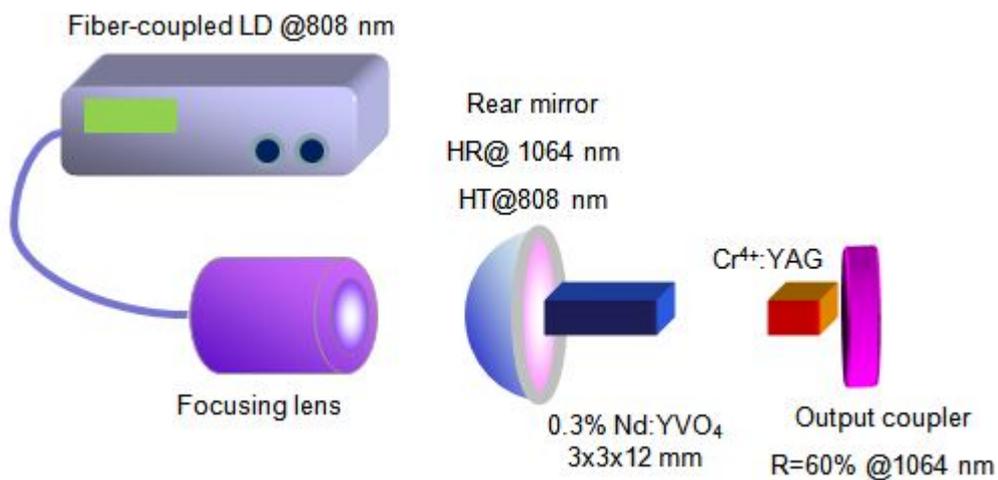


圖3.8 Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG - 被動式Q-開關種子雷射實驗架構

### 3.3.3 實驗結果

我們將上述實驗裝置架設完成後並且滿足章節3.3.1所選用的實驗參數條件，開始進行「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG - 被動式Q-開關種子雷射」實驗。實驗將激發光源功率大小設定為 5.6 W條件下進行，藉由更換不同初始穿透率  $T_0$  的「摻鉻鈮鋁石榴石晶體」飽和吸收體，得到不同的種子雷射光束能量特徵值如下圖3.9.1以及圖3.9.2所記錄。由飽和吸收體初始穿透率  $T_0=70\%$  依序更換實驗至  $T_0=40\%$ 所得到的脈衝重複率(pulse repetition rate)、脈衝能量(pulse energies)、脈衝寬度(pulse width)、以及峰值功率(peak power)分別為：

