

# 國立交通大學

## 理學院應用科技學程

### 碩 士 論 文

摻釹氟化鈮鋰晶體在連續波與被動式 Q 開關  
雷射之研究



Investigation of Nd:YLF laser crystal on continuous-wave and  
passively Q-switched performance.

研 究 生：李瑋倫

指導教授：陳永富 教授

中 華 民 國 一 百 年 七 月

# 摻釹氟化鈮鋰晶體在連續波與被動式 Q 開關雷射之研究

Investigation of Nd:YLF laser crystal on continuous-wave and  
passively Q-switched performance.

研 究 生：李瑋倫

Student：Wei-Lun Li

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

碩 士 論 文



A Thesis

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

# 摻釹氟化鈮鋰晶體在連續波與被動式 Q 開關雷射之研究

學生：李瑋倫

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



本論文主要是在以 a-cut 摻釹氟化鈮鋰(Nd:YLF)晶體作為增益介質的端面激發固態二極體雷射架構下，分成連續波雷射與被動式 Q 開關脈衝雷射兩大架構，並利用調整輸出耦合鏡(Output coupler) 的選頻方式，對 a-cut Nd:YLF 晶體的兩個主要波長( $\pi$  偏振方向，1047nm 與  $\sigma$  偏振方向，1053nm)作多面向的實驗與比較。

在連續波雷射的部份，我們分別使用  $0^\circ$ -wedged 與  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體作為增益介質，記錄兩個偏振方向的競合與表現，並討論熱效應、晶體 wedge 角度對其的影響。實驗發現，使用  $3^\circ$ -wedged 時，無論

是在凹平腔或平平腔的配置下，我們均可藉由調整輸出耦合鏡的方式輕易的將兩個波長分別選出，並且在  $\sigma$  偏振方向(1053nm)得到良好的光束品質。

在被动式 Q 開關脈衝雷射的部份，我們針對  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體，分別配置了初始穿透率( $T_0$ )為 80%與 95%的  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體作為被动式 Q 開關，記錄兩個偏振方向的各種表現，並探討了改變  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 的初始穿透率與輸出耦合鏡反射率對兩個偏振方向的影響。實驗發現，輸出耦合鏡(OC)的反射率並非與雷射的輸出功率成正比，而是在輸出鏡反射率為某一最佳值時有最大輸出功率。此外，我們亦證實了以下推論：雷射的輸出功率、脈衝重複率會隨著飽和吸收體的初始穿透率增加而增加，而平均脈衝能量、尖峰功率卻會隨著飽和吸收體的初始穿透率增加而減少。此一推論可作為設計被动式 Q 開關共振腔時的權衡參考。更重要的是，實驗結果顯示，在被动式 Q 開關的架構下， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的表現比  $\pi$  偏振方向(1047nm) 更穩定。

# Investigation of Nd:YLF laser crystal on continuous-wave and passively Q-switched performance.

Student: Wei-Lun Li

Advisor: Dr. Yung-Fu Chen

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



This thesis is aimed to investigate the continuous-wave (CW) and passively Q-switched (PQS) laser performance of the a-cut Nd:YLF gain medium with the wedged angle of  $0^\circ$  and  $3^\circ$ , respectively. Since the Nd:YLF crystal has two emission wavelengths which are  $\pi$ -polarization (1047nm) and  $\sigma$ -polarization (1053nm) in  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ , it is practically important to select pure  $\pi$ -polarization (1047nm) and pure  $\sigma$ -polarization (1053nm) independently. Although the wavelength-selection can be achieved with additional components in the laser cavity, this would inevitably lead to unnecessary loss. As a result, we decide to select pure  $\pi$ -polarization (1047nm) and pure  $\sigma$ -polarization (1053nm) simply by tilting the output coupler in this work.

In CW laser configuration, we employ the Nd:YLF crystals with  $0^\circ$ -wedged and  $3^\circ$ -wedged as gain medium, and make a thorough study on the

performance of  $\pi$ -polarization (1047nm) and  $\sigma$ -polarization (1053nm), respectively. Compare with the results obtained from 0°-wedged one, using 3°-wedged Nd:YLF can more efficiently select two wavelengths and obtain better beam quality in  $\sigma$ -polarization (1053nm).

In PQS laser configuration, we utilize the  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG ( $T_0=80\%$ , 95%) saturable absorber to comparative study the PQS performance between  $\pi$ -polarization (1047nm) and  $\sigma$ -polarization in 3°-wedged Nd:YLF crystal. We discuss the influence of initial transmission of  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG and reflectance of output coupler (OC). Experimental results reveal that there is optimal reflectance of OC which generates highest output power for different combinations of the initial transmissions of  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG and lasing wavelengths. The results also show that with increasing initial transmissions of  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG, average output power, pulse repetition rate and pulse width would increase, but pulse energy, peak power would decrease. This means that when designing a laser cavity, we should take these characteristics into consideration so that the performance would meet our demand. More importantly, we find that pulse-to-pulse amplitude stability at  $\sigma$ -polarization (1053nm) is considerably superior than that at  $\pi$ -polarization (1047nm) in PQS laser.

## 誌 謝

記得學生時期，一直希望儘早畢業進入職場；而踏入職場之後，卻又希望回到校園。交通大學提供了良好的環境，讓我能重溫學生時代不懂得珍惜的讀書樂。進修的這段過程，我被許多幸運所眷顧：很幸運的，我通過了入學考試；很幸運的，家人支持我的進修計畫；很幸運的，我跟了一位術業專精、循循善誘的老師學習；很幸運的，老師安排了一位有耐心、思考有邏輯的學長來指導我。

一路走來，除了有許多的幸運，更有滿滿的感謝。首先要感謝我的指導教授陳永富老師，除了您對於論文的悉心安排與指導，您對於邏輯的訓練與人生哲理的分享，更是教科書上學習不到的至寶。再來要感謝指導我的黃郁仁學長，您對於實驗的操作、應用軟體的使用、疑問的解析、論文的修正、口試的預演...等均處處用心解說，除了讓我學習到做研究應具備的知識與技巧，更讓我紮實的體驗了做研究的樂趣；一起奮鬥到凌晨的那段日子，依舊令我懷念再三。最後要感謝我的家人，你們的體諒與支持，讓我能無後顧之憂的專心於研究。此外，特別感謝我的老婆與未出生的兔崽子，每當我情緒低落時，只要看到你們，我就有了繼續前進的動力。

由衷的感謝以上各位，沒有你們的指導、支持與鼓勵，我無法完成這期盼許久的學業，謝謝你們!!

# 目錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	III
誌謝 .....	V
目錄 .....	VI
圖表目錄 .....	IX
第一章 介紹 .....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 本論文組織 .....	6
第二章 摻釹氟化鈮鋰(Nd:YLF)簡介 .....	7
2.1 四能階系統 .....	7
2.2 Nd:YLF 的偏振方向 .....	9
2.3 Nd:YLF 的波長與選頻 .....	9
2.4 熱效應 .....	12
2.4.1 Quantum defect .....	12
2.4.2 Excited state absorption (ESA)與 Energy transfer upconversion (ETU) .....	12
2.4.3 熱透鏡效應 .....	13
2.5 Nd:YLF 的優缺點 .....	18
2.6 Nd:YLF 的吸收光譜與螢光光譜 .....	18



第三章 連續波雷射(CW laser)	22
3.1 實驗架構	22
3.2 實驗結果與討論	24
3.2.1 0°-wedged Nd:YLF 設置下 $\pi$ 偏振方向(1047nm)與 $\sigma$ 偏振 方向(1053nm)的競合	24
3.2.2 3°-wedged Nd:YLF 設置下 $\pi$ 偏振方向(1047nm)與 $\sigma$ 偏振 方向(1053nm)的競合	27
3.3 結論	40
第四章 被動式 Q 開關雷射(PQS laser)	42
4.1 Q 開關簡介	42
4.1.1 Q 開關的種類	43
4.1.2 主動式 Q 開關動作機制	43
4.1.3 被動式 Q 開關作動機制	44
4.1.4 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體簡介	45
4.2 實驗架構	52
4.3 實驗結果與討論	54
4.4 結論	65
第五章 結論與未來展望	66
5.1 結論	66

5.2 未來展望 .....	67
參考文獻 .....	68



## 圖表目錄

圖 1-1 惰性氣體電弧燈固態雷射示意圖 .....	5
圖 1-2 雷射二極體側邊激發式雷射示意圖 .....	5
圖 1-3 雷射二極體端面激發式雷射示意圖 .....	5
圖 2-1 四能階系統示意圖 .....	8
圖 2-2 Nd:YLF 簡化能階圖 .....	11
圖 2-3 Energy transfer upconversion (ETU) 示意圖 .....	16
圖 2-4 輸入功率與熱透鏡焦距關係圖 .....	17
圖 2-5 熱透鏡效應示意圖 .....	17
圖 2-6 Nd:YLF 吸收光譜 (波長-吸收率).....	20
圖 2-7 Nd:YLF 吸收光譜 (波長-吸收係數).....	20
圖 2-8 a-cut Nd:YLF (3°-wedged) 螢光光譜圖 .....	21
圖 3-1 連續波雷射(CW laser)實驗架構圖 .....	23
圖 3-2 0°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率 25cm，輸出耦合鏡反射率 70%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖 .....	31
圖 3-3 0°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率 25cm，輸出耦合鏡反射率 90%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖 .....	31
圖 3-4 0°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率 50cm，輸出耦合鏡反射率 70%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖 .....	32

圖 3-5	0°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率 50cm，輸出耦合鏡反射率 90%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖 .....	33
圖 3-6	0°-wedged Nd:YLF，前鏡為平面鏡，輸出耦合鏡反射率為 70%、90%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖 .....	33
圖 3-7	輸出耦合鏡傾角不變，提升輸入功率時，兩波長競合的光譜圖 ..	34
圖 3-8	輸出耦合鏡傾角不變，降低輸入功率時，兩波長競合的光譜圖 ..	35
圖 3-9	Nd:YLF 晶體 wedge 面反射示意圖 .....	37
圖 3-10	3°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率為 25cm、50cm、平面鏡，輸出耦合鏡反射率為 70%、90%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖 .....	37
圖 3-11	3°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率 50cm，輸出鏡反射率 70%的設置下，改變輸出耦合鏡傾角時輸出功率與橫向模態的變化 .....	39
圖 4-1	Q 開關動作示意圖 .....	48
圖 4-2	主動式 Q 開關示意圖 .....	48
圖 4-3	被動式 Q 開關示意圖 .....	48
圖 4-4	飽和吸收體穿透率與入射光能量關係圖 .....	50
圖 4-5	被動式 Q 開關雷射脈衝產生示意圖 .....	50
圖 4-6	飽和吸收體能階示意圖 .....	51
圖 4-7	被動式 Q 開關雷射(PQS laser)實驗架構圖 .....	53
圖 4-8	連續波雷射與被動式 Q 開關雷射的輸出功率比較圖 .....	59

圖 4-9 被動式 Q 開關雷射在不同偏振方向的脈衝重複率比較圖 .....	60
圖 4-10 被動式 Q 開關雷射在不同偏振方向的脈衝寬度比較圖 .....	61
圖 4-11 被動式 Q 開關雷射在不同偏振方向的脈衝能量比較圖 .....	62
圖 4-12 被動式 Q 開關雷射在不同偏振方向的尖峰功率比較圖 .....	63
圖 4-13 被動式 Q 開關雷射在不同偏振方向的穩定性比較圖 .....	64
表 3-1 0°-wedged Nd:YLF，輸入功率為 13.4W 時，各種配置下的最大輸出功率、選頻結果與橫向模態比較圖 .....	36
表 3-2 3°-wedged Nd:YLF，輸入功率為 13.4W 時，各種配置下的最大輸出功率、選頻結果與橫向模態比較圖 .....	38
表 4-1 各種 Q 開關技術優劣比較 .....	49



# 第一章 介紹

## 1.1 研究動機與目的

雷射的架構主要分為激發光源(Pump source)、增益介質(Gain medium)與雷射共振腔(Cavity)三大部分，激發光源、增益介質的選擇與共振腔的設計，直接影響了整體雷射的效率與光束品質(beam quality)。

固態雷射的激發光源，廣泛使用的是惰性氣體電弧燈(flash lamp or arc lamp)，其作動原理是：於兩電極(材質有石英、鎢等)間的燈內充填氙、氬等惰性氣體，使用高電壓讓燈內的惰性氣體產生放電效果，亦即是以電弧產生光源的氣體放電燈(參照圖 1-1)。但因其放射光譜太寬，而增益介質(gain medium)的吸收光譜有限，以致大部分的能量被共振腔的元件所吸收，並使增益介質溫度升高，造成熱效應嚴重、光束品質不佳、光轉換效率差等現象；再加上體積大、使用壽命短、微調性差、穩定性差等缺點，因此，惰性氣體電弧燈並非理想的激發光源。

雷射二極體(LD, Diode laser)是近年來熱門的固態雷射激發光源，因其放射光譜窄，易落於增益介質的吸收光譜內(可因增益介質的不同，選擇適合的雷射二極體)，因此，使用雷射二極體作為激發光源的固態雷射，其熱效應較不嚴重、光束品質及光轉換效率較佳；再加上體積小、耦合性高(結構緊密性高)、指向性高、使用壽命長、穩定性高等優點，實為優良的激發光源。

二極體激發式 (diode pumped) 固態雷射又分為側邊激發式 (side-pumped) 與端面激發式 (end-pumped) 兩種。側邊激發式的雷射光束品質較差，橫向模態為多模結構(參照圖 1-2)；端面激發式的雷射二極體激發光源與雷射輸出位於同一光軸上(參照圖 1-3)，能將激發光源與雷射共振腔的基態橫模( $TEM_{0,0}$ )有效率的耦合，使激發光源與腔模重疊性高(good mode-matching)，亦即居量反轉(Population inversion)的效率得以提升，因此，雷射的輸出效率與光束品質極佳。

至於增益介質的選擇，常使用到的是 Nd:YAG、Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YLF、Yb:YAG、Er:glass 等晶體。其中，Nd:YLF 除了有熱光係數小( $dn/dT$  小)、螢光壽命長、晶格為單軸不對稱(具良好的線性偏振特性)、高損傷閾值等優點，其  $\sigma$  偏振方向(1053nm)波長具有輸出效率高、光束品質佳的特性，是極有潛力的光電材料。

Christoph Bollig 與 M.J. Daniel Esser 等人曾針對 0°-wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體，使用了共振腔設計的選頻方式將  $\sigma$  偏振方向(1053nm)選出，並做了連續波雷射與主動式 Q 開關脈衝雷射的研究[1][2]；B. Frei 與 J.E. Balmer 亦曾針對 0°-wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體，使用調整輸出耦合鏡(Output coupler, OC) 傾角的選頻方式做了類似的研究[3]。而 A. Agnesi 與 S. Dell'Acqua 則針對 1°-wedged 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體，搭配調整輸出耦合鏡傾角的選頻方式，做了連續波雷射與被動式 Q 開關雷射的研究[4]。



然而，若是使用共振腔設計的選頻方式，會因增加許多元件而使共振腔的複雜度提高，並且會因共振腔過長而使雷射脈衝的寬度過寬，亦即尖峰功率無法提高。至於針對  $0^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體使用調整輸出耦合鏡選頻傾角的選頻方式，則會因晶體沒切 wedge 而不易將純  $\pi$  偏振方向(1047nm)與純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)選出，即便選出了純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)，其輸出功率、光束品質亦不理想。此外，甚少有研究針對 Nd:YLF 晶體的  $\pi$  偏振方向(1047nm)雷射特性有所著墨。基於上述理由，本論文使用了端面激發固態二極體雷射作為實驗架構以探討 Nd:YLF 雷射的特性。激發光源是使用雷射二極體(806nm)，經由 Nd:YLF 的增益介質(a-cut， $0^\circ$ -wedged、 $3^\circ$ -wedged)轉換成  $\pi$  偏振方向(1047nm)或  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的雷射光。實驗分成連續波雷射(Continuous-Wave laser，CW laser)與被動式光開關雷射(PQS laser，Passively Q-switched laser)兩個架構，除了探討 a-cut Nd:YLF 雷射兩個偏振光的特性，也實現了高轉換效率、精巧且可靠度高的固態雷射架構。

本實驗的第一部份除了針對  $0^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體，使用調整輸出耦合鏡傾角的選頻方式，在沒有增加共振腔複雜度的情況下，做了  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的連續波雷射競合實驗；更選用了  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體，於相同的架構下，使用相同的選頻方式，分別記錄了  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的競合與表



現，並與  $0^\circ$ -wedged 的設置做了詳細的比較。本實驗的第二部份則針對  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體，選用了  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體作為被動式 Q 開關，記錄了在不同的飽和吸收體初始穿透率( $T_0$ )與輸出耦合鏡反射率的配置下，脈衝雷射的各種表現。透過以上實驗，我們有許多重要且有趣的發現，可作為日後相關研究的參考。



