

# 研究摻釹混合鈮酸鹽類雷射的自鎖模特性

學生：范揚貴

指導教授：陳永富教授

國立交通大學理學院應用科技學程研究所碩士班

## 摘要

由於鎖模雷射具有可以產生連續穩定的高輸出功率、極短脈衝寬度輸出的特性，使其在科學研究及工業領域都有許多應用，本實驗選用具有良好雷射物理特性的摻釹鈮酸類晶體 ( $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ ) 作為增益質材料，以結構簡單的凹平共振腔輸出自鎖模雷射脈衝波長在 1064nm 及 1342nm 脈衝，並探討其相關特性，作為後續鎖模脈衝雷射設計時參考運用；實驗結果發現輸出脈衝雷射波長在 1064nm 時，在最大輸入功率 7.85W 時，得到輸出功率為 2.51W，轉換效率約為 31.97%，輸出脈衝形成基本鎖模現象，形成原因為共振腔長所造成，並發現輸出脈衝穩定度與 Gd 濃度呈反比；輸出脈衝波長在 1342nm 時，得到輸出功率 1.37W，轉換效率為 17.45%，形成諧波鎖模現象，形成原因為增益介質晶體本身抗反射鍍膜，造成標準具效應 (etalon effect) 發生，產生  $N=3$ ，最高重複率達 32.1GHz，脈寬為 5.5ps 鎖模脈衝雷射，並歸納繪製關係圖，以為後續運用。

# Exploring Self-mode-locked properties in Nd-doped mixed Vanadate Lasers

Student : Yang-Kuei Fan

Advisor : Yung-Fu Chen

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

## ABSTRACT

Since a continuous stable high power and extremely short pulse width laser output can be achieved by mode-locked laser, ultrashort pulse lasers are used in a wide range of areas, both in scientific and industrial. Nd-doped vanadate ( $\text{Nd: Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ ) crystal as a gain medium of its excellent physical characteristics are chosen in the experiment for lasing mode-locked pulse laser with wavelength at 1064nm and 1342nm for investigation of their properties in a simple plano-concave laser resonance cavity as a reference for mode-locked laser design use. The experimental results show that the output wavelength at 1064nm, with input power of 7.85W, can obtain 2.51W output power with a conversion efficiency of 31.97%, with the output pulse form showing a fundamental mode-locking phenomenon, because of the resonance cavity length, and found that the stability of the output pulse with Gd concentration is inversely proportional; pulse output at 1342nm wavelength, with the same input power can obtain output power of 1.37W, the conversion efficiency of 17.45%, the formation of harmonic mode-locking phenomenon, formed due to the gain medium crystal anti-reflective coating, resulting in a harmonic mode-locking effect occurring, generating  $N=3$ , the highest pulse repetition rate at 32.1GHz, pulse width 5.5ps, and summarize the relationship drawing, for subsequent use.

## 誌 謝

研究所三年的學習，對離開學校已有一段時間的我而言，是一段充滿挑戰的奇幻旅程，倍感壓力卻又充實滿載，壓力來自於覺得學識的浩瀚難以完全掌握，卻也是引領著我向前的動力。在此，首先要感謝的是指導教授陳永富老師的指導，老師的教導非但在做研究上教會我許多的專業知識、研究的精神與方法，在為人處事乃至人生哲理上的想法分享上，也不斷的給我新的思維與想法，這樣的言教、身教讓人終生受用。

其次要感謝的是梁興馳博士的指導，引領我進入實驗的領域，不厭其煩的反覆指教；以及要感謝的是吳泰緯學長的指導，沒有你的指導，我很難完成這個研究的工作；除此之外要感謝電控所指導過我的歐陽盟教授還有電物所所有實驗室成員們對我的友善與微笑以及指導；還有就是專班同學在生活及學習上的相伴，你們是很棒的朋友，值得一輩子交陪。

最後要感謝的，就是我的家人以及朋友了，感謝泡哥吳青謀先生的指導讓我得以進入交通大學學習；感謝我的父、母親以及我親愛的老婆王英姿的包容與體諒還有一雙可愛女兒子瑀、子云的陪伴，有你們的支持與鼓勵，我才能順利完成學業，僅以此畢業證書，獻給你們！

感謝大家！

范揚貴謹誌  
國立交通大學理學院碩士在職專班  
中華民國一〇二年七月

# 目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	V
第一章 序言.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 論文架構.....	2
第二章 雷射系統簡介.....	3
2-1 增益介質(gain medium)與 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 材料特性探討.....	3
2-2 激發光源 (pumping source).....	9
2-3 共振腔 (cavity).....	11
2-4 雷射的輸出形式.....	12
第三章 鎖模雷射理論介紹、發展與類別.....	13
3-1 基本鎖模 (Fundamental Mode-Locking).....	13
3-2 諧波鎖模 (Harmonic Mode-Locking).....	19
3-3 多脈衝鎖模 (Multipulse Mode-Locking).....	21
3-4 鎖模雷射的分類與發展.....	21
3-4-1 主動式鎖模雷射 (Active Mode-locked Laser).....	23
3-4-2 被動式鎖模雷射(Passive Mode-locked Laser).....	24
3-4-3 自發性鎖模雷射(Spontaneous Mode-locked laser).....	24
3-5 超短脈衝雷射量測技術.....	26
3-5-1 g <sub>1</sub> (τ) 電場自相關 (Electric Field Autocorrelation)量測.....	27
3-5-2 g <sub>2</sub> (τ) 強度自相關 (Intensity Autocorrelation)量測.....	27
第四章 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 自鎖模雷射輸出在波長 1064nm 鎖模特性探討.....	30
4-1 實驗架構.....	30
4-2 實驗結果與討論.....	32
第五章 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 自鎖模雷射輸出在波長 1342nm 鎖模特性探討.....	39
5-1 實驗架構.....	39
5-2 實驗結果與討論.....	42
第六章 總結與未來研究方向.....	56
參考文獻.....	58

## 圖目錄

圖 2-1 熱平衡下的電子能階波茲曼分佈曲.....	4
圖 2-2 受激電子可能發生情況 (a) spontaneous emission (b) stimulated emission.....	5
圖 2-3 雷射能階躍遷示意圖 (a) 三階雷射 (b) 四階雷射.....	7
圖 2-4 以 Nd:Gd <sub>0.2</sub> Y <sub>0.8</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.6</sub> Y <sub>0.4</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.8</sub> Y <sub>0.2</sub> VO <sub>4</sub> 晶體測量其吸收光譜，經加上水平、垂直偏振片，並以 980 校正片校正後結果 (a) 水平偏振片 (b) 垂直偏振片.....	8
圖 2-5 Nd:Gd <sub>0.2</sub> Y <sub>0.8</sub> VO <sub>4</sub> 與 Nd:Gd <sub>0.8</sub> Y <sub>0.2</sub> VO <sub>4</sub> 螢光光譜量測結果.....	10
圖 3-1 非鎖模雷射 (a) 雷射輸出縱模模態之振幅及相位呈隨機分佈 (b) 雷射輸出強度無規則性.....	14
圖 3-2 理想鎖模雷射 (a) 輸出縱模模態振幅、相位圖，振幅呈高斯分佈 (b) 初始相位均為零 (c) 鎖模雷射輸出強度隨時間變化.....	15
圖 3-3 鎖模雷射輸出脈衝與時間函數圖，於 N = 3、5、7 時的縱模分佈.....	17
圖 3-4 谐波鎖模輸出 (a) E <sub>1</sub> with $\phi_1 = 0$ 脈衝輸出圖 (b) E <sub>2</sub> with $\phi_2 = \pi$ 脈衝輸出圖 (c) E <sub>1</sub> +E <sub>2</sub> 疊加後產生脈衝間隔 $\pi$ 輸出.....	20
圖 3-5 多脈衝鎖模輸出 (a) E <sub>0</sub> with $\phi_0 = 0$ (b) E <sub>1</sub> with $\phi_1 = \frac{3\pi}{5}$ (c) E <sub>2</sub> with $\phi_2 = \frac{\pi}{5}$ (d) E <sub>3</sub> with $\phi_2 = \frac{4\pi}{5}$ (e) E <sub>0</sub> 、E <sub>1</sub> 、E <sub>2</sub> 、E <sub>3</sub> 多脈衝鎖模調制後輸出隨時間變化.....	22
圖 3-6 超短脈衝量測技術示意圖 (a) g <sub>1</sub> ( $\tau$ ) 電場自相關儀、邁克森干涉儀示意圖 (b) g <sub>2</sub> ( $\tau$ ) 強度自相關量測技術儀.....	29
圖 4-1 以 1% Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質輸出波長 1064nm 雷射實驗架構示意圖.....	31
圖 4-2 以 Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質晶體輸出 1064nm 波長雷射輸入與輸出功率關係.....	33
圖 4-3 以 Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質晶體輸出 1064nm 波長雷射 (a) 1064.2nm 至 1064.4nm 光學頻譜 (optical spectrum) 圖 (b) 同調分析範圍 $\pm 165$ mm 同調長度 (coherent length) 關係圖 (c) 脈衝串時間解析維度 1 $\mu$ s 鎖模脈衝圖 (d) 脈衝串時間解析維度 2 $\mu$ s 振幅振盪脈衝輸出圖.....	35
圖 4-4 以 Nd:Gd <sub>0.2</sub> Y <sub>0.8</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.6</sub> Y <sub>0.4</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.8</sub> Y <sub>0.2</sub> VO <sub>4</sub> 等 4 顆混晶作為增益介質輸出波長 1064nm 脈衝雷射輸入與輸出功率關係圖.....	36
圖 4-5 以 Nd:Gd <sub>0.2</sub> Y <sub>0.8</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.6</sub> Y <sub>0.4</sub> VO <sub>4</sub> 、Nd:Gd <sub>0.8</sub> Y <sub>0.2</sub> VO <sub>4</sub> 等 4 顆混晶作為增益介質輸出波長 1064nm 脈衝雷射示波器 (oscilloscope) 解析度 100ns 脈衝輸出圖.....	37
圖 4-6 以 (a) Nd:Gd <sub>0.2</sub> Y <sub>0.8</sub> VO <sub>4</sub> 、(b) Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 、(c) Nd:Gd <sub>0.6</sub> Y <sub>0.4</sub> VO <sub>4</sub> 、(d) Nd:Gd <sub>0.8</sub> Y <sub>0.2</sub> VO <sub>4</sub> 等 4 顆混晶作為增益介質輸出波長 1064nm 脈衝雷射光學頻譜與同調長度圖.....	38

