

國立交通大學

理學院應用科技學程

碩士論文

摻釹鋁酸釷晶體雷射的各種運轉之研究

Investigation of the characteristic of Nd:YAP crystal laser

研究生：林世勇

指導教授：陳永富 教授

中華民國一百零三年一月

摻釹鋁酸鈮晶體雷射的各種運轉之研究

Investigation of the characteristic of Nd:YAP crystal laser

研究生：林世勇

Student：Shi-Yung Lin

指導教授：陳永富 教授

Advisor：Dr.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

Jan 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零三年一月

摻釹鋁酸鈮晶體雷射的各種運轉之研究

學生：林世勇

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

本論文著重在 Nd:YAP 雷射的連續波運作和脈衝波運作等兩種運作模式的研究。在連續波運作的研究上，因為 Nd:YAP 晶體在 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 的螢光光譜具有豐富的光譜線，所以我們的研究工作重點在於輸出波長的選擇；在脈衝波運作的研究上，我們利用被動式 Q 開關(Passively Q-switch)和自鎖模(Self-mode locking)兩種方式來產生脈衝波雷射，並且個別研究被動式 Q 開關雷射和自鎖模雷射的表現。以下分別針對(一)連續波運作的研究、(二)脈衝波運作的研究等兩個研究作個概要性介紹。讀者可以看到我們以 Nd:YAP 作為增益介質來實現了波長可選的連續波雷射、被動式 Q 開關脈衝雷射和自鎖模脈衝雷射三種雷射的輸出表現。

關鍵字：摻釹鋁酸鈮晶體、被動式 Q 開關雷射、自鎖模雷射

Investigation of the characteristic of Nd:YAP crystal laser

Student: Shi-Yung Lin

Advisor: Dr. Yung-Fu Chen

Department of Degree Program of Applied Science and Technology

National Chiao Tung University

Abstract

We demonstrate Nd:YAP crystal laser in both continuous wave and pulse wave operation in this thesis. Experimentally, the investigation of the fluorescent spectrum in the ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ transition, from Nd:YAP crystal laser operation in continuous wave from manifests the feasibility of tunable single- and multi-wavelength operations. The passive Q-switch and Self-mode locking pulse wave laser were used and studied their lasing performance, respectively. One can realize the Nd:YAP crystal laser with tenability and feasibility is capable to perform the function of continuous wave pumping, PQS, as well as self-mode locking.

Key words :Nd:YAP crtstal 、 passive Q-switch laser 、 self-mode-locked laser

誌謝

僅將誌謝獻給每一個曾經在我的人生路上給我鼓勵的你們。在鍵盤上敲出這論文的第一個字開始，就期待著寫誌謝的到來。在這篇論文完成的前夕，想起了一句電影對白：「結束時總會想到開始」。回憶由踏入陳永富老師的研究室大門起，研究論文就從這扇大門開始，誌謝也從此展開。

首先，感謝指導教授陳永富老師。跟隨陳老師做學問過程中，您認真嚴謹的治學態度加上和藹的關心讓學生有如沐春風般的感受，特別在教學以外的身教、言教，更讓我多所省思，收穫良多，深深期以學習的智慧榜樣。接著要感謝曾映舜博士，感謝你一年多來在實驗流程的教導、實驗數據的分析，論文撰寫的協助、悉心批閱並容忍我個性的缺點。感謝黃郁仁博士，對實驗流程的修正，實驗現象的剖析。特別感謝好友信豪，謝謝你指引我通往寶山求取知識的道路。謝謝台積電長官東利、福哥、柱子、阿信、柏誠，你們寫的推薦信。謝謝台積電的同事律璋、家明，讓我提早下班，幫我分擔晚上七、八點過後公司的工作。感謝信達傳承了交大人的風範，協助口試後的畢業流程。

龍君，謝謝妳當我的小書僮，陪著我完成學業，接下來當我的另一半，陪我一起走向美好的人生旅途。最後，感謝我的家人與猴頭幫，你們精神上的支持，讓我完成這期盼已久的學業，謝謝你們！

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖示目錄.....	VII
表格目錄.....	VXI
第一章 介紹.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 本論文組織.....	2
第二章 摻釹鋁酸鈮(Nd:YAP)簡介.....	3
2.1 Nd:YAP 晶體特性.....	3



2.2 Nd:YAP 的吸收光譜與螢光光譜	4
第三章 連續波雷射(CW laser)	8
3.1 實驗架構.....	8
3.2 實驗結果與討論.....	9
3.2.1 Etalon 理論	10
3.2.2 Mathcad 模擬 etalon.....	10
3.3 結論.....	11
第四章 被動式 Q 開關雷射(PQS laser)	27
4.1 Q 開關簡介.....	27
4.1.1 Q 開關的種類	28
4.1.2 主動式 Q 開關動作機制	29
4.1.3 被動式 Q 開關作動機制	30
4.1.4 Cr^{4+} :YAG 飽和吸收體簡介	31
4.2 實驗架構.....	33
4.3 實驗結果與討論.....	34
4.4 結論.....	36



第五章 自鎖模雷射(Self-mode-locked laser).....	55
5.1 實驗架構.....	55
5.2 實驗結果與討論.....	56
5.3 結論.....	57
第六章 結論與未來展望.....	74
6.1 結論.....	74
6.2 未來展望.....	75
參考文獻.....	76



圖示目錄

圖 2-1 Nd:YAP 吸收光譜(波長-吸收率) : (a) 500~1000 nm ; (b) 760~840 nm 。	6
圖 2-2 b-cut Nd:YAP(doping:1%)Nd:YAP 螢光光譜圖: (a) 820~1500 nm ; (b) 1040~1120 nm 。	7
圖 3-1 連續波雷射(CW laser)實驗架構圖。	12
圖 3-2 0°-wedged Nd:YAP , 前鏡曲率 50 cm , 耦合輸出鏡反射率 94% 設置下, 輸入功率為 15.4 W 時的連續波雷射: (a) 輸出光譜圖; (b) 輸出功率示意圖。	13
圖 3-3 波長可選的連續波雷射(CW laser)實驗架構圖。	14
圖 3-4 0°-wedged Nd:YAP , 前鏡曲率 50 cm , 耦合輸出鏡反射率 94% 設置下, 輸入功率為 15.4 W 時增加 etalon 法線與光路夾角激發出 1080 與 1084 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。	15

圖 3-5 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 94% 設置下，輸入功率為 15.4 W 時增加 etalon 法線與光路夾角激發出 1073、1080、1084 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。.....	16
圖 3-6 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 94% 設置下，輸入功率為 15.4 W 時增加 etalon 法線與光路夾角激發出 1073、1080 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。.....	17
圖 3-7 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 94% 設置下，輸入功率為 15.4 W 時增加 etalon 法線與光路夾角激發出 1073 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。.....	18
圖 3-8 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出: (a) 雙波長(1080,1084) nm 藉由調降輸入功率輸入功率至 4.56 W 時產生； (b) 單波長 1084 nm 的光譜圖。.....	19
圖 3-9 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出: (a) 三波長(1073,1080,1084) nm 藉由調降輸入功率輸入功率至 4.56 W 時產生； (b) 雙波長 (1073,1084) nm 的光譜圖。.....	20

圖 3-10 Nd:YAP 輸出單波長 1073 nm、1080 nm、1084 nm 單波長 I-P 曲線示意圖。	21
圖 3-11 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出單波長 1080 nm 波長可調動示意圖。	23
圖 3-12 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出單波長 1073 nm 波長可調動示意圖。	24
圖 3-13 輸入功率 4.56 W、Nd:YAP 輸出單波長 1084 nm 波長可調動示意圖。	25
圖 3-14 Mathcad 軟體模擬法布里珀羅理論示意圖。	26
圖 4-1 Q 開關動作示意圖。	37
圖 4-2 Q 開關種類示意圖。	38
圖 4-3 被動式 Q 開關示意圖。	39

圖 4-4 飽和吸收體穿透率與入射光能量關係圖。	41
圖 4-5 被動式 Q 開關雷射脈衝產生示意圖。	42
圖 4-6 被動式 Q 開關雷射(PQS laser)實驗架構圖。	43
圖 4-7 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射輸出表現示意圖。	44
圖 4-8 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射脈衝重複率示意 圖。	45
圖 4-9 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射脈衝寬度示意圖。	46

圖 4-10 0°-wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 90% 設置下, 輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射脈衝能量示意圖。	47
圖 4-11 0°-wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 90% 設置下, 輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射尖峰功率示意圖。	48
圖 4-12 0°-wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 90% 設置下, 輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射在 100 ns、200 ns、 10 ns 穩定性示意圖。.....	49
圖 4-13 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與週 期標準差表現示意圖。.....	50
圖 4-14 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與脈衝 寬度表現示意圖。.....	51
圖 4-15 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與脈衝 能量現示意圖。.....	52

圖 4-16 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與尖峰
功率現示意圖。 53

圖 4-17 0° -wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 90%
設置下, 輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射在與脈衝激發源
被動式 Q 開關雷射在 100 ns、200 ns、10 ns 穩定性示意圖。 54

圖 5-1 自鎖模雷射射(self mode locking laser)實驗架構圖。 58

圖 5-2 自鎖模雷射在: (a) 2 ns/div; (b) 200 ns/div 時的輸出波; (c) 脈
衝重複率示意圖; (d) 輸出光譜; (e) 自相關脈衝波形。 59

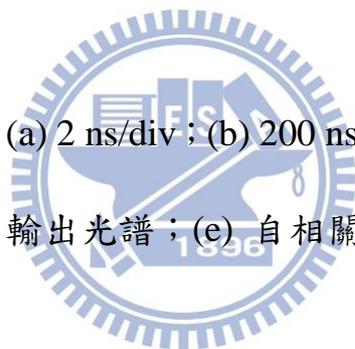


圖 5-3 自鎖模雷射射(tilting gain medium+wedged O.C)實驗架構圖。
..... 60

圖 5-4 自鎖模雷射射(tilting gain medium+wadged O.C): (a) 2 ns/div; (b)
200 ns/div 時的輸出波; (c) 脈衝重複率示意圖; (d) 輸出光譜; (e) 自
相關脈衝波形。 61

圖 5-5 自鎖模雷射在腔內 d 值約等於 0 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550\text{ ps}\sim 550\text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60\text{ ps}\sim 60\text{ ps}$)。..... 62

圖 5-6 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 1 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550\text{ ps}\sim 550\text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60\text{ ps}\sim 60\text{ ps}$)。..... 63

圖 5-7 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 2 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550\text{ ps}\sim 550\text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60\text{ ps}\sim 60\text{ ps}$)。..... 64



圖 5-8 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 3 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550\text{ ps}\sim 550\text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60\text{ ps}\sim 60\text{ ps}$)。..... 65

圖 5-9 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 4 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550\text{ ps}\sim 550\text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60\text{ ps}\sim 60\text{ ps}$)。..... 66

圖 5-10 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 5 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜;
(b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps~550 ps); (c) 自相關量測波形
(展開範圍-60 ps~60 ps) 。 67

圖 5-11 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 6 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜;
(b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps~550 ps); (c) 自相關量測波形
(展開範圍-60 ps~60 ps) 。 68

圖 5-12 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 7 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜;
(b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps~550 ps); (c) 自相關量測波形
(展開範圍-60 ps~60 ps) 。 69

圖 5-13 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 8 mm 時其雷射:(a) 輸出光譜;
(b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps~550 ps); (c) 自相關量測波形
(展開範圍-60 ps~60 ps) 。 70

圖 5-14 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 9 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜;
(b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps~550 ps); (c) 自相關量測波形
(展開範圍-60 ps~60 ps) 。 71

圖 5-15 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 10.5 mm 時其雷射:(a) 輸出光譜;
(b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps~550 ps); (c) 自相關量測波形
(展開範圍-60 ps~60 ps) 。 72

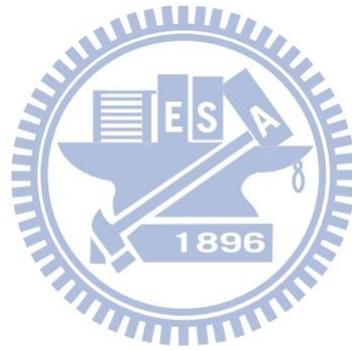
圖 5-16 自鎖模雷射不同腔內 d 值 I-P 曲線示意圖。 73



表格目錄

表 3-1 1073 nm、1080 nm、1084 nm 單波長雷射輸出比較表。..... 22

表 4-1 各種 Q 開關技術優劣比較。..... 40



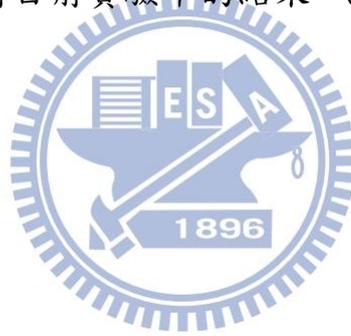
第一章 介紹

1.1 研究動機與目的

Nd:YAG 晶體因其優異的光學與機械特性，如今在高能量固態雷射的領域中，已被廣泛地採用的增益介質。然而，Nd:YAG 晶體是等向性晶體不具有自然的雙折射(Natural birefringence)，使得在高功率線偏振實驗中，因為 Nd:YAG 會產生熱引起的雙折射效應(Thermal birefringence)，所以進行線偏振運作時會有熱退偏振(Thermal depolarization)的損失。近年來，隨著長晶技術有著很好的進展，能夠獲得品質良好的 Nd:YAP 晶體(也被稱為 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}$ 或 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$)。在化學成分上，Nd:YAP 和 Nd:YAG 者都是由 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 所衍生的晶體，只是不同的成分比例差異，因此它們的物理性質非常相似；但因為它們在晶體結構上的差異，使得它們的光學性質有明顯的不同。Nd:YAP 的晶體結構為六角斜方晶結構，是個非等向性的晶體，它具有自然的雙折射的光學性質。自然的雙折射可以抑制熱引起的雙折射所造成無法預期的損耗，因此 Nd:YAP 晶體具有潛力取代 Nd:YAG 晶體成為高功率固態雷射的增益介質。此外，Nd:YAP 晶體具有豐富的螢光光譜線，其中在 1040-1115 nm 區間有幾個明顯可見的光譜線。因為 Nd:YAP 不但能夠成為高功率固態雷射的增益介質並且又具有豐富的螢光光譜線，其具有很高的應用價值，因此我們對 Nd:YAP 雷射做詳細的研究。

1.2 本論文組織

本文論文共有六章，第二章介紹 Nd:YAP 晶體的特性，在這當中，我們會呈現晶體的吸收光譜以及晶體的螢光光譜。第三章敘述波長可選的連續波雷射實驗，在實驗中，我們置入玻璃片於光學共振腔內並進行選擇波長的實驗，並闡釋法布里-珀羅理論。第四章描述被動式 Q 開關脈衝雷射，我們在光學腔體中置入 Cr^{4+} :YAG 飽和吸收體作為被動式開關原件，並且實現被動式 Q 開關雷射，量測其輸出功率的表現。第五章講述我們實現 Nd:YAP 的自鎖模雷射，在第五章當中，可以看見我們如何優化自鎖模雷射以及控制脈衝寬度。最後第六章中探討目前實驗中的結果，統整成結論，作為未來可行的實驗方向。



第二章 摻釹鋁酸鈮(Nd:YAP)簡介

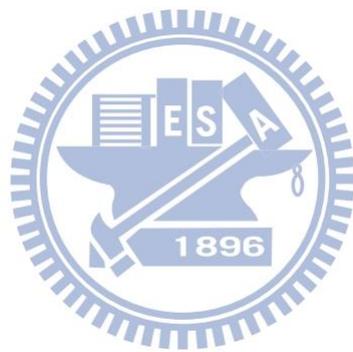
2.1 Nd:YAP 晶體特性

摻釹鋁酸鈮晶體的化學表示式為 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ ，簡記為 Nd:YAP，是畸變鈣鈦礦結構，屬於斜六方晶系，其空間群為 $D_{2h}^{16} - P_{6mm}$ ，其 a、b、c 軸互相垂直，為非等向性的負雙軸晶體。Nd:YAP 的熱擴散性能與抗熱衝擊性能比大多數基質晶體好，比紅寶石差些。因為 Nd:YAP 和 Nd:YAG 都是 Y_2O_3 與 Al_2O_3 的二元化合物，只是不同的成分比例差異，因此 Nd:YAP 的物理、化學、機械和熱性能都與 Nd:YAG 相近。生成 Nd:YAP 晶體與 Nd:YAG 晶體方法類似，使用高頻感應加熱拉提法。因為 Nd:YAP 比 Nd:YAG 相應的儲能大，Nd:YAP 晶體被稱為中等儲能晶體雷射材料。它的螢光線寬隨著溫度升高和 Nd^{3+} 離子濃度的增加而增寬。晶體中 Nd^{3+} 離子的螢光強度隨不同的偏振方向而有改變，隨溫度的增加而減少。屬於低晶系的 Nd:YAP 晶體由於它的光學向異性與雙折射特性使它具有特殊的雷射特性。當選用的光軸方向為結晶軸 b 軸時，b-cut 可以得到高增益性能，供連續波運轉及非線性光學振盪用。當選用的光軸方向為結晶軸 c 時，可以得到低增益和高儲能的性能，供脈衝與 Q-switch 使用。由於 Nd:YAP 晶體具有雙折射性，因此當輸入偏振光時，不會像 Nd:YAG 一樣觀察到熱退偏的現象，此外 Nd:YAP 還可以採 II 類 KTP 晶體實現非臨界相位匹配，獲得 $0.54 \mu\text{m}$ 二次諧波($1.08 \mu\text{m}$)與 $2.16 \mu\text{m}$ 參量放大($1.08 \mu\text{m}$)。

2.2 Nd:YAP 的吸收光譜與螢光光譜

摻釹晶體在 1.06 μm 雷射波長備受關注，由於晶體有較寬的吸收光譜與螢光光譜，有利於高效率半導體雷射作為激發光源與超短鎖模脈衝雷射的產生，並有優異的輸出功率 1.3 μm 的光波有廣泛的運用，例如：通信、光纖感測、測距和數據存取。此外，雙波長鎖模雷射的應用在 THz 輻射產生器和探針量測儀器。多波長雷射的應用在醫療儀器與非線性光學混頻器高重覆率雷射可應用於光頻梳，低噪音微波源、高速光採樣、光學時鐘、超快光譜、粒子加速器和大容量通信系統。與其它技術相比，固態鎖模雷射本質上具有高平均輸出功率、成本低、體積小、長期穩定性和優異的定時抖動，是有利於實現高重覆率操作的優點。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。雷射晶體的吸收光譜與螢光光譜是為兩個重要光學特性。在固態雷射研究中，它們對於雷射研究人員提供有效用的資訊。我們量測螢光光譜的目的是為了找出可以被激發的雷射波長。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:YAP 的吸收光譜主要有五個區段，分別是在 500~540 nm、560~600 nm、720~760 nm、780~830 nm、850~940 nm，圖 2-1 (a) 所示。晶體在 560~600 nm、720~760 nm 有較高的吸收係數，圖 2-1 (b) 所示。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 806 nm 雷射二極體作為激發光源。Nd:YAP 晶體螢光光譜在 ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{11/2}$ 躍遷中有非常豐富的光譜線。因為 Nd:YAP 的晶格結構為是非等向性,從不同