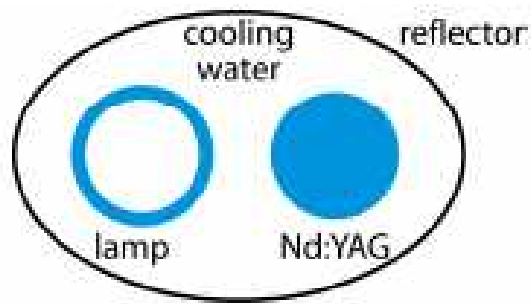


圖 1-1 惰性氣體電弧燈固態雷射示意圖

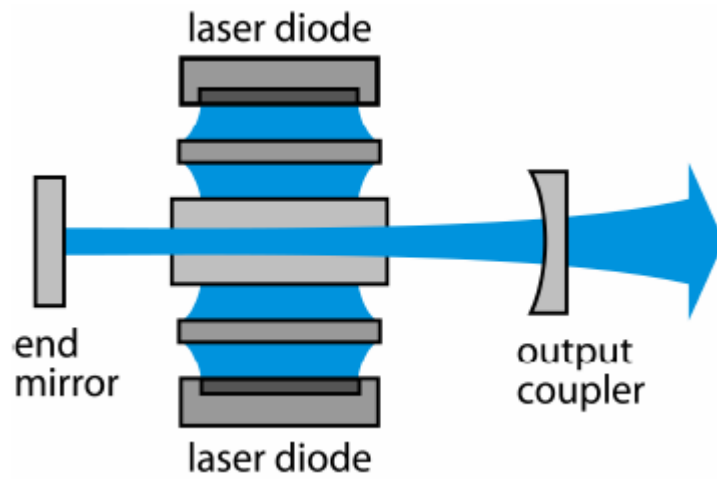


圖 1-2 雷射二極體側邊激發式雷射示意圖

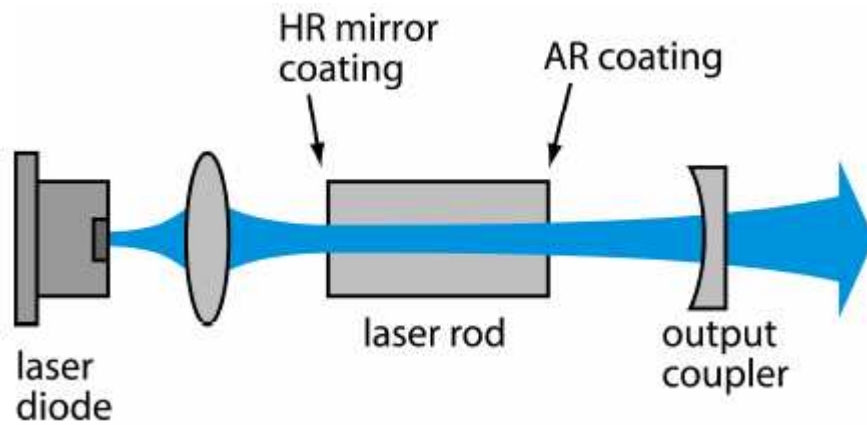


圖 1-3 雷射二極體端面激發式雷射示意圖

## 1.2 本論文組織

本文自第二章開始，除了介紹 Nd:YLF 的特性、四能階系統、熱效應，亦包括以光譜儀測量晶體的螢光光譜，及以單光儀測量晶體的吸收光譜。第三章為連續波雷射實驗，主要針對不同 wedge 角度的增益介質 ( $0^\circ$ -wedged 與  $3^\circ$ -wedged) 的設置下， $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的競合及現象，並探討造成諸現象的可能原因。第四章為使用  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體作為被動式 Q 開關的脈衝雷射實驗，除了介紹 Q 開關的種類與動作原理，亦針對在不同初始穿透率的  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體與不同反射率的輸出耦合鏡的配置下， $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)脈衝雷射的各種表現。最後在第五章中檢討目前實驗的結果，並統整成結論，同時探討本實驗未來可行的研究方向。

## 第二章 摻釹氟化鈮鋰(Nd:YLF)簡介

### 2.1 四能階系統

增益介質發生居量反轉(Population inversion)，是產生雷射的必要條件。其意義為：晶體受激後，躍遷至上能階的電子數量必須比下能階的電子數量多，才能使得受激輻射的發生機率更高，進而產生雷射。Nd:YLF 是四能階系統，具備受激後產生居量反轉的要件，是良好的增益介質。以 Nd:YLF 為例(參照圖 2-1)，電子因吸收了激發光源，從基態能階(Ground state)躍遷至激發態能階(Pump level)，但是，並不會在激發態停留太久，會很快的躍遷至上能階(upper laser level)。上能階是一種長時間的半穩定狀態，使電子在上能階與下能階間(lower laser level)產生居量反轉(Population inversion)。當電子從上能階躍遷至下能階時，即會放射出 1047nm( $\pi$  偏振方向)或 1053nm ( $\sigma$  偏振方向)的光子。當電子位於下能階時，也不會停留太久，會很快的躍遷回到基態。此外，電子自激發態能階躍遷至上能階時，或是自下能階躍遷回到基態能階時，均是以「聲子」的形式在晶格內傳遞，並且會產生熱能。

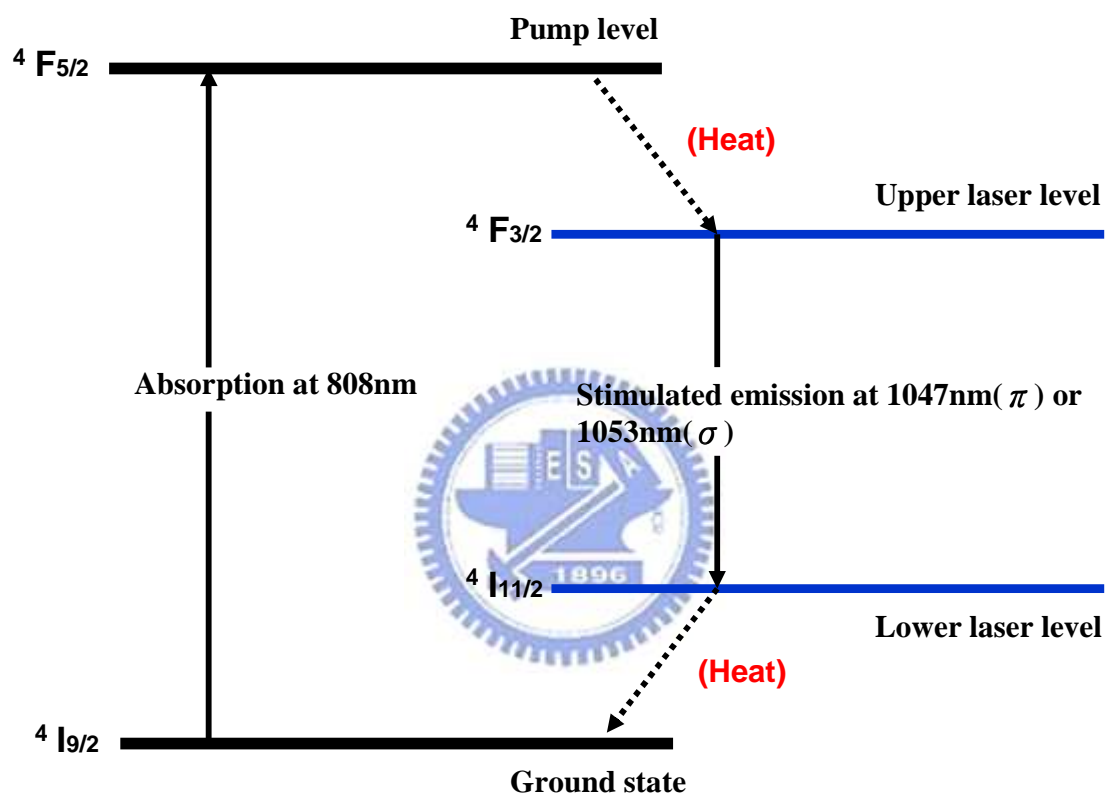


圖 2-1 四能階系統示意圖

## 2.2 Nd:YLF 的偏振方向

與我們存在的空間相同，晶體的晶格結構亦存在著三個軸向，分別定義為  $a$ ， $b$ ， $c$  三個軸向。Nd:YLF 的晶格為單晶軸不對稱，具有良好的線性偏振特性。亦即在某一偏振方向勝出的情況下，電場能量並非均勻分布於各個方向，而是只分佈於該偏振方向。Nd:YLF 晶體依切割方式的不同，分為 a-cut 與 c-cut 兩種形態：

- a-cut: 以端面激發(diode-end-pumped)的雷射架構而言，入射光平行  $a$  軸，電場能量分佈於  $b$  軸( $\sigma$  偏振方向，1053nm， $E \perp c$ )或  $c$  軸( $\pi$  偏振方向，1047nm， $E // c$ )，亦即在  $b$  軸與  $c$  軸會有明顯的線性偏振特性。
- c-cut：以端面激發(diode-end-pumped)的雷射架構而言，入射光平行  $c$  軸，電場能量均勻分佈各個方向，其放射波長為 1053nm( $\sigma$  偏振方向， $E \perp c$ )。

因為本實驗的目的為比較  $\pi$  偏振方向 (1047nm)與  $\sigma$  偏振方向 (1053nm) 的競合與表現，所以選用線性偏振特性明顯的 a-cut Nd:YLF 晶體作為增益介質。

## 2.3 Nd:YLF 的波長與選頻

Nd:YLF 的放射波長主要有三個波段，分別在  $0.9\mu\text{m}$ 、 $1.05\mu\text{m}$ 、 $1.3\mu\text{m}$  左右，每個波段有兩種雷射躍遷(參照圖 2-2)，我們可藉由選頻的裝置或

方法來選擇不同的工作波長。本實驗選擇的波段是  $1.05\mu\text{m}$ ，其有兩種雷射躍遷，分別是  $1047\text{nm}$ ( $\pi$  偏振方向)與  $1053\text{nm}$ ( $\sigma$  偏振方向)。 $0.9\mu\text{m}$  及  $1.3\mu\text{m}$  也可以這樣做，但必須抑制以  $1.05\mu\text{m}$  發射的雷射。選頻的方法大致上有兩種：

1. 於設計共振腔時，在腔內放置偏振裝置。
2. 利用不同波長有不同折射率的特性，藉由調整輸出耦合鏡(OC)傾角將波長選出。

然而，使用腔內偏振裝置，會使共振腔複雜度增加，造成不必要的能量損失；而當 Nd:YLF 晶體沒切 wedge 時，使用調整 OC 傾角的方式亦不易選出純  $\pi$  偏振方向( $1047\text{nm}$ )或純  $\sigma$  偏振方向( $1053\text{nm}$ )。本實驗發現，使用  $3^\circ$ -wedged 的 Nd:YLF 晶體搭配調整輸出耦合鏡(OC)傾角的選頻方式，除了不會造成不必要的能量損失，亦順利達成選頻的目的。

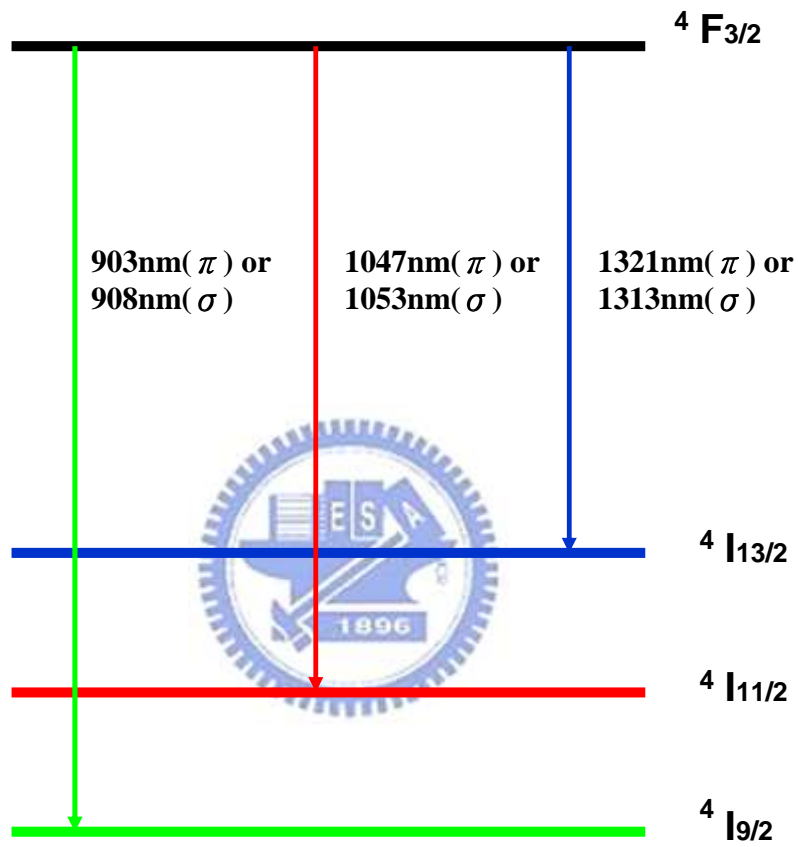


圖 2-2 Nd:YLF 簡化能階圖



## 2.4 熱效應

雷射運作時產生的熱直接影響雷射的工作效率，因此，如何克服熱效應，是設計雷射時的主要考量之一。熱的產生有以下幾個原因：

- Quantum defect
- 晶體受激後電子躍遷至激發態能階以外的能階。
- 非放射性衰退(以聲子 phonon 的方式傳遞，並產生熱能)
- 螢光(自發放射)
- Excited state absorption (ESA)與 Energy transfer upconversion (ETU)的過程。

### 2.4.1 Quantum defect

Quantum defect 是指激發光能量與雷射光能量的差異。以四能階系統為例，能量的差異來自於晶體吸收激發光後，電子受激躍遷至激發態能階，由激發態能階躍遷至上能階時，以及由下能階躍遷至基態能階時，以聲子方式傳遞時所產生的熱能。Quantum defect 的表示式如下：

$$\text{Quantum defect} = E_{\text{laser}} / E_{\text{pump}} = h\nu_{\text{laser}} / h\nu_{\text{pump}} = \lambda_{\text{pump}} / \lambda_{\text{laser}} \quad (2-1)$$

### 2.4.2 Excited state absorption (ESA)與 Energy transfer upconversion (ETU)

Excited state absorption (ESA)是指電子在激發態的任一能階，因吸收

能量而往高能階躍遷的現象。Energy transfer upconversion (ETU)則是指兩個電子互相影響後，其中一個電子因吸收能量而往高能階躍遷，另一個電子則因釋出能量而往低能階躍遷的現象。以 Nd:YLF 而言(參照圖 2-3)，往高能階躍遷的電子並不會在高能階上久留，而會以聲子的方式回到上能階並放出熱能；而往低能階躍遷的電子，若是躍遷至  $^4I_{11/2}$ ，則會放射出 1047nm ( $\pi$  偏振方向)或 1053nm ( $\sigma$  偏振方向)的光，並會由  $^4I_{11/2}$  以聲子的方式躍遷至基態能階而放出熱能。因此，若上能階的生命週期(lifetime)愈長，居量反轉所累積的電子即愈多，電子間發生交互影響的機率亦愈高，即發生 ETU 的機率愈高。



### 2.4.3 熱透鏡效應

根據 P.J. Hardman 等人的研究[5]，a-cut Nd:YLF 的  $\pi$  偏振方向 (1047nm)有很強的凹的熱透鏡效應，而  $\sigma$  偏振方向 (1053nm)則有微弱的凸的熱透鏡效應(參照圖 2-4)。熱透鏡效應的貢獻主要來自於兩方面：

1. 折射率溫度係數( $dn/dT$ )：即折射率隨溫度變化的梯度，亦即熱光係數 (Thermal-optical coefficient)。晶體中心受熱時，因中心與邊緣的受熱程度不同，產生溫度梯度變化，造成晶體中心與邊緣的折射率不同，折射率由晶體中心向外逐漸遞減。當光通過時，晶體中心光線的光程較晶體邊緣大，即光經過晶體邊緣的速度比經過晶體中心快，形成聚焦的效果，此現象即為一熱透鏡現象。 $\pi$  偏振方向 (1047nm)與  $\sigma$  偏振方

向 (1053nm)的折射率溫度係數( $dn/dT$ )如下所示：

–  $\pi$  偏振方向 (1047nm) :  $-4.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

–  $\sigma$  偏振方向 (1053nm) :  $-2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

2. 熱膨脹係數( $\alpha_T$ )：晶體吸收激發光而產生熱的空間分佈，產生縱向的溫度梯度變化，造成晶體材料的熱膨脹(thermal expansion)。因晶體中心與邊緣的熱脹情況不同，隨著激發光功率的增加，熱應力也隨之變大，當熱應力增大至增益介質的閾值(threshold)時，晶體即會產生破裂現象，此現象稱為熱破裂(thermal fracture)。Nd:YLF 在不同軸向的熱膨脹係數如下所示：

– a 軸 :  $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

– c 軸 :  $8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$



如上所述，a-cut Nd:YLF 的  $\pi$  偏振方向 (1047nm) 有很強的凹的熱透鏡效應，而  $\sigma$  偏振方向 (1053nm) 則有微弱的凸的熱透鏡效應。在光學上，我們可以將熱透鏡效應視為一個凹或凸的透鏡(參照圖 2-5)。於 Nd:YLF 沒有切 wedge 的設置下，當 Nd:YLF 低功率運作時， $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的熱透鏡效應均不明顯，此時因  $\pi$  偏振方向(1047nm)的增益較大，所以  $\pi$  偏振方向(1047nm)較易勝出。當 Nd:YLF 高功率運作時， $\pi$  偏振方向(1047nm)凹的熱透鏡效應使其不穩定，而  $\sigma$  偏振方向(1053nm)凸的熱透鏡效應則相對穩定，所以  $\sigma$  偏振方向(1053nm)較易勝

出。關於  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)在不同共振腔配置下的競合與表現，本文的第三章會有詳細的說明。