圖 5-1	以單光儀量測 Nd:Gd <sub>0.8</sub> Y <sub>0.2</sub> VO <sub>4</sub> 混晶的螢光光譜, 掃描範圍介於 1000nm~1380nm, 螢光光譜最強在波長 1064nm 處, 次強波長在 1342nm.....	40
圖 5-2	二極雷射激發以 1% Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質輸出自鎖模脈衝雷射波長在 1342nm 實驗架構圖.....	41
圖 5-3	以 Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質晶體架構輸出波長在 1342nm 鎖模雷射的平均輸出功率與連續輸入激發功率關係圖.....	43
圖 5-4	以 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質, 脈衝雷射輸出波長在 1342nm 形成重複率 10.7GHz 的諧波鎖模現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖.....	44
圖 5-5	以單光儀( TRIAX 320 )量測 Nd:Gd <sub>0.4</sub> Y <sub>0.6</sub> VO <sub>4</sub> 晶體的吸收光譜, 波長掃描範圍自 1000nm 至 1400nm 的量測結果.....	46
圖 5-6	以 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質, 脈衝雷射輸出波長在 1342nm 形成重複率 21.4GHz 的諧波鎖模現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖.....	48
圖 5-7	以 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質, 脈衝雷射輸出波長在 1342nm 形成重複率 32.1GHz 的諧波鎖模現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖.....	49
圖 5-8	以 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質, 脈衝雷射輸出波長在 1342nm 時輸出雷射呈現拍頻 (beating) 波包現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖.....	50
圖 5-9	以 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質, 脈衝雷射輸出波長在 1342nm 時輸出雷射呈現隨機分佈 (random) 波包現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖.....	51
圖 5-10	以 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質, 輸出波長在 1342nm 諧波鎖模脈衝雷射重複率達 (a) 10.7GHz、(b) 21.4GHz 及 (c) 32.1 GHz 等不同重複率之小尺度相干長度圖...	53
圖 5-11	以 Nd:Gd <sub>x</sub> Y <sub>1-x</sub> VO <sub>4</sub> 為增益介質, 脈衝雷射輸出波長在 1342nm 時輸出諧波鎖模雷射在不同共振腔長條件下所產生鎖模脈衝雷射重複率與晶體本身所造成重複率比值關係圖.....	54
圖 5-12	不同腔長條件下出現相同重複率族群整理比較圖.....	55

# 第一章 序言

## 1-1 研究動機

1960 年代發明了雷射後，開啟了許多有關於光學物理領域的研究，尤其到了 1960 年中期研發出第一個奈秒 (nanosecond,  $10^{-9}$ s) 鎖模雷射後，人們對超快光學領域更感興趣，時至今日，脈衝雷射尺度已達到飛秒 (femtosecond,  $10^{-15}$ s) 等級，超短脈衝雷射的應用範圍非常廣泛，不論在科學界與工業界甚至醫學領域，高強度脈衝在工業應用上常用作微精密加工、材料表面處理、鑽孔加工或三維原型機製造；在醫療用途上，可用作手術切割或眼科醫學應用，或是脈衝光對皮膚的治療處理以及各種醫學影像的應用，如顯微影像或光譜學的應用等；此外，超短脈衝使得量測更小時間維度變得可行，如微積體電路的光電取樣量測或半導體元件激發量測技術；而鎖模雷射在度量衡學領域可用以作測距或在頻域度量的量測應用；此外，高峯值能量鎖模雷射的非線性頻率轉換亦有許多的應用，比如在雷射投影顯示技術上的利用；另外，在微波、毫米波掃描、兆赫頻域光學、皮秒等級光電子學應用，等在通訊、高速電子與訊號處理領域均許多應用 [1]。

欲得到超短脈衝雷射有許多不同的方法，比如說 Q 開關或是鎖模的方式來達到，而鎖模機制又可分為主動式、被動式與自發性鎖模等類別，自發性鎖模雷射具有構造簡單、不需要額外的調制裝置或是其它元件的優點，共振腔內僅有增益介質晶體以產生自鎖模現象，能以簡單的共振腔結構產生超短脈衝雷射，這種鎖模技術主要係利用人造飽和吸收體的非線性特性，亦可稱為光學克爾效應，來達到鎖模的目的。

鎖模雷射發展至今，二極體激發固態雷射 (diode-pumped solid-state laser, DPSSL) 是相當重要的鎖模雷射之一，DPSSL 的設計中，增益介質的挑選是非常重要的，而且可說是關鍵的元件，Nd:YAG 晶體是一種傳統上被廣泛運用且認定為極佳的增益介質選擇之一，而 Nd:YVO<sub>4</sub> 是另一種良好的增益介質選擇，由於其在 808nm 波長附近有更寬的吸收頻帶特性，使其更適於應用在雷射設計中，可惜的是它的熱傳導係數較低，其後在 1992 年，成功生長出 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶體 [2] 後，由於 Nd:GdVO<sub>4</sub> 有更佳的雷射參數特性，改善了熱效應的缺點，因此也成為雷射設計中增益介質材料的一種選擇；近年來，一種

新的增益介質材料  $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  被研發應用 [3,4]，由於其具有更高效率的吸收與散射截面，並具有更佳的热傳導特性，且已被證實為極佳的增益質晶體選擇[5,6]。

因此在本論文之中，我們選用混晶  $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  晶體架構自發性鎖模雷射，以雷射二極體當作激發光源，並且以簡單的直線型凹平共振腔，在無其它額外增加元件的簡易條件來實現高重複率的脈衝雷射，實驗中搭配不同鍍膜鏡組條件使輸出脈衝雷射輸出波長在 1064nm 與 1342nm 的鎖模脈衝雷射，在實驗中，我們使用不同摻雜濃度的晶體當做增益介質，並藉著改變晶體傾角及腔長等條件來觀察鎖模的效果、原因，並探討所造成的鎖模現象。

## 1-2 論文架構

本論文第一章首先敘述研究動機，簡述鎖模雷射的發展與重要性，其次介紹以混晶為增益介質的特性，進而引發研究動機欲以混晶架構高重複率脈衝鎖模雷射的發想，其次在第二章則是簡介雷射系統，從雷射形成的基本原理開始介紹，另分別就構成要件之增益介質、激發光源以及共振腔結構等主要構成元素予說明，並就雷射輸出形式等介紹之，在第三章主要探鎖模雷射的理論，從理論解析的角度解釋鎖模雷射的類別與原因，其後就其歷史發展沿革與類別加以說明，最後並簡述超短脈衝雷射量測的原理；第四章為本論文實驗主體的開端，是以不同濃度的  $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  來架構自鎖模雷射並輸出波長在 1064nm 脈衝雷射並就所量得數據討論之，以及對不同濃度混晶對輸出脈衝所造成的影響的現象提出說明；於第五章則是以  $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  混晶架構自鎖模雷射並輸出波長在 1342nm 脈衝雷射並就所量得數據討論之，實驗中除先予調整至功率優化最佳條件時，並且改變晶體的傾角條件觀察輸出變化，以及調整腔長條件並觀察其輸出變化，並歸納出不同條件造成現象的小結與原因討論；最後在第六章則是歸納實驗總結與未來的研究方向。