的晶軸方向量測螢光光譜,會發現光譜線的強度因不同軸向而有所改變。我們發現光譜線的強度與線寬會因不同晶體軸向有所差異。圖 2-2 (a) 與 (b) 中說明 c 軸偏振中最強的波長是 $1.0795 \mu\text{m}$ 。Nd:YAP 的螢光光譜主要有三個區段，分別是在 $850\sim 930 \text{ nm}$ 、 $1040\sim 1120 \text{ nm}$ 、 $1310\sim 1440 \text{ nm}$ 。在 $1040\sim 1120 \text{ nm}$ 區間為我們感興趣的光譜區間，因此我們針對此區間做深入的研究。



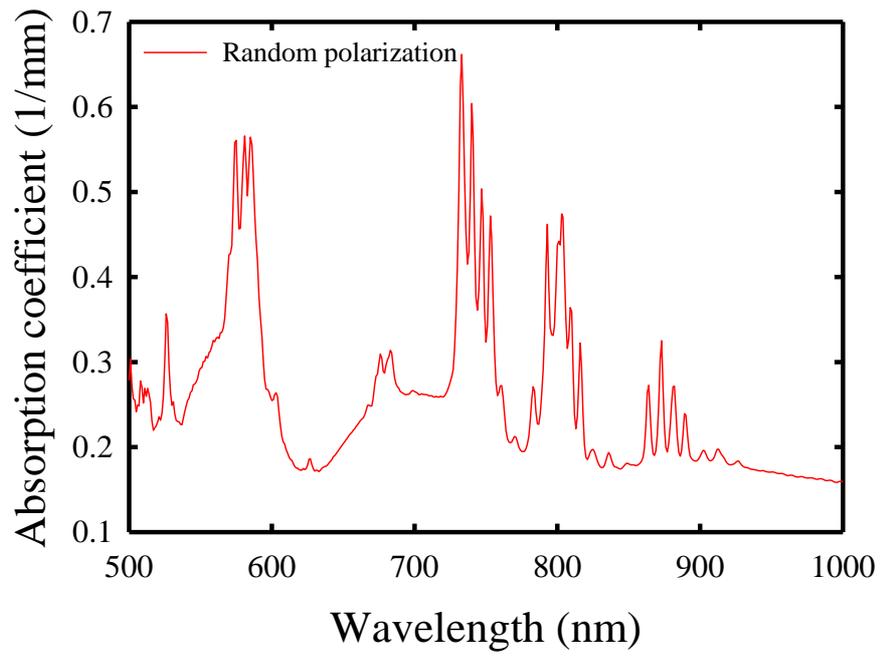


圖 2-1 (a)

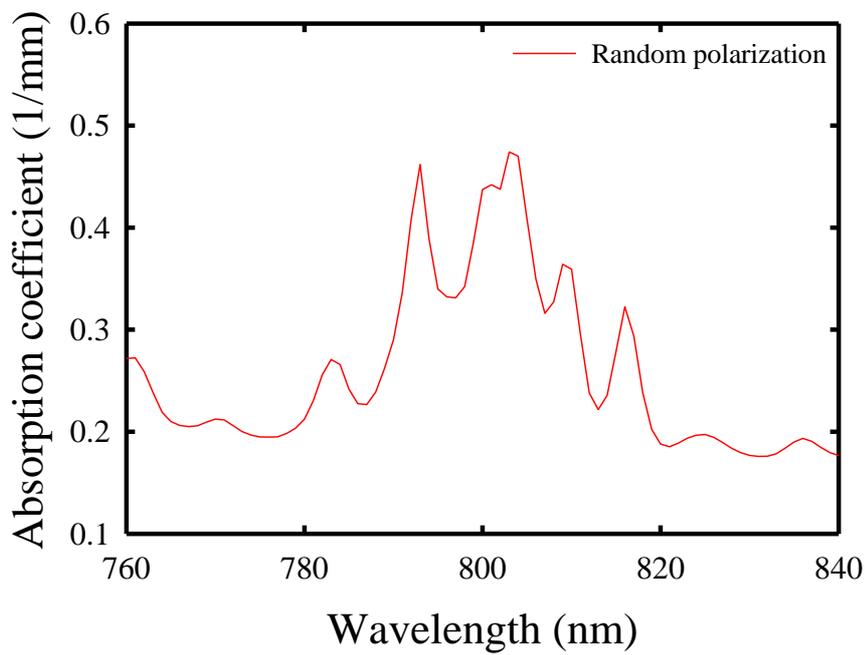


圖 2-1 (b)

圖 2-1 Nd:YAP 吸收光譜(波長-吸收率) : (a) 500~1000 nm ; (b) 760~840 nm °

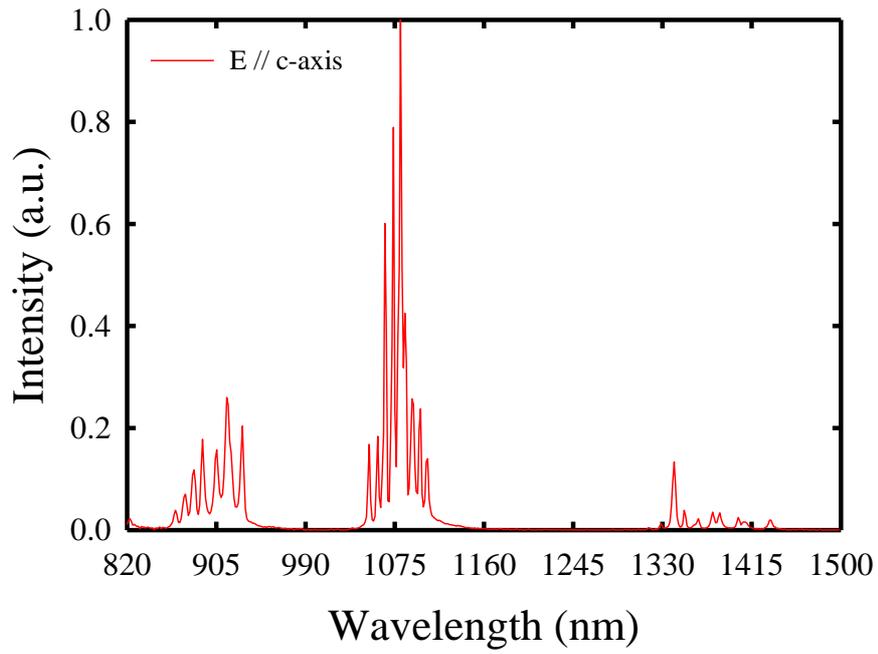


圖 2-2 (a)

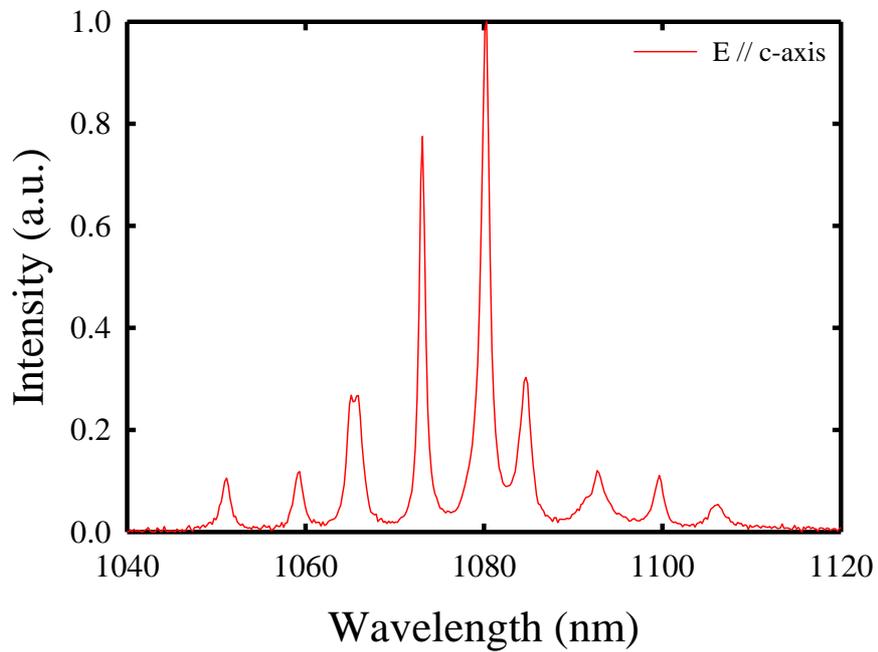


圖 2-2 (b)

圖 2-2 b-cut Nd:YAP(doping:1%) 螢光光譜圖: (a) 820~1500 nm ; (b)

1040~1120 nm。

第三章 連續波雷射(CW laser)

3.1 實驗架構

激發光源：雷射二極體(Laser diode)，其中輸出波長為 803 nm

光纖直徑：600 μm

增益介質：Nd:YAP(b-cut 1%、直徑為:3.7 mm、晶體長度:5.85 mm)

光學共振腔：腔長 2.4 cm(凹平腔)

- 前鏡(Input mirror)：曲率半徑為 50 cm、平面鏡(鍍膜:對於 808 nm 具高穿透特性，對於 1.064 μm 具高反射特性)
- 輸出耦合鏡(Output Coupler)：平面鏡反射率為 94%(鍍膜:對於 1.064 μm 具反射特性)如圖 3-1 所示
- Etalon：厚度 0.16 mm(未鍍膜)如圖 3-3 所示



3.2 實驗結果與討論

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。我們在沒有 etalon 的雷射架構中檢視 Nd:YAP 晶體的螢光光譜品質。此時，獲得最大的輸出波長為 1080 nm，如圖 3-2(a)所示。圖 3-2(b)說明 1080 nm 波長的輸出功率與 803 nm 輸入功率的關係。輸入功率初始值約 0.6 W，最大輸出功率為 6.9 W 其輸入功率為 15.4 W。相對應的斜率與光轉換效率分別為 46.7% 及 44.8% 實驗發現，當 etalon 置入雷射共振腔中，調整 etalon 的傾斜角度可以讓雷射輸出光譜產生 1080 及 1084 nm 的雙波長雷射，最大輸出功率為 3.2 W，如圖 3-4 所示。我們繼續增加 etalon 傾斜角度會使得雷射輸出光譜產生 1073、1080 及 1084 nm 三波長雷射，最大輸出功率為 2.1 W，如圖 3-5 所示。進而繼續增加角度會得到 1073 及 1084 nm 雙波長，最大輸出功率為 4.4 W，如圖 3-6 所示。最後我們再繼續增加角度可以得到 1073 nm 的單波長雷射輸出，最大輸出功率為 5.2 W，如圖 3-7 所示。為了求得 1084 nm 單波長與 1073 與 1084 nm 雙波長雷射輸出，我們在實驗中找出利用降低雷射輸入功率的方法使得 1080 nm 雷射衰減得以產生 1084 nm 單波長與 1073 與 1084 nm 雙波長雷射輸出。在 1080 與 1084 nm 雙波長輸出雷射中，我們降低輸入功率從 15.4 W 到 4.56 W，產生 1083 nm 單波長，輸出功率為 0.57 W，如圖 3-8 所示。在 1073、1080 與 1084 nm 三波長輸出雷射中，我們降低輸入功率從 15.4 W 到 4.56 W，產生 1073 與 1084 nm 雙波長雷射輸出，輸出功率為 1.8 W，如圖 3-9 所示。我們由實驗中得取 Nd:YAP 單波長雷射輸出功率表現如圖 3-10 所示，我們也比較 Nd:YAP 單波長雷射輸出表現如表 3-1 所示。此外，我們觀察到藉由微調 Etalon 的傾斜角度會使得 Nd:YAP 雷射單波長輸出波長會有可調性的特質表現。1073，

1080，及 1084 nm 可調範圍分別為 0.56，1.13 及 0.06 nm，如圖 3-11~13 所示。

3.2.1 Etalon 理論

在一上下平行的薄膜，一光束入射其表面上，入射光在上表面被分割為反射光束與折射光束。在下表面反射的同時還有一部分能量透射出去，形成透射光束。如此反覆地折射和反射，兩相鄰的反射光束或透射光束會產生光程差，我們可得到一個無窮系列的反射光束與透射光束。

當一個 etalon 兩面的反射率相同時，則穿透強度 T 則由以下式子表示：

$$T = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \left(\frac{2\pi L n \cos(\theta)}{\lambda} \right)} \quad (1)$$

R 為 etalon 表面的反射率， L 及 n 為 etalon 厚度及折射率， λ 為入射波波長， θ 為 etalon 的法線與光路夾角。

方程式(1)示，最大穿透發生在滿足方程式(2)：

$$\lambda_{peak} = \frac{2L n \cos(\theta)}{m} \quad (2)$$

m 為任意整數、非為零時， λ_{peak} 為最大穿透波長。

3.2.2 Mathcad 模擬 etalon

我們觀察到增加 θ 傾斜角時會使得 λ_{peak} 波長變小，此現象與當增加 θ 傾斜角時會使得 λ_{peak} 往短波長方向移動的理論一致，如圖 3-8 所示。

3.3 結論

為了有效激發晶體，我們量測了 b-cut Nd:YAP 晶體的吸收光譜與螢光光譜。Nd:YAP 晶體的吸收光譜中有一 803 nm 波長。Nd:YAP 晶體在 $^4F_{3/2}$ - $^4I_{11/2}$ 中躍遷，螢光光譜會有 1064.5,1072.9,1079.5,1084.5 nm 四條較強的光譜線。雷射系統在無偏振情況下會激發出 1079.5 nm 的 C 軸偏振雷射，是因為 1079.5 nm 波長在螢光光譜中為最強的螢光。我們利用轉動 etalon 角度產生單波長與多重波長的螢光光譜，輸出波長順序為 1080→[1080,1084]→[1073,1080,1084]→[1073,1080]→1073 nm。波長可選即是利用旋轉 etalon 角度，慢慢增加 etalon 的法線與光軸的夾角，輸出波長即會往短波長方向移動。我們探討了 1073,1080 及 1084 nm 波長的可選性，以及另用電腦模擬波長可選性來解釋 etalon 理論，圖 3-14 所示。etalon 理論說明了螢光光譜中最大穿透率的波長會因為增加腔體中 etalon 與光軸法線的夾角，螢光波長會慢慢往短波長方向移動。因此我們可以利用調整 etalon 與光軸法線的角度來選擇特定的雷射波長。

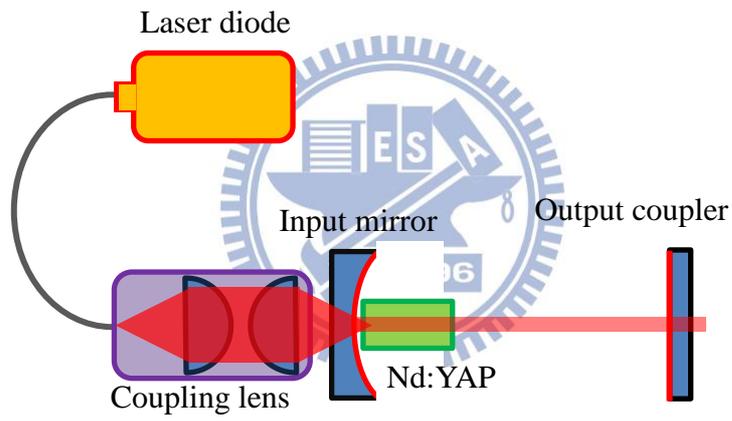


圖 3-1 連續波雷射(CW laser)實驗架構圖。

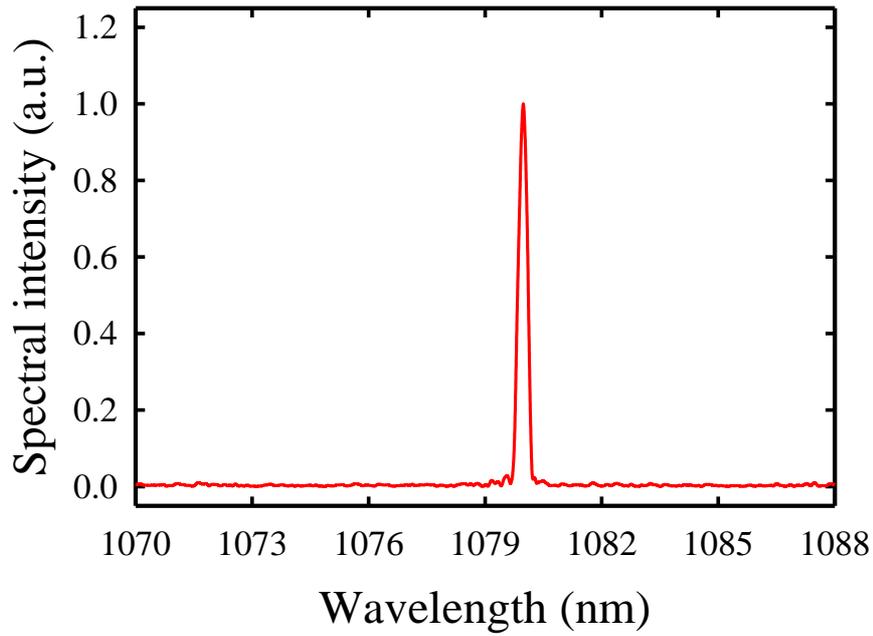


圖 3-2(a)

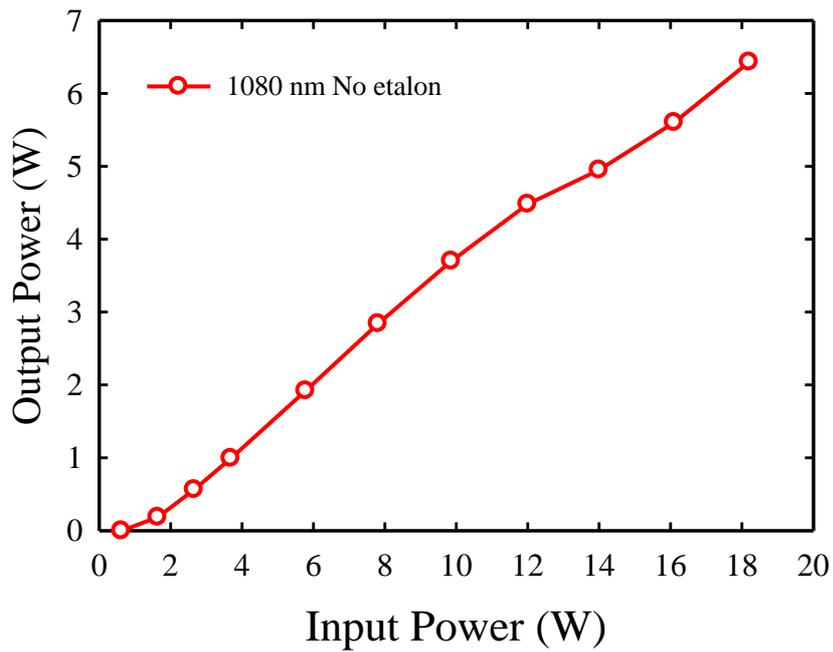


圖 3-2(b)