(1)脈衝重複率：50 kHz ~ 25 kHz

(2)脈衝能量：22  $\mu J$  ~ 36  $\mu J$

(3)脈衝寬度：4.9 ns ~ 1.7 ns

(4)峰值功率：4.5 kW ~ 21.2 kW

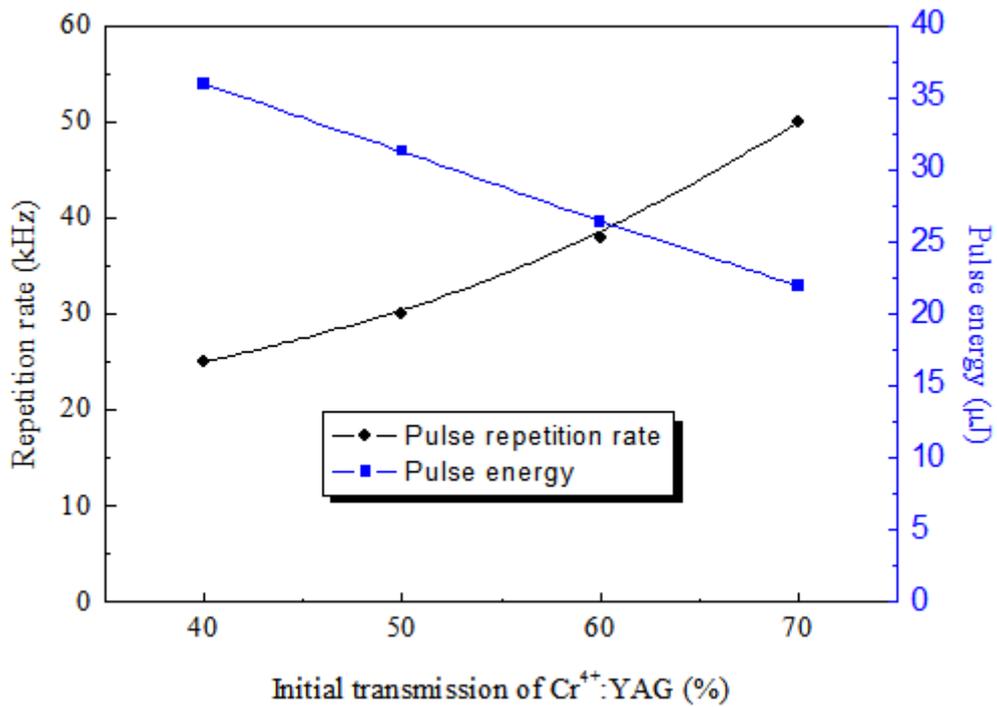


圖3.9.1 Cr<sup>4+</sup>:YAG不同初始穿透率對應雷射脈衝重複率與脈衝能量

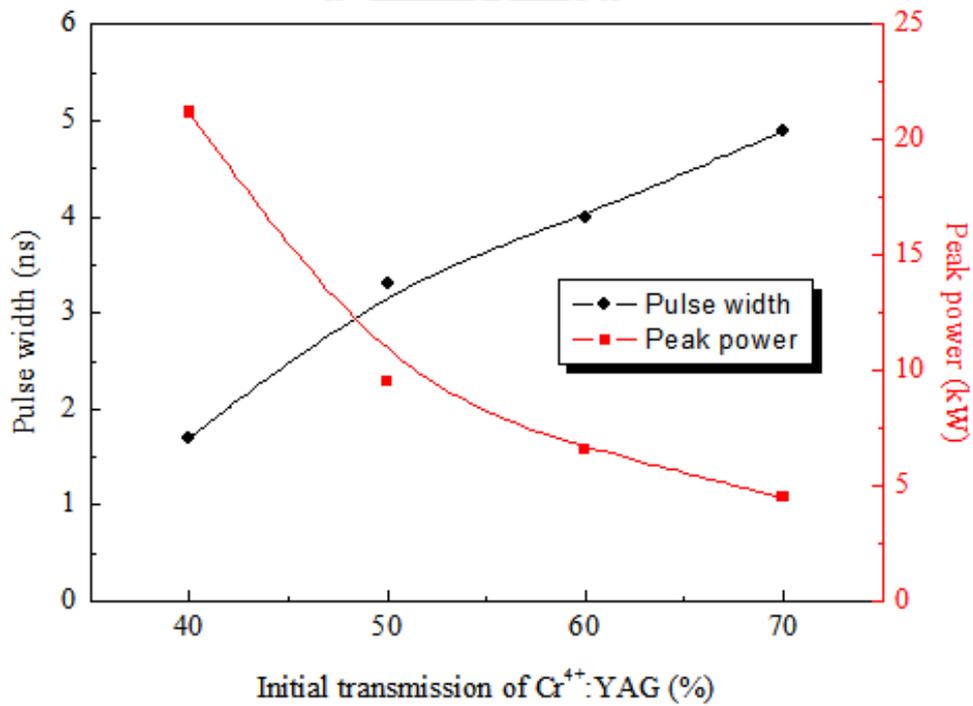


圖3.9.2 Cr<sup>4+</sup>:YAG不同初始穿透率對應雷射脈衝寬度與峰值功率

經由上述記錄結果我們選用下列 2 種條件的雷射光束，做為下一章節光纖放大器雷射 (Master-Oscillator Fiber Power Amplifier Laser MOFA/MOPA)，所需要的種子源雷射光束；並且重新整理所得到的能量值如下：

1. 最高脈衝重複率  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG } T_0 = 70\%$

脈衝重複率：50 kHz / 脈衝能量：22  $\mu\text{J}$  / 脈衝寬度：4.9 ns / 峰值功率：4.5 kW。

2. 最高峰值功率  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG } T_0 = 40\%$

脈衝重複率：25 kHz / 脈衝能量：36  $\mu\text{J}$  / 脈衝寬度：1.7 ns / 峰值功率：21.2kW。



下圖 3.10.1 以及 3.10.2 則為示波器記錄，將最高重複率( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG } T_0 = 70\%$ )，以及最高峰值功率( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG } T_0 = 40\%$ )條件時，單次脈衝最大輸出能量脈衝波形圖。