## 第二章 雷射系統簡介

雷射之名翻譯自英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)，1917 年愛因斯坦提出受激輻射理論，指出當材料原子核外電子受到外來激發時，會因為能量的增加，而被提升至較高之能階，然其為不穩定狀態，當電子自高能階回到低能階時，依據質能不滅定律，將釋放出能量，若此釋放能量以光子形態釋出，並創造一機制使過程不斷重複，光子數量達一定程度時即可產生雷射；一般而言其構成要件有三，分別為：增益介質 (gain medium)、激發光源 (pumping source)、共振腔 (cavity)，以下分別簡介之：

### 2-1 增益介質(gain medium)與 $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ 材料特性探討

從波爾 (Niels Bohr)於 1913 年所建立的原子模型理論中可以了解到，物質原子核週邊分佈著一定數量的電子，且僅存在於特定的能階，不同的繞行軌道代表著不同的能階，當原子呈熱平衡 (thermal equilibrium)時，相較於較高能階的受激態，大部份的電子處於穩定的基態，即原子核外圍能量最弱的電子軌道，能量分佈呈 Boltzmann Distribution，如圖 2-1 所示。

當電子受到一個入射光子激發，吸收能量躍遷至較高能階成受激態，此時將有二種可能發生狀況，當電子受到熱、電、光、化學等能量作用時，將會自基態能階躍遷至較高的能階，第一種狀況為電子經一段時間後自然的從較高能階掉回到原本的基態能階上，此時將會產生一個光子，這個過程叫自發輻射 (spontaneous emission)現象，此時產生之光子，因不具有方向性，故對於雷射的產生不具有意義；第二狀況則為，當電子處於受激態能階時，若受到同波長之外部光能量誘發，此時將會導致電子掉回到基態能階，並且會產生兩個光子，這個過程叫受激輻射 (stimulated emission)現象，此過程所產生的光，具有固定的方向性、波長、頻率等特性，亦可稱其具有同調性 (coherent)，這種現象是產生雷射的主要來源，若在前後以鏡組使其在腔內不斷反射重現，即為雷射的基本架構，前述二種狀況簡要圖示如圖 2-2。

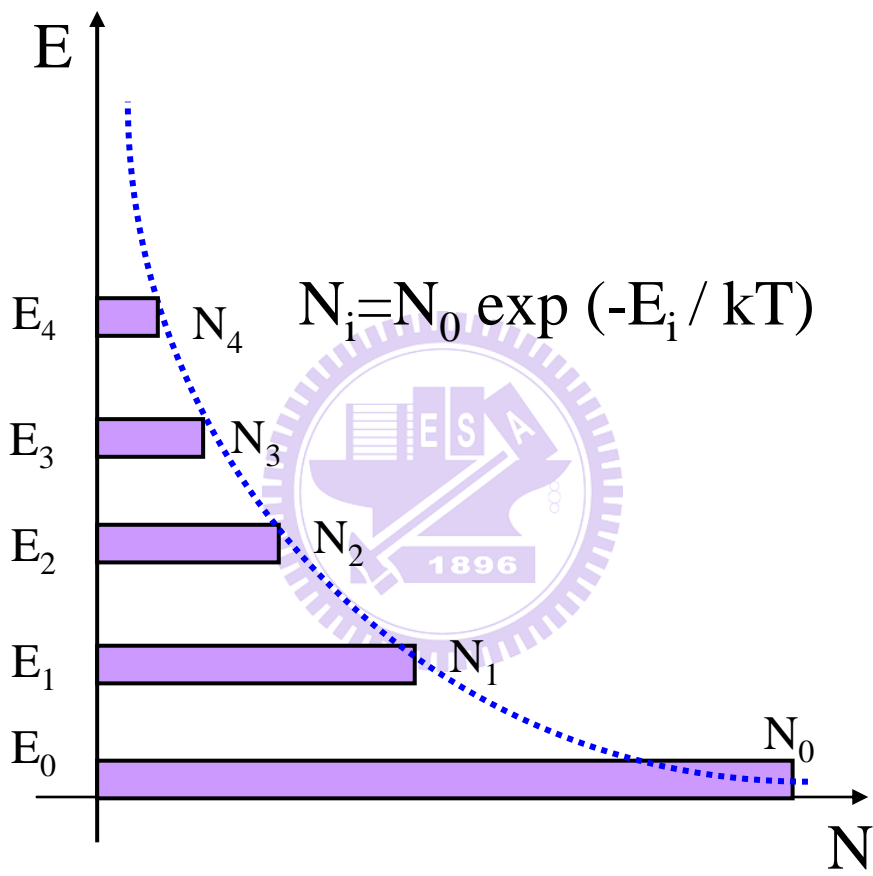
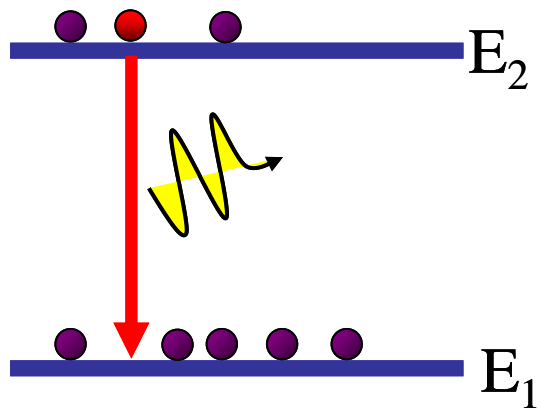
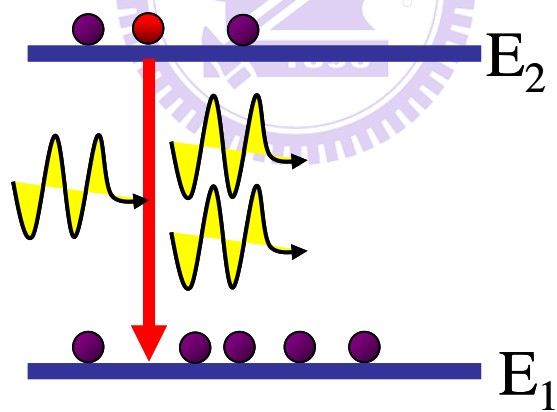


圖 2-1 熱平衡下的電子能階波茲曼分佈曲線



**(a) spontaneous emission**



**(b) stimulated emission**

圖 2-2 受激電子可能發生情況 (a) spontaneous emission (b) stimulated emission

為能產生大量光子形成雷射，增益介質之材料必需具有高能階電子數量較多、低能階電子數量較少，與熱平衡電子分佈行情相反之特性，使之更適於架構雷射系統，這種特性稱之為居量反轉 (population inversion)，此為產生雷射之必要條件；大部分用作雷射增益介質材料皆為四能階材料，因其較三能階材料具有較易形成居量反轉環境之特性，如圖 2-3 所示。

雷射依增益介質材料可區分為固態雷射、液態雷射、氣態雷射、半導體雷射等類型，固態雷射因具有體積較小、堅固、使用方便與輸出功率大等特性，因此廣為應用於各種領域之中，其中，增益介質材料特性，為固態雷射設計的主要關鍵因素之一，通常基底材料為晶體、玻璃或陶瓷材料等，並摻雜少量的稀土元素，或可稱之為雷射啟動離子 (laser-active ions)，這些稀土元素離子對激發光源特定波長具有良好的轉換效率，目前較廣為應用的增益介質材料有 Nd:YAG、Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:GdVO<sub>4</sub>、Nd:GdYVO<sub>4</sub> 等以鈮鋁石榴石 (YAG)或鈮酸鈮 (YVO<sub>4</sub>)為基底材料，並摻雜鐳系金屬離子，使其具有較佳材料特性。

由於摻鈮鈮酸類晶體 (Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>)具有更高效率的吸收與散射截面，與 Nd:GdVO<sub>4</sub> 比較，有更佳的物理特性與更高的熱傳導性，從吸收與散射光譜亦證明此類混晶具有更大的吸收係數與更寬的吸收頻帶，以及更大的半高寬，可作為極佳的增益質材料 [3-7]。