圖 3-2 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 94% 設置下，輸入功率為 15.4 W 時的連續波雷射: (a) 輸出光譜圖；(b) 輸出功率示意圖。

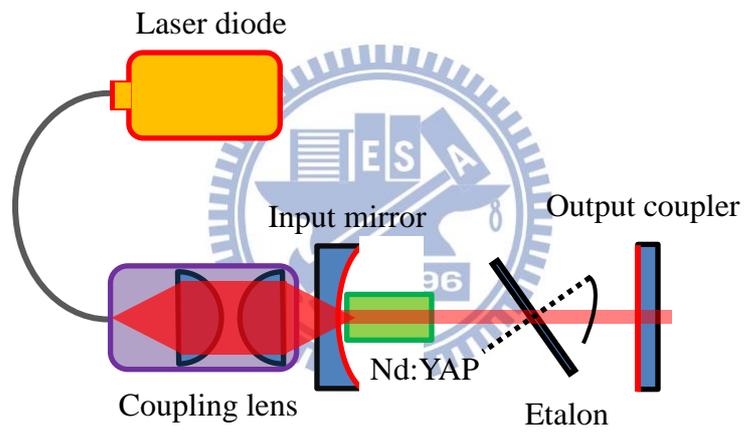


圖 3-3 波長可選的連續波雷射(CW laser)實驗架構圖。

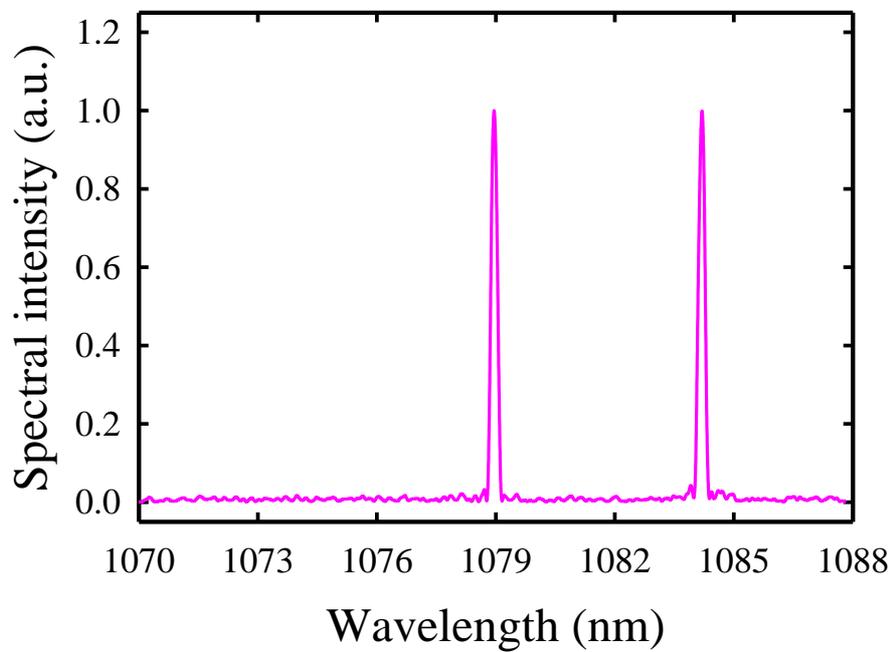


圖 3-4 0° -wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 94% 設置下, 輸入功率為 15.4 W 時增 etalon 法線與光路夾角激發出 1080 與 1084 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。

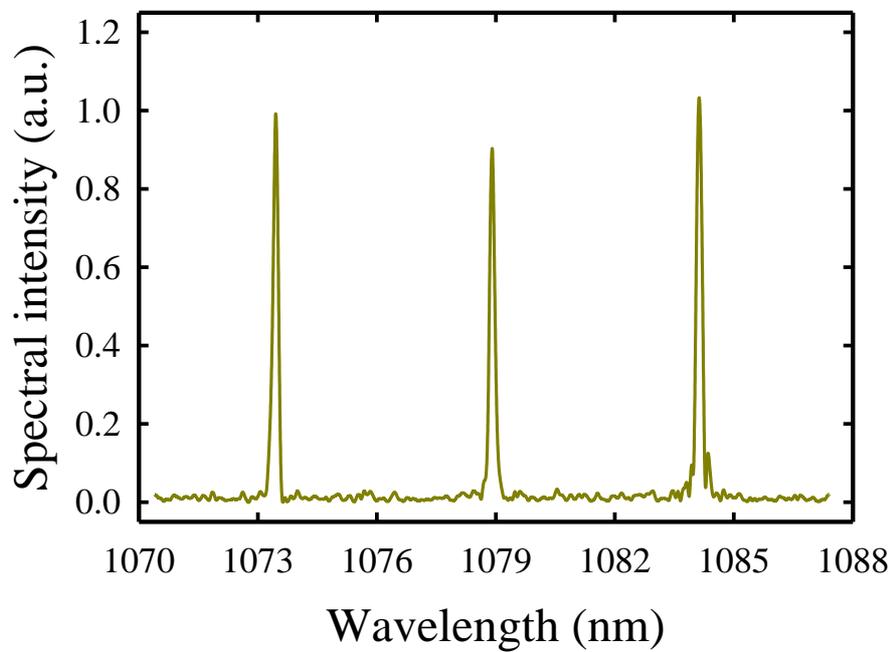


圖 3-5 0° -wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 94% 設置下, 輸入功率為 15.4 W 時增 etalon 法線與光路夾角激發出 1073、1080、1084 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。

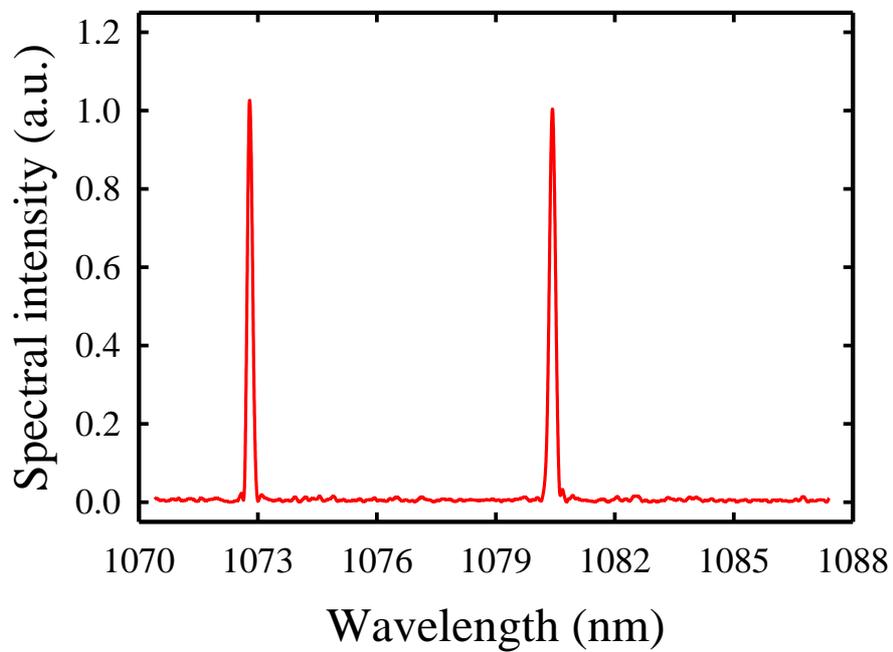


圖 3-6 0° -wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 94% 設置下, 輸入功率為 15.4 W 時增 etalon 法線與光路夾角激發出 1073、1080 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。

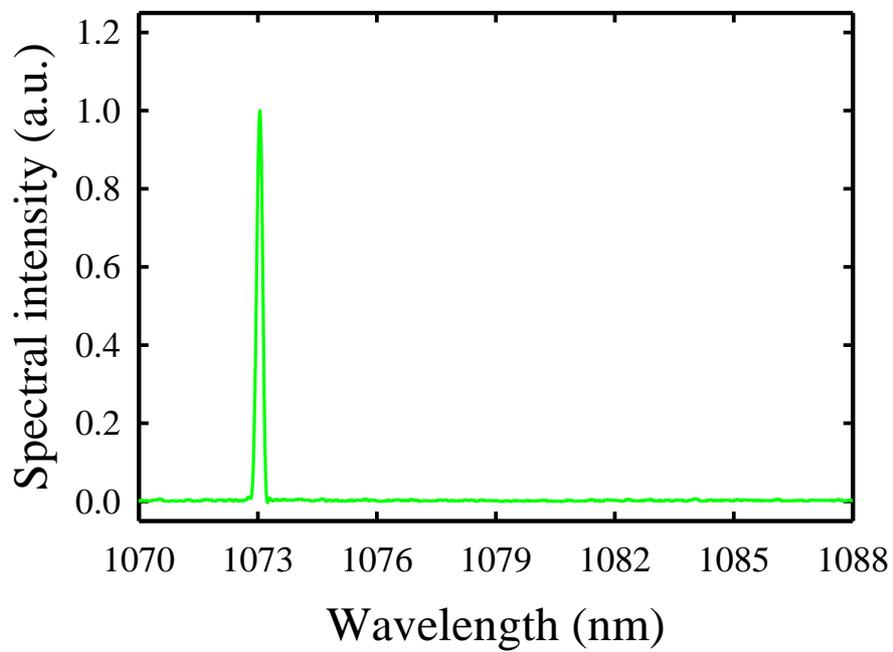


圖 3-7 0°-wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 94% 設置下, 輸入功率為 15.4 W 時增 etalon 法線與光路夾角激發出 1073 nm 雙波長雷射輸出的光譜圖。

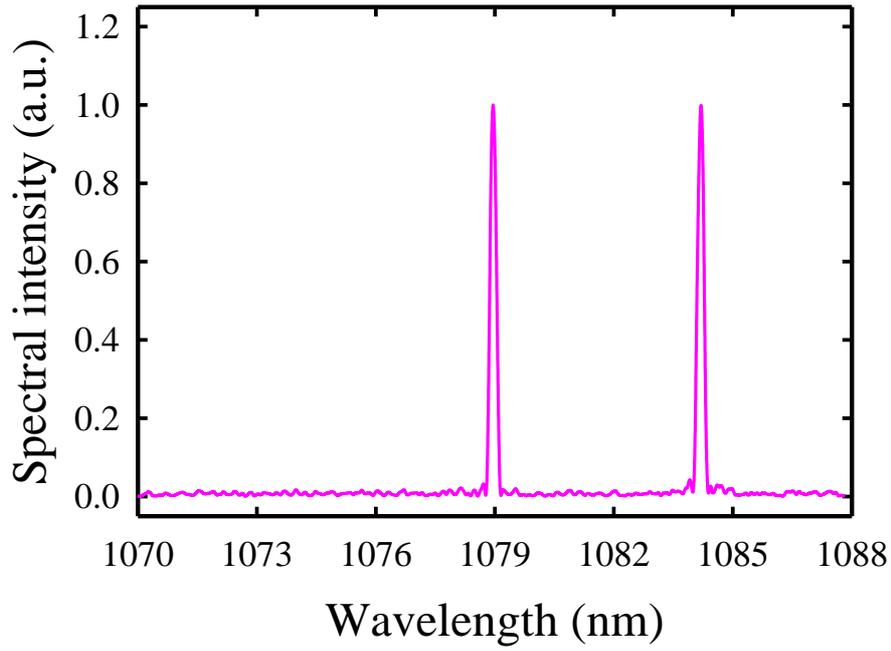


圖 3-8(a)

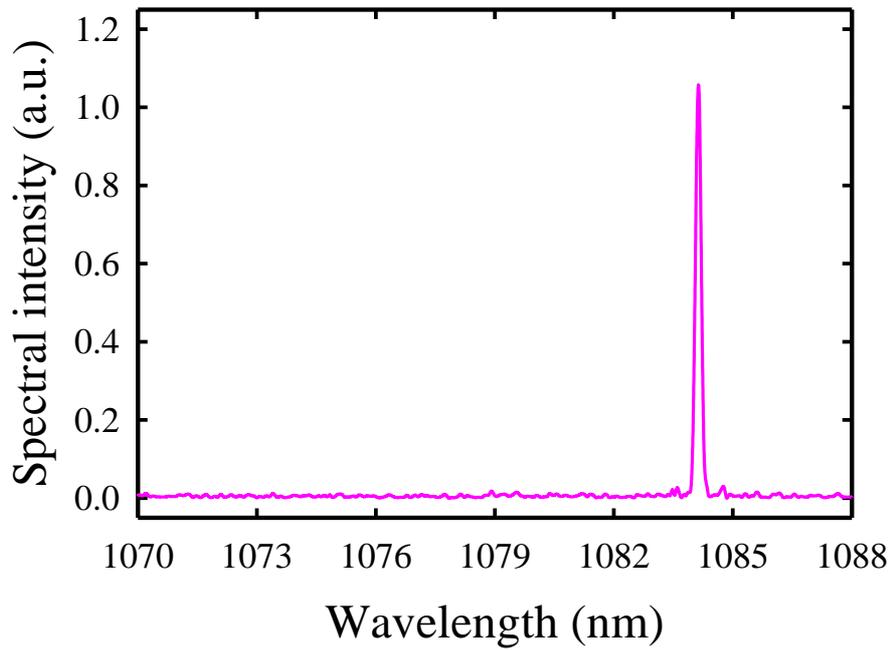


圖 3-8(b)

圖 3-8 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出雙波長:(a) (1080,1084) nm 藉由調降輸入功率輸入功率至 4.56 W 時產生；(b) 1084 nm 的光譜圖。

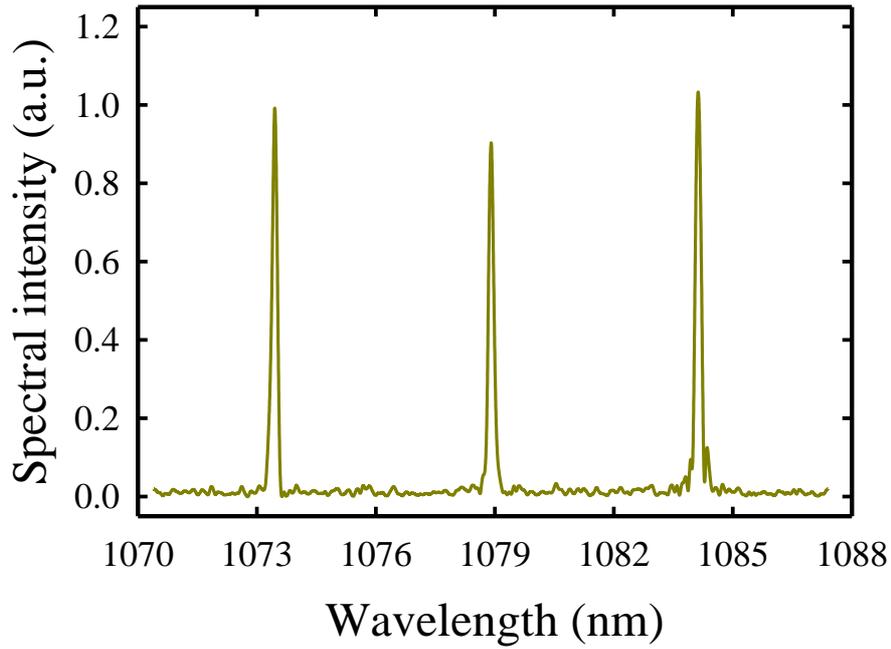


圖 3-9(a)

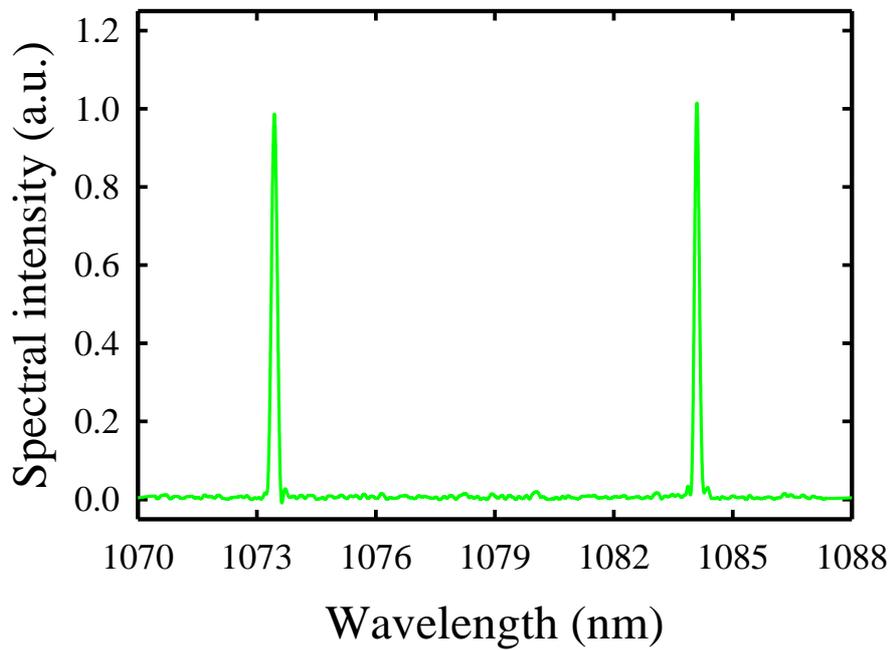


圖 3-9(b)

圖 3-9 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出三波長:(a) (1073,1080,1084) nm 藉由調降輸入功率輸入功率至 4.56 W 時產生；(b) (1073,1084) nm 的光譜圖。

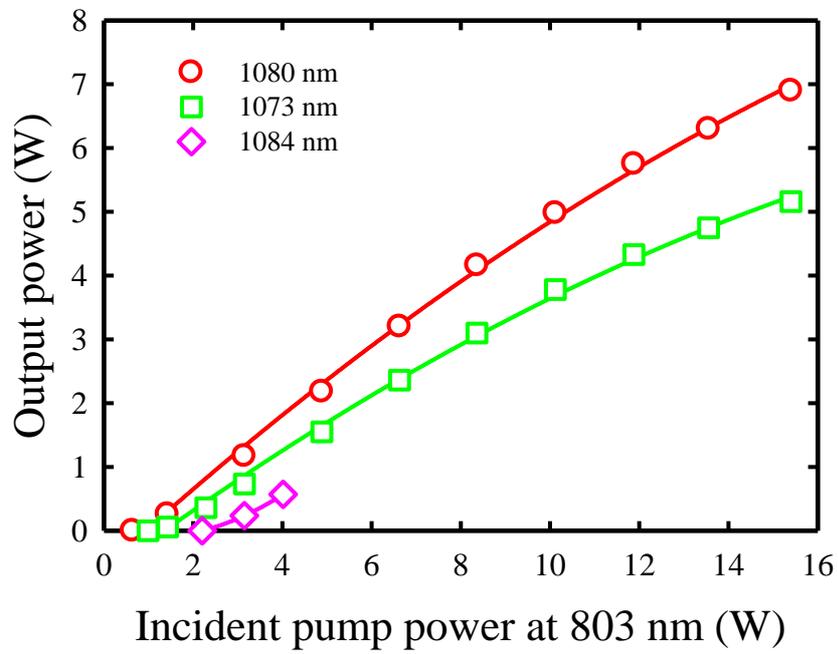


圖 3-10 Nd:YAP 輸出單波長 1073 nm、1080 nm、1084 nm 單波長 I-P 曲線示意圖。

表 3-1 1073 nm、1080 nm、1084 nm 單波長雷射輸出比較表。

波長	1073 nm (with etalon)	1080 nm (no etalon)	1084 nm (with etalon)
閾值	1 W	0.6 W	2.2 W
輸入功率	15.4 W	15.4 W	4.5 W
最大輸出功率	5.2 W	6.9 W	0.57 W
斜效率	35.8%	46.7%	24.8%
光轉換效率	33.5%	44.8%	12.7%