此章節末，值得另外一提的部分在於，由過去的文獻以及參考資料的研討中可以發現，當產生高能脈衝的同時常會伴隨著有一微小的雜訊脈衝生成，或是同時產生的脈衝震盪。此一現象或是雜訊脈衝的生成，不僅僅會降低「被動式 Q-開關」的雷射品質(最大脈衝能量以及峰值功率均會受到影響)；脈衝的震盪更會造成雷射脈衝振幅的震盪過大，進而無法提供穩定品質的種子雷射光束。由我們本次的實

驗結果，我們不但得到一精確、短脈衝、高峰值的脈衝雷射，並且能夠消除微小雜訊脈衝的生成。由此一實驗結果讓我們更具信心，如此的實驗架構以及共振腔設計將可得到更精確的結果。

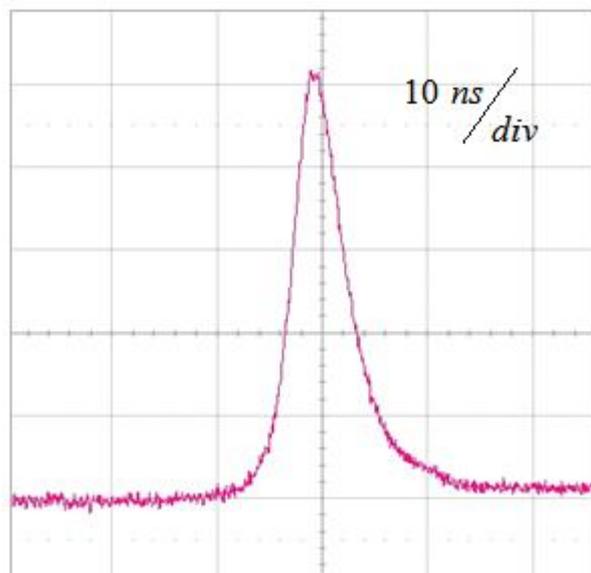


圖3.10.1 Cr<sup>4+</sup>:YAG T<sub>0</sub>=70% 單發雷射脈衝波形圖

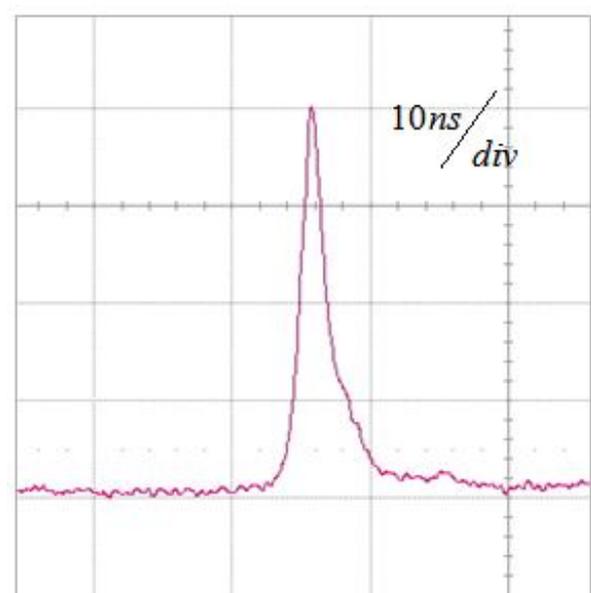


圖3.10.2 Cr<sup>4+</sup>:YAG T<sub>0</sub>=40% 單發雷射脈衝波形圖

## 第四章 光纖放大器

### 4.1 導論

「光纖放大器」(Master-Oscillator Fiber Power-Amplifier MOFA/MOPA)，搭配利用「被動式 Q-開關」(Passively Q-Switch)雷射，做為種子光束的做法(以摻雜  $Nd^{3+}$  離子的晶體，做為增益介質)，為激發高峰值雷射光束…等的相關實驗，提供了一個更有效率的達成方法。在此，我們將第三章節中「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG - 被動式 Q-開關種子雷射」實驗所得到的結果，選取下列(1)、(2)種子雷射光束導入光纖放大器雷射(Master-Oscillator Fiber Power Amplifier Laser MOFA/MOPA)中：