有關增益介質材料選用之探討，實驗首先就 Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.4</sub>Y<sub>0.6</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 等四顆 3\*3\*6mm<sup>3</sup> 晶體，鈮元素摻雜濃度為 1%，不同比例混合鈮元素與鈮元素的混合晶體，以單光儀進行吸收光譜的量測，以確認此類混合晶體在不同濃度下，對於那一種波長的激發光源具有較佳的吸收效果，籍以作為選用激發光源的參考依據，量測結果如圖 2-4 顯示，可以發現不同 Gd 與 Y 濃度之混合晶體，分別加以垂直、水平偏振片量測吸收光譜，並且以單光儀校正片予以校正量測值，由量測結果可發現偏振方向並不會對吸收光譜波長造成太大的影響，同時可以發現 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 混晶對 808nm 波長具有良好的吸收特性，可作為後續實驗雷射二極體激發光源選擇的參考依據。

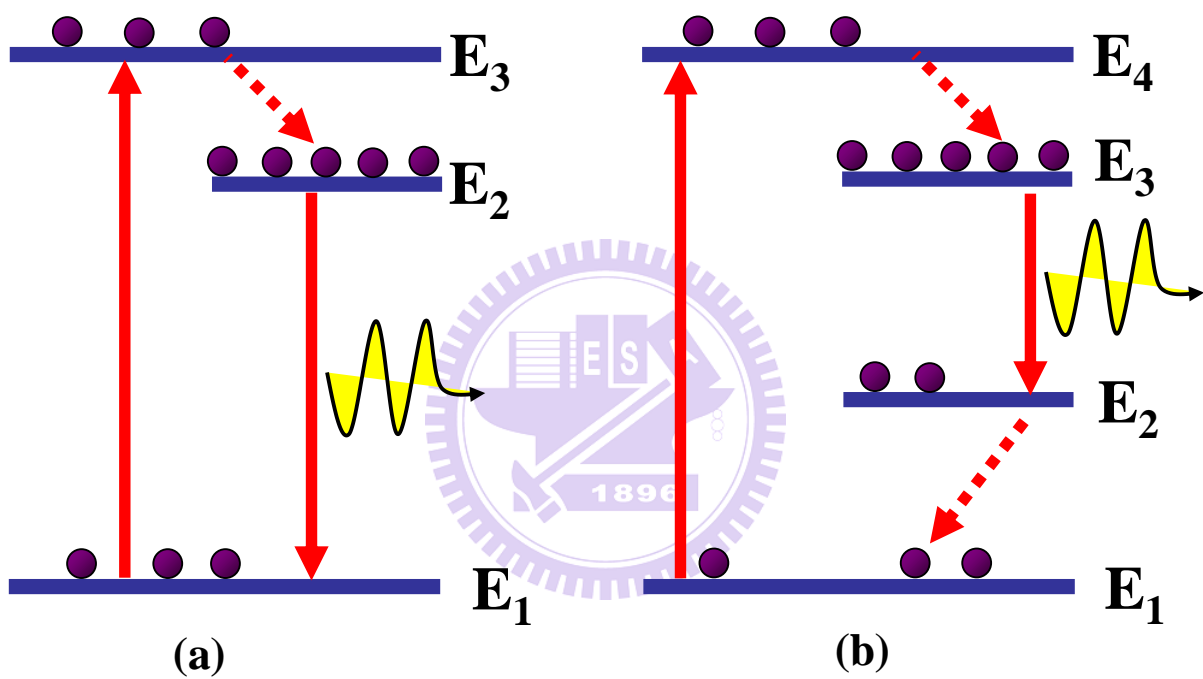


圖 2-3 雷射能階躍遷示意圖 (a) 三階雷射 (b) 四階雷射

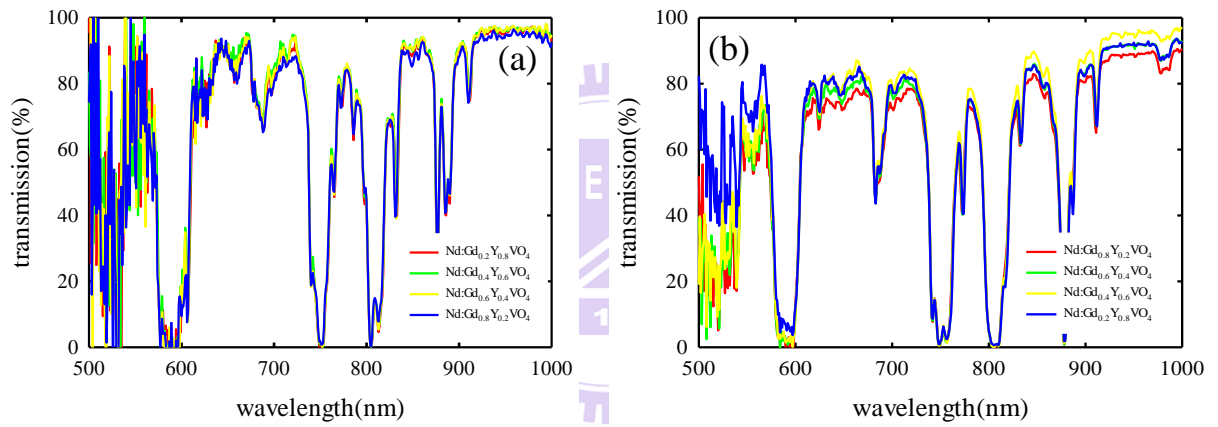


圖 2-4 以  $\text{Nd:Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{VO}_4$  晶體測量其吸收光譜，經加上水平、垂直偏振片，並以 980 校正片校正後結果 (a) 水平偏振片 (b) 垂直偏振片

由於光激發螢光量測是一種非破壞，且可以快速得到材料中能階結構與載子躍遷行為的量測方法，可用於檢測半導體材料的光特性，並可進一步分析摻雜雜質種類、能隙大小等特性，做為材料結構、成分與品質的判斷依據，運用外來光源的照射，使待檢測晶體發出螢光以量測其螢光光譜；接下來，實驗就 Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub> 與 Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 兩顆晶體進行光激發螢光光譜量測，其量測結果如圖 2-5 所示，量測結果顯示，對於不同混合比例釷元素與鈮元素的混合晶體條件，對於個別螢光光譜特性並不會有太大的影響，以 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 混合晶體的光激發螢光能量強度最強波長在 1064nm 附近，次強波長在 1342nm 附近與 914nm 附近，因此本論文實驗主要對以 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 混合晶體為增益介質架構雷射系統，並使其輸出波長分別在 1064nm 與 1342nm 這兩個主要輸出波長去探討其所形成的鎖模特性，以單光儀 TRIAX-320 單光儀進行光激發螢光量測結果可作為後續雷射架設時特性參考依據。

## 2-2 激發光源 (pumping source)

承前討論，為使增益介質形成居量反轉環境，進而產生雷射光束，須由外部給予能量，此過程稱為激發 (pumping)，依不同激發方式，可分成光能激發 (optical pumping) 與電能激發 (electrical pumping) 兩種，光能激發係以高能量短波長光線對增益介質產生激發作用，而電能激發常用於氣體雷射，於放電管電極給予適當電壓，使放電管兩極有電流流過，利用氣體放電，造成電子居量反轉以產生雷射光束輸出。

另外，光學激發依照射位置可區分為側邊激發及單端激發兩種方式，側邊激發指的是將激發源置於增益介質的週圍，利用雷射二極體或是閃光燈為光源對中心的增益介質作用，側邊激發具有所得增益值較差、光束品質與功率轉換效率較差的缺點。而單端激發就是將激發光源置於增益介質的單一側邊，以雷射二極體或是二極體陣列光束來激發增益介質，其聚焦點會在增益介質晶體內部，作動方向同共振腔方向，此種結構具有結構簡單、空間模態佳與轉換效率高等優點，本論文實驗即採此種激發方式。前述兩種激發方式，各有其優、缺點，並應用於不同需求情況；此外，另一種常在半導體雷射中應用的激發方式為以電流做為雷射控制參數，屬於電能激發的一種，由外部控制輸入電流