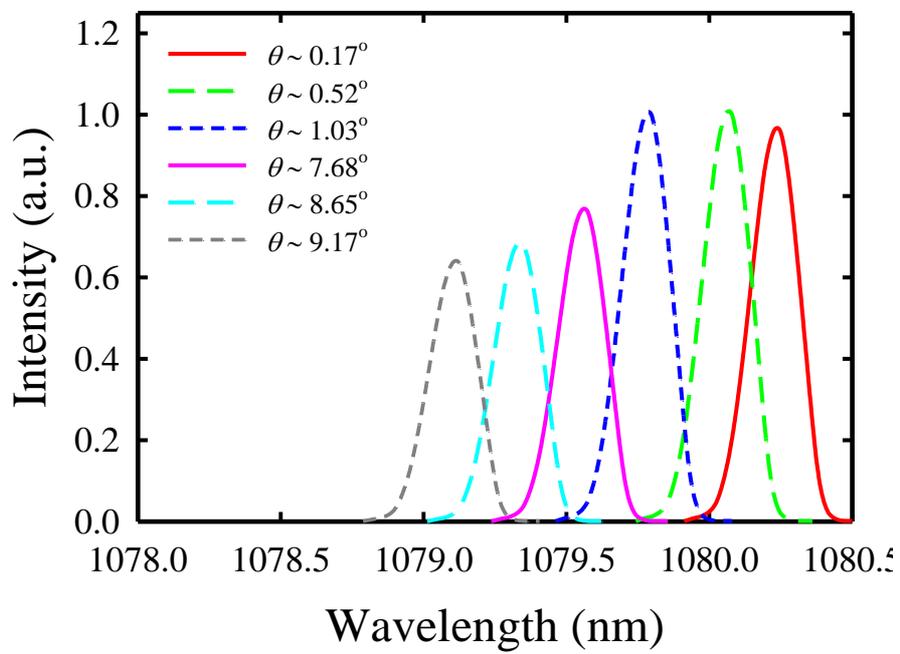


圖 3-11 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出單波長 1080 nm 可調動示意圖。

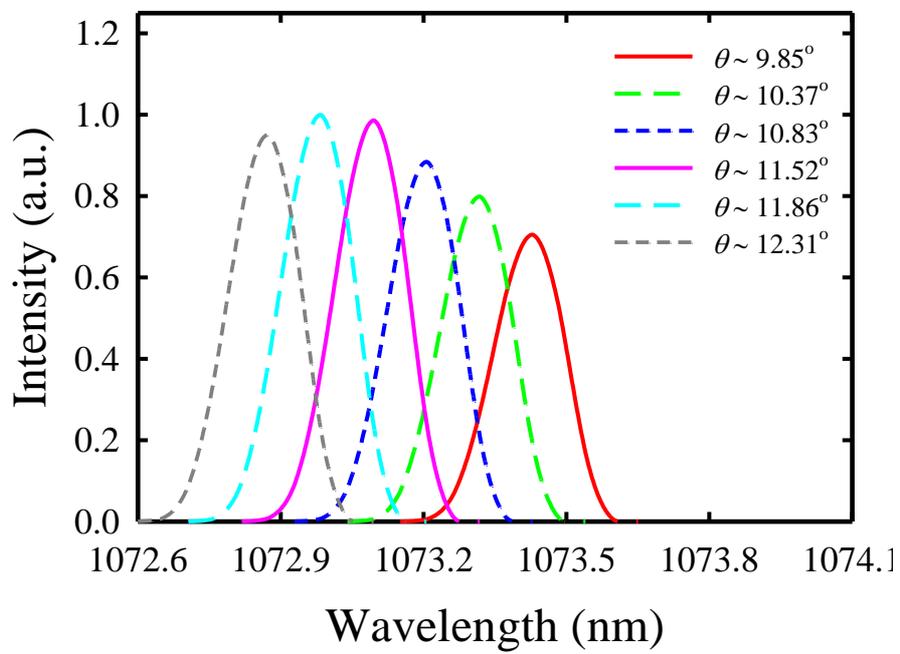


圖 3-12 輸入功率 15.4 W、Nd:YAP 輸出單波長 1073 nm 可調動示意圖。

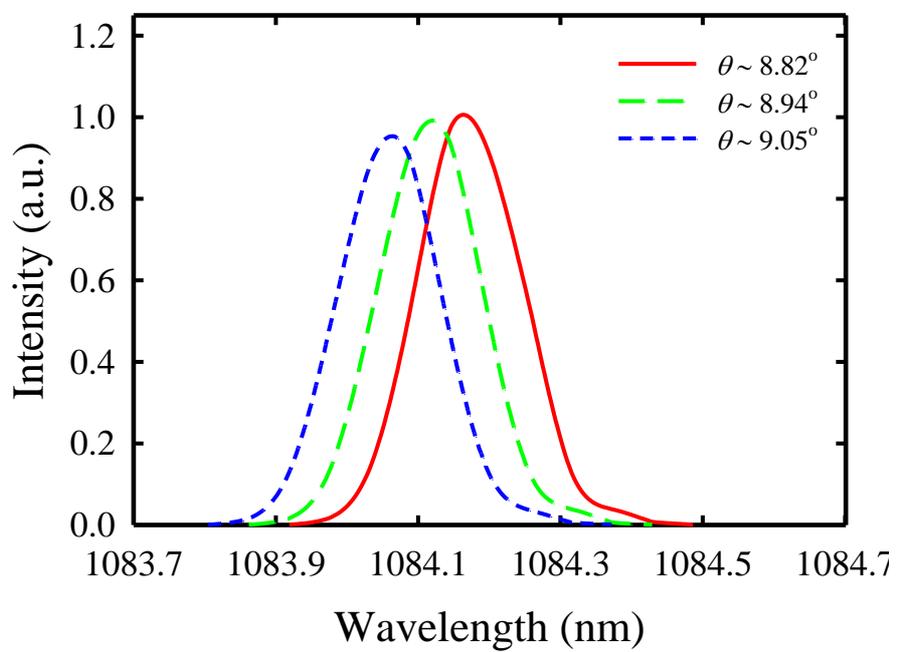


圖 3-13 輸入功率 4.56 W、Nd:YAP 輸出單波長 1084 nm 可調動示意圖。

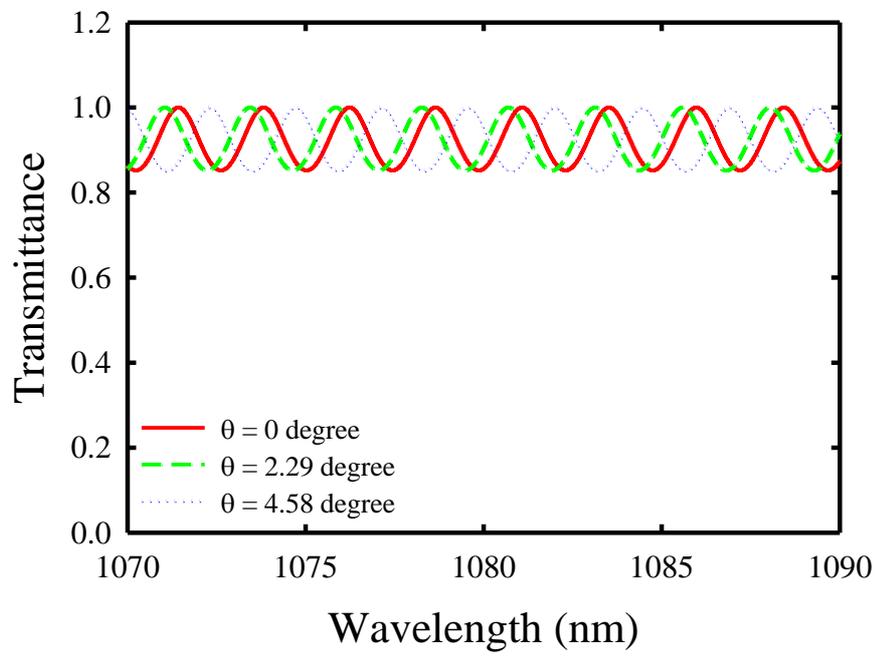


圖 3-14 Mathcad 軟體模擬法布里珀羅理論示意圖。

第四章 被動式 Q 開關連續波雷射 (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，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，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)。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(O.C)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 Cr^{4+} 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、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：

- 基態能階的吸收能力強(亦即基態能階的吸收截面積 σ_{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(σ_{gs})>上能階的吸收截面積(σ_{es})

4.1.4 Cr⁴⁺:YAG 飽和吸收體簡介

目前被廣泛使用的飽和吸收體是 Cr⁴⁺: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 μm 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

因為具備上述優點，Cr⁴⁺:YAG 常被使用於以摻釹晶體為增益介質的被動式 Q 開關雷射系統中。

Cr⁴⁺:YAG 飽和吸收體的吸收係數(α_0)與腔內能量(E_i)成反比，其關係式如下所示：

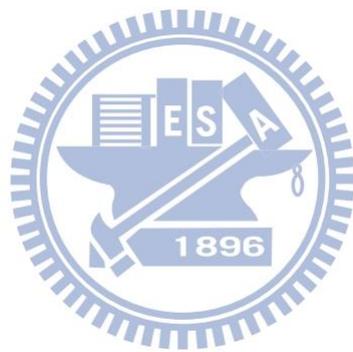
$$\alpha_0(E) = \alpha_0 / (1 + E_i / E_s) \quad (4-2)$$

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

E_s 是飽和狀態下的單位面積能量，是為定值 σ_{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)。



4.2 實驗架構

激發光源：803 nm 雷射二極體

激發方式：連續波激發 / 脈衝式激發(Duty \approx 42%)

光纖直徑：600 μ m

耦合鏡(Coupling lens)：f=25 mm/1:1

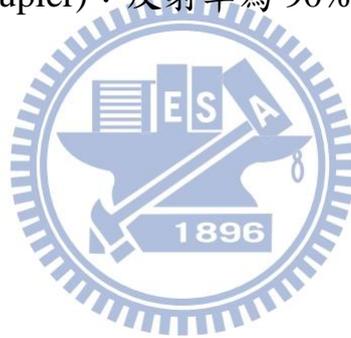
增益介質：Nd:YAP/b-cut/1%/直徑為 3.7 mm/晶體長度為 5.85 mm

被動式 Q 開關：Cr⁴⁺:YAG 固態晶體(初始穿透率 $T_0=90\%$)

光學共振腔：腔長 65 mm(連續波激發)、腔長 70 mm (脈衝式激發)

前鏡(Input mirror)：曲率為 500 mm

輸出耦合鏡(Output Coupler)：反射率為 90%，圖 4-6 所示



4.3 實驗結果與討論

就我們所知，我們首次利用 Nd:YAP 搭配飽和吸收體 Cr⁴⁺:YAG 實現被動式 Q 開關雷射。在實驗的過程中，一開始我們採用連續波激發光源來進行實驗，我們發現 Nd:YAP 的熱透鏡效應很嚴重，在高輸入功率的情況下，熱透鏡效應會迫使能維持雷射穩定的腔長必須縮短，而且很容易出現高階橫模(High order transverse mode)，由於高階橫模的出現所以會伴隨著寄生脈衝的產生，因此，我們找出能夠同時維持低階橫模且沒有寄生脈衝的輸入功率上限，此上限大約為 11.9 W。

在被動式 Q 開關雷射的實驗中，我們致力於改善脈衝的週期跳動。為了改善脈衝的週期跳動，我們由原先的連續波激發光源改採用脈衝式的激發光源來激發增益介質，實驗結果告訴我們脈衝式激發光源能夠改善週期跳動。以下我們分別呈現連續波激發光源與脈衝式激發光源所產的被動式 Q 開關雷射的實驗結果，最後比較兩者的表現。

(1)連續波激發光源

為了消彌高階橫模的光斑與寄生脈衝，我們輸入功率的上限為 11.9 W，在輸入功率小於 11.9 W 的情況下所獲得的脈衝都能有好的模態且不具有寄生脈衝。在連續激發光方式下，我們的腔長為 65 mm，且盡可能讓飽和吸收體接近輸出耦合鏡。

在輸入功率為 11.9 W 的時候，所獲得的輸出功率、週期、脈寬、脈衝能量、尖峰功率與週期標準差分別為 2.24 W(圖 4-7 所示)、

64.9 μs (圖 4-8 所示)、19 ns(圖 4-9 所示)、145.5 μJ (圖 4-10 所示)、7.66 KW(圖 4-11 所示)與 2 μs (圖 4-12 所示)。

如圖 4-12 所示，在連續波激發模式下，週期標準差隨著輸入功率增加而降低，換句話說，週期標準差隨著輸出脈衝重複率的增加而明顯降低。

(2)脈衝式激發光源

相較於連續波的激發光源，在脈衝式激發光源的方法中，飽和吸收體 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 能夠透明的時刻被局限在脈衝式激發光的脈寬之中，在時間上迫使飽和吸收體透明的週期能夠更穩定。此外，在脈衝式激發方式下，能夠明顯地降低晶體所累積的熱，因此能夠降低熱透鏡對雷射系統的影響；但是，在熱透鏡效應的降低的同時也對雷射系統內部產生變化，因此，在脈衝式激發方式且維持原來 65 mm 的腔長的情況下，一些相對低階的高階橫模仍然能夠在共振腔內作振盪，雖然以肉眼觀察輸出光斑仍然是一個光點，但是在示波器上仍然會觀察到有寄生脈衝的產生。為了消彌寄生脈衝，我們將腔長從原來的 65 mm 增加至 70 mm。

我們觀察 5(週期= 200 μs)、7(週期= 142.8 μs)、10(週期= 100 μs)、12(週期= 83.3 μs)和 15(週期= 66.6 μs) kHz 等五個重複率的脈衝激發光源的實驗結果，此五個重複率的脈衝激發光源所對應到的脈寬分別為 84、60、42、35 和 28 μs (Duty~42%)如圖 4-13 所示。在脈衝波激發方式的不同重複率激發之下，被動式 Q 開關雷射的週期標準差大約落在 1~2 μs ，如圖 4-17 所示。此外，在輸出脈寬(圖 4-14)、脈充能量(圖 4-15)、尖峰功率(圖 4-16)都比連續波激發方式的結果

稍微增加。

4.4 結論

Nd:YAP 晶體的熱透鏡效應很明顯，當操作在被動式 Q 開關的運作且高輸入功率之下，穩定的腔長會被迫縮短，而且很容易產生高階橫模伴隨著寄生脈衝的產生。因此，在連續波激發模式下，若要消弭高階橫模與寄生脈衝，輸入功率最大上限約為 11.9 W。在連續波激發模式下，獲得的最大脈衝能量為 145.5 μJ ，其輸出脈衝的週期標準差隨著輸入功率增加而明顯減少，當輸入功率從 5.7 W 增加至 11.9 W，輸出脈衝的週期標準差從 7.7 μs 降低至 2 μs 。

當我們將激發模式改為脈衝波激發，因為熱透鏡效應降低，使得穩定共振腔的長度增加，導致寄生脈衝的產生，因此我們將腔長從原本的 65 mm 增加至 70 mm。在脈衝波激發模式下，不管是脈衝寬度、脈衝能量、尖峰功率的表現上，就數值而言，都比連續波激發模式下的結果高；唯獨週期標準差比整體而言比較低而且隨著重複率的變動不大，週期標準差大約落在 1~2 μs 之間。因此，在脈衝波激發模式下，能夠降低週期標準差，尤其是在低重複率的情況下更為明顯。