1. 最高脈衝重複率 Cr<sup>4+</sup>:YAG  $T_0=70\%$

脈衝重複率：50 kHz / 脈衝能量：22  $\mu J$  / 脈衝寬度：4.9 ns / 峰值功率：4.5 kW。

2. 最高峰值功率 Cr<sup>4+</sup>:YAG  $T_0=40\%$

脈衝重複率：25 kHz / 脈衝能量：36  $\mu J$  / 脈衝寬度：1.7 ns / 峰值功率：21.2kW。

紀錄透過光纖放大器雷射(MOPA)將雷射脈衝能量放大後所得到的結果則分別為：

1.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $T_0=70\%$  --- 平均功率(average power) 8.9、脈衝能量 178  $\mu\text{J}$ 、重複率 50KHz、脈衝寬度 4.8 ns、最高峰值功率 37 KW。
2.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $T_0=40\%$  --- 平均功率(average power) 4.8、脈衝能量 192  $\mu\text{J}$ 、重複率 25KHz、脈衝寬度 1.7 ns、最高峰值功率 113 KW。

## 4.2 被動式 Q-開關種子雷射光纖放大器

高峰值功率、線性偏振且脈衝重複率已提升至數十 kHz 的脈衝雷射，現今已被廣泛的應用於許多非線性波長轉換相關實驗或是材料製程...學術與工業界的應用。利用摻雜了稀土元素的光纖或是放大器結構，結合應用在雷射的實驗裝置中，形成所謂的「光纖雷射」、「光纖放大器」雷射...等應用。而其架構上之所以被廣泛的應用，主要是因為「光纖放大器」能為雷射相關實驗提供一更好的雷射光束品質、更高效率、更緊密高能的脈衝波、更好的散熱效益...等優點。

且「光纖放大器」架構相較於「光纖雷射」，對於要輸出短脈衝的雷射共振腔設計上，提供了一個更完美、更少缺陷的解決方法。

「被動式 Q-開關」(Passively Q-Switched)雷射，做為種子光束的做法，更是為產生高峰值雷射光束等相關實驗，提供一個更有效率的達成方法，也因此目前普遍為實驗所應用。相較於「主動式 Q-開關」架構，利用「被動式 Q-開關」架構，亦無需提供高電壓或是高速驅

動聲光元件觸發機制、且相對低成本的實驗架構…等優點。

其次，我們利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體設置於實驗共振腔內，相較於其它摻雜 Nd<sup>3+</sup> 的晶體而言，有較寬的吸收光譜、較大的激發放射截面積；利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶體當做飽和吸收體可以降低實驗架設的成本、且其對高能激發有較高的忍受度、有較低的溫度敏感度…等優勢。由上述的各種相對利用優勢，我們架設「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被動式 Q-開關種子雷射」做為激發種子光束，並將相關實驗結果導入「光纖放大器」架構，記錄以下相關實驗結果。



#### 4.2.1 實驗裝置

「光纖放大器」的實驗架構，如下圖 4.1.1 「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG-被動式 Q-開關光纖放大器」雷射實驗裝置圖所述：

1. 激發光源(pumping source): 20-W, 976 nm, 光束直徑 200  $\mu\text{m}$ , 數值孔徑(N.A.) 0.2° 光纖耦合式雷射二極體。
2. 聚焦透鏡(coupling lens): 焦距長度 25 mm
3. 面鏡(mirror): 高穿透率(HT, T>90% @ 976 nm) / 高反射率(HR, R>99.8% @ 1030 ~ 1100 nm)
4. 摻鏡光纖(Yb-doped Panda-style PM double clad fiber---Nefern)

光纖長度 3 公尺, (Panda-style polarization maintaining PM) 為廣泛應用於維持光極化性的雙包覆(double cladding)光纖；其應力作用

區域(Stress applying parts SAP)所作用的雙折射率  $1.5 \times 10^{-4}$ ，核心直徑為  $30 \mu\text{m}$  (數值孔徑  $\text{N.A.}=0.06$ )；內層包覆直徑為  $250 \mu\text{m}$  ( $\text{N.A.}=0.46$ )，光譜吸收衰減率為  $6.6 \text{ dB/m @ } 975 \text{ nm}$ ，此外為了消除光纖兩邊端面所造成的反射效果，我們將光纖兩邊端面口裁切為  $8^\circ$  的斜面。下圖 4.1.2 所示即為 Panda-style polarization maintaining 光纖顯微截面圖。

實際實驗過程的激發光束半徑大小約略為  $100 \mu\text{m}$ ，估計透過光纖後的光耦合效益為 85%；而種子源光束透過耦合透鏡重新聚焦入射到摻鏡光纖內，其光能量耦合效益約略為 30%，而其中光半波面(half-wave plate)將透過入射到光纖的光傳導快軸(fast-axis)藉以控制維持光極化性。

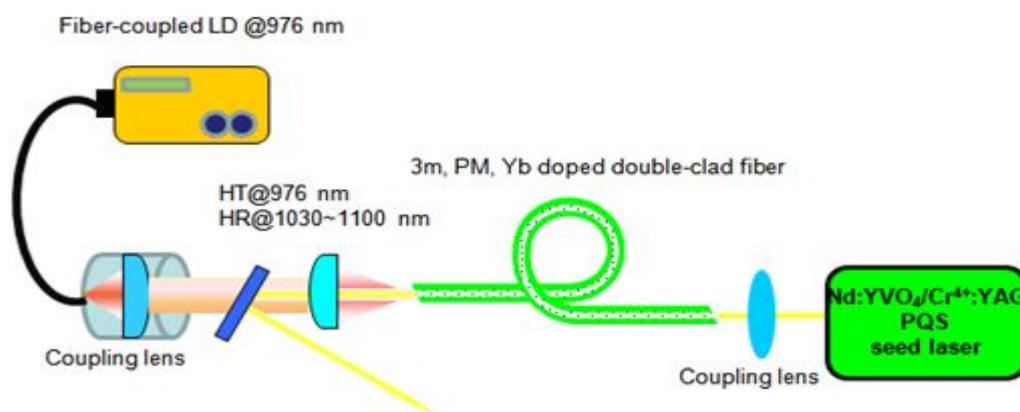


圖4.1.1 「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG-被動式Q-開關光纖放大器」雷射實驗裝置圖

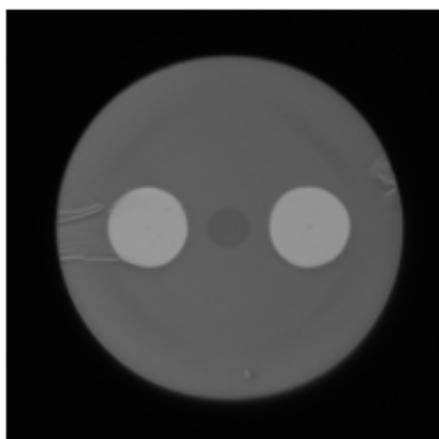


圖4.1.2 摻鏡光纖截面圖(Panda-style PM fiber)