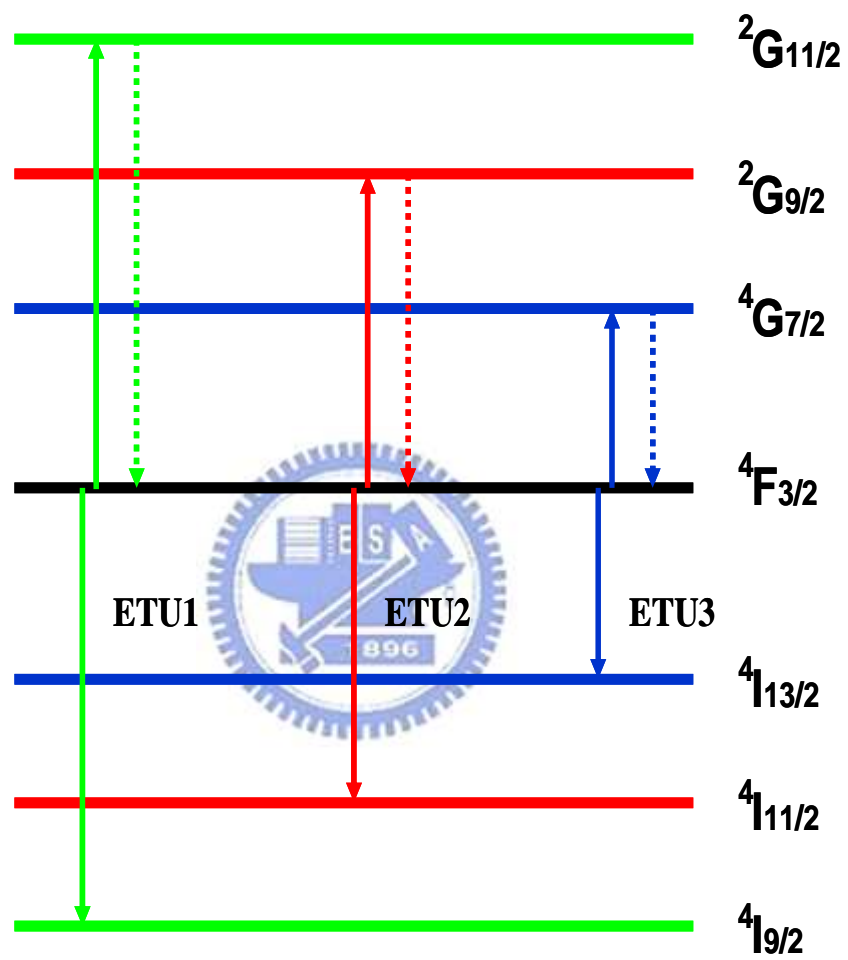


圖 2-3 Energy transfer upconversion (ETU)示意圖

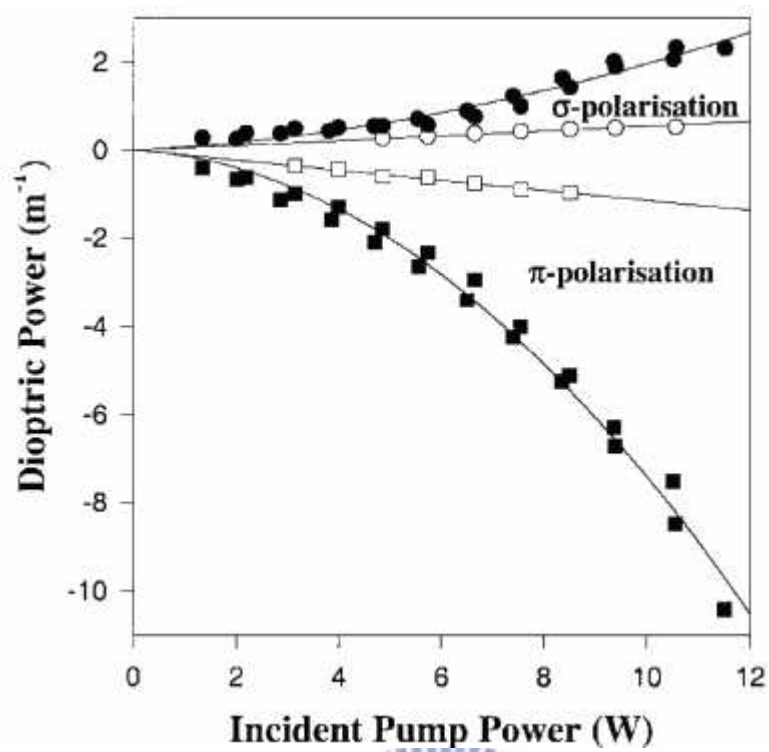


圖 2-4 輸入功率與熱透鏡焦距關係圖

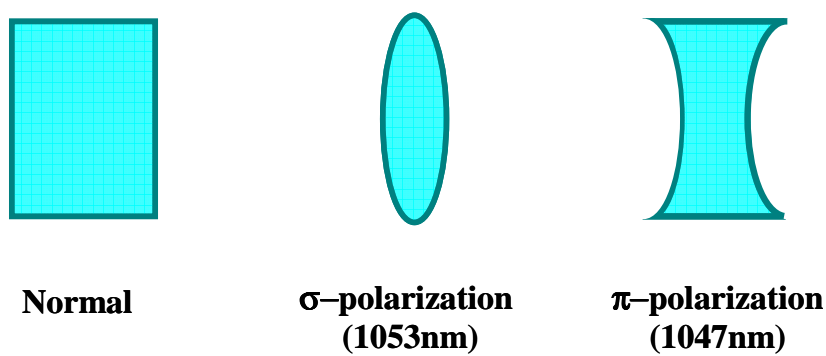


圖 2-5 熱透鏡效應示意圖

## 2.5 Nd:YLF 的優缺點

選用 Nd:YLF 作為增益介質，主要有以下優點：

- 熱光係數小( $dn/dT$  小)。亦即低熱透鏡效應，於  $\sigma$  偏振方向 (1053nm)時更為明顯。
- 螢光壽命長。亦即電子受激後，於上能階停留的時間長。此低增益(low gain)的特性，使 Nd:YLF 晶體成為製作高能量脈衝雷射時的良好增益介質。
- 晶格為單軸不對稱，具有良好的線性偏振特性。
- 高損傷閾值。即晶體強度高，不易損壞。

然而，Nd:YLF 亦有其缺點：

- 熱導率低。亦即易產生熱斷裂(thermal fracture)。
- 晶體生長工藝較難。由於 Nd 離子與 Y 離子半徑的不匹配，使得摻了 Nd 離子後，晶體的內應力增大，增加晶體生長的難度。

## 2.6 Nd:YLF 的吸收光譜與螢光光譜

雷射系統中，激發光源與增益介質的選用，必須參考激發光源的放射光譜與增益介質的吸收光譜，選用的激發光源波長必須要落在增益介質的吸收區內，才能達到激發增益介質，使成居量反轉的目的。

Nd:YLF 的吸收光譜主要有三個區段，分別是在 700nm~750nm、760nm~810nm、850nm~880nm(參照圖 2-6、圖 2-7)。雖然晶體在 793nm

與 797 有更高的吸收係數，但要找到此波長且高功率的激發光源並不容易，因此，本實驗選用常見的高功率 806nm 雷射二極體作為激發光源。

至於 Nd:YLF(a-cut)螢光光譜，如前所述，其放射波長主要有三個波段，分別在  $0.9\mu\text{m}$ 、 $1.05\mu\text{m}$ 、 $1.3\mu\text{m}$  左右，每個波段各有兩種雷射躍遷(參照圖 2-8)，分別是：

(1) 903nm( $\pi$  偏振方向)或 908nm( $\sigma$  偏振方向)

(2) 1047nm( $\pi$  偏振方向)或 1053nm( $\sigma$  偏振方向)

(3) 1321nm( $\pi$  偏振方向)或 1313nm( $\sigma$  偏振方向)

我們可藉由選頻的裝置或方法來選擇不同的工作波長，本實驗選擇的波段是  $1.05\mu\text{m}$ ，亦即 1047nm( $\pi$  偏振方向)與 1053nm( $\sigma$  偏振方向)兩個波長。





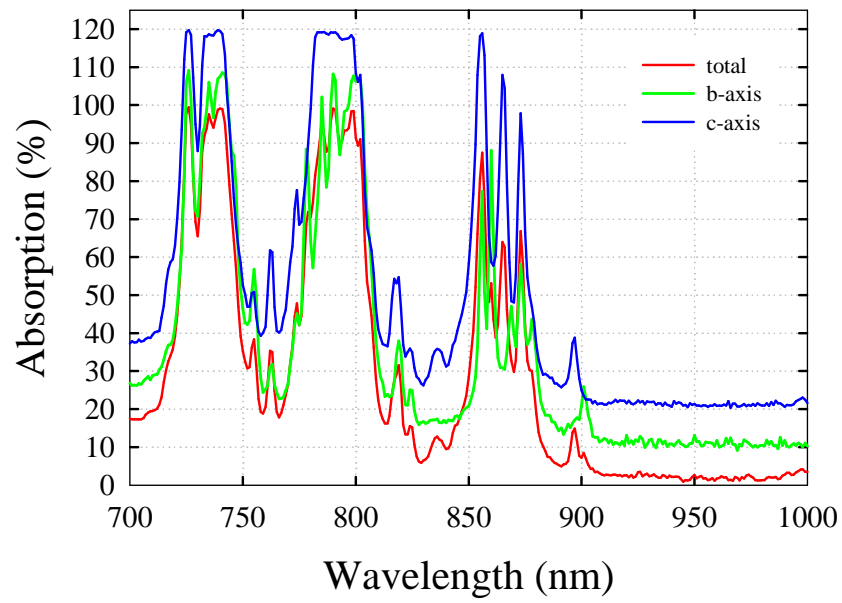


圖 2-6 Nd:YLF 吸收光譜 (波長-吸收率)

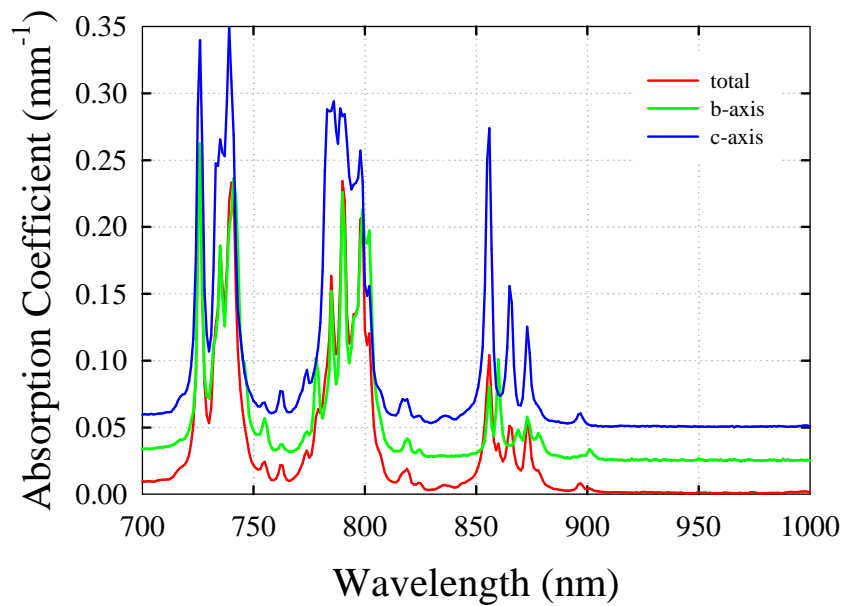


圖 2-7 Nd:YLF 吸收光譜 (波長-吸收係數)

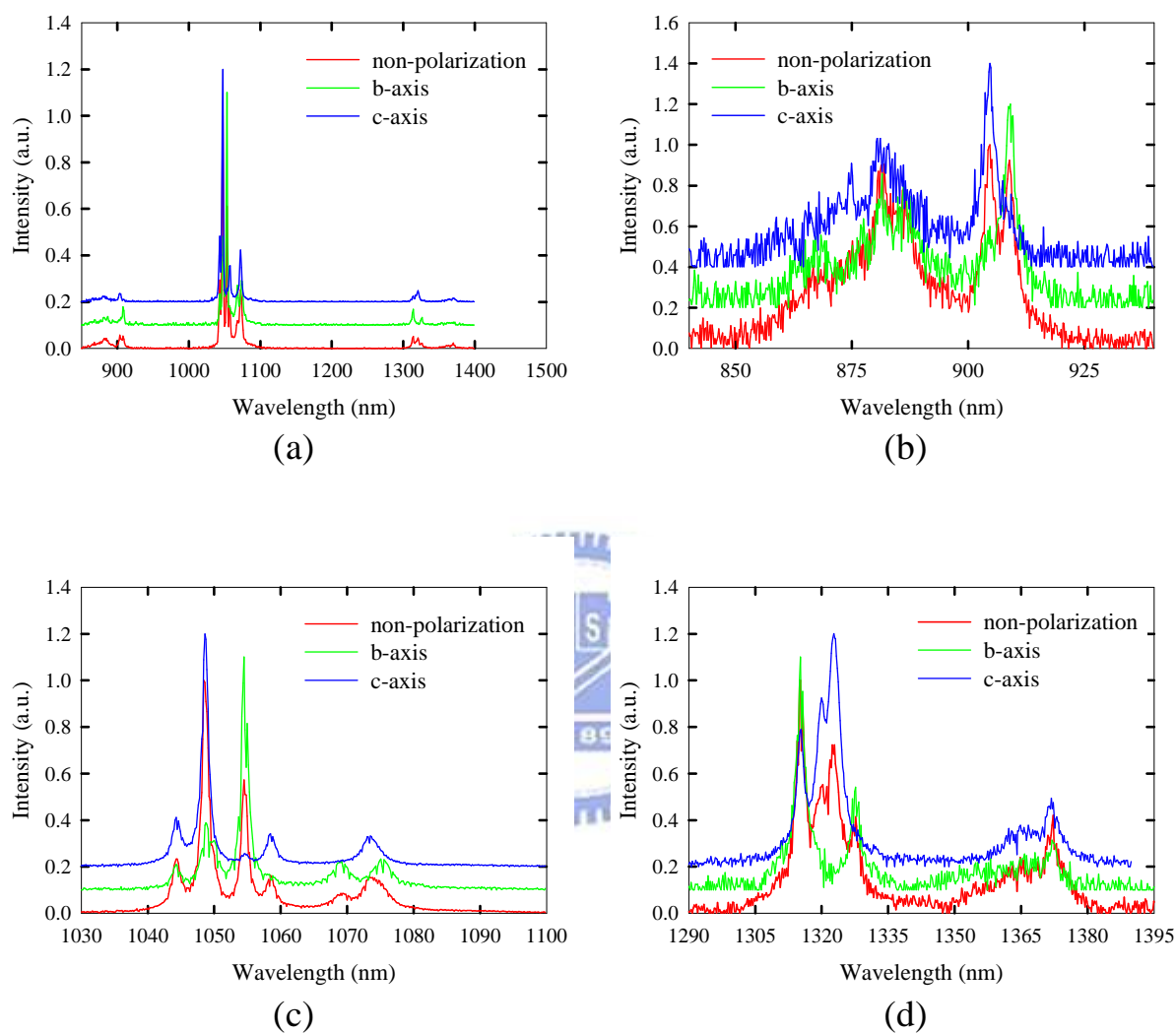


圖 2-8 a-cut Nd:YLF (3°-wedged, doping:0.8%) 螢光光譜圖。

(a)840nm~1400nm (b)840nm~940nm (c)1020nm~1100nm  
(d)1280nm~1400nm

## 第三章 連續波雷射(CW laser)

### 3.1 實驗架構

- (1) 激發光源：806nm 雷射二極體
- (2) 光纖直徑：400 $\mu\text{m}$
- (3) 增益介質：Nd:YLF (a-cut doping:0.8% 3x3x20 mm<sup>3</sup>, 0°-wedged, 3°-wedged)
- (4) 光學共振腔：腔長 5cm (凹平腔/平平腔)
  - 前鏡(Input mirror)：曲率為 25cm、50cm、平面鏡 (鍍膜:對於 808nm 具高穿透特性，對於 1.05 $\mu\text{m}$  具高反射特性)
  - 輸出耦合鏡(Output Coupler)：反射率為 70%、90% (鍍膜:對於 1.05 $\mu\text{m}$  具反射特性)



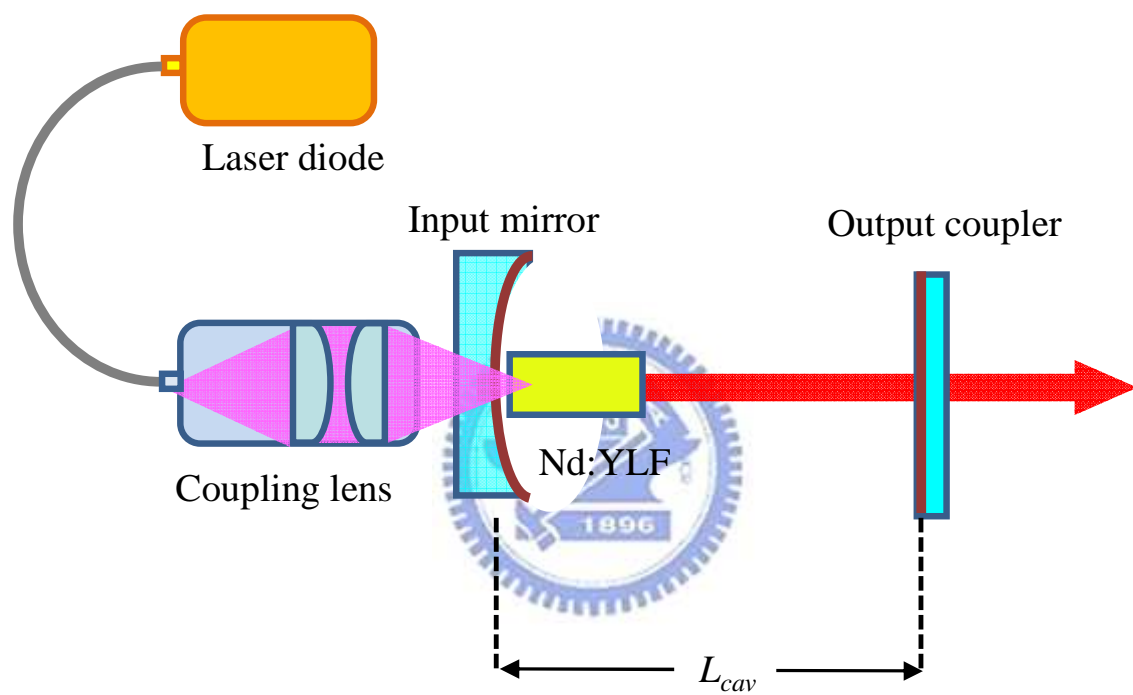


圖 3-1 連續波雷射(CW laser)實驗架構圖

## 3.2 實驗結果與討論

### 3.2.1 0°-wedged Nd:YLF 設置下 $\pi$ 偏振方向(1047nm)與 $\sigma$ 偏振方向(1053nm)的競合

當前鏡的曲率為 25cm，最大輸出時的波長為 1047nm( $\pi$  偏振方向)；當前鏡曲率更換為 50cm 時，最大輸出時的波長為 1047nm( $\pi$  偏振方向)與 1053nm( $\sigma$  偏振方向)共存；而當前鏡更換為平面鏡時，最大輸出時的波長變換成 1053nm ( $\sigma$  偏振方向)。

#### 1. 波長選擇：

- (1) 前鏡曲率為 25cm，OC 反射率為 70%時(參照圖 3-2)：可選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)，但無法選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。
- (2) 前鏡曲率為 25cm，OC 反射率為 90%時(參照圖 3-3)：可選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)，亦可選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。
- (3) 前鏡曲率為 50cm，OC 反射率為 70%時(參照圖 3-4)：可選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)，但無法選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。
- (4) 前鏡曲率為 50cm，OC 反射率為 90%時(參照圖 3-5)：可選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)，亦可選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。
- (5) 前鏡為平面鏡，OC 反射率為 70%、90%時(參照圖 3-6)：可選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)，亦可選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。

實驗發現，無論前鏡曲率為 25cm 或 50cm(亦即凹平腔)，當輸出鏡反

射率為 70% 時，皆無法選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。其原因可能是因為晶體沒切 wedge，再加上  $\pi$  偏振方向(1047nm)的增益比  $\sigma$  偏振方向(1053nm)大，因此， $\sigma$  偏振方向(1053nm)不易勝出，亦即不易選出純的  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。而當前鏡為平面鏡(亦即平平腔)時，雖可選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)，但其輸出功率非常低，亦即， $\pi$  偏振方向(1047nm)極不穩定，是不可信賴的；至於  $\sigma$  偏振方向(1053nm)，由於其凸的熱透鏡效應比  $\pi$  偏振方向(1047nm)凹的熱透鏡效應更穩定，因此，我們可選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。圖 3-2~圖 3-7 為各種設置下的光譜圖。