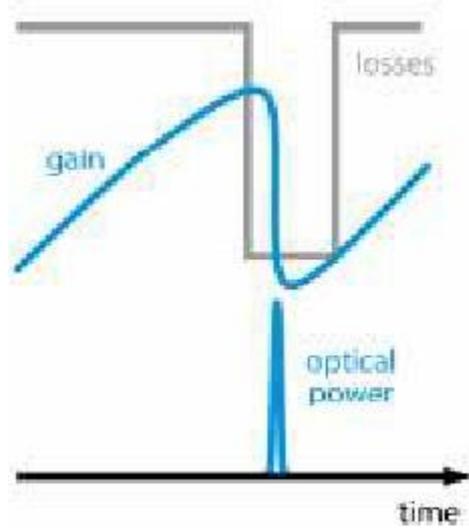


圖 4-1 Q 開關動作示意圖。

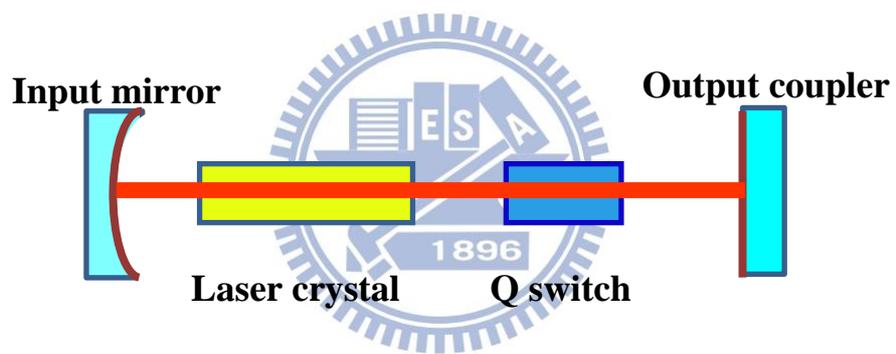


圖 4-2 主動式 Q 開關示意圖。



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

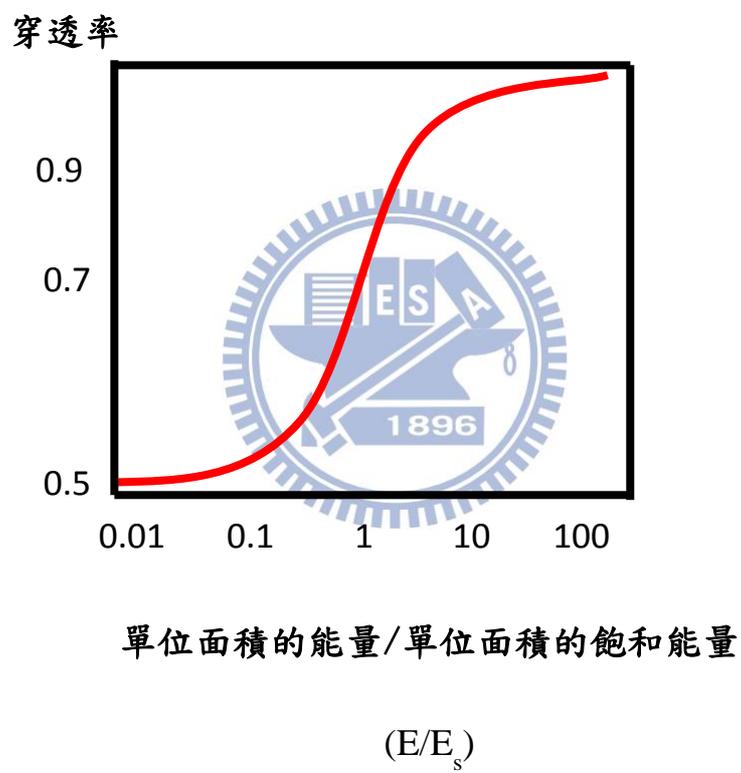


圖 4-4 飽和吸收體穿透率與入射光能量關係圖。

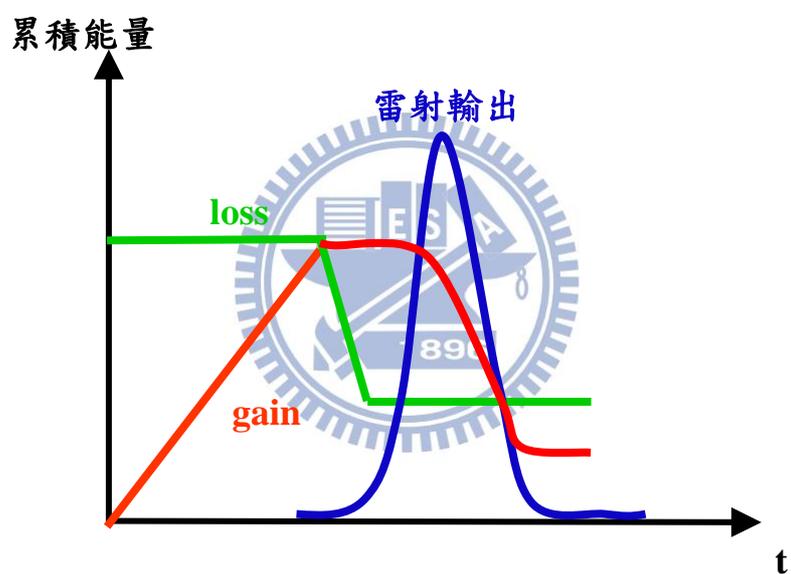


圖 4-5 被動式 Q 開關雷射脈衝產生示意圖。

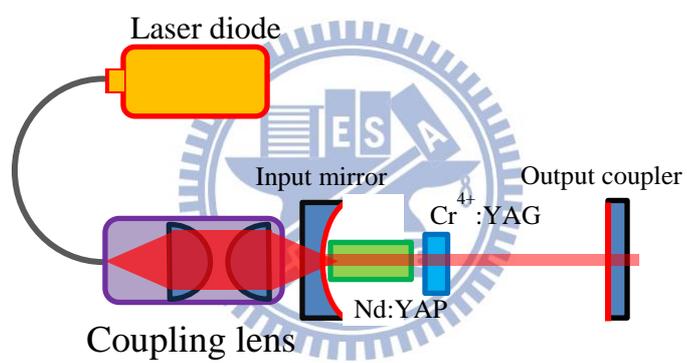


圖 4-6 被動式 Q 開關雷射實驗架構。

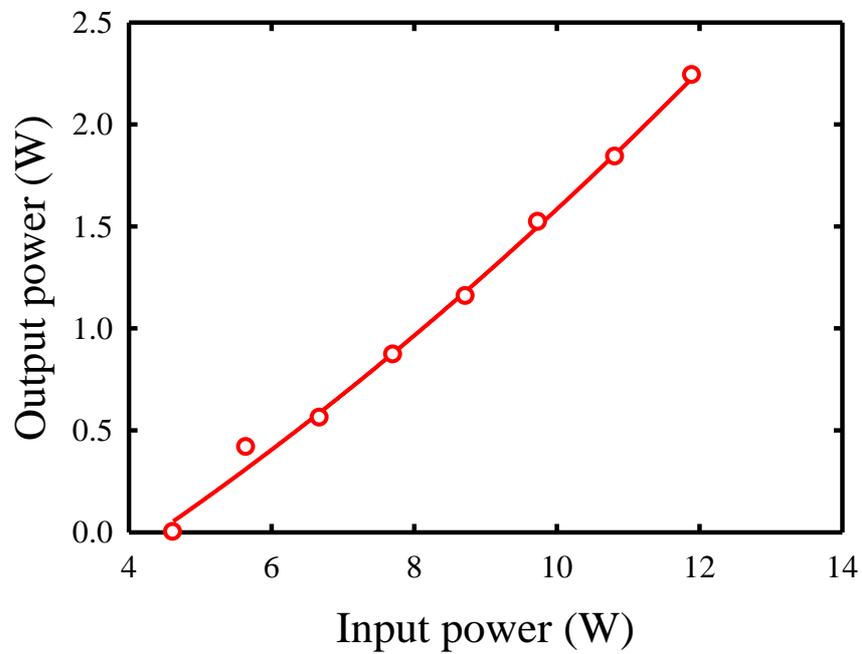


圖 4-7 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射輸出表現示意圖。

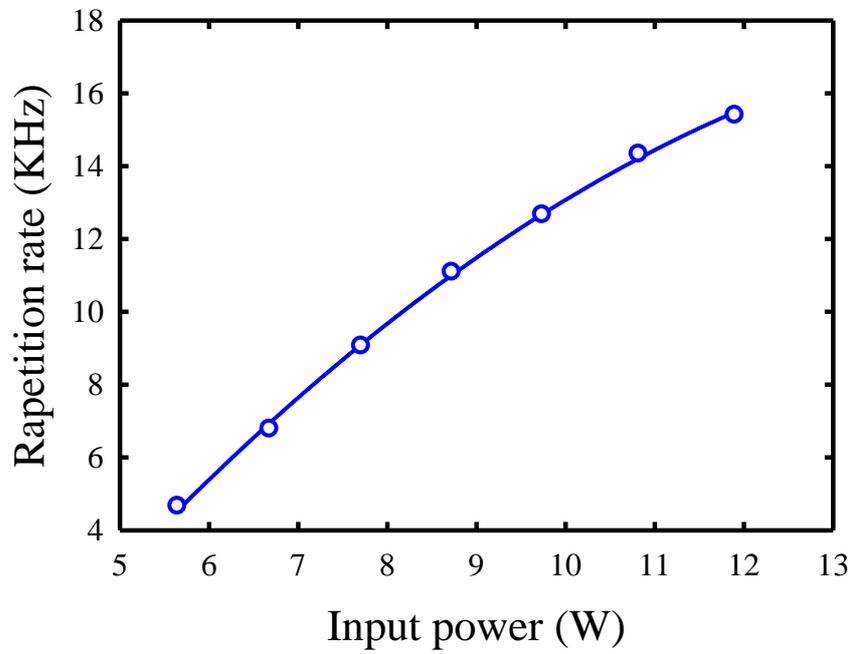


圖 4-8 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射脈衝重複率示意圖。

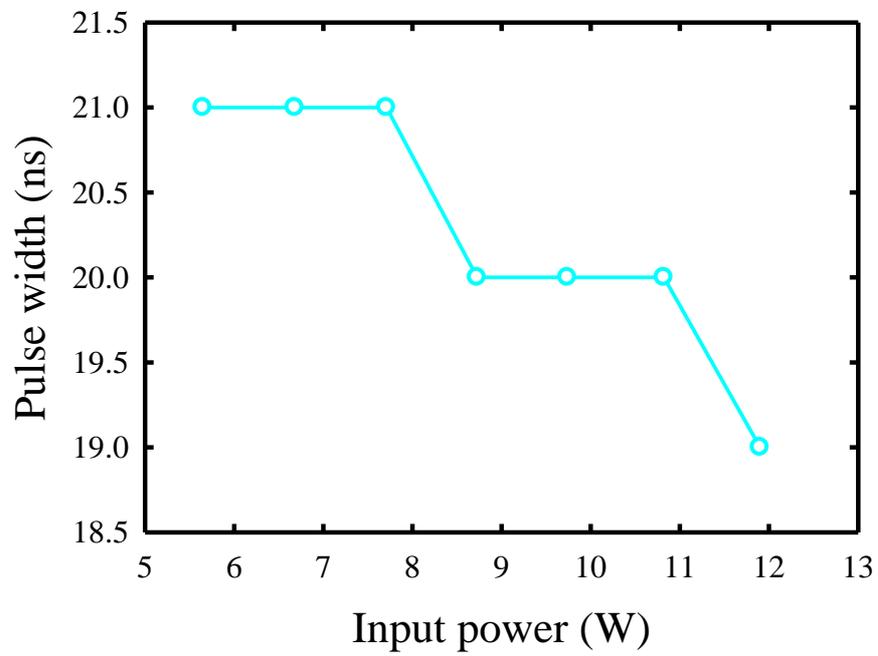


圖 4-9 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射脈衝寬度示意圖。

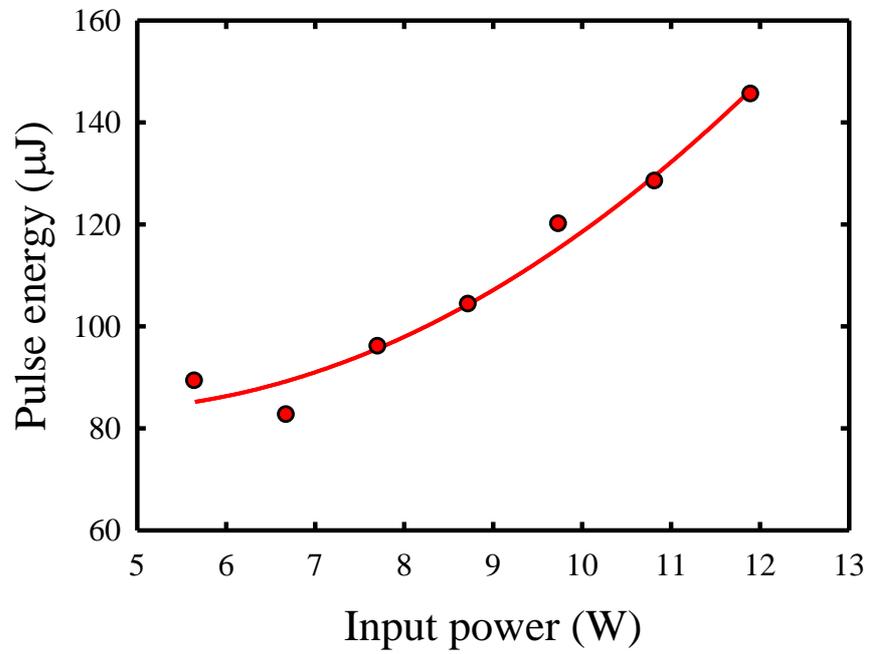


圖 4-10 0° -wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 90% 設置下, 輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射脈衝能量示意圖。

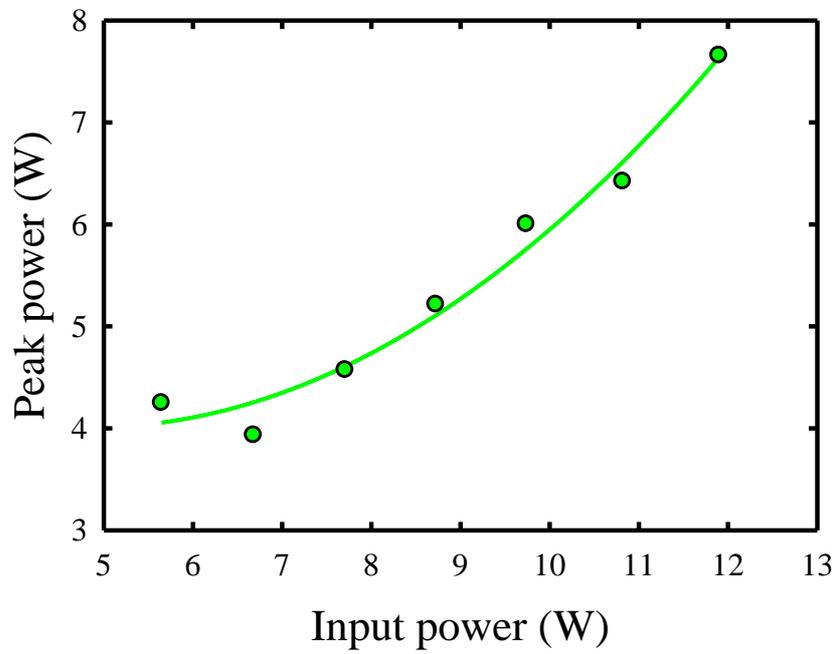


圖 4-11 0° -wedged Nd:YAP, 前鏡曲率 50 cm, 耦合輸出鏡反射率 90% 設置下, 輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射尖峰功率示意圖。

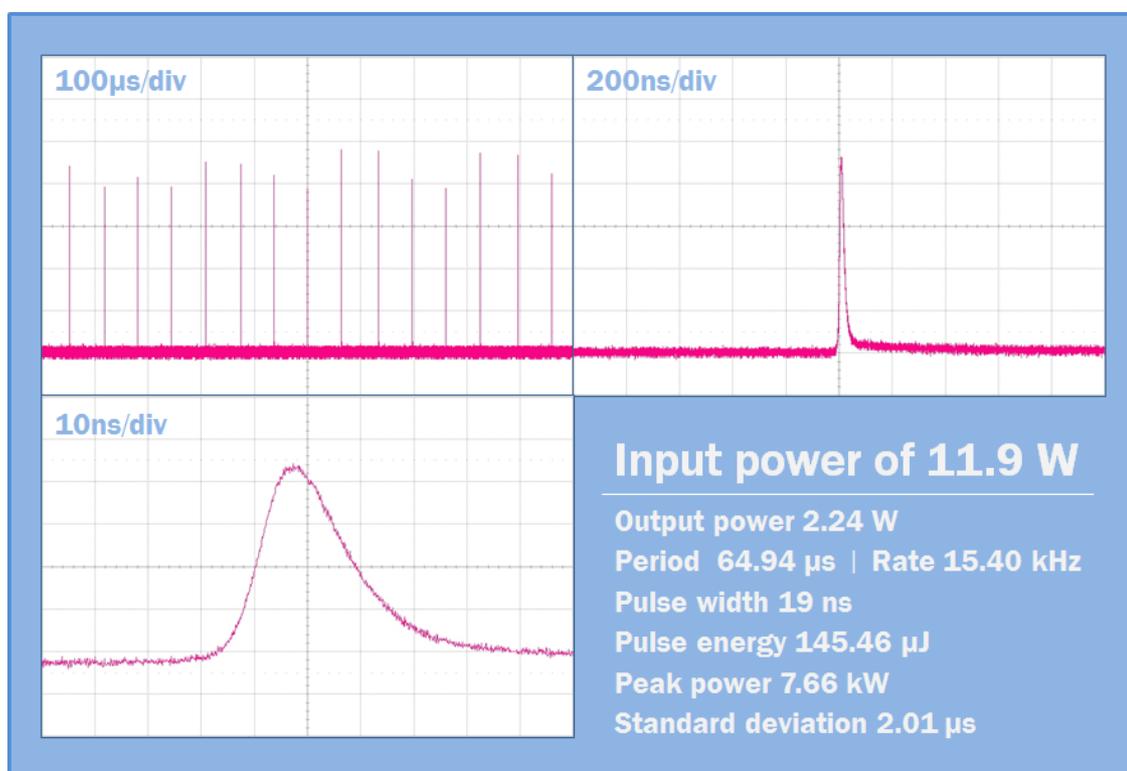


圖 4-12 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射在 100 ns、200 ns、10 ns 穩定性示意圖。