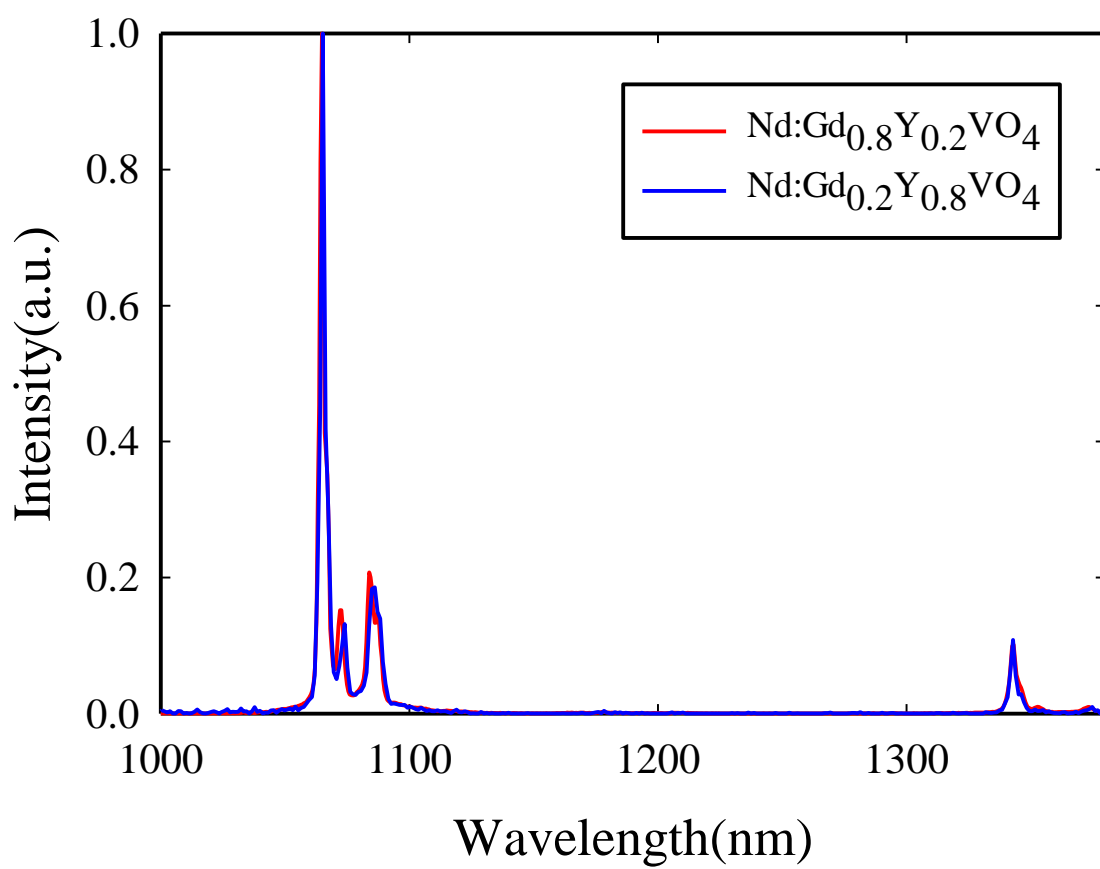


圖 2-5 Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub>與 Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 螢光光譜量測結果



大小，使半導體內部 P 型與 N 型材料載體產生變化，形成雷射光束，此種雷射具有寬廣的輸出波長範圍，此類雷射通常用做高激發效率與高轉換效率固態雷射。

一般而言，雷射在設計階段，即需依不同的重複率、輸出功率需求來挑選所需激發光源，不同之激發光源會影響共振腔結構，而固態雷射常使用閃光燈或雷射二極體做為激發光源，當需要瞬間大功率輸出且重複率不需太高之雷射，可以閃燈為激發光源，如需長時間連續輸出穩定功率並具有高重複率者，應選用雷射二極體當成激發源，依前節所述吸收光譜量測結果，本論文以 808nm 波長雷射二極體做為激發光源，實現高重複率雷射結構。

## 2-3 共振腔 (cavity)

共振腔的組成，係由兩鏡組所組成，一面為全反射鏡又稱為前鏡，而另一面為部分反射鏡又稱為輸出鏡，鏡組僅對特定波長進行反射與出光，端賴鍍膜達成所需波長雷射，光線在共振腔中來回震盪，形成駐波。

不同的共振腔長度，將影響雷射之穩定性，而其穩定性指的是光在共振腔中往返共振時，不會任意的離開腔體，而在腔體內穩定反覆共振達設定輸出波長，前後鏡組可為平面鏡、凹面鏡、凸面鏡等類別，假設前、後鏡之曲率半徑分別為  $R_1$  與  $R_2$ ，兩鏡距離為  $L$ ，亦稱為腔長，依不同組合可分類為： $R_1=R_2$  之平平腔、 $R_1=R_2=L/2$  之共球心式共振腔、 $R_1=R_2=L$  之共焦式共振腔、 $R_1=R_2 \gg L$  之長半徑共振腔、 $R_1 \geq L, R_2 = \infty$  之半球型共振腔等類別。

共振腔的功能係針對腔內之振盪方向與頻率予以限制，由腔體形狀得以決定光行進之方向，並藉由調整反射鏡距離，使光線在共振腔內形成駐波，依鍍膜條件，只有特定波長光線得以持續振盪來回於腔內，餘光線因角度、波長等條件偏折至腔體外，而無法參與光線振盪，另外，共振腔長度亦為雷射之重要參數，如太長則輸出光斑將會變大，並造成激發光與雷射輸出光束重疊性不佳，進而造成雷射效率不佳；如共振腔較短，將造成光斑較小，影響輸出功率，但此結構容易產生 high order mode，光束品質變差。

本論文實驗共振腔選用一凹面鏡當作前鏡，並在腔內側鍍上欲造成共振波長之高反射鍍膜，在輸出鏡的選擇上則選用一平面鏡，在內側鍍上高穿透鍍膜，並在外側鍍上欲輸出雷射波長的高穿透，餘波長產生反射的部份反射鍍膜，此腔體結構稱為平凹腔。

## 2-4 雷射的輸出形式

一般而言，雷射的輸出形式可分為連續輸出雷射 (continuous wave laser, CW laser) 和脈衝雷射 (pulse laser) 兩種，連續輸出雷射係指運作後輸入端會持續繳發動作，而輸出端將持續有穩定能量輸出，固態雷射常利用驅動雷射二極體產生連續輸出雷射，其特性為可持續輸出穩定能量，但無法產生高功率雷射。

相對而言，脈衝雷射可在極短的時間間隔內，產生高峰值功率，故在需要應用到高峰值功率的領域，脈衝雷射就顯得非常的重要；脈衝雷射依工作原理可區分為 Q-switched 雷射和鎖模雷射 (mode-locked laser) 和兩種，其中，Q-switched 雷射又可區分為被動式 Q-switched 雷射與主動式 Q-switched 雷射兩種，被動式 Q-switched 雷射係以飽和吸收晶體為主要元件，藉晶體本身特性產生極強能量的脈衝雷射，而主動式 Q-switched 雷射則藉外部控制元件來操控輸出脈衝的特性，其特性為可瞬間產生高功率輸出雷射，並以固定頻率輸出能量，一般脈衝雷射輸出約為幾個毫秒 (ms) 至微秒 ( $\mu$ s) 之間，鎖模雷射甚至可產生皮秒 (picosecond) 與飛秒 (femtosecond) 等級的脈衝寬度。

脈衝雷射運作原理，可從雷射的增益 (gain) 與耗損 (loss) 的關係來探討，當雷射系統的光耗損值一定，持續輸入定值能量，則輸出能量為一定值，這就是連續輸出雷射的基本運作原理；另外，假設將光耗損設定增加至很大，系統為達到放大增益與光耗損平衡狀態，增益值將隨之放大，此時，比平常大的能量將被儲存於增益介質中，而若瞬時將耗損值變小，系統瞬間將多餘的能量以光的型式輸出，形成一脈衝雷射。

鎖模雷射是利用干涉的方法對輸出縱模的相對相位與強度作調控，以獲得連續穩定輸出脈衝雷射，除了可以產生高輸出功率、極短脈衝寬度外，以不同的鎖模機制或材料，可以得到數百吉赫高重複率的脈衝輸出，使其在科學研究及工業領域如光通訊、訊號處理上都有許多應用，故本實驗出發點欲以結構簡單的自鎖模雷射來探討其相關特性。