## 2. 輸出耦合鏡傾角不變，改變輸入功率時，兩波長的競合：

於前鏡曲率 25cm，OC 反射率 90% 配置下，輸入功率為 11.5W 時，將兩波長選出，使強度相同。在不改變 OC 傾角，只改變輸入功率的情況下，我們有以下發現：

- (1) 提升輸入功率時， $\sigma$  偏振方向(1053nm)強度增加， $\pi$  偏振方向(1047nm)強度減少(參照圖 3-7)。
- (2) 降低輸入功率時， $\pi$  偏振方向(1047nm)強度增加， $\sigma$  偏振方向(1053nm)強度減少(參照圖 3-8)。

## 3. 橫向模態：

- (1) 前鏡曲率為 25cm，OC 反射率為 70% 時： $\pi$  偏振方向(1047nm)為 1

維的 Hermite-Gaussian； $\sigma$  偏振方向(1053nm)為 2 維的

Hermite-Gaussian。

(2) 前鏡曲率為 25cm，OC 反射率為 90% 時： $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)均為 1 維的 Hermite-Gaussian。

(3) 前鏡曲率為 50cm，OC 反射率為 70% 時： $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)均為 1 維的 Hermite-Gaussian。

(4) 前鏡曲率為 50cm，OC 反射率為 90% 時： $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)均為 1 維的 Hermite-Gaussian。

(5) 前鏡為平面鏡，OC 反射率為 70% 時： $\pi$  偏振方向(1047nm)為類鐘形； $\sigma$  偏振方向(1053nm)為 1 維的 Hermite-Gaussian。

(6) 前鏡為平面鏡，OC 反射率為 90% 時： $\pi$  偏振方向(1047nm)為半碟形； $\sigma$  偏振方向(1053nm)為流星狀。

表 3-1 為 **0°-wedged Nd:YLF** 的各種設置下，最大輸出功率、選頻結果與橫向模態的整理。

我們可將以上現象大致歸納如下：

- i. 在前鏡曲率為 25cm 與 50cm，亦即凹平腔的設置下，無論 OC 反射率為 70% 或 90%，最大輸出時的橫向模態均為一維的 Hermite-Gaussian 形狀。
- ii. 當前鏡為平面鏡時，亦即平平腔的設置下，不同的 OC 反射率，會

使  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的橫向模態明顯不同：當 OC 反射率為 70% 時， $\pi$  偏振方向(1047nm)的橫模為鐘形， $\sigma$  偏振方向(1053nm) 的橫模為一維的 Hermite-Gaussian；當 OC 反射率為 90% 時， $\pi$  偏振方向(1047nm)的橫模為半圓形， $\sigma$  偏振方向(1053nm) 的橫模為流星狀。

### 3.2.2 3°-wedged Nd:YLF 設置下 $\pi$ 偏振方向(1047nm)與 $\sigma$ 偏振方向(1053nm)的競合

無論前鏡的曲率為 25cm、50cm、平面鏡，或 OC 反射率為 70%、90%，最大輸出時的波長均為  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。其原因可能是：由於  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的折射率不同，晶體的 wedge 使得  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)離開晶體的出射光角度明顯的不同，因此，可以輕易的藉由調整 OC 傾角將純  $\pi$  偏振方向(1047nm)與純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)選擇出來。此外， $\pi$  偏振方向(1047nm)的增益雖然比  $\sigma$  偏振方向(1053nm)大，但因其在 wedge 面的反射率較大，造成損耗較大；而  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的增益雖然比  $\pi$  偏振方向(1047nm)小，卻因其在 wedge 面的反射率較小而損耗較小，使得  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的總增益比  $\pi$  偏振方向(1047nm)大而勝出。

如圖 3-9 所示，若 Nd:YLF 有 wedge 角度，當入射光接觸到 Nd:YLF 晶體的 wedge 面時，會有部分穿透與部分反射的現象，由平面波的穿透率



與反射率原理得知， $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的反射率分別是：

$$- R_{\pi} = 0.036 \quad (3-1)$$

$$- R_{\sigma} = 0.034 \quad (3-2)$$

反射率愈高者，腔內的損耗即愈大。由上式可知  $R_{\pi} < R_{\sigma}$ ，即  $\pi$  偏振方向(1047nm)的損耗大於  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的損耗，造成腔內  $\pi$  偏振方向(1047nm)增益小於  $\sigma$  偏振方向(1053nm)增益，因此使得  $\sigma$  偏振方向(1053nm)勝出。

已知 Nd:YLF 的 wedge 角度( $\theta_w$ )為  $3^\circ$ ，且已知兩波長的折射率( $\lambda=1.05\mu\text{m}$ )：

$$- n_{\pi} = 1.470 \quad (3-3)$$

$$- n_{\sigma} = 1.448 \quad (3-4)$$

由以下公式可算出  $\sigma$  偏振方向 (1053nm)與  $\pi$  偏振方向 (1047nm)的折射光夾角( $\phi$ )：

$$\phi = (n_{\pi} - n_{\sigma}) \theta_w = (1.479 - 1.448)(3 \times \pi / 180) \doteq 1.151 \times 10^{-3} \text{ mrad} \quad (3-5)$$

### 1. 波長選擇：

無論前鏡的曲率為 25cm、50cm、平面鏡，或 OC 反射率為 70%、90%，均可選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)與純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。圖 3-10 為各種設置下的選頻結果。

## 2. 橫向模態：

(1) 前鏡的曲率為 25cm、50cm，即凹平腔的設置下，OC 反射率為 70%、90% 時， $\pi$  偏振方向(1047nm)的橫向模態可藉由調整 OC 傾角得到多樣化的態樣； $\sigma$  偏振方向(1053nm)則為  $TEM_{0,0}$  至  $TEM_{n,0}$  的一維 Hermite-Gaussian。

(2) 前鏡為平面鏡，OC 反射率為 70% 時， $\pi$  偏振方向(1047nm)為二維的 Hermite-Gaussian； $\sigma$  偏振方向(1053nm)為一維的 Hermite-Gaussian。

(3) 前鏡為平面鏡，OC 反射率為 90% 時， $\pi$  偏振方向(1047nm)為鐘形； $\sigma$  偏振方向(1053nm)為一維的 Hermite-Gaussian。

表 3-2 為 3°-wedged Nd:YLF 的各種設置下，最大輸出功率、選頻結果與橫向模態的整理。

在輸入功率為 9.6W，前鏡為 50cm，OC 反射率為 70% 的設置下，當不斷改變 OC 的傾角時，我們有以下發現(參照圖 3-11)：

- i. 選出純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)後，當不斷改變 OC 的傾角時，橫向模態由原本的  $TEM_{0,0}$ ，逐漸轉變為 1 維的 Hermite-Gaussian 形態(參照圖 3-11 b~e)。
- ii. 選出純  $\pi$  偏振方向(1047nm)後，當不斷改變 OC 的傾斜角度時，橫向模態由原本較簡單的 high order mode，逐漸轉變更複雜的 high

order mode 形態(參照圖 3-11 g~l)。其原因可能是熱效應的影響嚴重，導致嚴重的光扭曲(distortion)與散光(astigmatism)等現象，使得橫向模態呈現多種樣貌。

- iii. 值得注意的是，當  $\sigma$  偏振方向(1053nm)與  $\pi$  偏振方向(1047nm)共存時， $\sigma$  偏振方向(1053nm)依然維持 1 維的 Hermite-Gaussian 形態，同時 1047 則維持 high order mode 的形態，形成了有趣的模態(參照圖 3-11 f)。

由實驗中可發現，在  $3^\circ$ -wedged Nd:YLF 的設置下， $\sigma$  偏振方向(1053nm)所呈現的橫向模態為  $TEM_{0,0}$  至  $TEM_{n,0}$  的一維 Hermite-Gaussian 態樣，與一般雷射可由共振腔設計決定橫向模態的現象一致；至於  $\pi$  偏振方向 (1047nm)則可能是因為嚴重的熱效應，產生光扭曲與散光等現象而呈現 high order mode 的橫向模態，與一般雷射可由共振腔設計決定橫向模態的現象違背，光束品質(beam quality)較差。因此可知， $\sigma$  偏振方向(1053nm)在  $3^\circ$ -wedged Nd:YLF 的設置下，光束品質優於  $\pi$  偏振方向(1047nm)；且當雷射功率為最大輸出時， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的輸出功率亦高於  $\pi$  偏振方向(1047nm)。

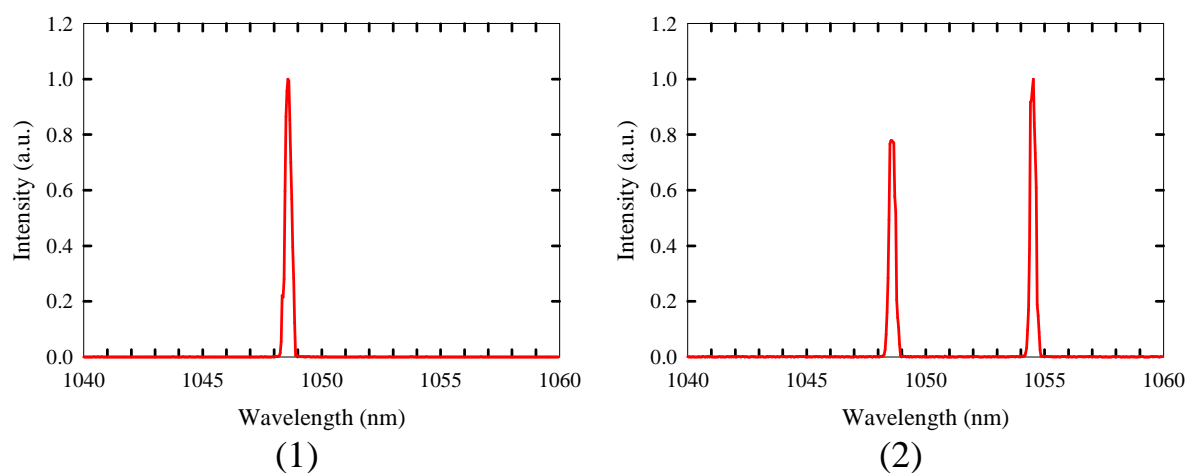


圖 3-2  $0^\circ$ -wedged Nd:YLF，前鏡曲率 25cm，輸出耦合鏡反射率 70%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖。(1)最大輸出時為純  $\pi$  偏振方向。(2)調整 OC 傾角無法選出純  $\sigma$  偏振方向。

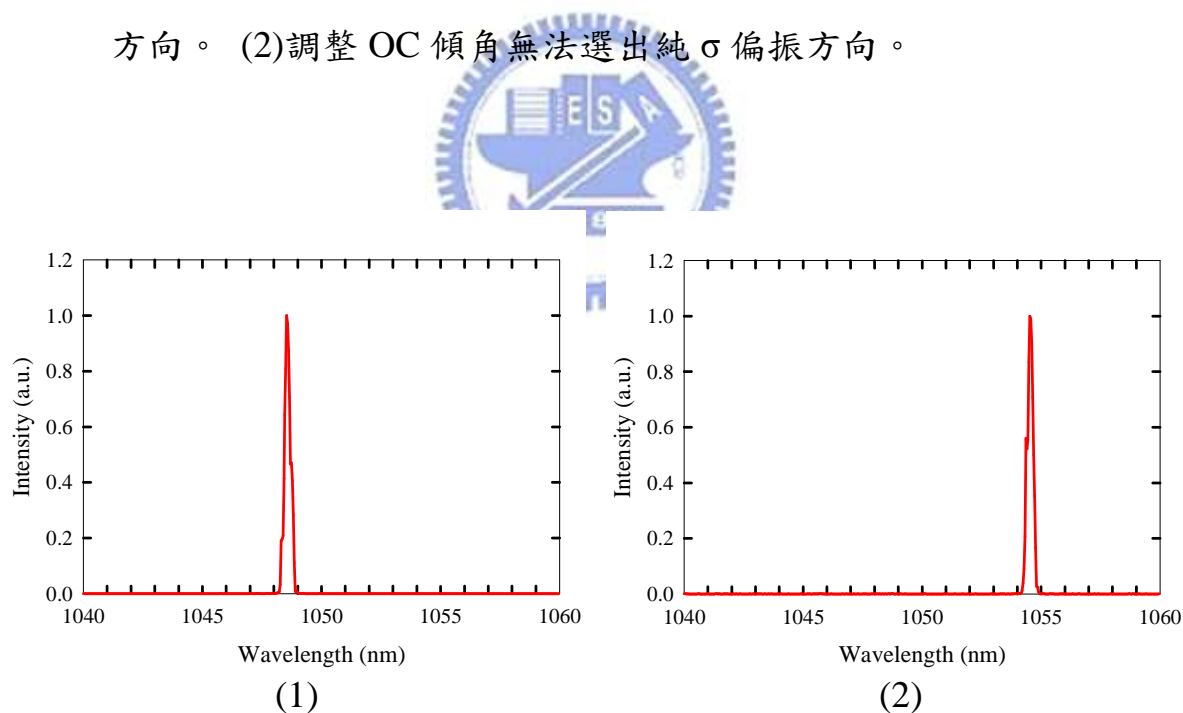


圖 3-3  $0^\circ$ -wedged Nd:YLF，前鏡曲率 25cm，輸出耦合鏡反射率 90%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖。(1)最大輸出時為純  $\pi$  偏振方向。(2)可藉由調整 OC 傾角選出純  $\sigma$  偏振方向。

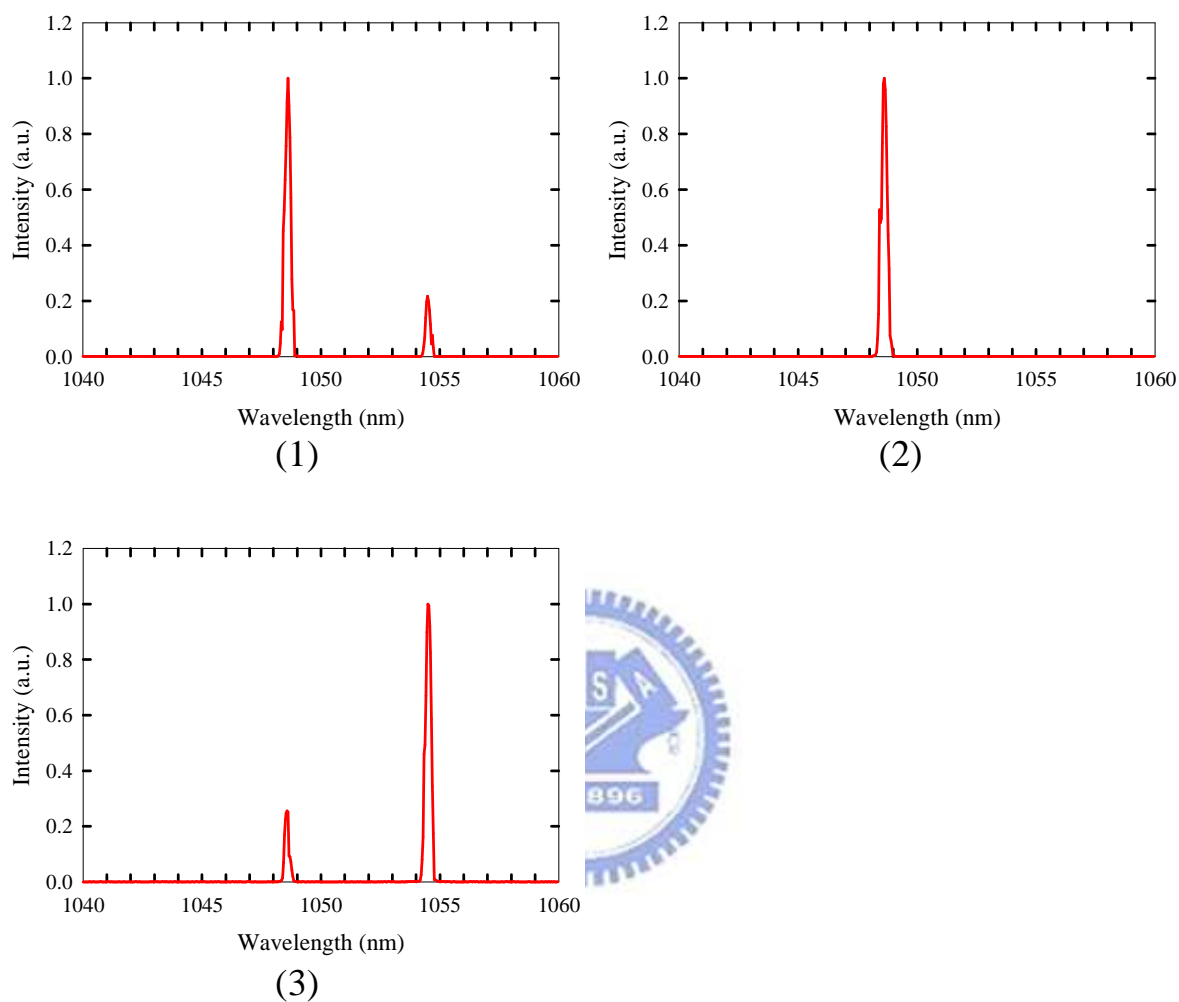


圖 3-4 0°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率 50cm，輸出耦合鏡反射率 70%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖。(1)最大輸出時為  $\pi$  偏振方向與  $\sigma$  偏振方向共存。(2)可藉由調整 OC 傾角選出純  $\pi$  偏振方向。(3)調整 OC 傾角無法選出純  $\sigma$  偏振方向。