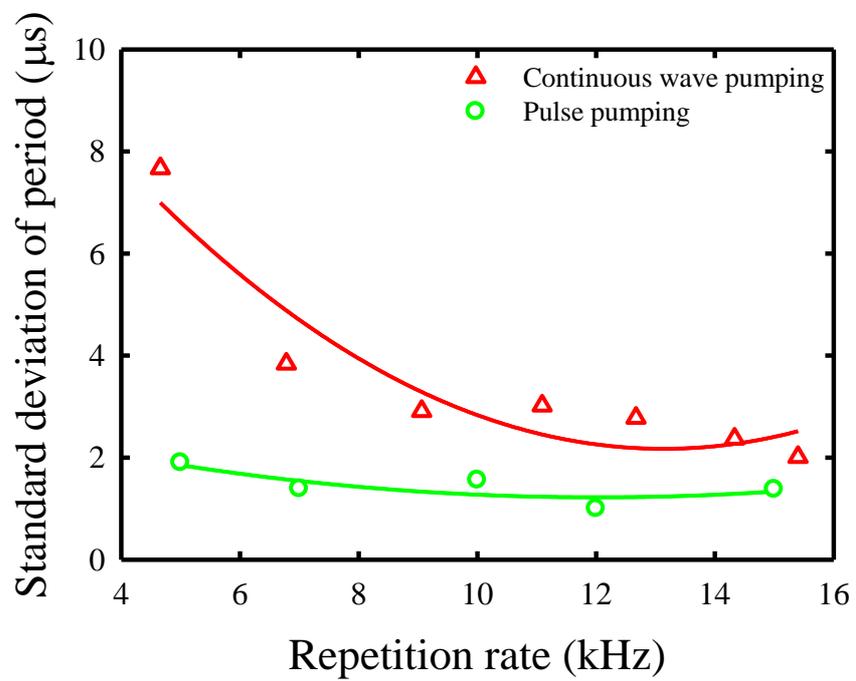


圖 4-13 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與週期標準差表現示意圖。

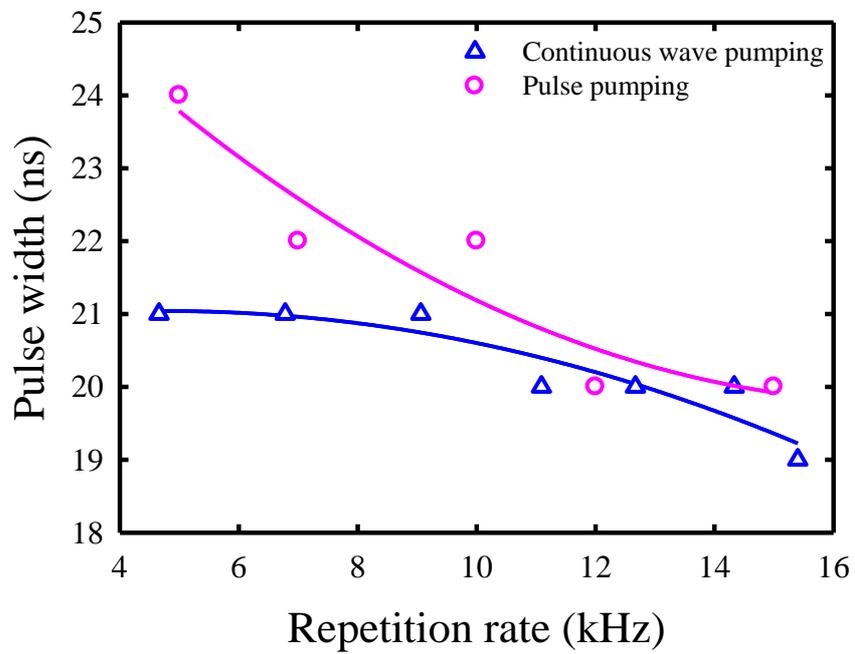


圖 4-14 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與脈衝寬度表現示意圖。

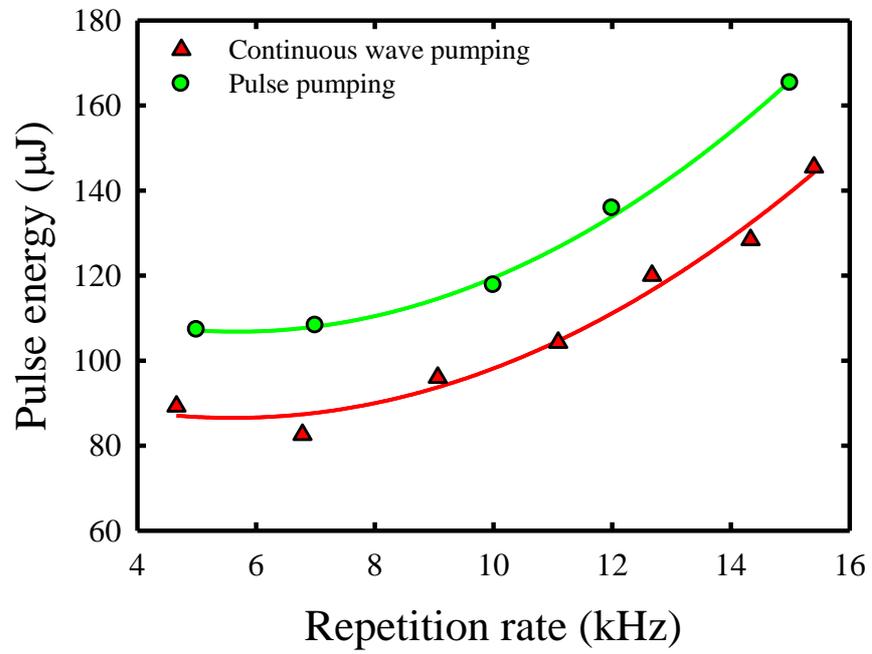


圖 4-15 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與脈衝能量表現示意圖。

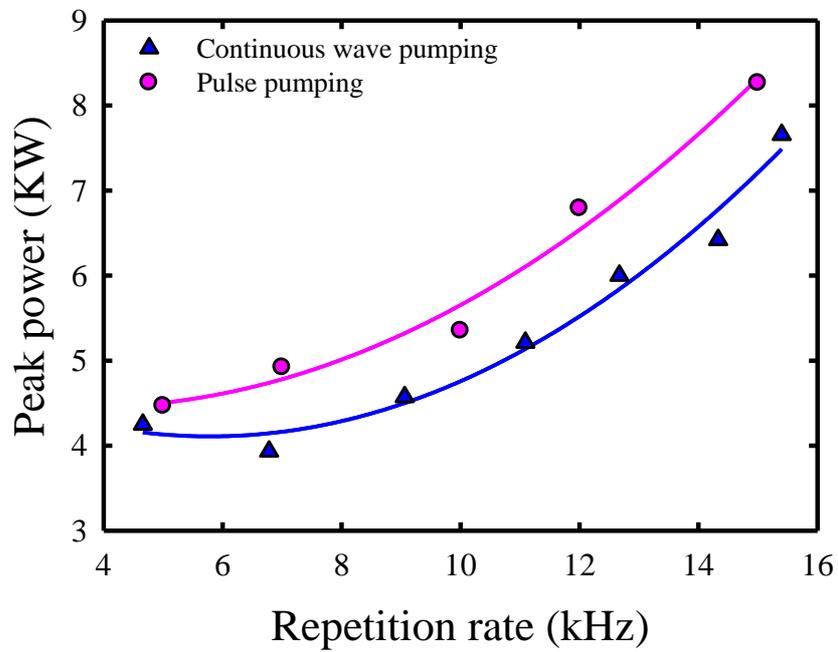


圖 4-16 被動式 Q 開關雷射與脈衝激發源被動式雷射的重覆率與尖峰功率表現示意圖。



圖 4-17 0°-wedged Nd:YAP，前鏡曲率 50 cm，耦合輸出鏡反射率 90% 設置下，輸入功率為 11.9 W 時的被動式 Q 開關雷射在與脈衝激發源被動式 Q 開關雷射在 100 ns、200 ns、10 ns 穩定性示意圖。

第五章 自鎖模雷射表現(Self-mode-locked laser)

5.1 實驗架構

激發光源：803 nm 雷射二極體

光纖直徑：200 μm

增益介質：Nd:YAP(b-cut doping:1% 直徑:3.7 mm 晶體長度 5.85 mm)

光學共振腔：腔長 2.1 cm(凹平腔)

-前鏡(Input mirror)：曲率為 50 cm、平面鏡(鍍膜:對於 808 nm 具高穿透特性，對於 1.064 μm 具高反射特性)

-輸出耦合鏡(Output Coupler)：反射率為 94% ，wedged 2 degree(鍍膜:對於 1.064 μm 具反射特性)圖 5-1 所示



5.2 實驗結果與討論

我們觀察 Nd:YAP 自鎖模雷射在無改變腔體中任何條件下的輸出表現。圖 5-2 為雷射輸出光譜、輸出波型和脈衝訊號。我們從文獻中得知改變輸出耦合鏡的切邊角度可改善自鎖模雷射的脈衝重複率。進而我們更換腔體中的輸出耦合鏡為 2 度楔形角、反射率 95% 的輸出耦合鏡，如 5-3 所示，觀察到脈衝雷射輸出表現有明顯改善。當我們改變增益介質與光路的角度時可以最佳化脈衝雷射輸出，而輸出光譜也有明顯的變化，圖 5-4 所示。於是我們進一步設定前鏡與增益介質的距離為 d ，利用調變增益介質角度調整距離。觀察自鎖模雷射的輸出表現。圖 5-5~圖 5-15 為 $d=0\sim 10.5$ mm 的雷射輸出表現示意圖。由圖中可觀察到當腔體長度不變而 d 距離變小，輸出光譜變寬、由於 FSR 不變所以模數變多。反之，當 d 距離變大，輸出光譜變窄、FSR 不變模數變少。



5.3 結論

我們成功地經由改變平邊耦合輸出鏡為切邊耦合輸出鏡實現自鎖模雷射。並且設定條件，調整前鏡與增益介質的距離 d ，最佳化雷射的脈衝表現。從實驗可歸納出腔體長度與前鏡和增益介質的距離(d)的兩者相對關係腔體長度固定， d 變小，則模數越多，bandwidth 越大，mode 的 FSR 不變， d 固定，腔體長度變大；模數變大，bandwidth 不變，FSR 變小。因此若要增加 mode-locking 的模數，有兩個方法。一為減少 d 的距離，二為增大腔體長度。我們在同時間將 pumping source 與增益介質往同方向移動後量測 I-P 實驗數據中得知，當前鏡與增益介質的距離(d)為 0.5、9 mm 時，I-P 的數據無明顯差異，圖 5-16 所示。代表移動 pumping source 與增益介質的距離，不會影響輸出功率(output power)。

當增益介質的角度垂直於光軸時，激發出的雷射脈衝寬度表現短又差，需調整晶體角度始可最佳化輸出脈衝寬度。

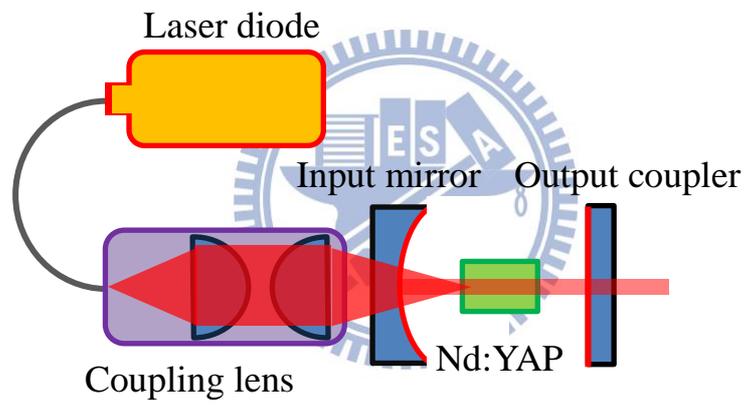


圖 5-1 自鎖模雷射射(self-mode locked laser)實驗架構圖。

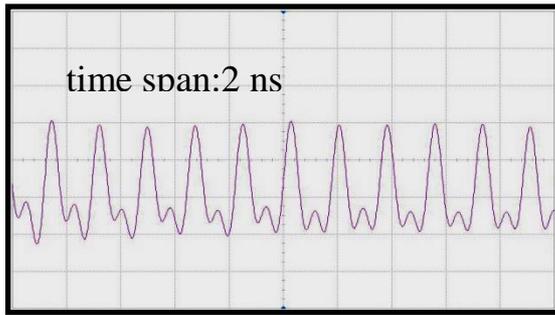


圖 5-2 (a)

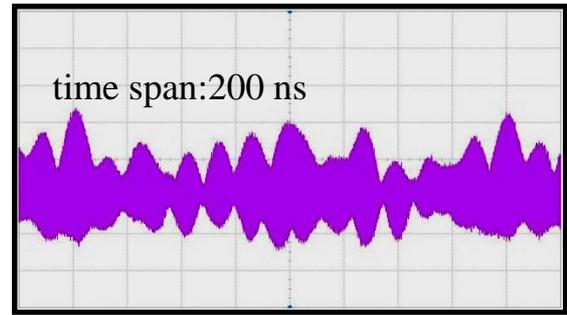


圖 5-2 (b)

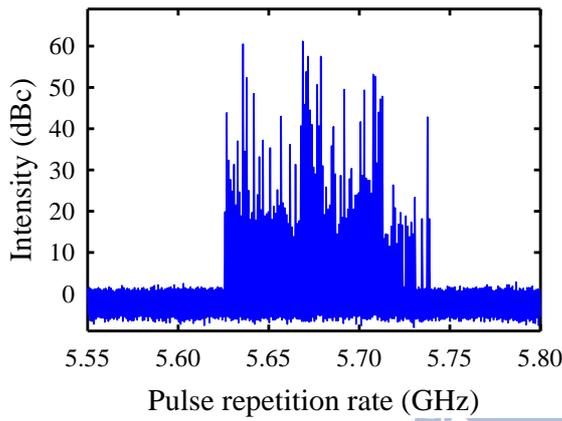


圖 5-2 (c)

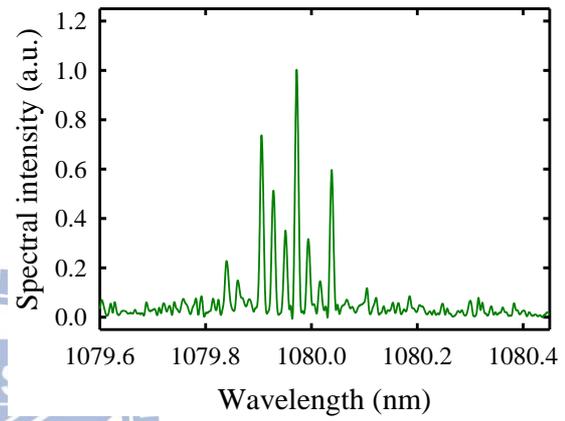


圖 5-2 (d)

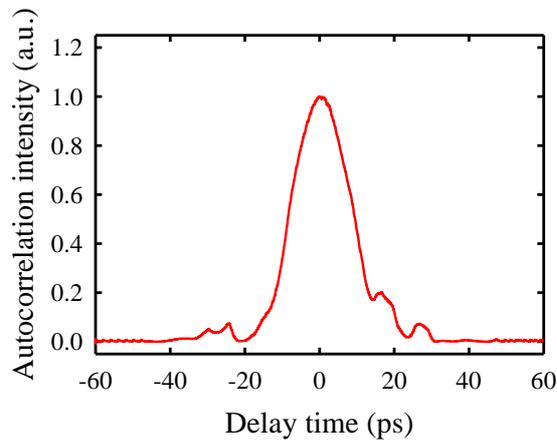


圖 5-2(e)

圖 5-2 自鎖模雷射在: (a) 2 ns/div ; (b) 200 ns/div 時的輸出波 ; (c) 脈衝重複率示意圖 ; (d) 輸出光譜 ; (e) 自相關脈衝波形。

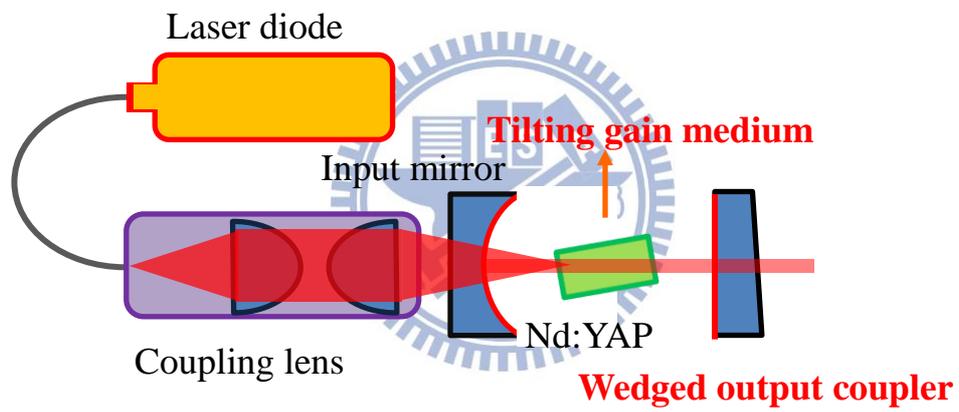


圖 5-3 自鎖模雷射射(tilting gain medium+wadged O.C)實驗架構圖。

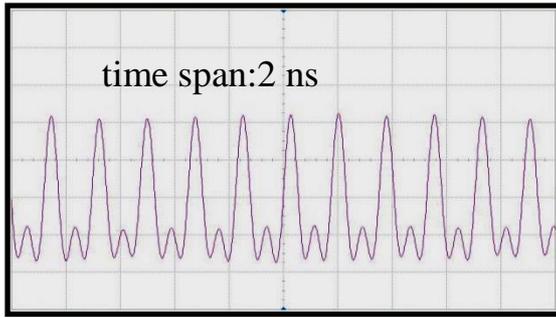


圖 5-4 (a)

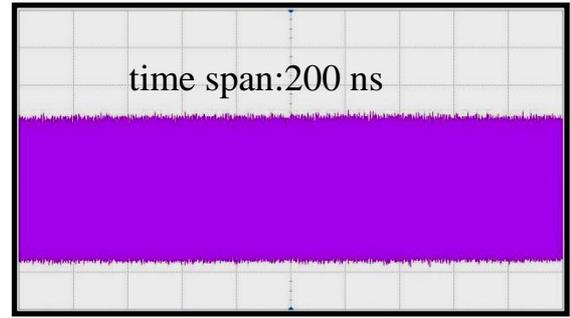


圖 5-4 (b)

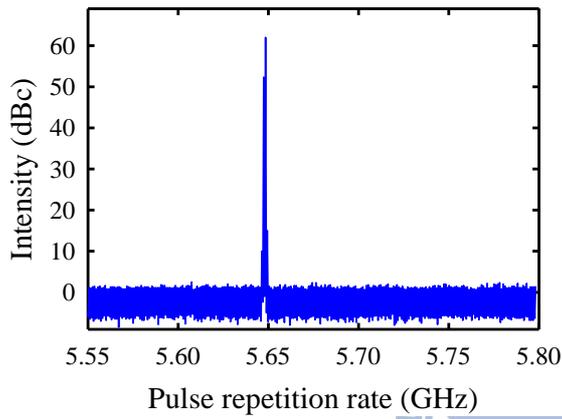


圖 5-4 (c)

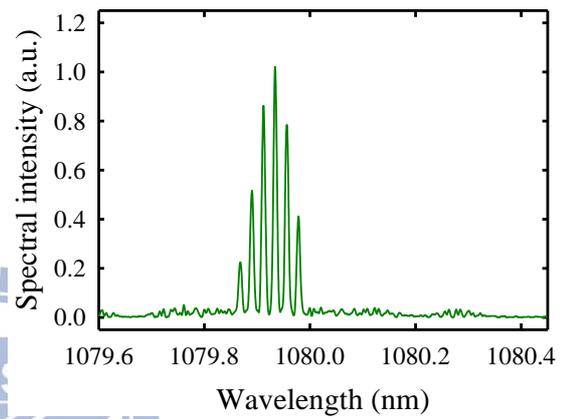


圖 5-4 (d)

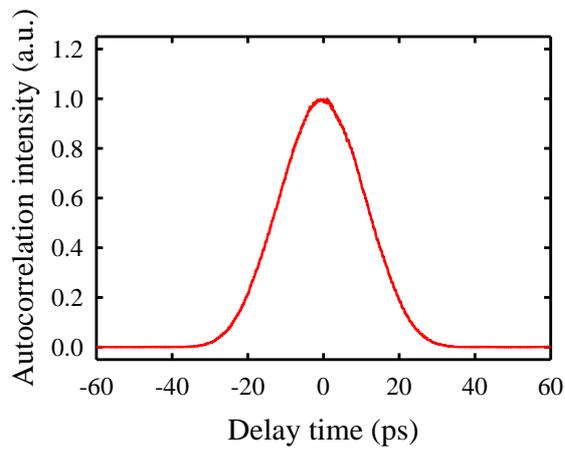


圖 5-4 (e)

圖 5-4 自鎖模雷射(tilting gain medium+wadged O.C)在: (a) 2 ns/div ; (b) 200 ns/div 時的輸出波 ; (c) 脈衝重複率示意圖 ; (d) 輸出光譜 ; (e) 自相關脈衝波形。

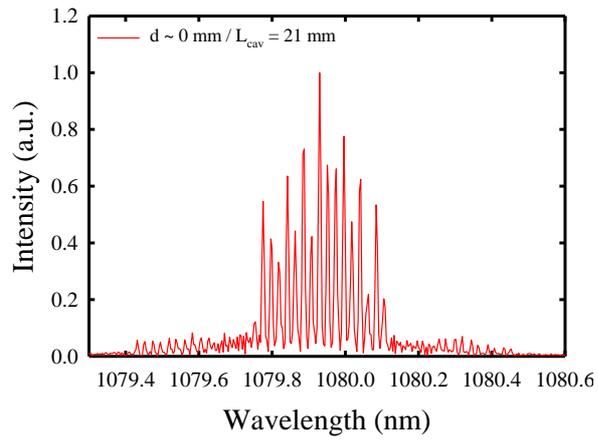


圖 5-5 (a)

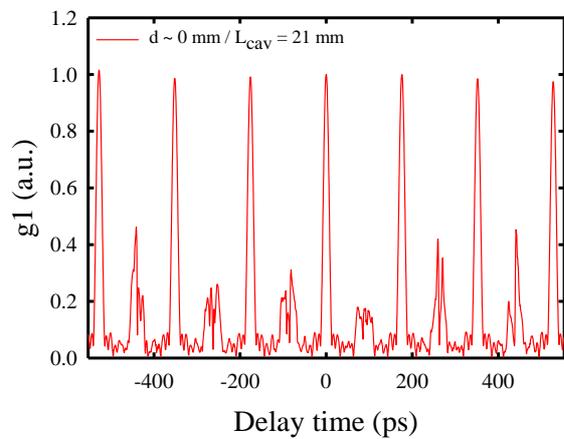


圖 5-5 (b)