## 4.2.2 實驗結果



我們將「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG - 被動式 Q-開關種子雷射」在飽和吸收體 Cr<sup>4+</sup>:YAG 初始穿透率分別為 70%(最高重複率)、以及 40%(最高峰值功率)的實驗結果，當作種子源雷射光束，導入上述「光纖放大器雷射」架構，得到以下相關實驗數據：

- (1) 飽和吸收體初始穿透率  $T_0=70\%$  / 最高重複率 50 kHz / 脈衝峰值功率 4.5 kW。

由圖 4.2.1 我們可以知道，在激發入射光功率 16 W 時，我們可以得到放大激發光脈衝平均功率為 8.9 W，脈衝能量為 178  $\mu J$ ，由圖中斜率去計算其功率效益大約為 54 %，最大峰值功率 37 KW。由下圖

4.2.2 為示波器擷取單一發脈衝雷射於最大脈衝能量輸出時的波形圖。

由下圖 4.2.3 示波器所擷取的波形圖可以得知在峰值功率為 37 kW 時，其脈衝寬度為 4.8 ns 且兩兩脈衝之間的振幅波動率小於 1.5% 均方根值(root mean square)。

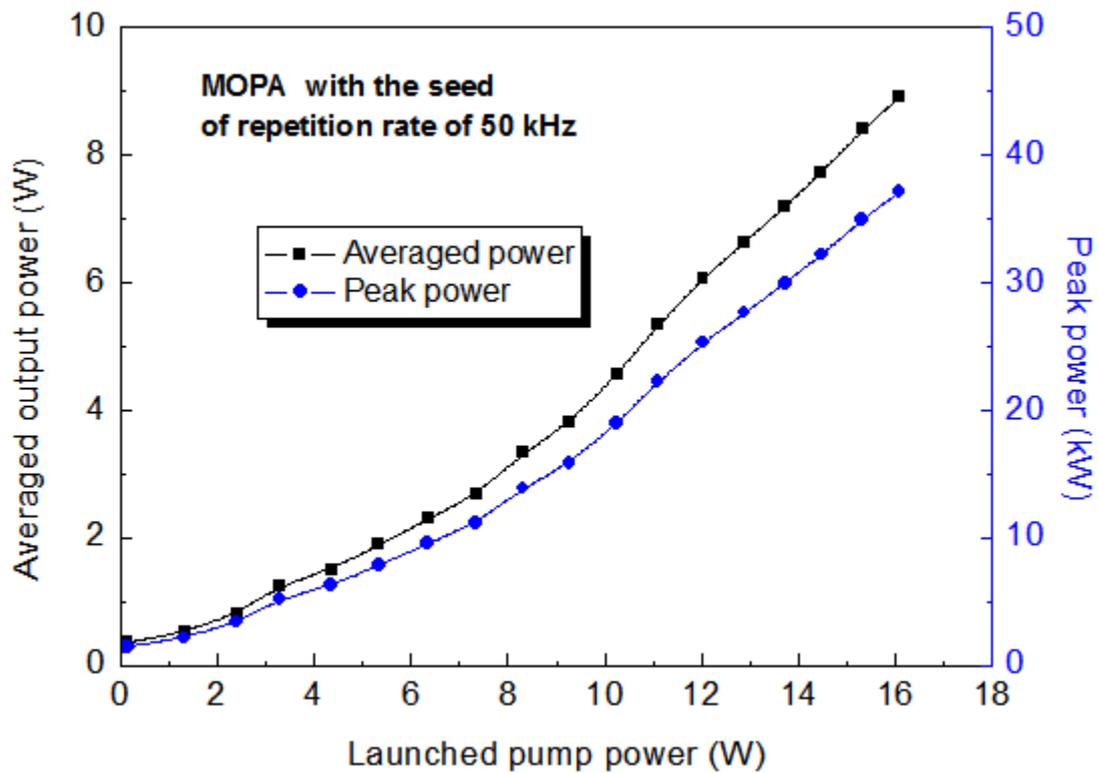


圖4.2.1 激發光功率對應平均功率以及峰值功率圖

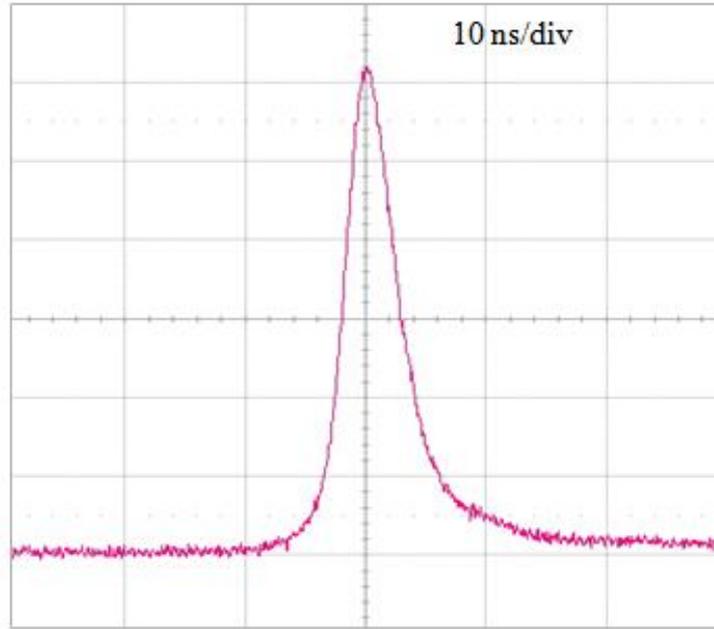


圖4.2.2 最大峰值功率37 kW, 脈衝寬度為4.8 ns

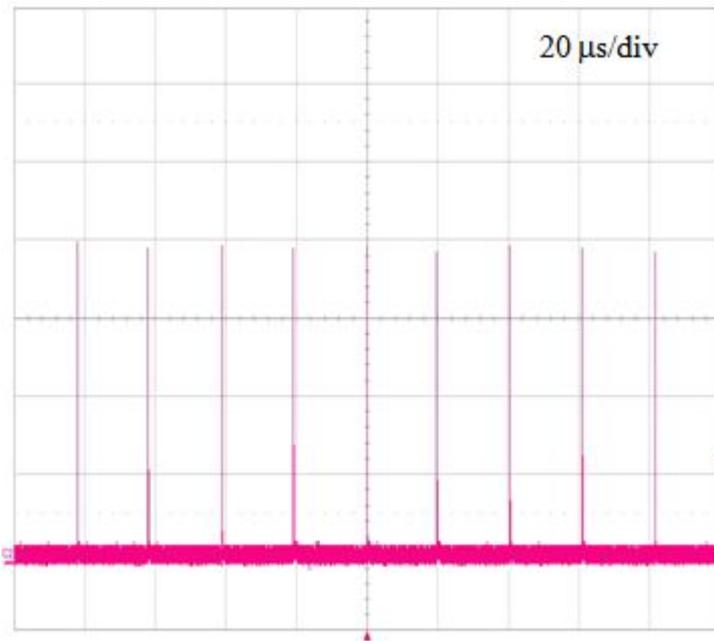


圖4.2.3  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $T_0=70\%$  脈衝放大重覆率圖

- (2) 飽和吸收體初始穿透率  $T_0=40\%$  / 脈衝重複率 25 kHz / 脈衝  
峰值功率 21.2 kW。

由下圖 4.3.1 激發光源功率對應平均功率與峰值功率圖可以得知不同

的激發光功率時，所得到的相對應平均功率以及峰值功率曲線。當入射激發光源功率 10 W 時，其透過光纖放大激發機制後，得到脈衝平均功率為 4.8 W，脈衝能量計算值為  $192 \mu J$ ；由下圖計算其功率能量效益約略為 47%，最大峰值功率為 113 kW。由下圖 4.3.2 為示波器擷取單一發脈衝雷射於最大脈衝能量輸出時的波形圖。由下圖 4.3.3 示波器所擷取的波形圖可以得知在峰值功率為 113 kW 時，其脈衝寬度為 1.6 ns 且脈衝之間的振幅波動率小於 4% 均方根值。