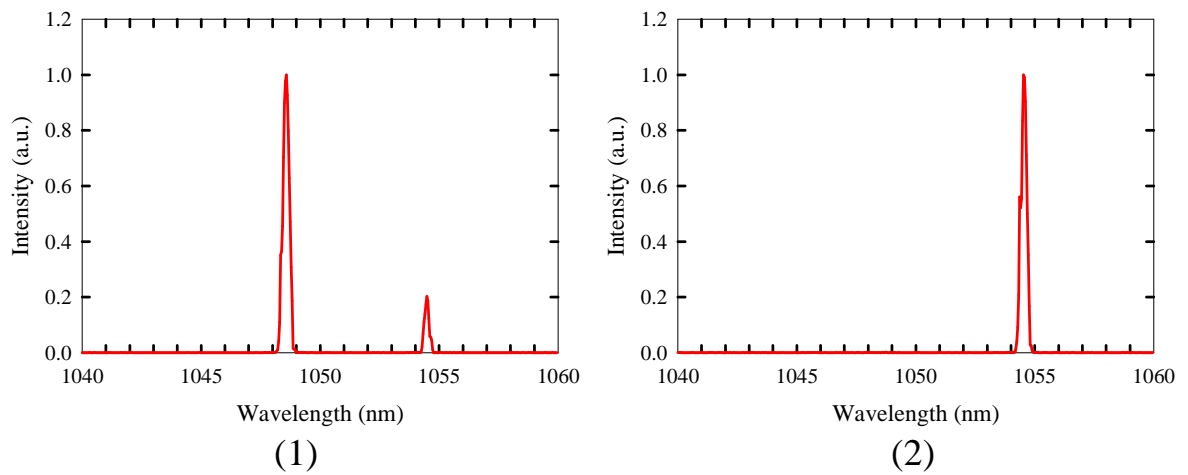


圖 3-5  $0^\circ$ -wedged Nd:YLF，前鏡曲率 50cm，輸出耦合鏡反射率 90%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖。(1)最大輸出時為  $\pi$  偏振方向與  $\sigma$  偏振方向共存。(2)可藉由調整 OC 傾角選出純  $\sigma$  偏振方向。

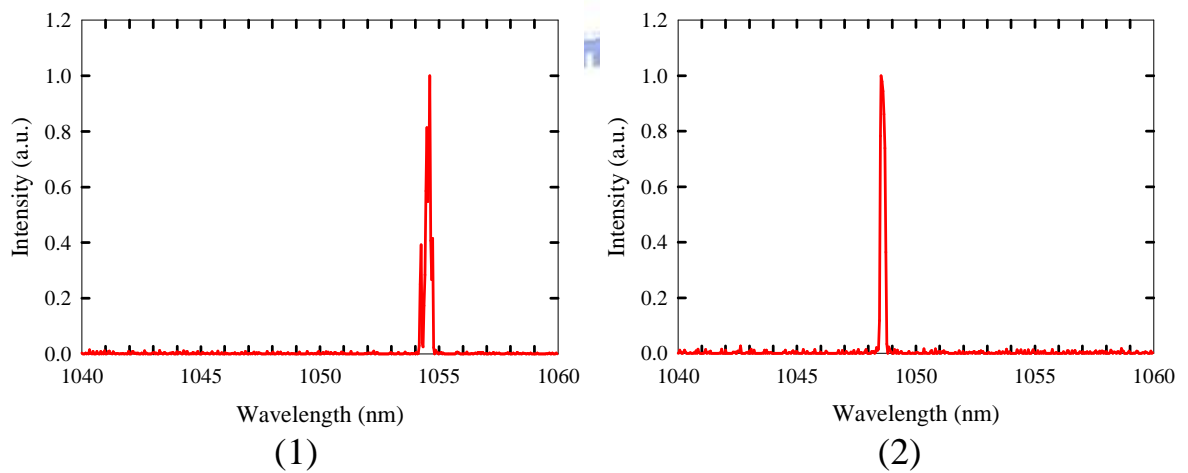
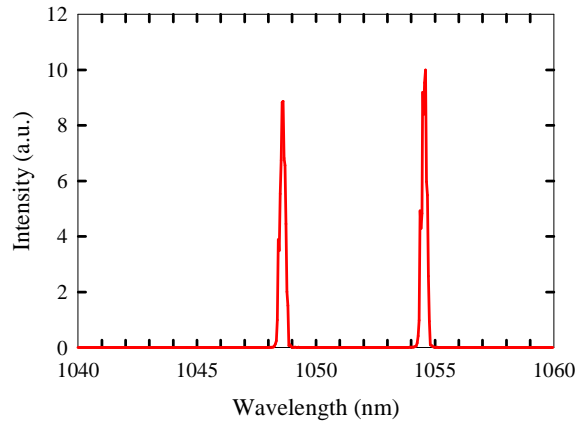
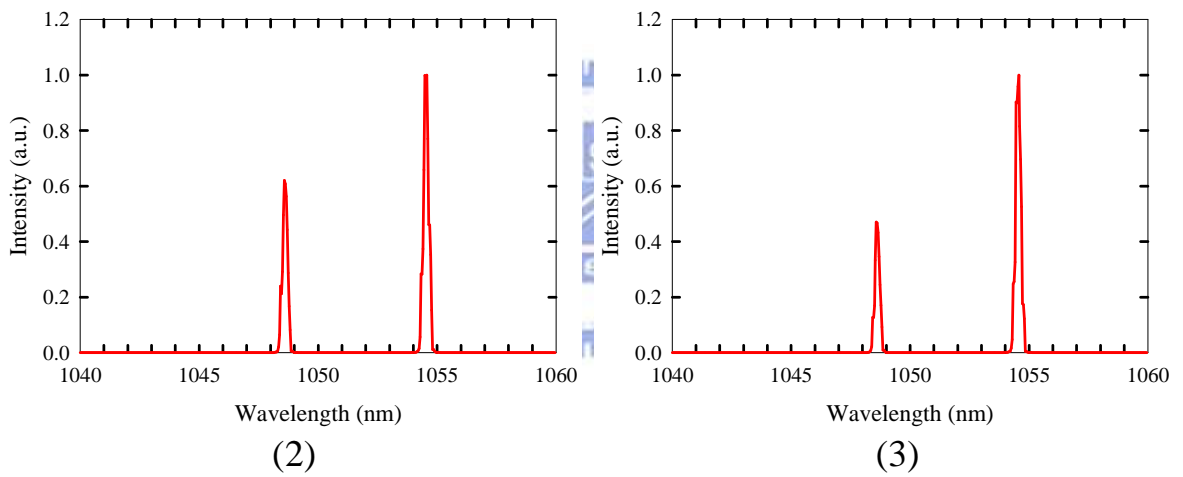


圖 3-6  $0^\circ$ -wedged Nd:YLF，前鏡為平面鏡，輸出耦合鏡反射率為 70%、90%設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖。(1)最大輸出時為純  $\sigma$  偏振方向。(2)可藉由調整 OC 傾角選出純  $\pi$  偏振方向。



(1)

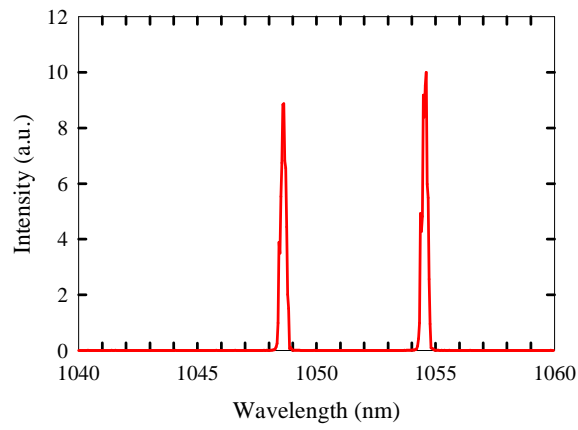


(2)

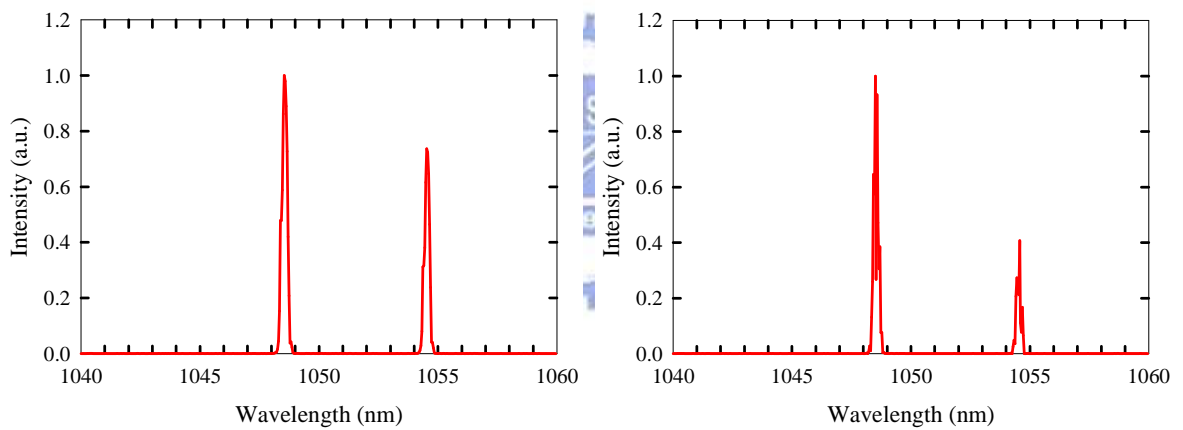
(3)

圖 3-7 輸出耦合鏡傾角不變，提升輸入功率時，兩波長競合的光譜圖。

(1)於輸入功率為 11.5W，將兩波長選出，使強度相同。(2)提升輸入功率至 13.4W。(3)提升輸入功率至 15W。



(1)



(2)

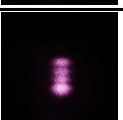
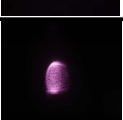
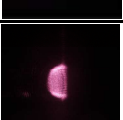
(3)

圖 3-8 輸出耦合鏡傾角不變，降低輸入功率時，兩波長競合的光譜圖。

(1)於輸入功率為 11.5W，將兩波長選出，使強度相同。(2)降低輸入功率至 7.7W。(3)降低輸入功率至 3.9W。



表 3-1 0°-wedged Nd:YLF，輸入功率為 13.4W 時，各種配置下的最大輸出功率、選頻結果與橫向模態比較圖。

輸入功率	Radius-of-curvature	Reflectivity	Wavelength	Max output power	Pattern
13.4W	25cm	70%	最大輸出時為 1047nm。	4.71W	
			無法選出純1053nm，與1047nm共存。	2.86W	
		90%	最大輸出時為 1047nm。	5.82W	
			可選出純1053nm。	3.06W	
	50cm	70%	最大輸出時1047nm與1053nm共存。	4.48W	
			可選出純1047nm。	4.2W	
			無法選出純1053nm，與1047nm共存。	4.03W	
		90%	最大輸出時1047nm與1053nm共存。	6.03W	
			可選出純1053nm。	0.213W	
	Flat	70%	最大輸出時為 1053nm。	2.94W	
			可選出純1047nm。	0.703W	
		90%	最大輸出時為 1053nm。	4.18W	
			可選出純1047nm。	0.178W	

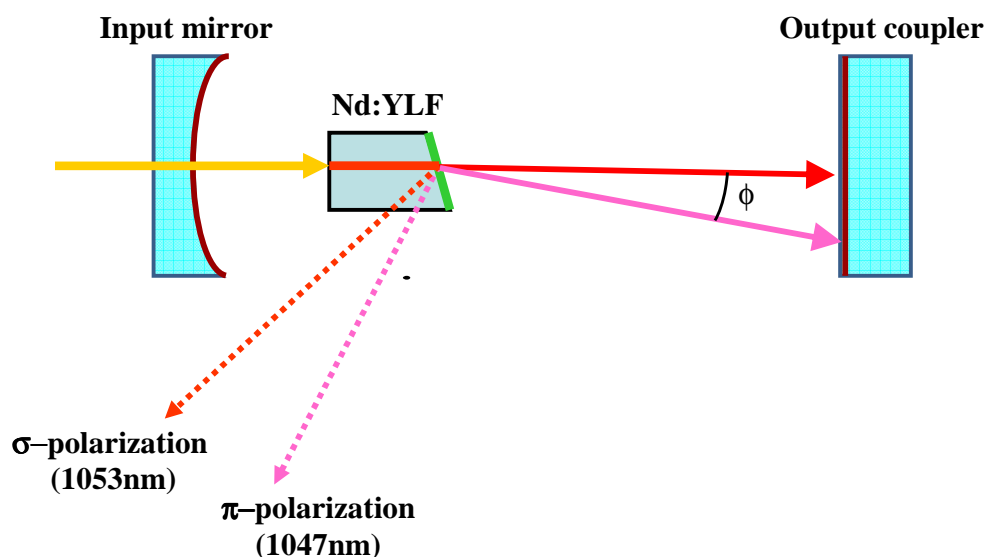


圖 3-9 Nd:YLF 晶體 wedge 面反射示意圖。3°-wedged Nd:YLF 兩波長的折射光夾角  $\phi \doteq 1.151 \times 10^{-3}$  mrad。

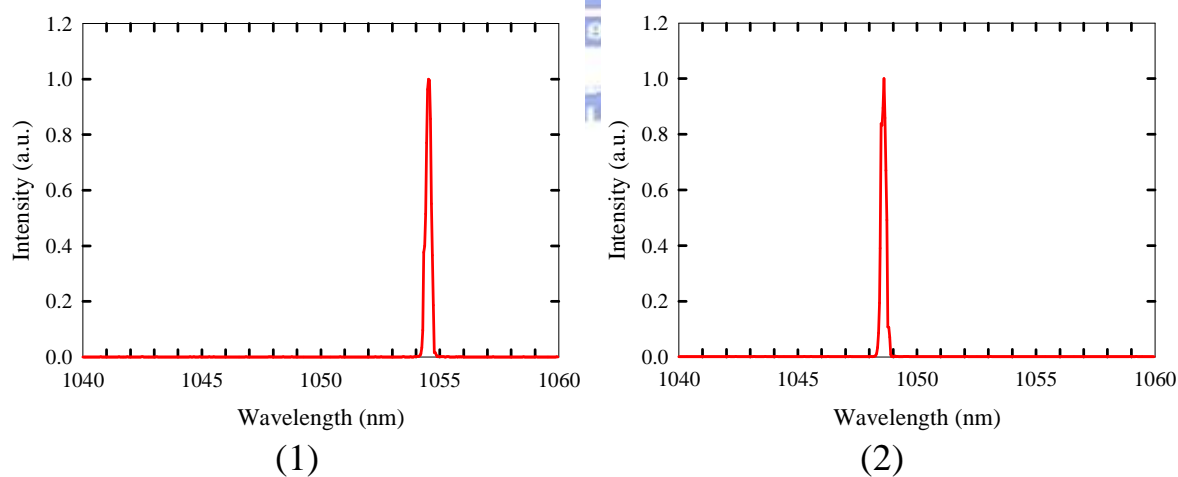


圖 3-10 3°-wedged Nd:YLF，前鏡曲率為 25cm、50cm、平面鏡，輸出耦合鏡反射率為 70%、90% 設置下，輸入功率為 13.4W 時的光譜圖。  
(1)最大輸出時為純  $\sigma$  偏振方向。(2)可藉由調整 OC 傾角選出純  $\pi$  偏振方向。

表 3-2 3°-wedged Nd:YLF，輸入功率為 13.4W 時，各種配置下的最大輸出功率、選頻結果與橫向模態比較圖。

輸入功率	Radius-of-curvature	Reflectivity	Wavelength	Max output power	Pattern
13.4W	25cm	70%	最大輸出為 1053nm。	3.66W	
			可選出純 1047nm。	3.07W	
		90%	最大輸出為 1053nm。	4.97W	
			可選出純 1047nm。	2.09W	
	50cm	70%	最大輸出為 1053nm。	3.85W	
			可選出純 1047nm。	2.46W	
		90%	最大輸出為 1053nm。	4.85W	
			可選出純 1047nm。	2.43W	
	Flat	70%	最大輸出為 1053nm。	2.19W	
			可選出純 1047nm。	0.176W	
		90%	最大輸出為 1053nm。	3.66W	
			可選出純 1047nm。	0.644W	

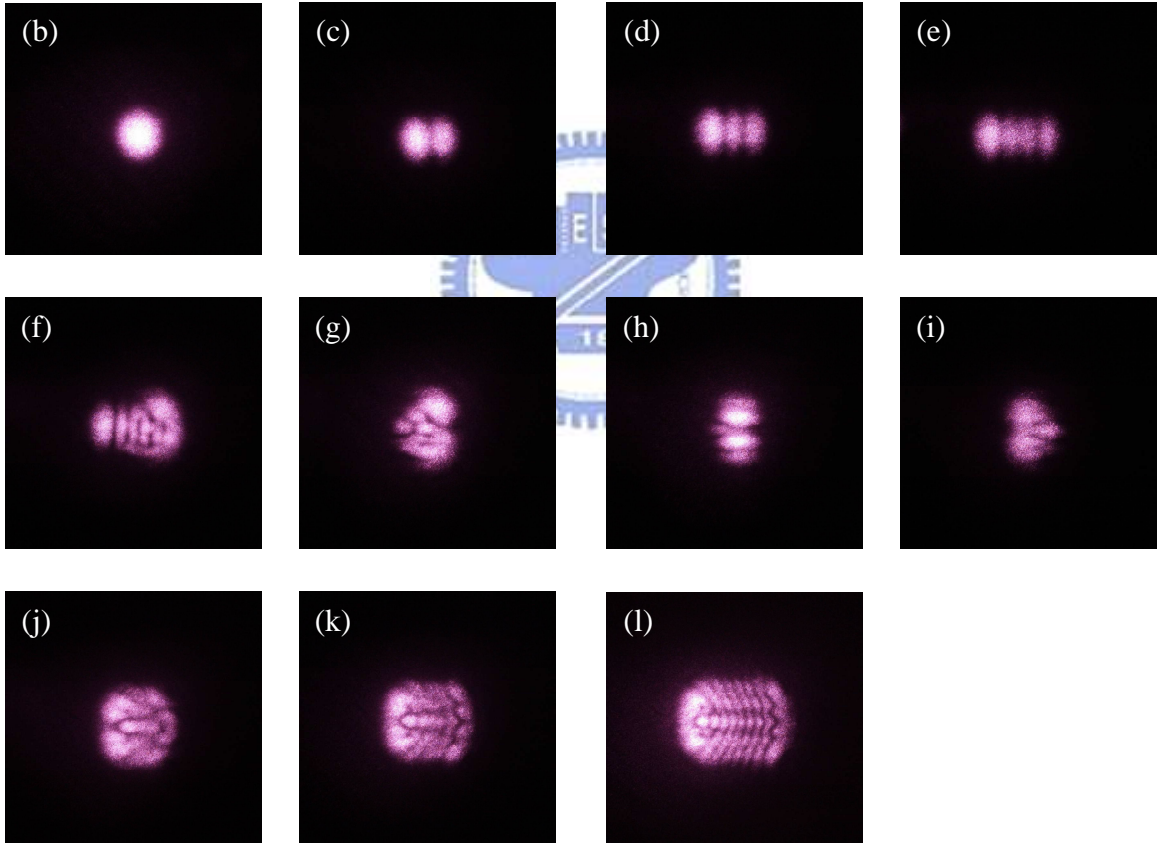
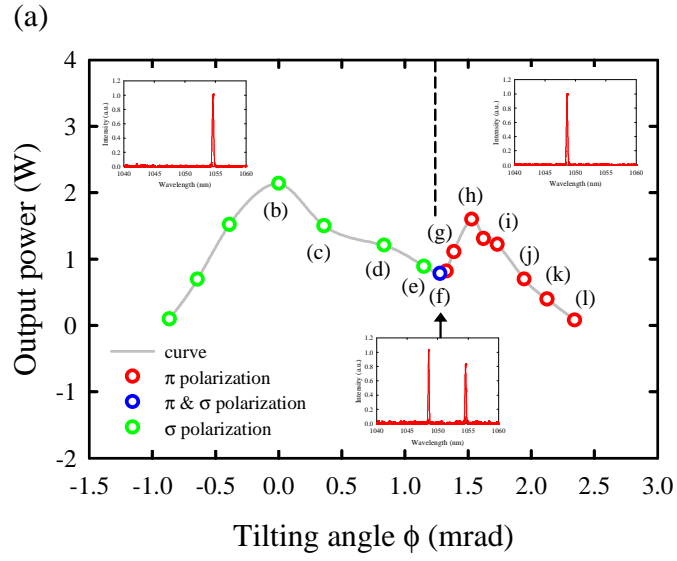