## 第三章 鎖模雷射理論介紹、發展與類別

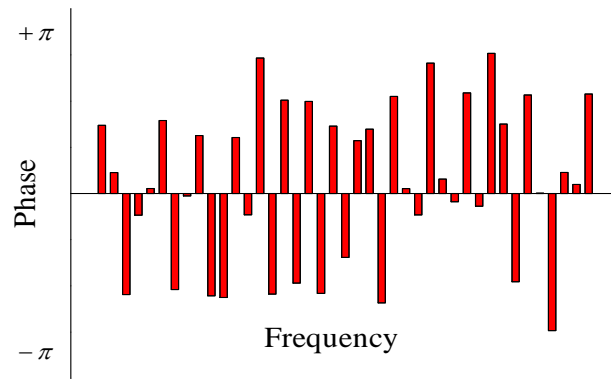
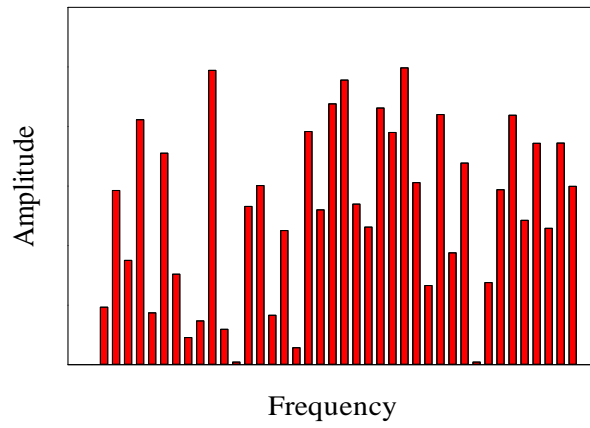
在前一章末，我們討論到脈衝雷射的概念，如欲得到超短脈衝雷射，可利用固態雷射的鎖模技術，使輸出雷射脈寬寬度達到皮秒 (picosecond) 甚至飛秒 (femtosecond) 的等級，而鎖模技術即為對這些縱模的相對相位及強度做調控而得，利用光的相互干涉，改變光在時間軸上的分佈，使能量集中於極短時間輸出，一般而言，雷射輸出時有多個縱模同時存在，以頻域角度觀之，其以非固定相位與強度型態隨機振盪，從平均時軸與強度的量測結果，由圖 3-1 可以觀察到非鎖模雷射其輸出無固定強度與相位，在頻譜圖上，可以觀察到，雷射以互不相干且間隔  $\frac{c}{2L}$  且不連續的頻率隨機振盪，此處  $c$  為光速， $L$  則為共振腔長，其相位隨機分佈於  $-\pi$  至  $\pi$  的範圍之內，在時域上，可觀察到其強度大小呈隨機分佈，反過來說，若每個縱模間的相位關係是固定的，則可輸出高強度單發脈衝雷射，此種類型的輸出，即所謂的鎖模 (mode-locked laser) 或鎖相 (phase locked) 雷射，圖 3-2 顯示一理想的鎖模雷射，其輸出空間強度呈高斯分佈 (Gaussian distribution)，且空間相位均為 0，在時域上，輸出型式為一高斯脈衝，如圖所示，鎖模技術修正了起始隨機輸出的狀態，每一個縱模被鎖住，並以單一脈衝形態輸出。

### 3-1 基本鎖模 (Fundamental Mode-Locking)

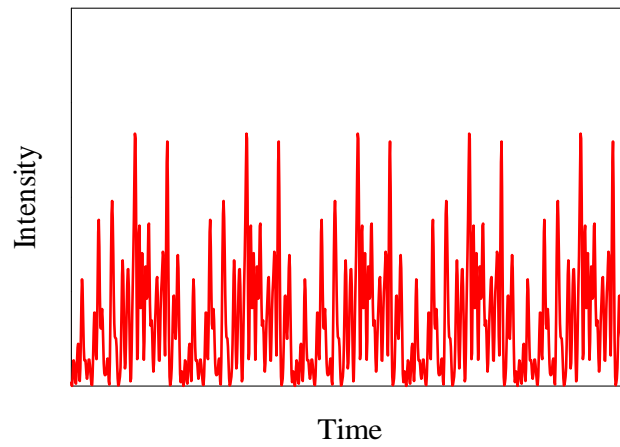
有關鎖模現象的理論分析，可表示為所有縱向模態的電場總和，假設將雷射輸出限制於單一橫向模態，其中有  $N=2M+1$  個縱向模態振盪，在中心頻率有  $\pm M$  個額外頻率，每個縱模間隔角頻率為  $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T_r}$ ， $T_r$  是往返共振腔的往返時間 ( $T_r = \frac{2L}{c}$ )，其中  $L$  為共振腔長度， $c$  為光速，故空間中任意點的電場可以下式描述

$$E(t) = \sum_{n=-M}^M E_n \cdot e^{i(\omega_0 + n \cdot \Delta\omega)t + \phi_n} \quad (3-1-1)$$

上式中  $\omega_0$  為增益頻寬曲線的中心頻率， $E_n$  與  $\phi_n$  為第  $n$  個模態的電場振幅與相位，一般而言，不同縱模的電場振幅與相位是隨時間呈不規則分佈，這會形成圖 3-1 所



(a)



(b)

圖 3-1 非鎖模雷射 (a)雷射輸出縱模模態之振幅及相位呈隨機分佈 (b)雷射輸出強度無規則性

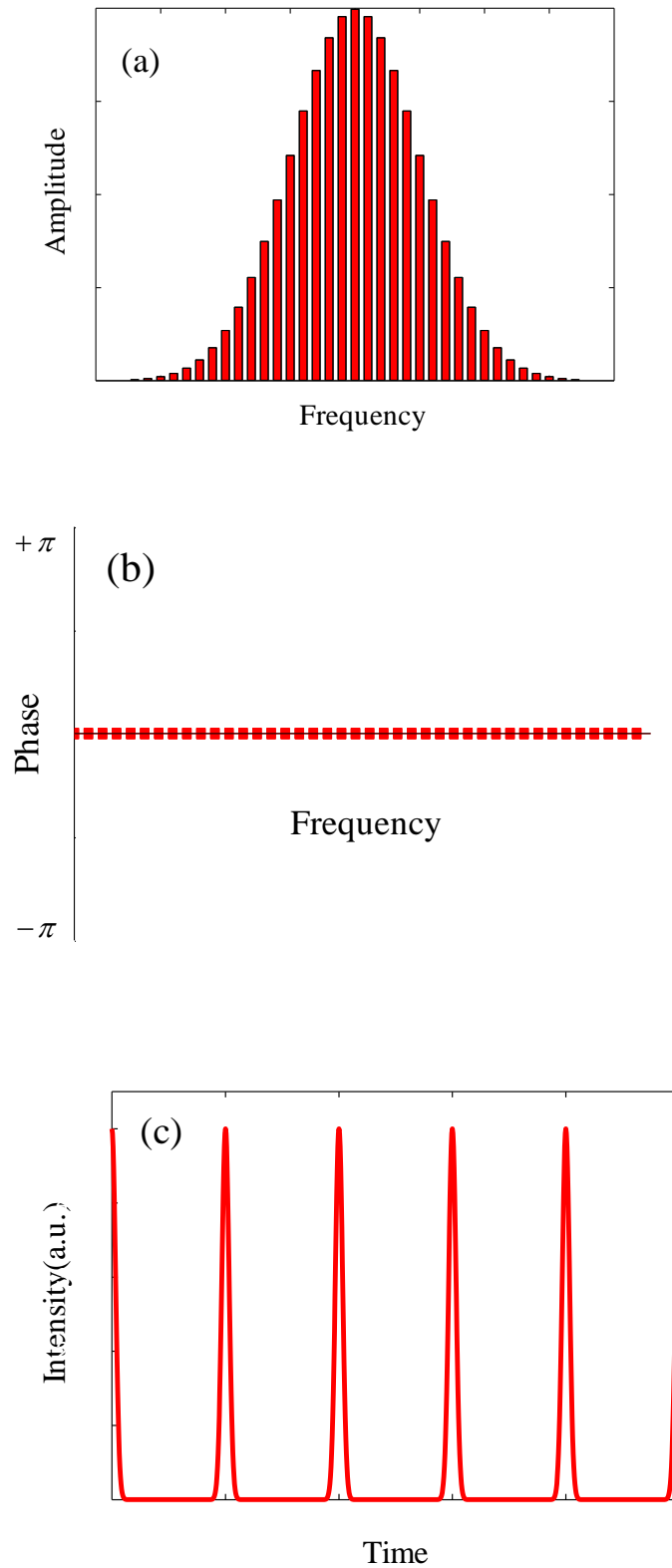


圖 3-2 理想鎖模雷射 (a)輸出縱模模態振幅、相位圖，振幅呈高斯分佈 (b)初始相位均為零 (c)鎖模雷射輸出強度隨時間變化

示的非鎖模雷射，在鎖模雷射情況下，所有縱模相位是相等的，所以此時輸出將由原本的隨機形態變成明確的單脈衝輸出，加總的縱模數愈多，輸出脈衝將更明確，頻寬更窄；從數值分析的角度來看 3-1-1 式，電場振幅  $E_n$  大小，並不會影響到雷射輸出波形，當其以隨機形態輸出時，將在示波器上觀察到輸出脈衝強度隨機分佈，在實際雷射輸出調校上，當然是朝所有模態振幅相同的方向努力，以求穩定的輸出，實務上，微調雷射構成元件，可有效改善此種現象，另外，初始相位將決定脈衝起始時間位置，對於輸出波形諸如半高寬、重複率等重要參數，同樣不會造成影響。接下來以數學計算簡化電場表示式，假設中心頻率初始相位  $\phi_n = \phi$ ，且所有模態振幅相同，即  $E_n = E_0$ ，3-1-1 式可改寫成

$$E(t) = E_0 \cdot \sum_{n=-M}^M e^{i(\omega_0 + n \cdot \Delta\omega)t} \cdot e^{in\phi} \quad (3-1-2)$$