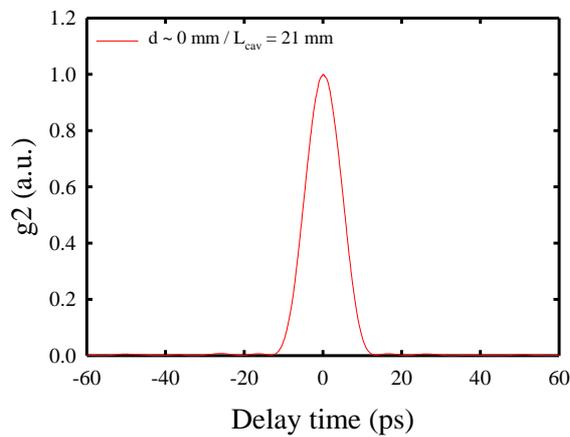


圖 5-5 (c)

圖 5-5 自鎖模雷射在腔內 d 值約等於 0 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550 \text{ ps} \sim 550 \text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60 \text{ ps} \sim 60 \text{ ps}$)。

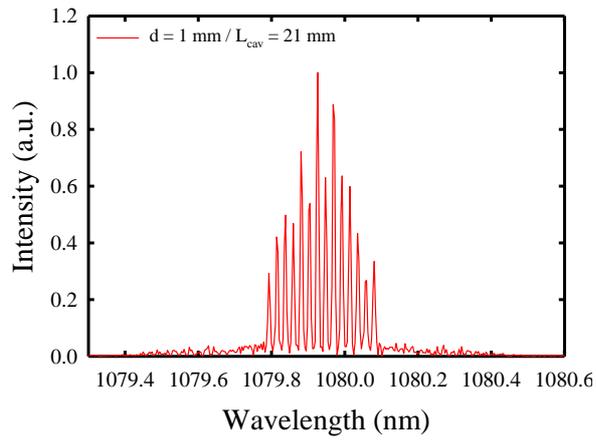


圖 5-6 (a)

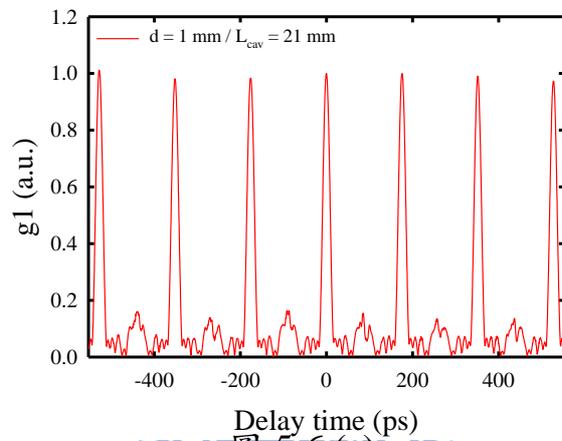


圖 5-6 (a)

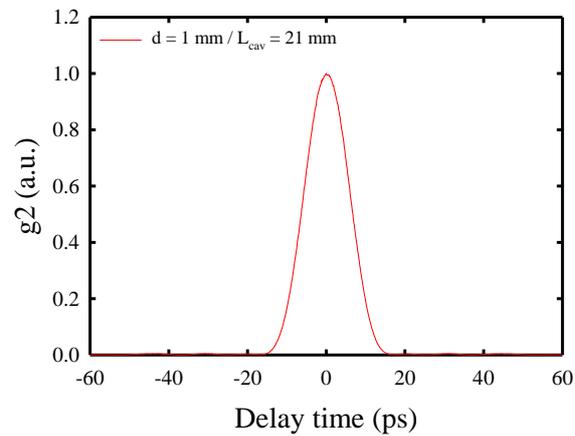


圖 5-6 (c)

圖 5-6 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 1 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550 \text{ ps} \sim 550 \text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60 \text{ ps} \sim 60 \text{ ps}$)。

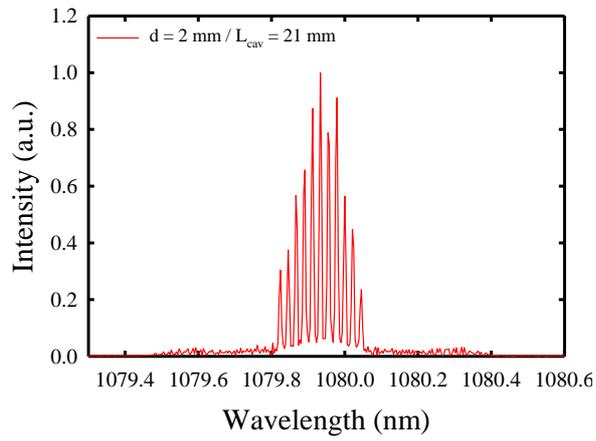


圖 5-7 (a)

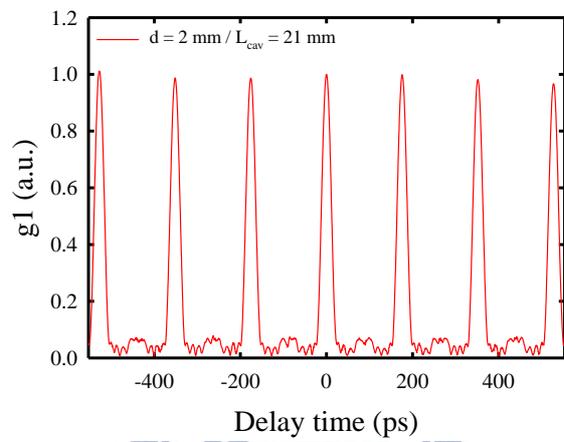


圖 5-7 (b)

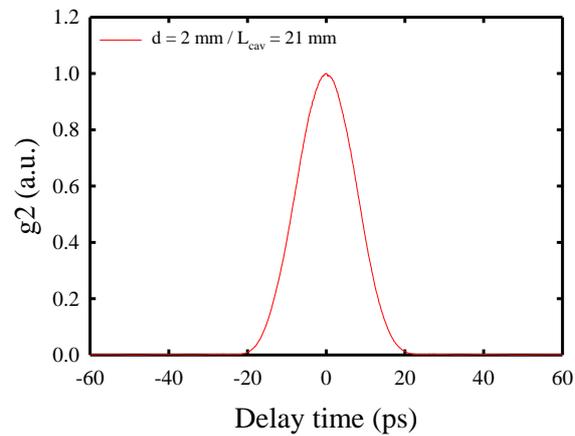


圖 5-7 (c)

圖 5-7 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 2 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550 \text{ ps} \sim 550 \text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60 \text{ ps} \sim 60 \text{ ps}$)。

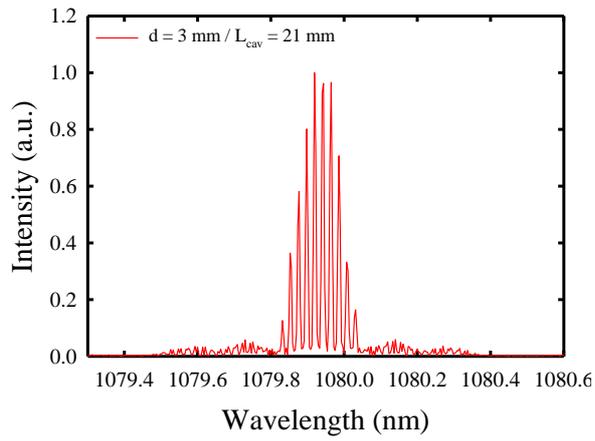


圖 5-8 (a)

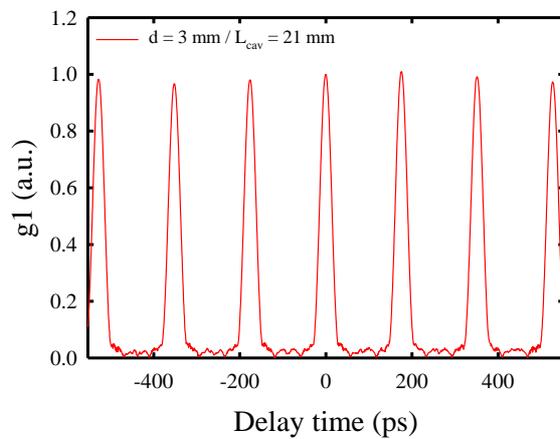


圖 5-8 (b)

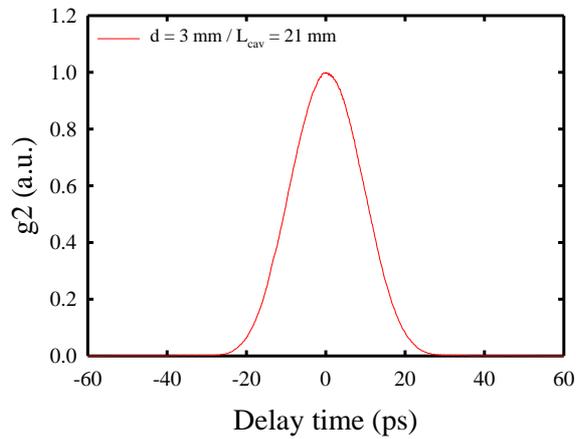


圖 5-8 (c)

圖 5-8 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 3 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 -550 ps ~ 550 ps); (c) 自相關量測波形(展開範圍 -60 ps ~ 60 ps)。

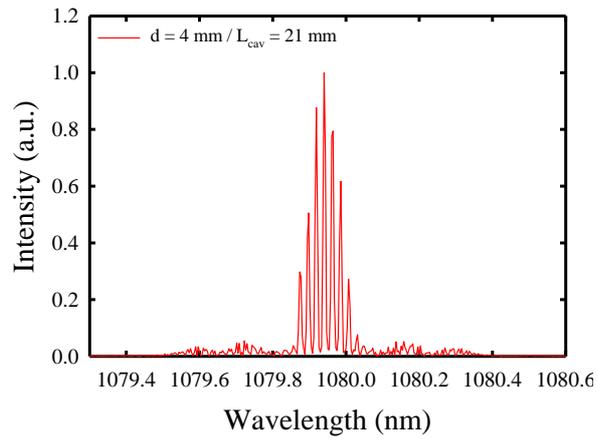


圖 5-9(a)

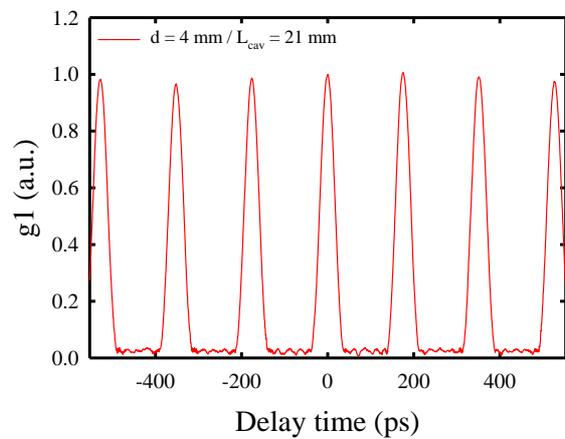


圖 5-9(b)

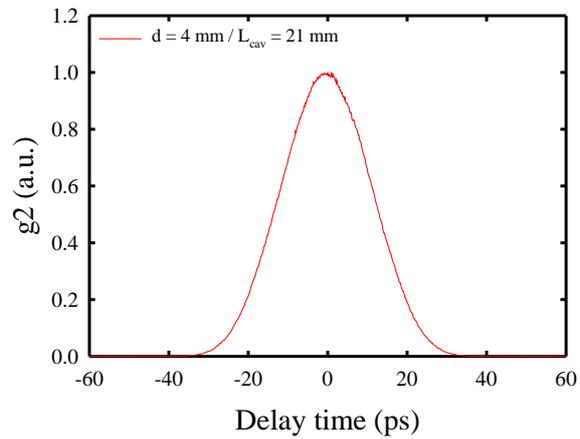


圖 5-9 (c)

圖 5-9 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 4 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 -550 ps ~550 ps); (c) 自相關量測波形(展開範圍 -60 ps ~60 ps)。

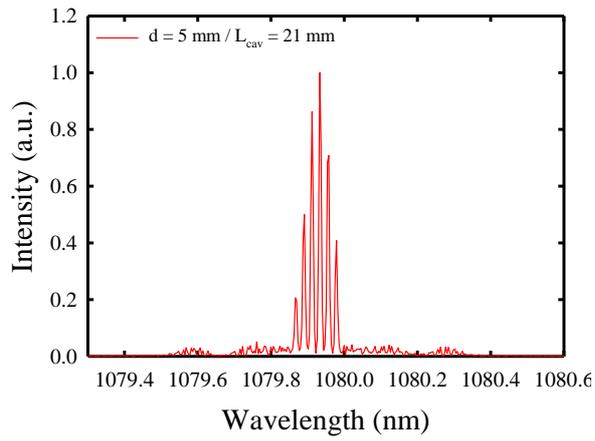


圖 5-10(a)

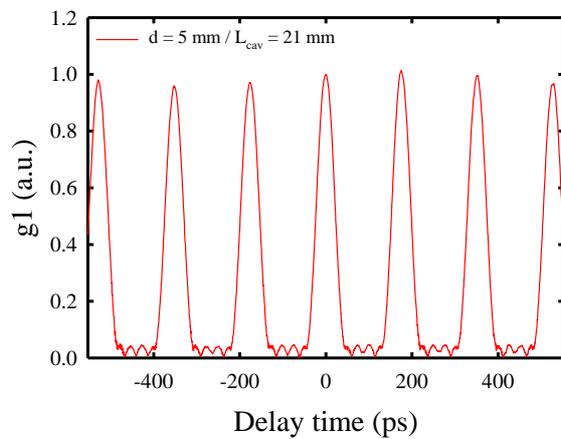


圖 5-10(b)

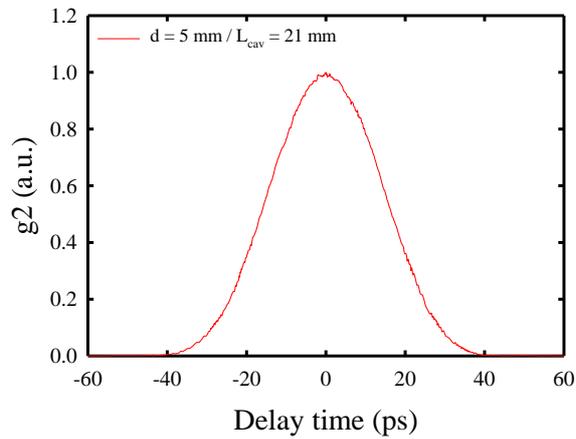


圖 5-10 (c)

圖 5-10 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 5 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 -550 ps ~ 550 ps); (c) 自相關量測波形(展開範圍 -60 ps ~ 60 ps)。

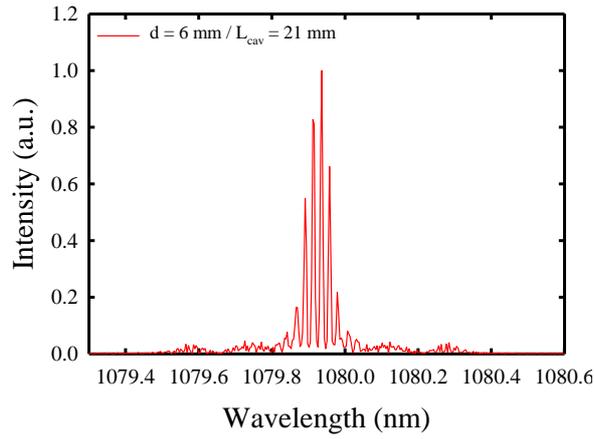


圖 5-11 (a)

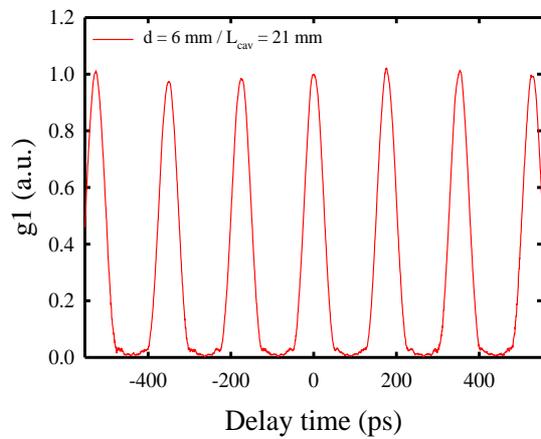


圖 5-11 (b)

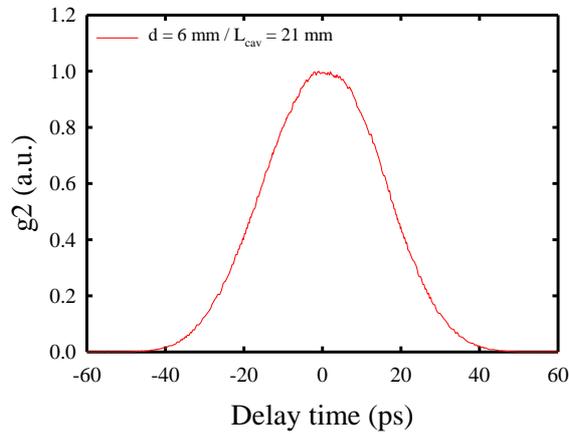


圖 5-11 (c)

圖 5-11 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 6 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 -550 ps ~ 550 ps); (c) 自相關量測波形(展開範圍 -60 ps ~ 60 ps)。

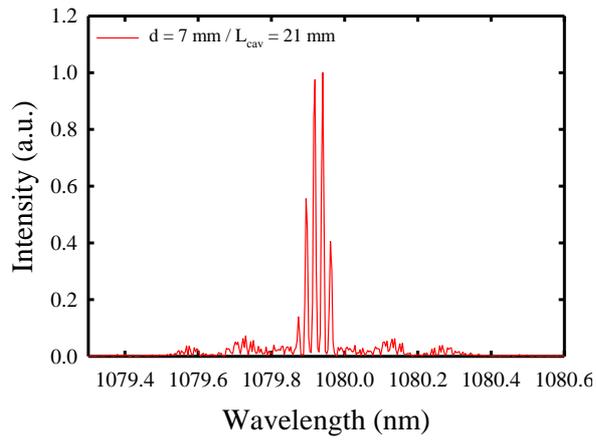


圖 5-12 (a)

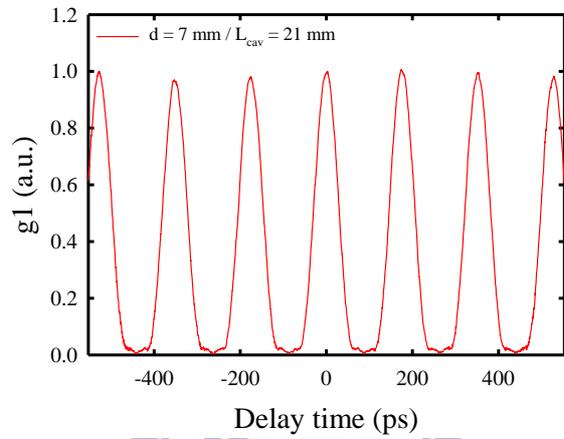


圖 5-12 (b)