圖 3-11  $3^\circ$ -wedged Nd:YLF，前鏡曲率 50cm，輸出鏡反射率 70%的設置下，改變輸出耦合鏡傾角時(a)輸出功率的變化。(b)~(l)橫向模態的變化。

### 3.3 結論

由以上數據可知，使用  $0^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體時，在凹平腔的設置下，前鏡的曲率愈小或輸出鏡的反射率愈小，愈不容易將純的  $\sigma$  偏振方向(1053nm)選出，即便選出了，其輸出功率亦不高。其原因主要有二：

(1) 前鏡的曲率愈小，愈能補償  $\pi$  偏振方向(1047nm)凹的熱透鏡

效應，使  $\pi$  偏振方向(1047nm)在腔內更穩定而勝出。

(2) 輸出鏡的反射率愈小，代表腔內的損耗愈多。再加上晶體沒切

wedge，且  $\pi$  偏振方向(1047nm)的增益比  $\sigma$  偏振方向(1053nm)大，

因此， $\sigma$  偏振方向(1053nm)不易勝出，亦即不易選出純的  $\sigma$  偏振方向(1053nm)。

在平平腔的設置下，雖然因無法補償  $\pi$  偏振方向(1047nm)凹的熱透鏡效應而使  $\sigma$  偏振方向(1053nm)勝出，但  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的橫向模態卻不理想(為 1 維的 Hermite Gaussian)，亦即光束品質不好。

然而，使用  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體時， $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)離開晶體的出射角度因為 wedge 角度而明顯不同，我們可藉由調整輸出耦合鏡傾角的方式輕易的將  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)分別選出。此外， $\pi$  偏振方向(1047nm)的增益雖然比  $\sigma$  偏振方向(1053nm)大，但因其在 wedge 面的反射率較大，造成損耗較大；而  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的增益雖然比  $\pi$  偏振方向(1047nm)小，卻因其

在 wedge 面的反射率較小而使損耗較小，因此，造成了無論是在凹平腔或平平腔的設置下， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的總增益均比  $\pi$  偏振方向(1047nm)大而勝出，且其橫向模態亦非常好( $TEM_{0,0}$ )，亦即光束品質非常好。簡而言之，相較於  $0^\circ$ -wedged 的設置，使用  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體，除了選頻更容易， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的輸出表現也更加優良。



## 第四章 被動式 Q 開關雷射(PQS laser)

### 4.1 Q 開關簡介

利用外加的 Q 開關(Q-switch)，調製雷射共振腔的 Q 值，以提高共振腔的儲存能量，並將累積的所有能量於極短的時間內(約幾奈秒)全部釋放出來，產生高峰值的脈衝輸出。Q 值指的是雷射共振腔的品質因子，定義為：

$$Q = \text{共振腔儲存之能量} / \text{共振腔單位時間內耗損之能量} \quad (4-1)$$

當 Q 開關 OFF，Q 開關以阻擋或吸收的方式使自發輻射光子在共振腔內無法來回震盪，此時共振腔屬於高損耗狀態(high loss)，Q 值下降(Low-Q)。在此情況下，自發輻射光子因無法在共振腔內來回共振放大而沒有雷射輸出；然而，激發光源輸入增益介質的能量卻持續累積，共振腔內的增益隨著激發光源輸入的增加而提高，直到 Q 開關切換或無法吸收時，就會迅速開啟(ON)以提高 Q 值(High-Q)，讓共振腔回復到低耗損狀態(low loss)。此時，自發輻射光子經由輸出鏡耦合(OC)的反射於共振腔內來回共振，由於腔內的增益遠大於損耗，因此，自發輻射光子以極快的速度放大，並於極短的時間內(約幾奈秒)將所累積的能量全部釋放，產生一高峰值的雷射脈衝(參照圖 4-1)。



### 4.1.1 Q 開關的種類

Q 開關的種類依其控制方式可分為主動式(Active Q-switch)與被動式(Passive Q-switch)兩種：

1. 主動式 Q 開關：可藉由外部機制控制開關的重複率。目前主要的機制有：機械式 Q 開關(Mechanical Q-switch)、電光式 Q 開關(Electro-optic Q-switch)、聲光式 Q 開關(Acousto-optic Q-switch) ... 等(參照圖 4-2)。
2. 被動式 Q 開關：開關的重複率決定於材料特性，無法藉由外部機制控制。早期使用染料(dye)作為飽和吸收體(saturable absorber)，但其除了有易變質、具有毒性、需經常更換...等缺點，有機染料更對 UV 光敏感，造成使用上的困擾。近年來，染料已被固態晶體所取代(如  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ) (參照圖 4-3)。

表 4-1 為各種 Q 開關技術優劣的比較。

### 4.1.2 主動式 Q 開關動作機制

主動式 Q 開關主要有三種類型：機械式 Q 開關(Mechanical Q-switch)、電光式 Q 開關(Electro-optic Q-switch)、聲光式 Q 開關(Acousto-optic Q-switch)。

1. 機械式 Q 開關(Mechanical Q-switch)：使用高轉速馬達轉動菱鏡以達到高重複率的脈衝輸出。其優點是成本低廉、構造簡單；缺點是馬達壽命短、開關速度緩慢、雷射穩定性差。



2. 電光式 Q 開關(Electro-optic Q-switch)：於共振腔內置入電光晶體與偏振片，藉由控制輸入電光晶體的電壓，改變入射光的偏振方向，造成共振腔內損耗，達到啟閉 Q 開關的作用。其優點是：反應速度快、適用於高增益的連續波雷射與高尖峰功率的脈衝雷射；缺點是：易潮解、價格昂貴、損壞閾值低。
3. 聲光式 Q 開關(Acousto-optic Q-switch)：於共振腔內置入聲光晶體，藉由控制輸入的射頻(RF, Radio Frequency)，對該聲光晶體產生壓力波變化，當入射光通過該聲光晶體時，會因射頻輸入的不同，而產生不同的繞射現象。其作用有如一個光學的相位光柵，當入射光進入此光柵，大部份會因繞射而偏離原本方向，形成布拉格散射(Bragg scattering)的效果。其優點是：高損壞閾值、關閉 Q 開關(OFF)時損耗低、關閉 RF 訊號即可轉換成連續波雷射；缺點是：僅適用於低增益雷射。

#### 4.1.3 被動式 Q 開關作動機制

被動式 Q 開關使用「飽和吸收體」(saturable absorber)作為控制 Q 開關的材料，開關的重複率決定於材料特性，無法藉由外部機制控制。飽和吸收體的穿透率會隨著入射光能量的增強而增加(參照圖 4-4)，當入射光能量不大時，飽和吸收體的穿透率較低，亦即會將大部分的入射光吸收，此時 Q 開關 OFF；隨著入射光能量增強時，飽和吸收體的穿透率亦隨之增加，當共振腔內的增益等於損耗時，飽和吸收體的穿透率增大至無法吸

收入射光，Q 開關即切換至 ON，此時，自發輻射光子在共振腔內以極快的速度來回共振放大，並於極短的時間內將累積的能量釋放出來，形成一高峰值的雷射脈衝(參照圖 4-5)。飽和吸收體的優點是：成本低廉、脈衝輸出穩定、使用簡單、體積小(雷射架構精巧)、高損傷閾值；缺點是：無法控制脈衝重複率、時序擾動問題(jitter)較嚴重。能當作被動式 Q 開關材料，至少須具備以下要件(參照圖 4-6)：

- 基態能階的吸收能力強 (亦即基態能階的吸收截面積  $\sigma_{gs}$  大)
- 上能階的生命週期長 (易達到居量反轉)
- 基態能階的吸收截面積( $\sigma_{gs}$ ) > 上能階的吸收截面積 ( $\sigma_{es}$ )

#### 4.1.4 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體簡介

目前被廣泛使用的飽和吸收體是  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 固態晶體，除了具備以上三個被動式 Q 開關的要件(基態能階吸收能力強、上能階的生命週期長、基態能階的吸收截面積 > 上能階的吸收截面積)之外，尚有以下優點：

- 在  $1\mu\text{m}$  附近有很好的吸收率，能匹配摻釹晶體的放射光譜。
- 光學品質佳(亦即切換至 ON 時透明度高)
- 輸出穩定
- 耐受性高
- 高損傷閾值
- 熱導係數高

因為具備上述優點， $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  常被使用於以摻鉻晶體為增益介質的被動式 Q 開關雷射系統中。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  飽和吸收體的吸收係數( $\alpha_0$ )與腔內能量( $E_i$ )成反比，其關係式如下所示：

$$\alpha_0(E) = \alpha_0 / (1 + E_i / E_s) \quad (4-2)$$

$$E_s = h\nu / \sigma_{gs} \quad (4-3)$$

$E_s$  是飽和狀態下的單位面積能量，是為定值。 $\sigma_{gs}$  則是基態能階的吸收截面積。因此，當腔內的能量愈大(即  $E_i$  愈大)，飽和吸收體的吸收效率就愈差，直到飽和吸收體無法再吸收入射光，此時，飽和吸收體會切換至透明狀態，亦即 Q 開關 ON，讓自發輻射光子通過，並於腔內來回共振放大，進而產生脈衝雷射。

然而，只要是介質，就一定會造成損耗，飽和吸收體亦不例外。無論初始穿透率( $T_0$ )多高的飽和吸收體，就算是切換至 ON(完全透明狀態)，仍會造成腔內最基本的能量損耗，此一損耗稱為殘餘吸收(residual absorption)，原因主要來自於兩方面：

- 基態能階的電子分布密度。當 Q 開關處於 ON(High-Q)時，基態能階尚有電子存在，並吸收能量躍遷至激發態能階。
- 激發態能階的電子吸收能量後，往更高能階躍遷，此現象即是 Excited-State absorption (ESA)。

當 Q 開關處於 ON(High-Q)時，以上兩個現象皆會因電子吸收能量往高能階躍遷，使飽和吸收體處於非飽和狀態，而造成腔內能量的基本損耗 (residual loss)。



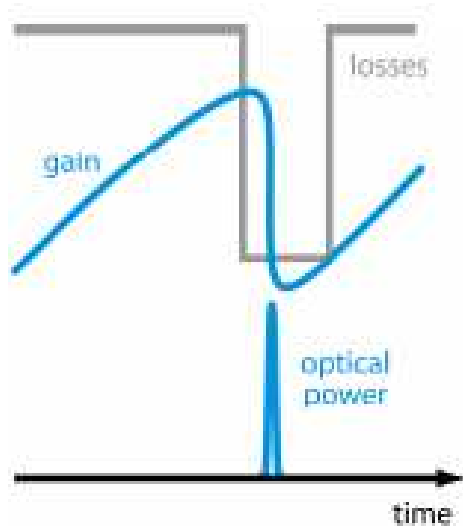


圖 4-1 Q 開關動作示意圖

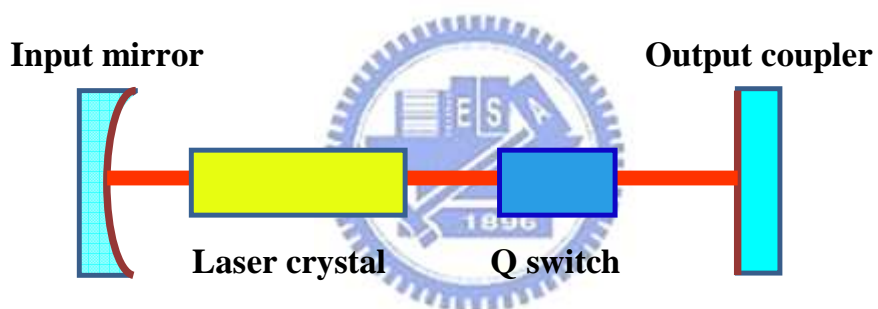


圖 4-2 主動式 Q 開關示意圖

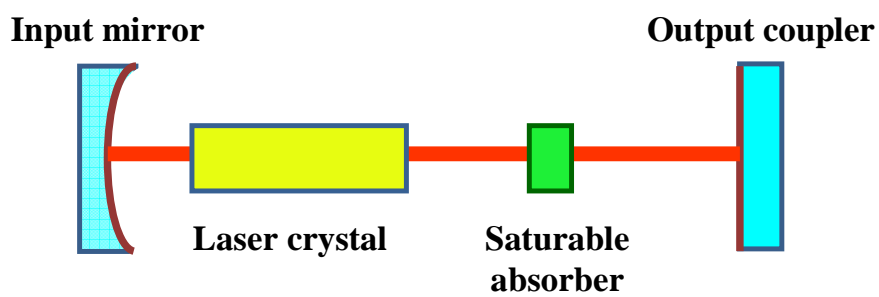


圖 4-3 被動式 Q 開關示意圖

表 4-1 各種 Q 開關技術優劣比較

Q開關種類	動作元件	優點	缺點
機械式Q開關 (Mechanical Q-switch)	菱鏡 高轉速馬達	成本低廉、構造簡單。	馬達壽命短、開關速度 緩慢、雷射穩定性差。
電光式Q開關 (Electro-optical Q-switch)	電光晶體 偏振裝置	反應速度快、適用於高 增益的連續波雷射與高 尖峰功率的脈衝雷射。	易潮解、價格昂貴、損 壞閾值低。
聲光式Q開關 (Acousto-optic Q-switch)	聲光晶體	高損壞閾值、關閉Q開 關(OFF)時損耗低、關 閉RF訊號即可轉換成連 續波雷射。	僅適用於低增益雷射。
被動式Q開關 (Passively Q-switch)	飽和吸收體	成本低廉、脈衝輸出穩 定、使用簡單、體積 小、高損傷閾值。	無法控制脈衝重複率、 時序擾動問題(jitter) 較嚴重。