上式為一有限總和，將其代數變換後可得

$$E(t) = E_0 \cdot e^{i\omega_0 t} \cdot \frac{\sin \frac{N}{2} (\Delta\omega t + \phi)}{\sin \frac{1}{2} (\Delta\omega t + \phi)} \quad (3-1-3)$$

由上式可推得輸出強度

$$I(t) = E(t)E^*(t) = E_0^2 \cdot \frac{\sin^2 \left[ \frac{N}{2} (\Delta\omega t + \phi) \right]}{\sin^2 \left( \frac{\Delta\omega t + \phi}{2} \right)} \quad (3-1-4)$$

由 3-1-4 式可得知，當  $\phi = 0 \sim 2\pi$  區間時，輸出將呈穩定且相位關係固定、具有週期性的正弦波輸出，如圖 3-3，以一個腔長 4cm 的鎖模雷射為例，增益介質晶體長度為 0.6cm，晶體折射率為 2.2，代入

$$L_{opt} = L_{cav} + L_{cry}(n-1) \quad (3-1-5)$$

上式  $L_{opt}$  為光程長度、 $L_{cav}$  為共振腔腔長度、 $L_{cry}$  為晶體長度， $n$  為晶體折射率，代入已知數值得  $L_{opt} = 4.72\text{cm}$ ，因  $f = \frac{1}{T_r} = \frac{c}{2L_{opt}}$ ，可推得其脈衝重複率約為 3.18 GHz，在縱模數  $N=3、5、7$  時的輸出強度與時間關係圖型，半高寬分別為 105ps、63ps、45ps，可發現當縱模數愈多時，脈寬愈窄，脈衝重複率愈高，原本不穩定的輸出經過調制後，相

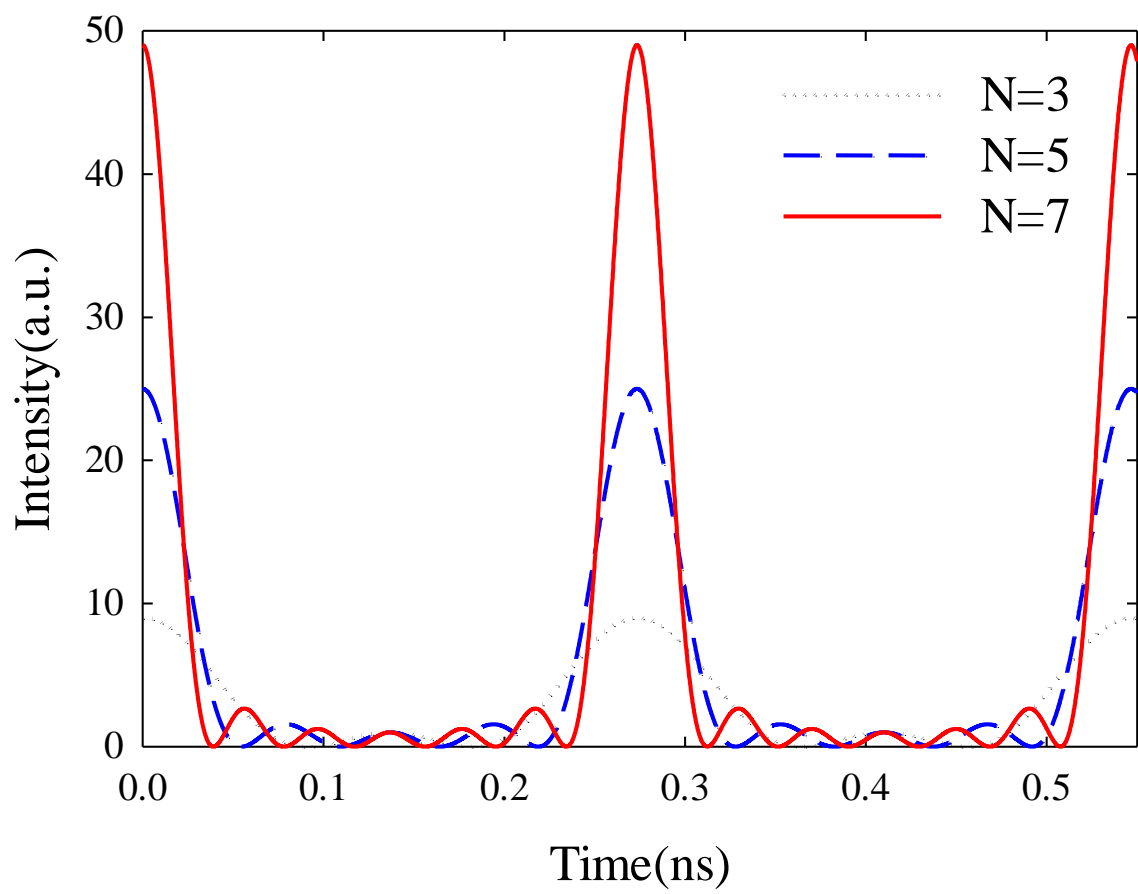


圖 3-3 鎖模雷射輸出脈衝與時間函數圖，於  $N=3$ 、 $5$ 、 $7$  時的縱模分佈

位變成一穩定輸出，此時，輸出脈衝縱模間隔為一定值，顯示在示波器上的結果，可測得等間隔脈衝，縱模數  $N$  值變化時，僅會改變振幅與脈寬的大小，並不會改變原本週期性，此種現象，稱之為鎖模現象，有關脈衝寬度計量，可定義為脈衝強度為零至下一次強度為零所需時間的一半，假設峰值於  $t = 0$  時強度為零，則至第一個脈衝為零所需條件為

$$\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \Delta\omega \cdot t_{\frac{1}{2}}\right) = 0 \quad (3-1-5)$$

而上式成立條件為

$$\frac{N}{2} \cdot \Delta\omega \cdot t_{\frac{1}{2}} = \pi \quad (3-1-6)$$

故  $t_{\frac{1}{2}}$  可近似為

$$t_{\frac{1}{2}} \approx \frac{T_r}{N} \approx \frac{1}{\Delta\nu} \quad (3-1-7)$$

上式  $\Delta\nu$  為脈衝增益曲線頻寬，其大小為縱模數乘以各模態間距，本式之所以成立是因為我們假設此構成系統為一理想鎖模雷射，亦即所有增益曲線下的縱模都被理想的調制。由 3-1-7 式，我們亦可推知，鎖模脈衝與增益曲線寬度成反比關係，欲獲得愈短的鎖模脈衝，需要愈大的增益曲線寬，另外，脈寬寬度約等於光程時間除以縱模數，等強度縱模鎖模雷射的時間/增益頻寬關係已經由數值計算方式求解得

$$t_p \Delta\nu = 0.886 \quad (3-1-8)$$

上式  $t_p$  為脈衝半高寬度 (full-width half-maximum, FWHM)，此外，如果鎖模雷射強度增益頻寬曲線呈高斯分佈情況時，所形成的鎖模脈衝亦會呈高斯分佈，其時間/增益頻寬關係為

$$t_p \Delta\nu = 0.44 \quad (3-1-9)$$

由以上討論，我們可以了解到，鎖模雷射的脈衝寬度不但與被鎖定的縱模數有關，也與光程時間有相關聯性。



### 3-2 諧波鎖模 (Harmonic Mode-Locking)

鎖模現象除了基本鎖模外，還有一種鎖模現象稱之為諧波鎖模，早先此種現象在某些運作模式或結構的雷射輸出中被觀察到，由於尚無統一的理論依據去解釋這種現象，從現象的觀點說明，諧波鎖模現象即在共振腔往返時間 (round trip time) 內可產生多個脈衝輸出，若以不同縱模電場疊加的方式分析之，可視為當參與調制縱模若有多個，此時輸出雷射不再如基本鎖模討論所述，在基本鎖模現象討論中，我們假設參與調制的一個縱模為  $E_1$ ，其電場表示式為

$$E_1(t) = e^{i\omega_0 t} \cdot \sum_{n=-M}^M e^{in(\Delta\omega t + \phi_1)} \quad (3-2-1)$$

今假設另一個參與調制縱模  $E_2$ ，電場表示式為

$$E_2(t) = e^{i\omega_0 t} \cdot \sum_{n=-M}^M e^{in(\Delta\omega t + \phi_2)} \quad (3-2-2)$$