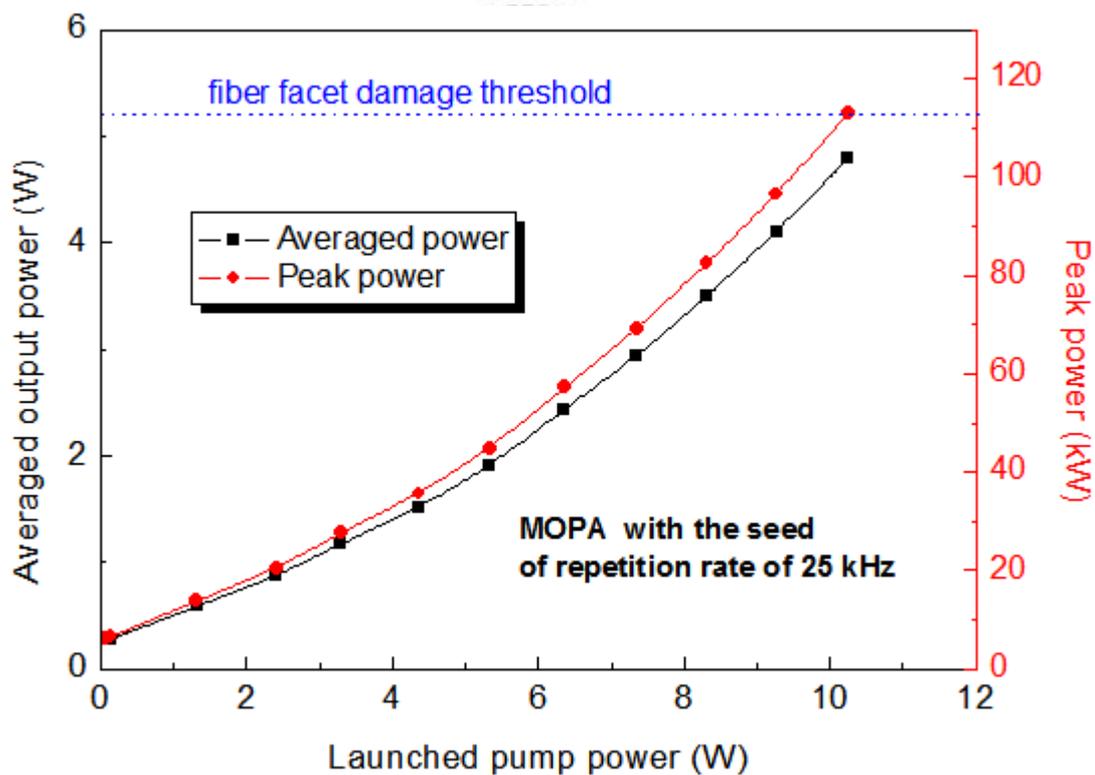


圖4.3.1 激發光源功率對應平均功率與峰值功率圖

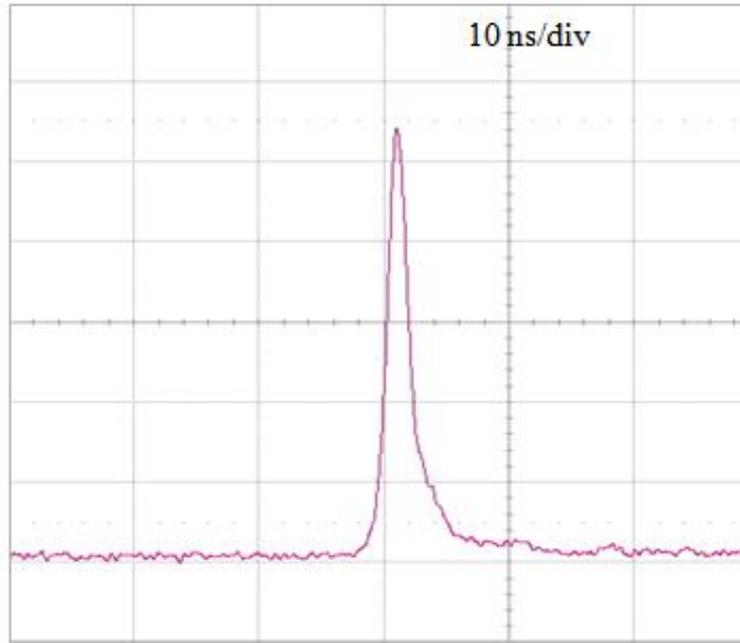


圖4.3.2 最大峰值功率113 KW, 脈衝寬度為1.6 ns

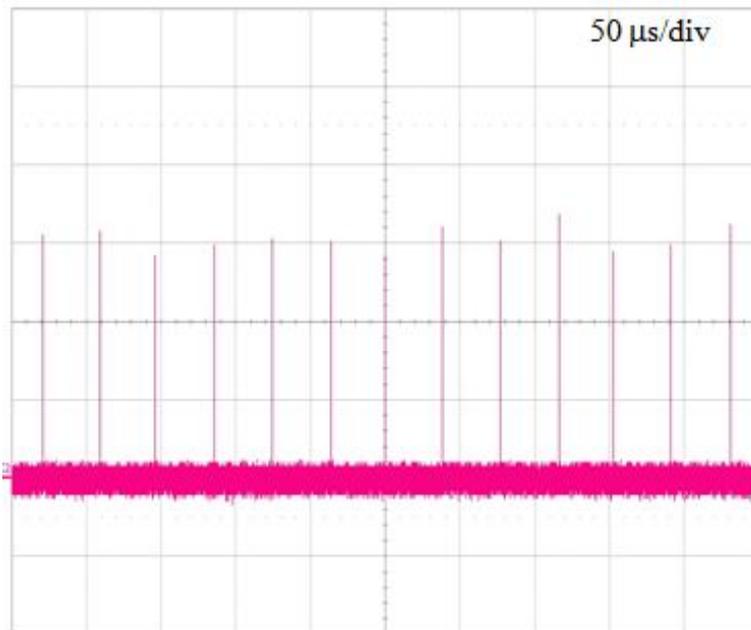


圖4.3.3  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG  $T_0=40\%$  脈衝放大重覆率圖

由上圖 4.3.1 我們可以發現到，我們所能獲得的相關能量數據將受限在激發光束功率為 10 W 時，此時光纖的出光端面將因為達到光纖

端面的最大能量耐受上限，而出現明顯的損毀情形。 同時間，我們計算光纖端面光能量強度時，得到結果為  $27.2 \text{ J/cm}^2$ ， 而此一計算結果亦符合文獻報告中矽晶表面對於  $1064 \text{ nm}$  波長激發雷射光端面破壞的相關結果。[16] 下圖 4.4 即為當光纖端面因為超過最大能量耐受度時，出現毀損時的端面及剖面顯微圖片。

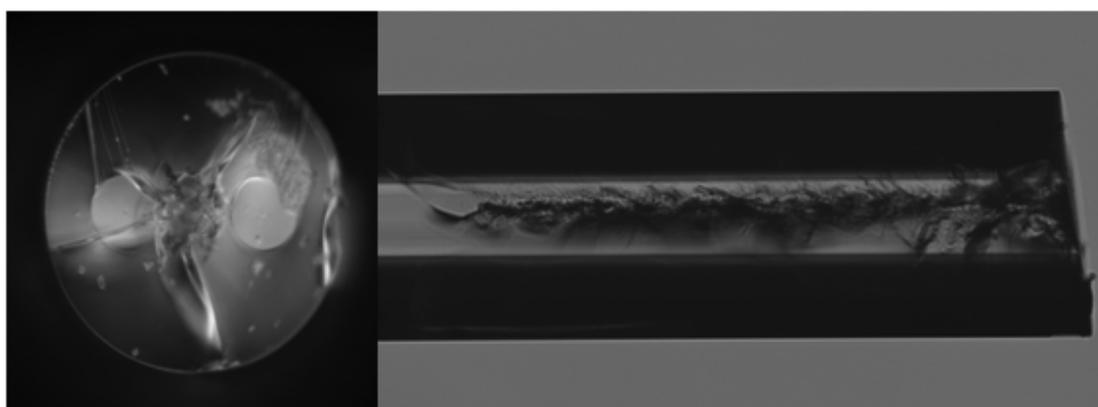


圖4.4 光纖超過最大耐受能量端面破壞圖

我們由上面兩個實驗結果中可以得知兩者放大效益時所產生的時序擾動均小於 2%均方根值，且雷射輸出品質的  $M^2$  因子，亦小於 1.3。而因為光纖內部應力改變所造成的極化改變率，經過量測結果所得大約為 100:1

下圖 4.5.1 以及 4.5.2 則分別為當  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG } T_0=70\%$  以及  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG } T_0=40\%$  輸出最大能量時的頻譜擷取圖。由圖中可以發現在  $1040\text{nm}$  波長附近有一個微小脈衝突起，其大小則分別約略為 30dB 以及 40dB。此現象即為「摻鎳光纖」在激發過程中所產生的「自發性幅射放大」

(Amplified Spontaneous Emission)效應。而此「自發性輻射放大」效應在我們所得到的實驗結果中約略小於最大輸出功率的 2%(MOPA1 Cr<sup>4+</sup>:YAG T<sub>0</sub>=70%，峰值功率 37 kW)以及 0.5%(MOPA2 Cr<sup>4+</sup>:YAG T<sub>0</sub>=40%，峰值功率 113 kW)。