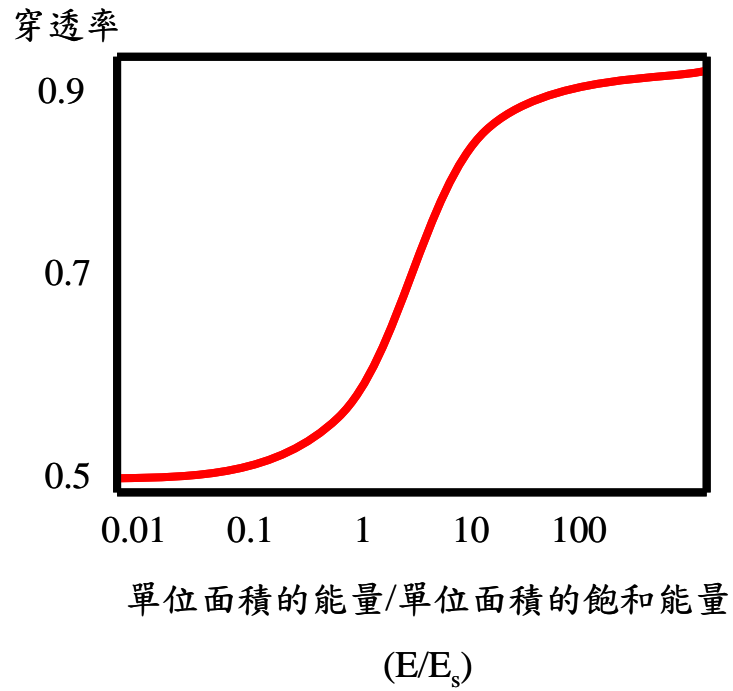


圖 4-4 飽和吸收體穿透率與入射光能量關係圖

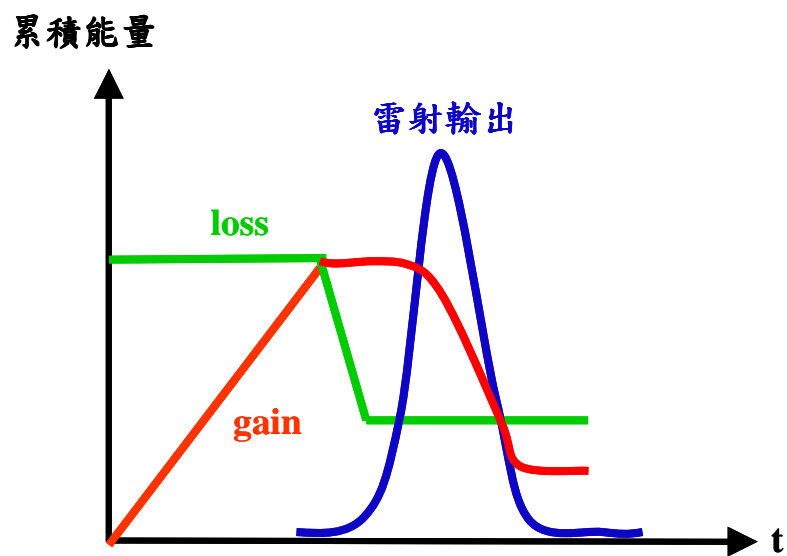


圖 4-5 被動式 Q 開關雷射脈衝產生示意圖

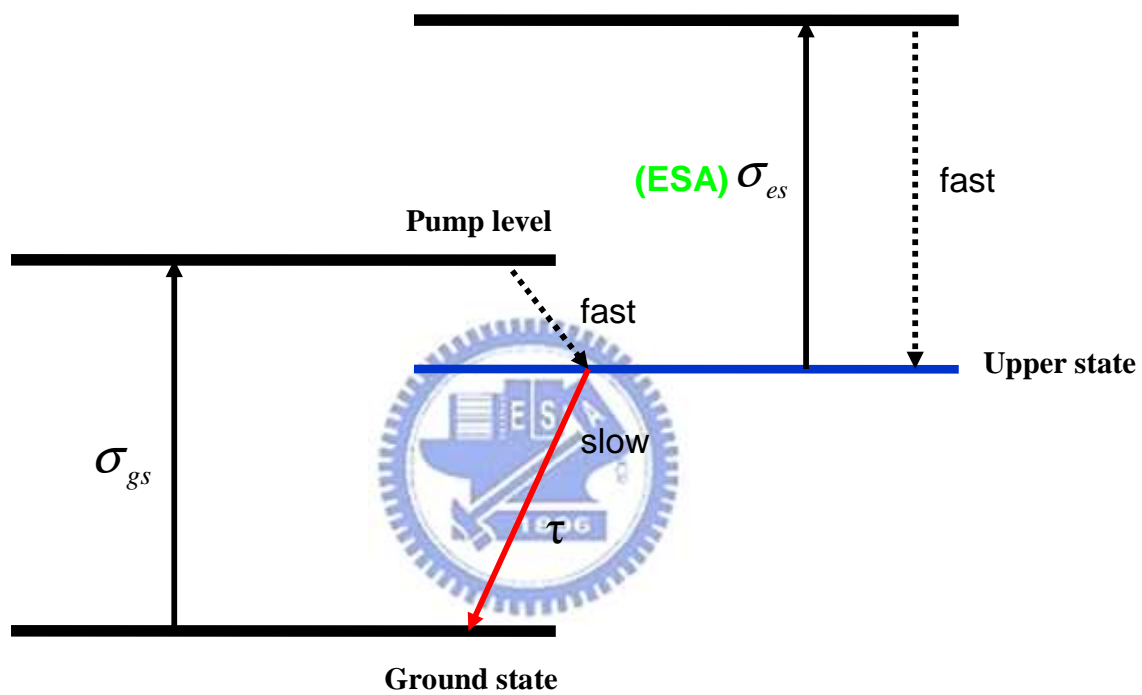


圖 4-6 飽和吸收體能階示意圖



## 4.2 實驗架構

- (1) 激發光源：806nm 二極體雷射
- (2) 光纖直徑：400 $\mu$ m
- (3) 增益介質：Nd:YLF (a-cut doping:0.8% 3x3x20 mm<sup>3</sup>, 3°-wedged)
- (4) 被動式 Q 開關：Cr<sup>4+</sup>:YAG 固態晶體(初始穿透率  $T_0=80\%$ 、95%)
- (5) 光學共振腔：腔長 5cm (凹平腔)
  - 前鏡(Input mirror)：曲率為 50cm (鍍膜:對於 808nm 具高穿透特性，對於 1.05 $\mu$ m 具高反射特性)
  - 輸出耦合鏡(Output Coupler)：反射率為 50%、64%、70%、80%、90%(鍍膜:對於 1.05 $\mu$ m 具反射特性)



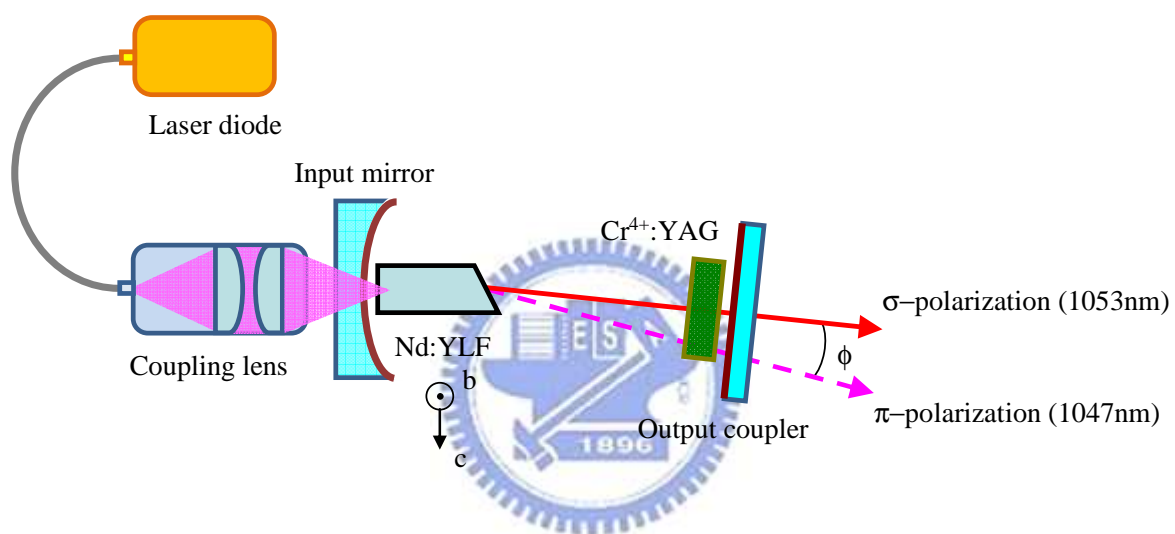


圖 4-7 被動式 Q 開關雷射(PQS laser)實驗架構圖

### 4.3 實驗結果與討論

本實驗的增益介質使用的是  $3^\circ$ -wedged 的 Nd:YLF 晶體，如第三章所述，當增益介質使用  $3^\circ$ -wedged 的 Nd:YLF 晶體時，無論前鏡的曲率與輸出鏡(OC)的反射率，最大輸出時的波長均為 1053nm ( $\sigma$  偏振方向)。其原因可能是：晶體因為切了  $3^\circ$ -wedged，使得  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向 (1053nm)離開晶體的出射角度明顯不同，因此，我們可以藉由調整 OC 的傾角將純  $\pi$  偏振方向(1047nm)與純  $\sigma$  偏振方向(1053nm)選擇出來。 $\pi$  偏振方向(1047nm)的增益雖然比  $\sigma$  偏振方向(1053nm)大，但因出射光角度較大，造成損耗較大；而  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的增益雖然比  $\pi$  偏振方向(1047nm)小，卻因出射光角度較小而損耗較小，使得  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的總增益比  $\pi$  偏振方向(1047nm)大，因此， $\sigma$  偏振方向(1053nm)勝出。實驗結果亦顯示，無論是連續波雷射或是脈衝雷射， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的輸出功率均高於  $\pi$  偏振方向(1047nm)。此外，脈衝雷射架構畢竟是在連續波雷射架構中置入 Q 開關元件，或多或少會造成雷射共振腔的損耗，因此，以同一偏振方向而言，脈衝雷射的輸出功率自然小於連續波雷射。

當飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )愈大時，可視為共振腔內的損耗愈小，因此，輸出功率愈高。飽和吸收體的初始穿透率愈大，也表示其愈易達到吸收飽和的狀態，亦即 Q 開關的切換頻率愈高(脈衝重複率愈高)。飽和吸收體的初始穿透率愈大，晶體能吸收的能量愈少，亦表示晶體內居量

反轉的電子亦愈少，因此，當 Q 開關切換至 ON 時，釋放能量的速度愈慢(脈衝寬度愈寬)。綜上所述，我們可以得到以下推論：大體而言，飽和吸收體的初始穿透率愈大，輸出功率會愈大、脈衝重複率會愈高、但脈衝寬度會愈寬、平均脈衝能量會愈低、尖峰功率亦會愈低。

此外，並非輸出耦合鏡 (OC) 的反射率愈高，雷射的輸出功率就愈大，而是在輸出鏡反射率為某一最佳值時有最大輸出功率。其原因是因為：

- 當輸出鏡反射率愈小時，腔內損耗較大，因此，輸出能量較低。
- 當輸出鏡反射率愈大時，能量因大部份封存於共振腔內，以致輸出能量較低。



## 1. 連續波雷射與被動式 Q 開關雷射的輸出功率比較

無論是連續波雷射或是被動式 Q 開關雷射， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的輸出功率均比  $\pi$  偏振方向(1047nm)高。以同一偏振方向而言，被動式 Q 開關雷射因置入 Q 開關造成共振腔損耗，所以輸出功率小於連續波雷射。此外，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )愈高，表示腔內損耗愈小，所以輸出功率愈高(參照圖 4-8)。

以  $\pi$  偏振方向(1047nm)而言，無論是連續波雷射或是被動式 Q 開關雷射架構，均在輸出耦合鏡反射率為 80% 時有最大輸出功率。

以  $\sigma$  偏振方向(1053nm)而言，在連續波雷射或飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )為 95% 的被動式 Q 開關雷射架構下，輸出鏡的反射率愈大，輸出功

率愈大；而在飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )為 80%的配置下，則在輸出耦合鏡反射率為 70%時有最大輸出功率。

## 2. 被動式 Q 開關雷射的脈衝重複率比較

如前所述，當飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )愈大，也表示其愈易達到吸收飽和的狀態，亦即 Q 開關的切換頻率愈高(脈衝重複率愈高)。

實驗亦顯示，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )為 95%的被動式 Q 開關雷射，其脈衝重複率高於初始穿透率( $T_0$ )為 80%的配置(參照圖 4-9)。且在相同的配置下(前鏡曲率、輸出耦合鏡反射率、飽和吸收體初始穿透率皆相同)， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的重複率會高於  $\pi$  偏振方向(1047nm)。

## 3. 被動式 Q 開關雷射的脈衝寬度比較

如前所述，飽和吸收體的初始穿透率愈大，晶體能吸收的能量愈少，亦表示晶體內居量反轉的電子亦愈少，因此，當 Q 開關切換至 ON 時，釋放能量的速度愈慢(脈衝寬度愈寬)。

實驗亦顯示，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )為 95%的被動式 Q 開關雷射，其脈衝寬度大於初始穿透率( $T_0$ )為 80%的配置(參照圖 4-10)。

## 4. 被動式 Q 開關雷射的脈衝能量比較

如前所述，無論是連續波雷射或是被動式 Q 開關雷射， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的輸出功率均比  $\pi$  偏振方向(1047nm)高。且以同一偏振方向而

言，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )愈高，脈衝重複率愈高，且因腔內損耗愈小，而使輸出功率愈高。由以下算式可得到雷射輸出的平均脈衝能量：

$$\text{脈衝能量(J)} = \text{輸出功率(W)} / \text{脈衝重複率(Hz)} \quad (4-4)$$

實驗顯示，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )為 80% 的被動式 Q 開關雷射，其平均脈衝能量大於初始穿透率( $T_0$ )為 95% 的配置(參照圖 4-11)。亦即，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )愈高，平均脈衝能量愈低。此外，在相同的配置下， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的平均脈衝能量大於  $\pi$  偏振方向(1047nm)。

## 5. 被動式 Q 開關雷射的尖峰功率比較

如前所述，飽和吸收體的初始穿透率愈大，脈衝寬度愈寬，平均脈衝能量愈低。由以下算式可得到雷射脈衝的尖峰功率：

$$\text{尖峰功率(W)} = \text{脈衝能量(J)} / \text{脈衝寬度(s)} \quad (4-5)$$

實驗顯示，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )為 80% 的被動式 Q 開關雷射，其尖峰功率大於初始穿透率( $T_0$ )為 95% 的配置(參照圖 4-12)。亦即，飽和吸收體的初始穿透率( $T_0$ )愈高，尖峰功率愈低。

## 6. 被動式 Q 開關雷射在 $\pi$ 偏振方向(1047nm)與 $\sigma$ 偏振方向(1053nm)的穩定性比較

實驗顯示，在同一配置下，被動式 Q 開關  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的脈衝

寬度與  $\pi$  偏振方向(1047nm)差不多，但重複率會高於  $\pi$  偏振方向(1047nm)，且脈衝輸出更穩定(參照圖 4-13)。亦即， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的表現優於  $\pi$  偏振方向(1047nm)。



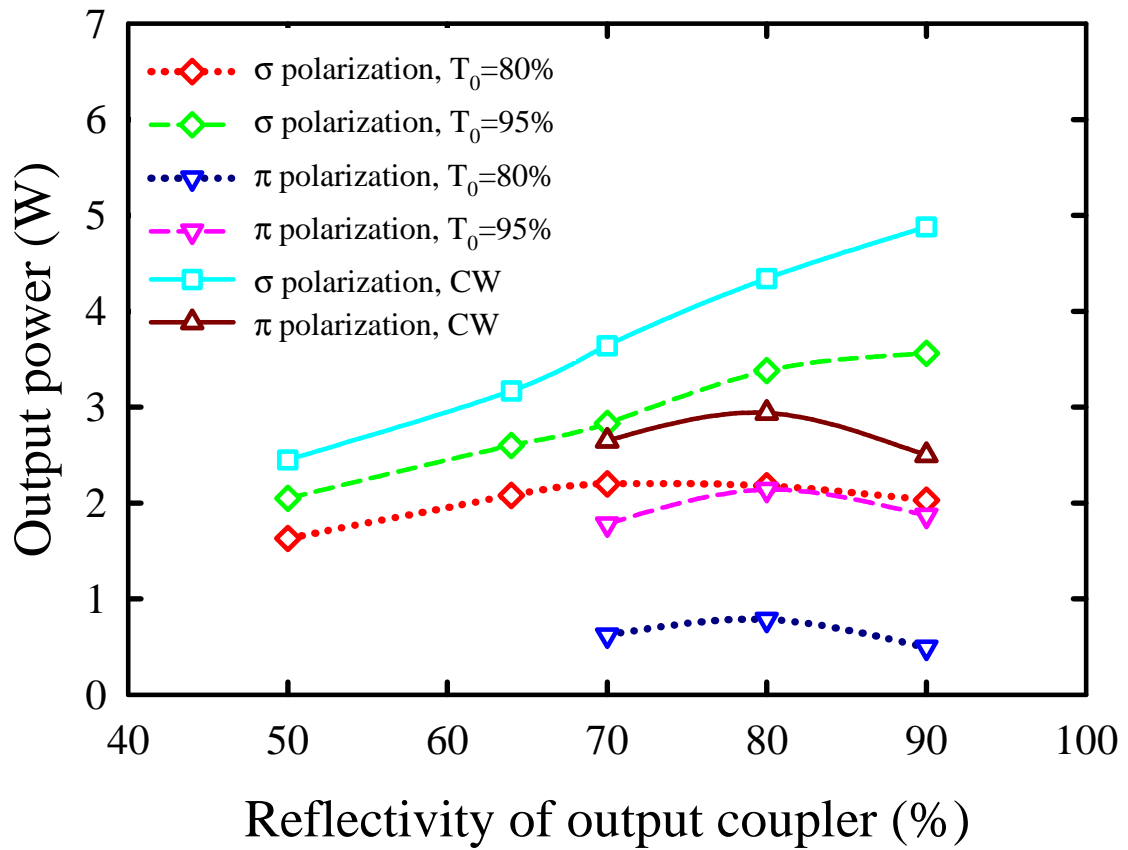


圖 4-8 連續波雷射與被動式 Q 開關雷射(初始穿透率為 80%、95%)在  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的輸出功率比較圖。



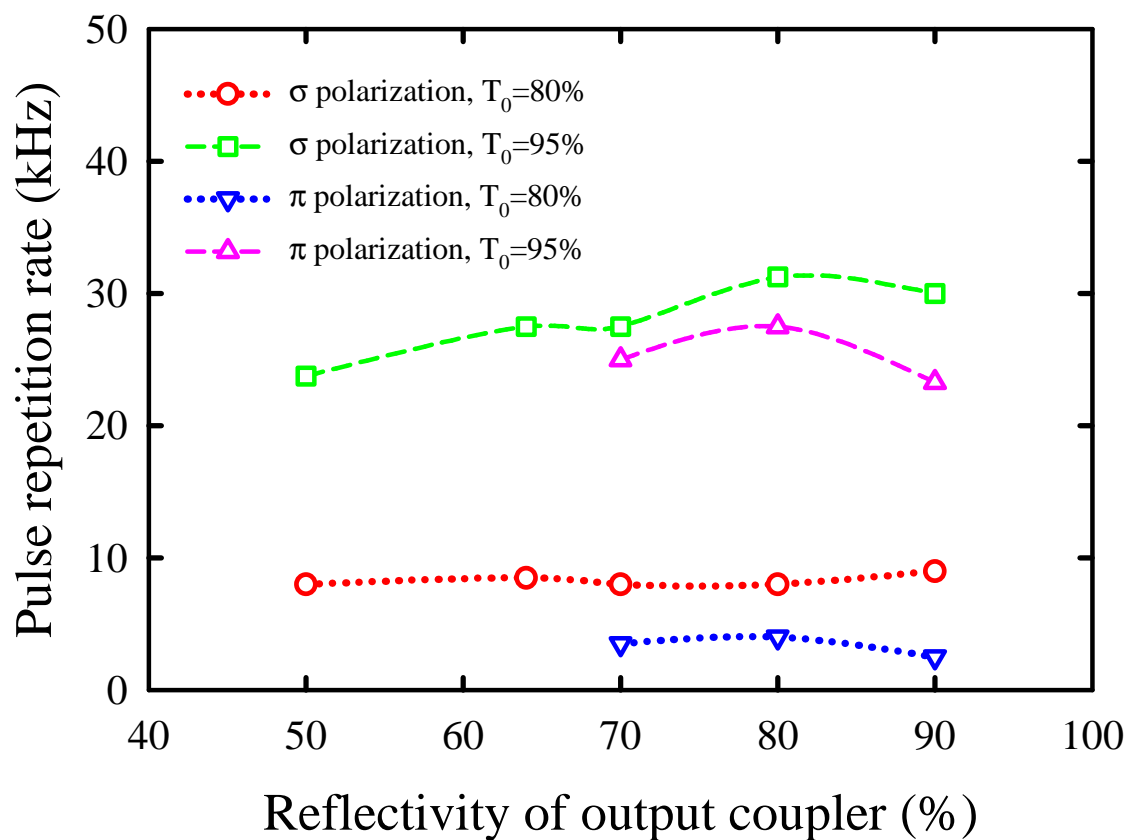


圖 4-9 被動式 Q 開關雷射(初始穿透率為 80%、95%)在  $\pi$  偏振方向(1047nm)