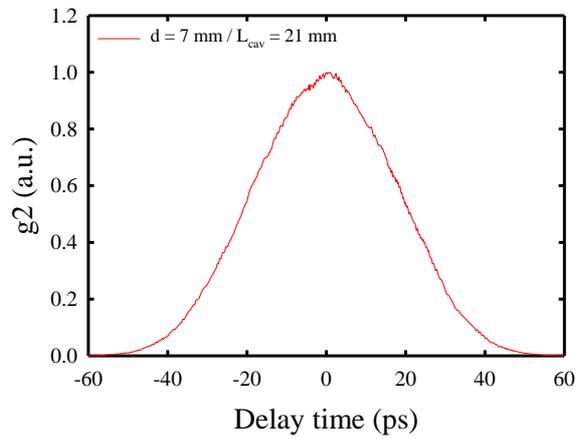


圖 5-12 (c)

圖 5-12 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 7 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 $-550 \text{ ps} \sim 550 \text{ ps}$); (c) 自相關量測波形(展開範圍 $-60 \text{ ps} \sim 60 \text{ ps}$)。

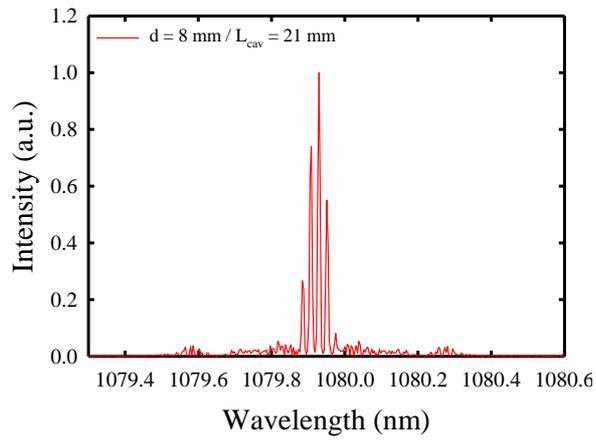


圖 5-13 (a)

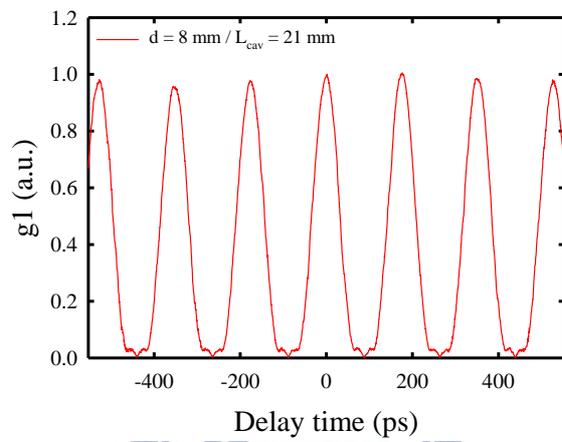


圖 5-13 (b)

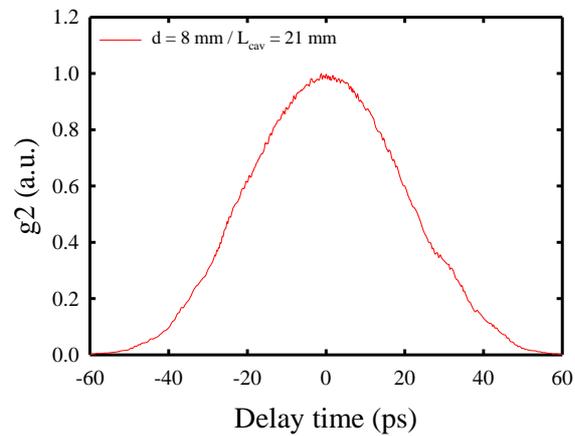


圖 5-13 (c)

圖 5-13 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 8 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps ~550 ps); (c) 自相關量測波形(展開範圍-60 ps ~60 ps)。

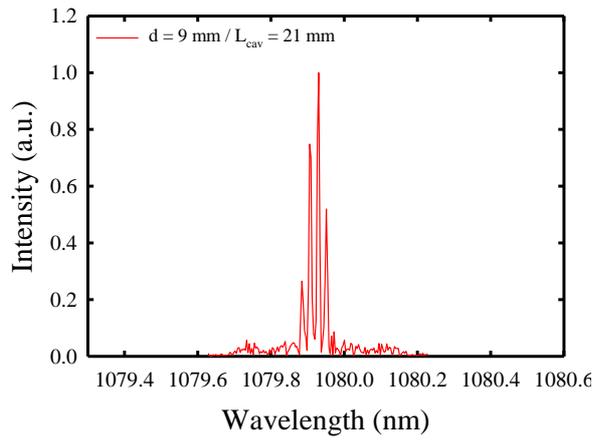


圖 5-14 (a)

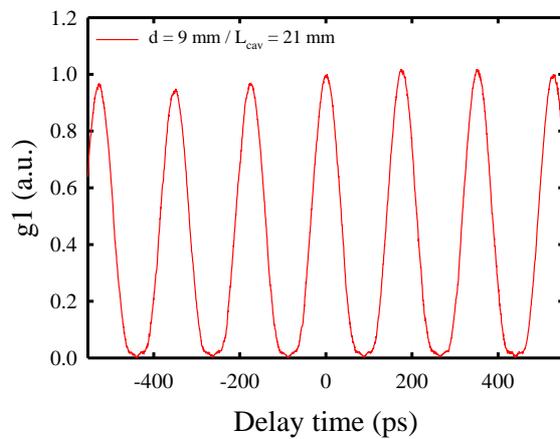


圖 5-14 (b)

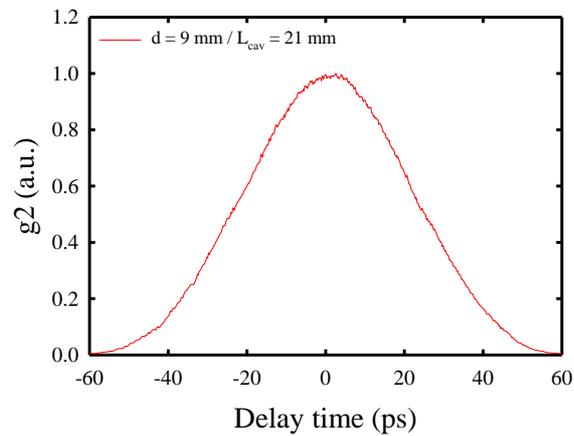


圖 5-14 (c)

圖 5-14 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 9 nm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍-550 ps ~550 ps); (c) 自相關量測波形(展開範圍-60 ps ~60 ps)。

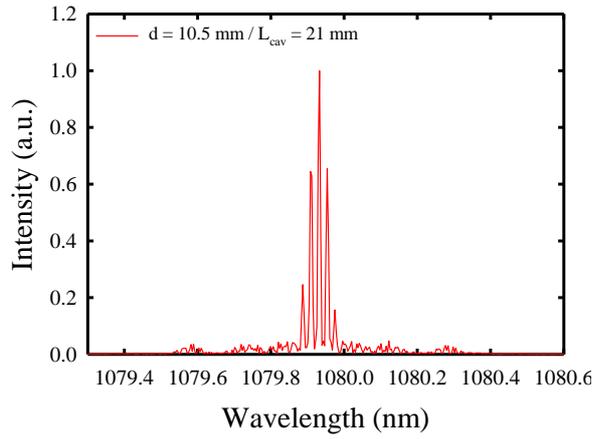


圖 5-15 (a)

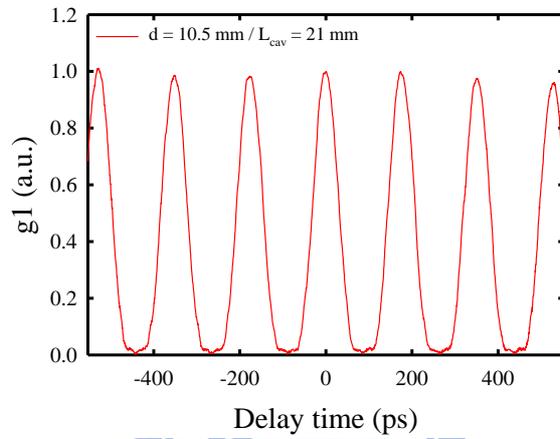


圖 5-15 (b)

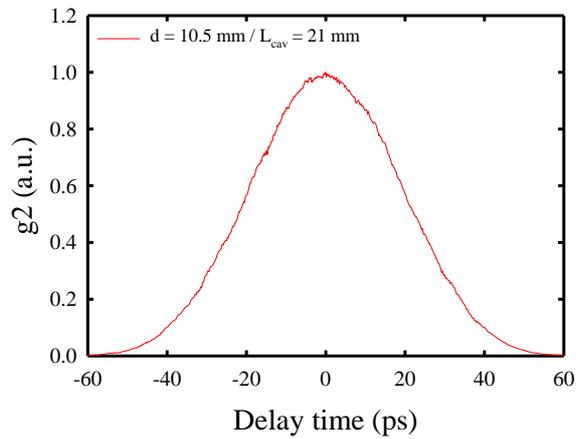


圖 5-15 (c)

圖 5-15 自鎖模雷射在腔內 d 值等於 10.5 mm 時其雷射: (a) 輸出光譜; (b) 自相關量測波形(展開範圍 -550 ps ~ 550 ps); (c) 自相關量測波形(展開範圍 -60 ps ~ 60 ps)。

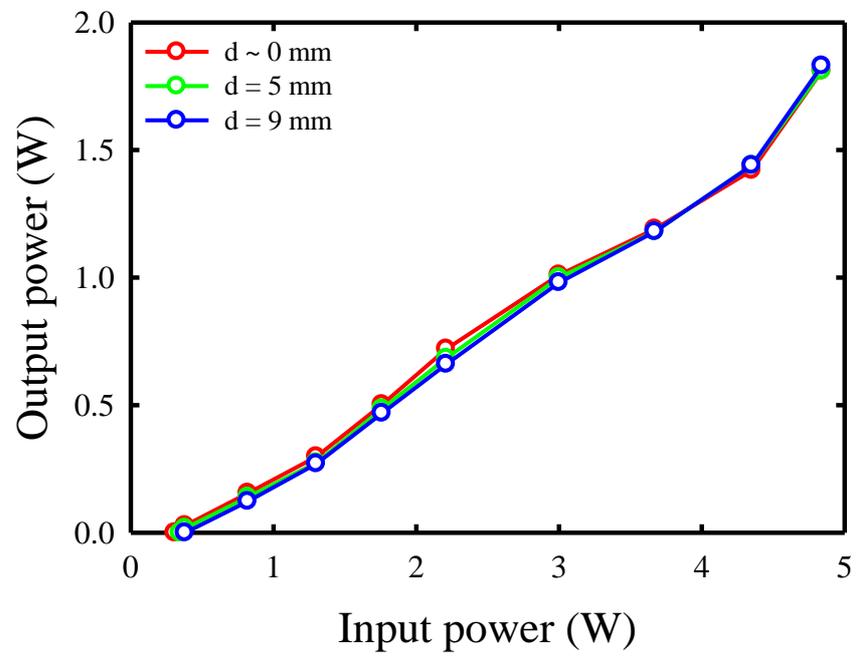


圖 5-16 自鎖模雷射不同腔內 d 值 I-P 曲線示意圖。

第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本實驗旨在研究 Nd:YAP 晶體的雷射輸出表現，主要分成連續波雷射 (CW laser)、被動式 Q 開關脈衝雷射 (PQS laser) 與自鎖模脈衝雷射 (Self-mode-locked laser) 三大實驗架構，並分四個部分討論 Nd:YAP 晶體的特性與雷射輸出表現。

第一個部分是以 b-cut Nd:YAP 晶體置入單光儀儀器中，量測 Nd:YAP 晶體 a 軸、b 軸、與 c 軸的吸收光譜。得已選用適當的激發源波長激發 Nd:YAP 晶體。我們量測出晶體的吸收光譜在 803 nm 有極大的吸收峰值。二極體雷射的輸出波長為 808 nm。我們已知二極體雷射的輸出波長常會因冷卻溫度影響而變化。我們改變二極體雷射的冷卻溫度測試出溫度在 19 度時，輸出波長為 803 nm。我們利用二極體雷射激發 Nd:YAP 晶體，並利用光學頻譜儀量測輸出波長 Nd:YAP 的螢光光譜主要有三個區段，分別是在 850~930 nm、1040~1120 nm、1310~1440 nm。在 1040~1120 nm 區間為我們感興趣的光譜區間，因此我們針對此區間做深入的研究。

第二部分是連續波雷射 (CW laser) 激發晶體，量測雷射輸出表現。實驗中我們將玻璃片置入雷射共振腔體中，成功的實現利用轉動玻璃片法線與光路角度達到輸出波長可為單波長、雙波長、多重波長。同時在單波長輸出時觀察到微調玻璃片的傾斜角度會使得 Nd:YAP 雷射輸單波長出光譜有可調性的特質表現。我們發現當增加玻璃片法線與光路兩者間的夾角角度 θ ，光譜儀的輸出光譜會往短波長的方向變化。

第三部分是被動式 Q 開關脈衝雷射實驗，量測脈衝雷射輸出表現。實驗中我們將 Cr^{4+} :YAG 晶體置入雷射共振腔體中，形成被動式脈衝雷射，

我們利用示波器顯示出雷射輸出波形。實驗中發現被動式開關雷射因為使用高耦合鏡面及 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 飽和吸收晶體造成許多的雷射損失導致無法激發出 1084 nm 波長

第四部份是自鎖模脈衝雷射實驗。我們觀察 Nd:YAP 晶體在腔體中無條件改變下，輸出波長的脈衝表現很差。更換了切邊角的輸出耦合鏡，得以改善自鎖模雷射的脈衝重複率。當我們改變增益介質與光路的角度時可以最佳化脈衝雷射輸出。其中輸出光譜也有明顯變化。觀察到當腔體長度不變而 d 距離變小，輸出光譜變寬、由於 FSR 不變所以模數變多。反之，當 d 距離變大，輸出光譜變窄、FSR 不變模數變少。



6.2 未來展望

在未來的工作中，可進一步探討兩種雷射輸出模式分別為：

(一)被動式 Q 開關脈衝雷射共振腔中置入玻璃片達成可選式單波長、雙波長及多波長被動式 Q 開關脈衝雷射。

(二)自鎖模脈衝雷射共振腔中置入玻璃片達成可選式單波長、雙波長及多波長自鎖模脈衝雷射操作。

參考文獻

1. M. J. Weber, M. Bass, K. Andringa, R. R. Monchamp, and E. Comperchio, “Czochralski growth and properties of YAlO_3 laser crystals,” *Appl. Phys. Lett.* **15**(10), 342-345 (1969).
2. M. J. Weber and T. E. Varitimos, “Optical spectra and intensities of Nd^{3+} in YAlO_3 ,” *J. Appl. Phys.* **42**(12), 4996-5005 (1971).
3. A. A. Kaminskii, S. E. Sarkisov, I. V. Mochalov, L. K. Aminov, and A. O. Ivanov, “Anisotropy of spectroscopic characteristics in the biaxial $\text{YAlO}_3\text{-Nd}^{3+}$ laser crystals,” *Phys. Stat. Sol. (a)* **51**(2), 509-520 (1979).
4. G. A. Massey and J. M. Yarborough, “High average power operation and nonlinear optical generation with the Nd:YAlO_3 laser,” *Appl. Phys. Lett.* **18**(12), 576-579 (1971).
5. R. Moncorgé, B. Chambon, J. Y. Rivoire, N. Garnier, E. Descroix, P. Laporte, H. Guillet, S. Roy, J. Mareschal, D. Pelenc, J. Doury, and P. Farge, “Nd doped crystals for medical laser applications,” *Opt. Mater.* **8**(1-2), 109-119 (1997).
6. R. Wu, P. B. Phua, and K. S. Lai, “Linearly polarized 100-W output from a diode-pumped Nd:YAlO laser,” *Appl. Opt.* **39**(3), 431-434 (2000).
7. M. Boucher, O. Musset, J. P. Boquillon, and E. Georgiou, “Multiwatt CW diode end-pumped Nd:YAP laser at 1.08 and 1.34 μm : influence of Nd doping level,” *Opt. Commun.* **212**(1-3), 139-148 (2002).
8. H. Y. Zhu, Y. M. Duan, G. Zhang, C. H. Huang, Y. Wei, W. D. Chen, H. Y. Wang, and G. Qiu, “High-power LD end-pumped intra-cavity

- Nd:YAlO₃/KTiOAsO₄ optical parametric oscillator emitting at 1562 nm,”
Laser Phys. Letter **7**(10), 703-706 (2010).
9. X. Wan, T. Riesbeck, and H. J. Eichler, “Tunable single frequency
microchip Nd:YAP MOPA laser operating at 1.08 μm,” Laser Phys. **23**(4),
045804 (2013).
10. L. Scheerer and M. Leduc, “Tuning characteristics and new laser lines in
an Nd:YAP CW laser,” IEEE J. Quantum Electron. **22**(6), 756-758 (1986).
11. F. Hanson and P. Poirier, “Multiple-wavelength operation of a
diode-pumped Nd:YAlO₃ laser,” J. Opt. Soc. Am. B **12**(7), 1311-1315
(1995).
12. L. D. Scheerer and P. Tin, “Tunable lasers at 1080 nm for helium optical
pumping,” J. Appl. Phys. **68**(3), 943-949 (1990).
13. E. F. Stephens, R. Vandiver, P. Tin, and M. R. Kokta, “Continuous-wave
operation and tuning characteristics of Nd:LuAlO₃ at 1083 nm for ³He and
⁴He optical pumping,” J. Appl. Phys. **78**(5), 3543-3545 (1995).
14. P. Cancio Pastor, G. Giusfredi, P. De Natale, G. Hagel, C. de Mauro, and
M. Inguscio, “Absolute frequency measurement of the 2³S₁ → 2³P_{0,1,2}
atomic helium transitions around 1083 nm,” Phys. Rev. Lett. **92**(2),
023001 (2004).
15. W. G. Rellergert, S. B. Cahn, A. Garvan, J. C. Hanson, W. H. Lippincott, J.
A. Nikkel, and D. N. McKinsey, “Detection and imaging of He₂ molecules
in superfluid helium,” Phys. Rev. Lett. **100**(2), 025301 (2008).

16. W. Guo, J. D. Wright, S. B. Cahn, J. A. Nikkel, and D. N. McKinsey, “Metastable helium molecules as tracers in superfluid ^4He ,” *Phys. Rev. Lett.* **102**(23), 235301 (2009).
17. Y. P. Huang, C. Y. Cho, Y. J. Huang, and Y. F. Chen, “Orthogonally polarized dual-wavelength Nd:LuVO₄ laser at 1086 nm and 1089 nm,” *Opt. Express* **20**(5), 5644-5651 (2012).
18. G. Shayeganrad, Y. C. Huang, and L. Mashhadi, “Tunable single and multiwavelength continuous-wave c-cut Nd:YVO₄ laser,” *Appl. Phys. B* **108**(1), 67-72 (2012).