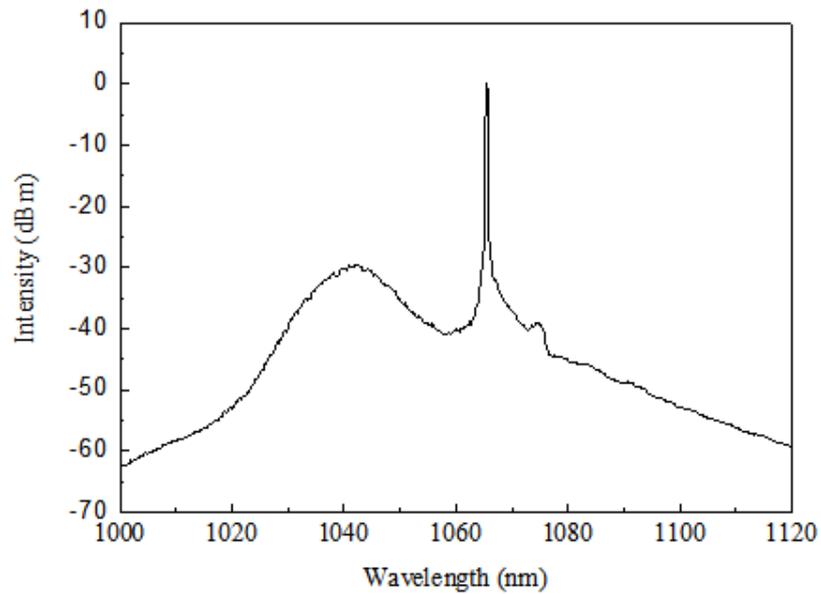


圖4.5.1 激發光源功率16W時MOPA1頻譜圖

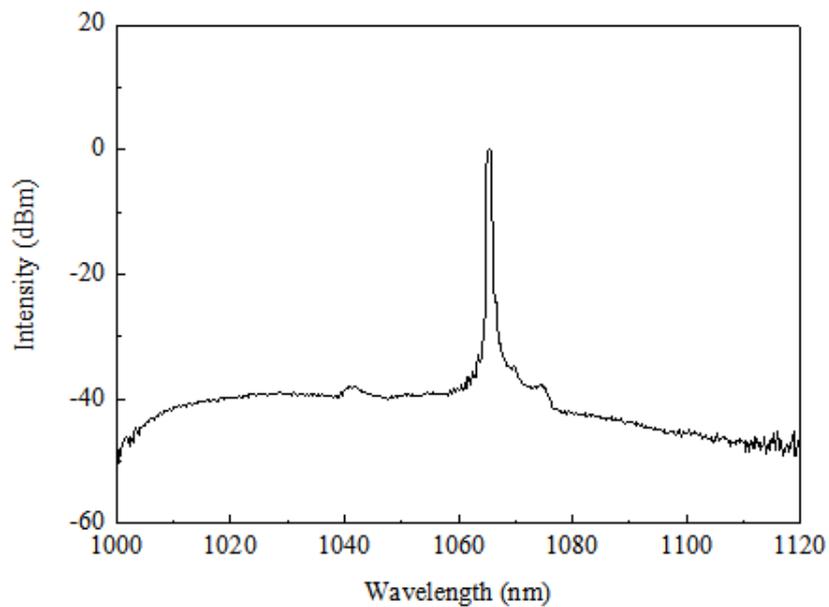


圖4.5.2 激發光源功率10W時MOPA2 頻譜圖

## 第五章 結論與未來工作

在考慮了「熱透鏡效應」以及「共振腔最佳化」條件後，我們成功的獲得了一個較為穩定且緊密的「Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG - 被動式 Q-開關種子雷射」實驗結果，透過更換飽和吸收體的實驗所得到的實驗數據為漸增的脈衝能量從 22μJ ~ 36μJ；脈衝重複率從 50 kHz 到 25 kHz。之後 選取最高重複率(初始穿透率 70%飽和吸收體)以及最高峰值功率(初始穿透率 40%飽和吸收體)，將其經由光纖放大器實驗將其能量放大所得到的結果分別為，脈衝能量 178μJ, 峰值功率 37 kW(T<sub>0</sub>=70%)；脈衝能量 192μJ, 峰值功率 113 kW(T<sub>0</sub>=40%)。

由於最大激發功率會受限於光纖的損壞上限極值，過大的激發功率將造成光纖端面的毀損(如圖 4.4 所述)；因此 我們預期未來如果「光纖放大器」實驗在相同的實驗架構下，將增益介質由一般傳統 LMA 光纖替換為「光子晶體光纖」(Photonic crystal fiber)，則預期結果將可以操作在更高的峰值功率狀態而不會產生端面毀損的情形。由於「光子晶體光纖」的心蕊孔徑面積較一般傳統 LMA(Large mode area) 光纖大 5.5 倍；且其數值孔徑也更小(0.03)。由這兩種特點 我們預期可以在實驗過程中不造成光纖端面毀損的條件下，獲得更高功率的峰值功率，並且獲得更好的雷射品質。