與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的脈衝重複率比較圖。

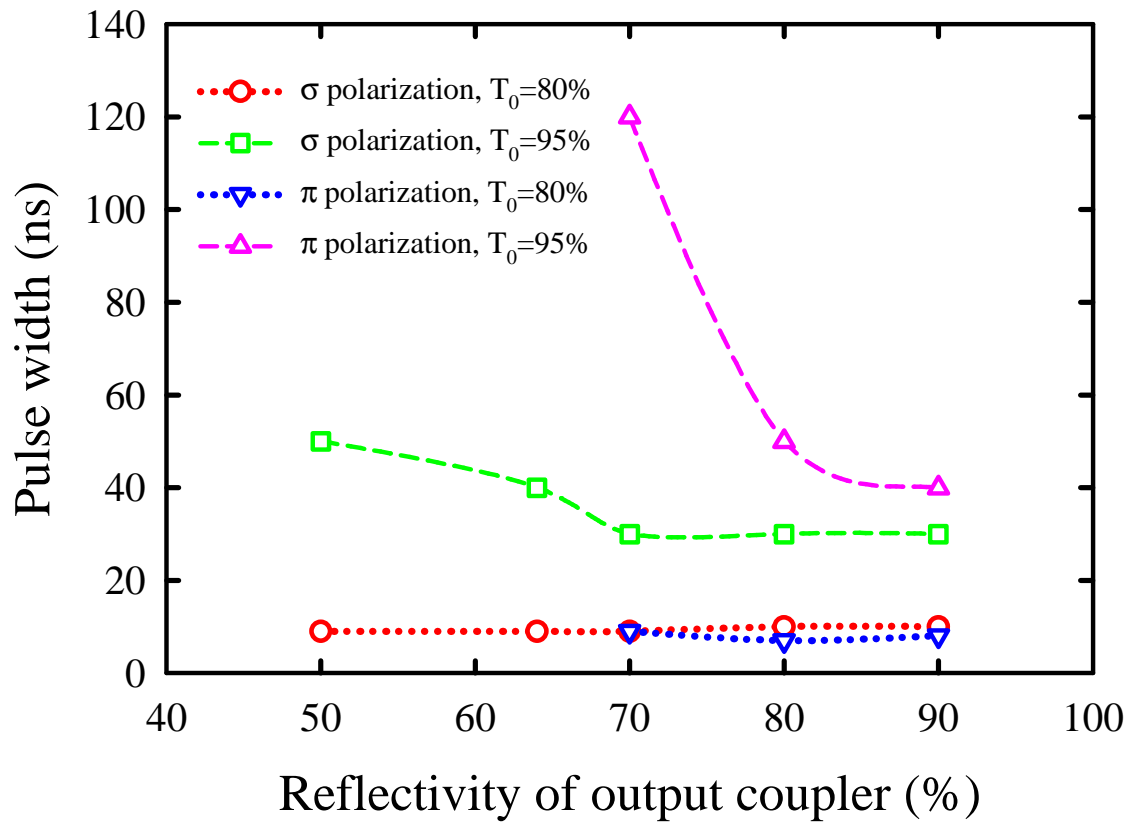


圖 4-10 被動式 Q 開關雷射(初始穿透率為 80%、95%)在  $\pi$  偏振方向

(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的脈衝寬度比較圖。

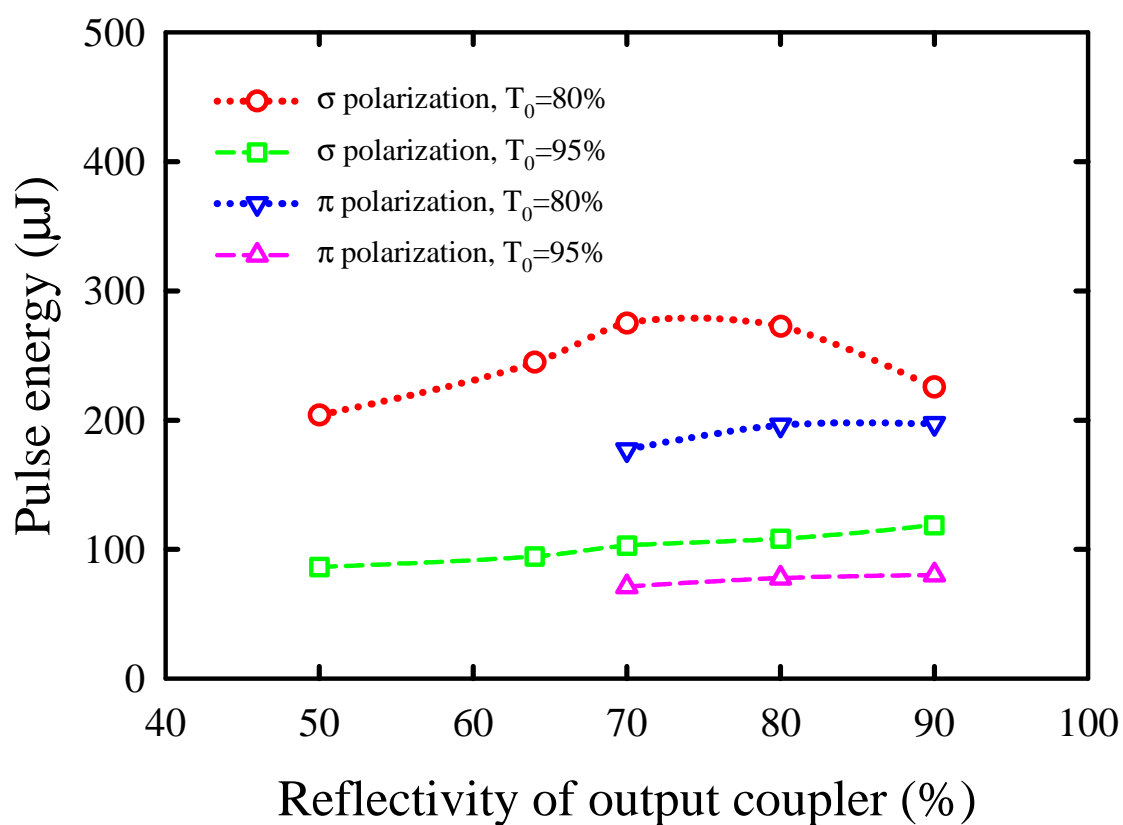


圖 4-11 被動式 Q 開關雷射(初始穿透率為 80%、95%)在  $\pi$  偏振方向

(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的脈衝能量比較圖。

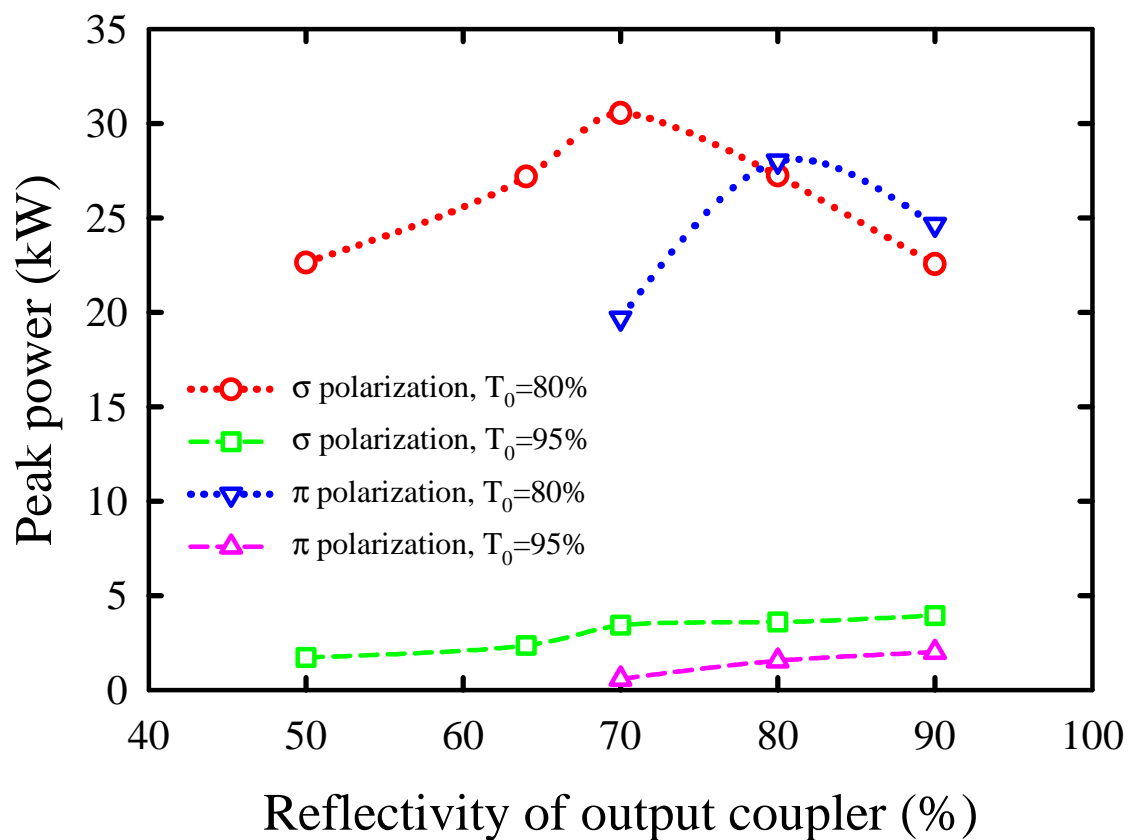


圖 4-12 被動式 Q 開關雷射(初始穿透率為 80%、95%)在  $\pi$  偏振方向

(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的尖峰功率比較圖。

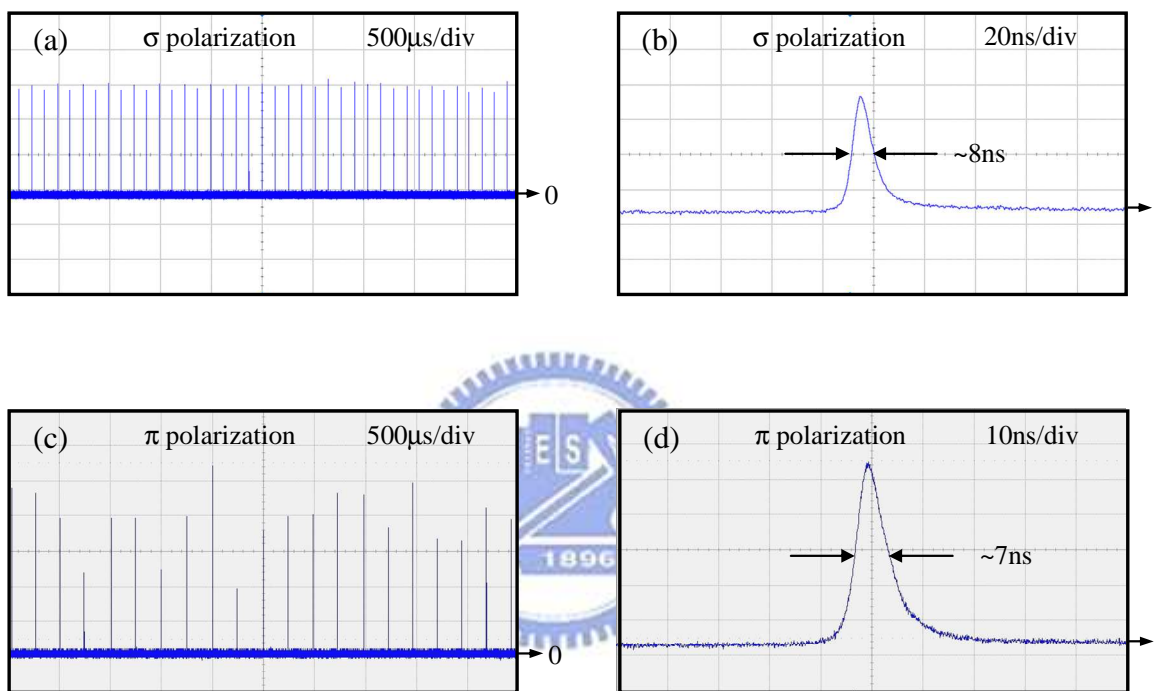


圖 4-13 被動式 Q 開關雷射在  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm)的穩定性比較圖。

## 4.4 結論

大體而言，飽和吸收體的初始穿透率愈大，輸出功率雖會愈高、卻會因重複率愈高、脈衝寬度愈寬、而造成平均脈衝能量與尖峰功率會愈低。因此，在設計共振腔的架構時，應針對以上特性一併考慮，亦即：

- 飽和吸收體的初始穿透率愈大，愈易實現輸出功率高、重複率高的脈衝雷射，但缺點是平均脈衝能量與尖峰功率會愈低。
- 飽和吸收體的初始穿透率愈小，愈易實現高脈衝能量、高尖峰功率的脈衝雷射，但缺點是輸出功率與重複率會愈低。

本實驗結果亦與上述推論一致。實驗顯示，當置入  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  飽和吸收體時，初始穿透率( $T_0$ )=95%的配置，其輸出功率、重複率、脈衝寬度均大於  $T_0$ =80%的配置；而其脈衝能量、尖峰功率則均小於  $T_0$ =80%的配置。此外，更重要的是，實驗顯示了  $\sigma$  偏振方向(1053nm)在被動式 Q 開關的脈衝雷射架構下，表現得比  $\pi$  偏振方向(1047nm) 更穩定。

## 第五章 結論與未來展望

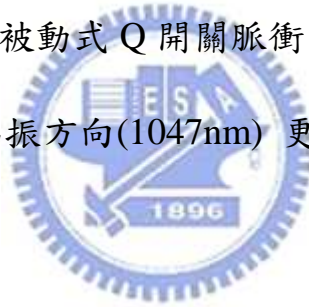
### 5.1 結論

本實驗為了研究 a-cut Nd:YLF 在  $1.05\mu\text{m}$  波段的兩個波長( $\pi$  偏振方向, 1047nm 與  $\sigma$  偏振方向, 1053nm)的競合與表現, 主要分成連續波雷射(CW laser)與被動式 Q 開關脈衝雷射(PQS laser)兩大實驗架構, 並分為三部份討論兩個波長的各種現象。

第一部分是以前以  $0^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體作為增益介質的端面激發固態二極體連續波雷射。在凹平腔、平平腔的設置下, 利用調整輸出耦合鏡傾角的選頻方式選出  $\pi$  偏振方向(1047nm)與  $\sigma$  偏振方向(1053nm), 並觀察其競合與表現。我們發現, 在凹平腔的設置下, 前鏡的曲率愈小或輸出鏡的反射率愈小, 愈不容易將  $\sigma$  偏振方向(1053nm)選出, 即便選出了, 其輸出功率亦不高; 且  $\pi$  偏振方向(1047nm)雖因增益大而勝出, 光束品質卻不佳; 而在平平腔的設置下,  $\sigma$  偏振方向(1053nm)雖因熱透鏡效應較小而勝出, 光束品質卻不佳。

第二部分則是在第一部分的實驗架構下, 置換  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 晶體為增益介質的連續波雷射。不同於  $0^\circ$ -wedged 時的選頻不易與光束品質不佳, 在  $3^\circ$ -wedged 的設置下, 無論是在凹平腔或平平腔, 我們均可藉由調整輸出耦合鏡傾角的方式輕易的將兩個波長分別選出, 並且在  $\sigma$  偏振方向(1053nm)得到良好的光束品質。

第三部份是以  $3^\circ$ -wedged 的 a-cut Nd:YLF 為增益介質，搭配  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 飽和吸收體的被動式 Q 開關脈衝雷射，並針對  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 的初始穿透率為 80% 與 95% 的輸出表現作了多面向的比較。實驗發現，並非輸出耦合鏡(OC)的反射率愈高，雷射的輸出功率就愈大，而是在輸出耦合鏡反射率為某一最佳值時有最大輸出功率；此外，輸出功率、脈衝重複率會隨著飽和吸收體的初始穿透率增加而增加；而平均脈衝能量、尖峰功率卻會隨著飽和吸收體的初始穿透率增加而減少。因此，設計共振腔時，應考慮以上特性，選擇適當的飽和吸收體初始穿透率及輸出耦合鏡反射率，方可實現所欲求。此外，更重要的是，在被動式 Q 開關脈衝雷射的架構下， $\sigma$  偏振方向(1053nm)的輸出表現比  $\pi$  偏振方向(1047nm) 更穩定、光束品質更好。



## 5.2 未來展望

在未來的工作中，可進一步探討不同配置下橫向模態的形成原因；或是改變腔長，觀察熱效應對於  $\sigma$  偏振方向(1053nm)與  $\pi$  偏振方向(1047nm)的競合表現有何影響。另一研究方向則是在相同的雷射架構下，將飽和吸收體置換為主動式 Q 開關(機械式、電光式、聲光式)，觀察 Nd:YLF 晶體  $\sigma$  偏振方向(1053nm)與  $\pi$  偏振方向(1047nm)的各種輸出表現。

此外，亦可利用 Nd:YLF 實現非線性轉換，例如：OPO(Optical Parameter Oscillator，光學參數震盪器)、倍頻與三倍頻轉換，觀察不同波長表現對上述非線性轉換的影響。



## 參考文獻

- [1] Christoph Bollig, Cobus Jacobs, M.J. Daniel Esser, Edward H. Bernhardt, Hubertus M. Von Bergmann, “Power and energy scaling of a diode-end-pumped Nd:YLF laser through gain optimization” , OPTICS EXPRESS, Vol.18, No.13, 13993–14003, June 2010.
- [2] M.J.Daniel Esser, “Diod-End-Pumped Solid-State Lasers” , University of Stellenbosch, Science master degree, April 2005.
- [3] B. Frei, J.E. Balmer, “1053-nm-wavelength selection in a diode-laser-pumped Nd:YLF laser” , APPLIED OPTICS, Vol.33, No. 30, 6942–6946, October 1996.
- [4] A. Agnesi, S. Dell’ Acqua , “High-peak-power diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser” , Applied Physics B, Laser and Optics, 76, 351–354, 2003.

- [5] P. J. Hardman, W. A. Clarkson, G. J. Friel, M. Pollnau, D. C. Hanna, " Energy-Transfer Upconversion and Thermal Lensing in High-Power End-Pumped Nd:YLF Laser Crystals" , IEEE Journal of Quantum Electronics, 35, 647-655, April 1999.
- [6] Keln J.Kuhn, Laser Engineering, Prentice-Hall, Inc., United States of America, 1998.
- [7] Rüdiger Paschotta, Field Guide to Lasers, SPIE, Bellingham, Washington USA, 2007.
- [8] Walter Koechner, Solid-State Laser Engineering, Springer, sixth edition, New York, USA, 2006.
- [9] 姚建銓，徐德剛，全固態激光及非線性光學頻率變換技術，科學出版社，北京，2007。