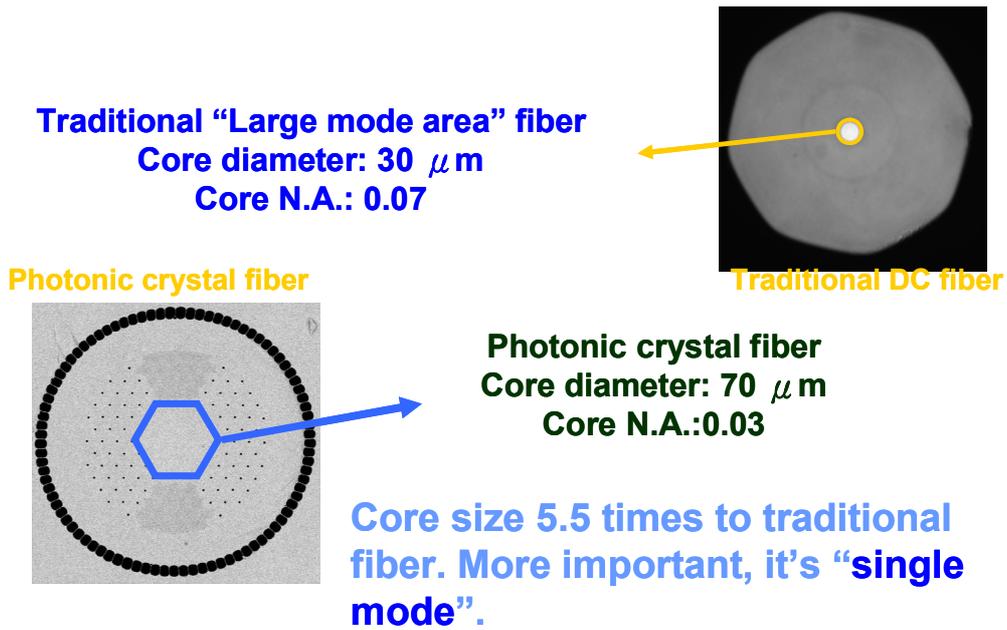


圖 4.6 傳統 LMA 光纖與 PCF 截面積圖

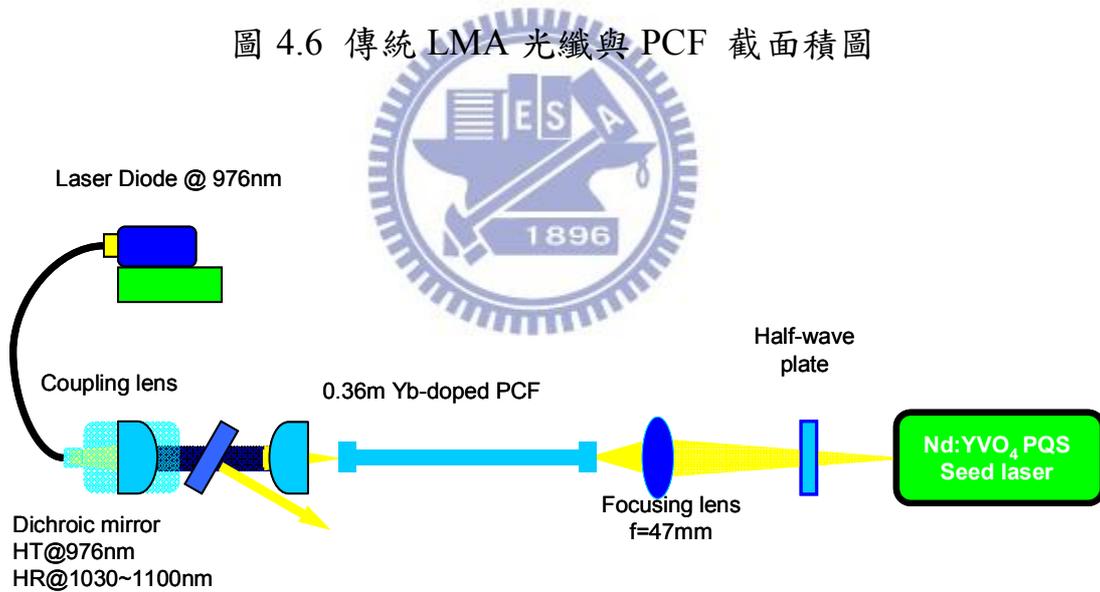


圖 4.7 PCF 光纖放大器實驗架構

## 參 考 文 獻

- [1] J. J. Degnan, "Theory of the optimally coupled Q-switched laser." IEEE J. Quantum. , 1989, 25: 214-220.
- [2] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 6<sup>th</sup> edn. (Springer, Berlin, 2005),Ch.8.
- [3] J. Y. Huang, W. Z. Zhuang, W. C. Huang, K. W. Su, C. Hu, K. F. Huang, and Y. F. Chen, "Comparative studies for Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal and AlGaInAs semiconductor used as a saturable absorber in Q-switched Yb-doped fiber laser"
- [4] C. Li, J. Song, D. Shen, N. S. Kim, J. Lu, and K. Ueda, "Diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> lasers operating at 1.06 $\mu$ m wavelength," Appl. Phys. B 70(4), 471-474 (2000)
- [5] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 6<sup>th</sup> edn. (Springer, Berlin, 2005),Ch.2.
- [6] H. C. Liang, "Investigations and Application of Self-Mode-Locked Lasers",Ch.6
- [7] Y. F. Chen, S. W. Tsai, and S. C. Wang, "High-power diode-pumped Q-switched and mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber," Opt. Lett. 25(19), 1442-1444 (2000).
- [8] J. J. Degnan, D. B. Coyle, and R. B. Kay, "Effect of thermalization on Q-switched lasers properties," IEEE J. Quantum Electron. 34(5), 887-889 (1998).
- [9] G. Xiao, J. H. Lim, S. Yang, E. Van Stryland, M. Bass, and L. Weichman, "Z-scan measurement of the ground and excited state absorption cross sections of Cr<sup>4+</sup> in yttrium aluminum garnet," IEEE J.

Quantum Electron. 35(7), 1086-1091 (1999).

[10] G. Xiao, J. H. Lim, S. Yang, E. Van Stryland, M. Bass, and L. Weichman, "Z-scan measurement of the ground and excited state absorption cross sections of  $\text{Cr}^{4+}$  in yttrium aluminum garnet," IEEE J. Quantum Electron. 35(7), 1086-1091 (1999).

[11] Y.F. Chen, Y.C. Chen, S.W. Chen, Y.P. Lan, "High-power efficient diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP/Cr<sup>4+</sup>:YAG eye-safe laser," Opt. Commun. 234, 337-342 (2004).

[12] N. Hodgson, and H. Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation*, 2<sup>nd</sup> edn. (Springer, Berlin, 2005), Ch. 5.

[13] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 6<sup>th</sup> edn. (Springer, Berlin, 2005), Ch. 7.

[14] N. Hodgson, and H. Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation*, 2<sup>nd</sup> edn. (Springer, Berlin, 2005), Ch. 8.

[15] Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao, C. L. Wang, and S. C. Wang, "Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect," IEEE J. Quantum Electron. 33(8), 1424-1429 (1997).

[16] J. H. Campbell, and F. Rainer, "Optical glasses for high-peak-power laser applications," Proc. of SPIE 1791, 246-255 (1992).

[17] A. Agnesi and S. Dell'Acqua, "High-peak-power diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser," Appl. Phys. B 76(4), 351-354 (2003).

[18] J. Song, C. Li, N. S. Kim, and K. Ueda, "Passively Q-switched diode-pumped continuous-wave Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG laser with high peak

- power and high pulse energy,” *Appl. Opt.* **39**(27), 4954-4958 (2000).
- [19] Y. F. Chen, S. W. Chen, Y. C. Chen, Y. P. Lan, and S. W. Tsai, “Compact efficient intracavity optical parametric oscillator with a passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG laser in a hemispherical cavity,” *Appl. Phys. B* **77**, 493-495 (2003).
- [20] H. Yu, H. Zhang, Z. Wang, J. Wang, Z. Shao, M. Jiang, and X. Zhang, “CW and Q-switched laser output of LD-end-pumped 1.06μm c-cut Nd:LuVO<sub>4</sub> laser,” *Opt. Express* **15**(6), 3206–3211 (2007).
- [21] H. Yu, H. Zhang, Z. Wang, J. Wang, Y. Yu, M. Jiang, and X. Zhang, “Passively Q-switched laser performance of c-cut Nd:Gd<sub>0.63</sub>Y<sub>0.37</sub>VO<sub>4</sub> crystal,” *Opt. Commun.* **281**(20), 5199-5201 (2008).
- [22] C. Li, J. Song, D. Shen, J. Xu, and K. Ueda, “Diode-pumped CW and passively Q-switched solid-state lasers with an ultra-thin Nd:YVO<sub>4</sub> crystal as the gain medium,” *Opt. Commun.* **186**(4-6), 245-250 (2000).
- [23] C. Ye, M. Gong, P. Yan, Q. Liu, and G. Chen, “Linearly-polarized single-transverse-mode high-energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50W average power” *Opt. Express* **14**(17), 7604–7609 (2006).
- [24] C. Ye, P. Yan, L. Huang, Q. Liu, and M. Gong, “Stimulated Brillouin scattering phenomena in a nanosecond linearly polarized Yb-doped double-clad fiber amplifier,” *Laser Phys. Lett.* **4**(5), 376-381 (2007).