假設  $\phi_1 = 0$  且  $\phi_2 = \pi$  並進行疊加，經代數變換後可得下式

$$E_1 + E_2 = e^{i\omega_0 t} \cdot \sum_{n=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} e^{i2k \cdot \Delta\omega t} \quad (3-2-3)$$

由上式可求得其輸出脈衝強度為

$$I(t) = E(t)E^*(t) = E_0^2 \cdot \frac{\sin^2 \left[ \frac{N}{2} (\Delta\omega t + \phi) \right]}{\sin^2 \left( \frac{\Delta\omega t + \phi}{2} \right)} \quad (3-2-4)$$

由上式歸納結果，與原縱模間隔  $\Delta\omega$  相較會產生倍頻現象，即脈衝頻率比原先增加一倍，這種狀況即所謂諧波鎖模現象，此時在示波器上可觀察得到在共振腔往返時間內，可產生兩個等間隔脈衝，意指其縱模間隔  $\Delta\omega$  相等，依此類推，當  $N=3$  時，可測得有 3 個脈衝，此類現象統稱為諧波鎖模現象。

如圖 3-4 所示，當  $\phi_1 = 0$  時電場  $E_1$  輸出脈衝強度隨時間變化如(a)，而  $\phi_2 = \pi$  時電場  $E_2$  如圖(b)， $E_1 + E_2$  顯示如圖(c)，圖(c)模擬當產生諧波鎖模現象時，此時頻率較原先變成 2 倍，即所謂倍頻現象，可觀察得知此時疊加輸出結果為脈衝間隔  $\pi$  之連續輸出，且脈衝頻率為原先的 2 倍。

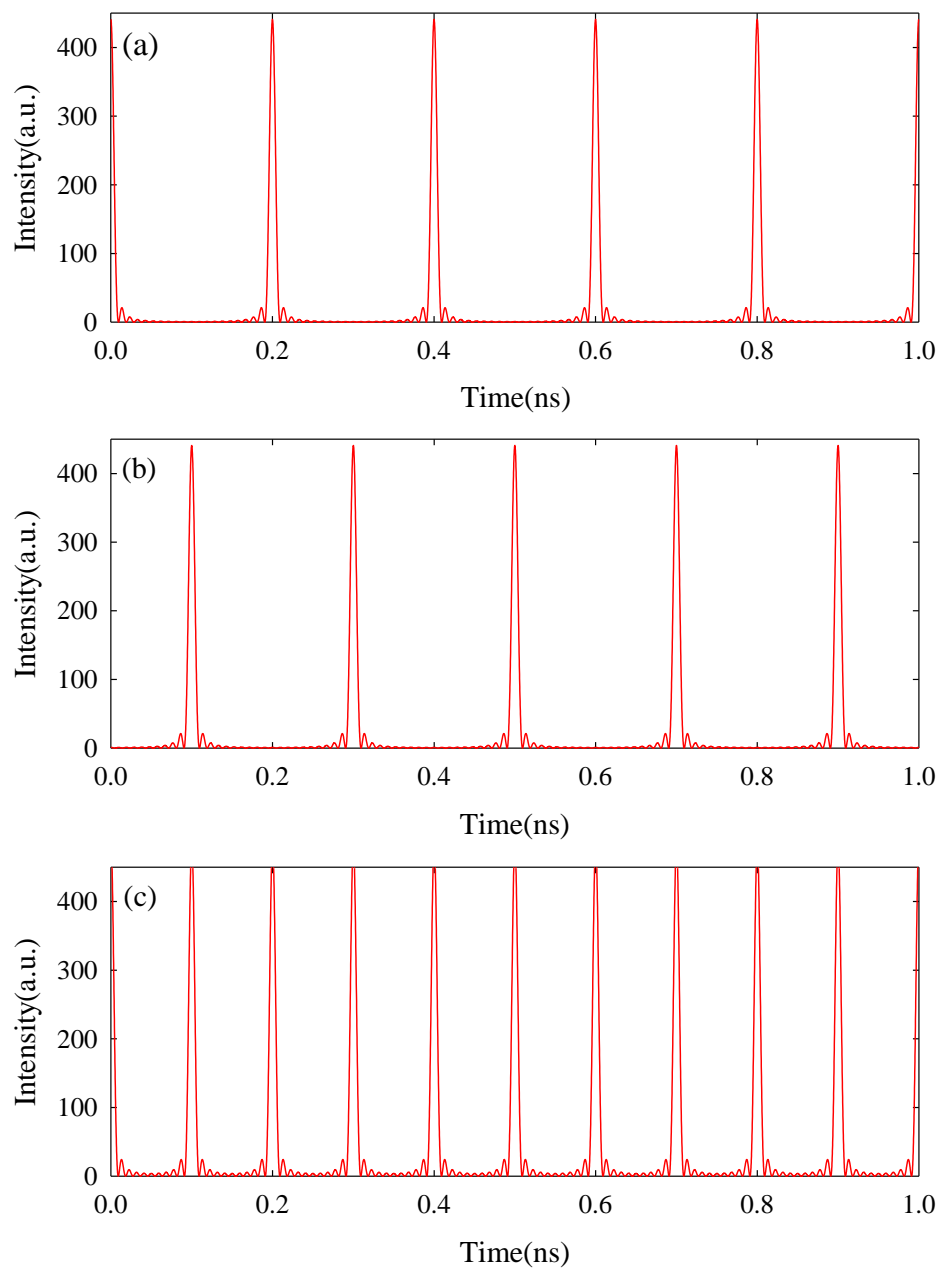


圖 3-4 諧波鎖模輸出 (a)  $E_1$  with  $\phi_1 = 0$  脈衝輸出圖 (b)  $E_2$  with  $\phi_2 = \pi$  脈衝輸出圖 (c)  $E_1 + E_2$  疊加後產生脈衝間隔  $\pi$  輸出

### 3-3 多脈衝鎖模 (Multipulse Mode-Locking)

除了基本鎖模與諧波鎖模現象外，實驗中，我們發現有時輸出脈衝呈現多脈衝輸出且  $\Delta\omega$  呈不規則分佈狀況，同樣以電場疊加的理論分析之，參與調制縱模同樣可以 3-1-1 式表示

$$E(t) = \sum_{n=-M}^M E_n \cdot e^{i(\omega_0 + n \cdot \Delta\omega)t + \phi_n} \quad (3-3-1)$$

圖 3-5 中，分別代表(a) $E_0$ ，其  $\phi_0 = 0$ 、(b) $E_1$ ，其  $\phi_1 = \frac{3\pi}{5}$ 、(c) $E_2$ ，其  $\phi_2 = \frac{\pi}{5}$ 、(d) $E_3$ ，其  $\phi_3 = \frac{4\pi}{5}$ ，此 4 種不規則輸出脈衝縱模模態，在經過鎖模調制後，可由(e)中觀察到其輸出在  $0 \sim 2\pi$  區間有 4 個脈衝，且與諧波鎖模不同的是，脈衝縱模間隔非固定值，端視參與調制縱模條件，這樣的現象即可視為多脈衝鎖模現象。

光固子雷射 (soliton lasers) 的多脈衝現象在過去數十年來有許多的研究發表，所建立模型與解釋方式亦不同，早期對高階光固子觀察的研究是在對撞脈衝 (colliding-pulse) 鎖模染料雷射中觀察到雙峰形多脈衝輸出 [8]，另外在 8 字型共振腔光纖雷射中，輸出呈大量不規則隨機分佈情形 [9]，研究並指出共振腔內能量被量化，並依參與調制脈衝數決定其輸出脈衝形態，其後，將單一脈衝分離成多脈衝現象則呈現在鈦藍寶石克爾鎖模雷射研究中 [10] 與其它透過半導體飽和吸收鏡 (semiconductor saturable absorber mirrors, SESAM's) [11] 機制運作的半導體雷射研究指出，多脈衝縱模間隔受到脈寬的調制，並等於雙脈衝運作乘上一個時間常數，在上述例子中，輸出脈衝縱模間隔一般而言都遠大於單一脈寬並且呈現不規則分佈，且受制於瞬間的改變。

共振腔內形成多脈衝現象對產出高重複率脈衝源扮演非常重要的角色，而高重複率脈衝對光纖通訊系統、生化影像、眼球雷射手術等領域亦極為重要，許多科學家投入研究，並試著解釋、分析此一現象，本實驗其後亦將探討摻鉍材料半導體自鎖模雷射相關特性，以為後續研究所用。

### 3-4 鎖模雷射的分類與發展

鎖模雷射依其運作模式，可區分為 3 種類型，分別為主動式鎖模雷射、被動式鎖模

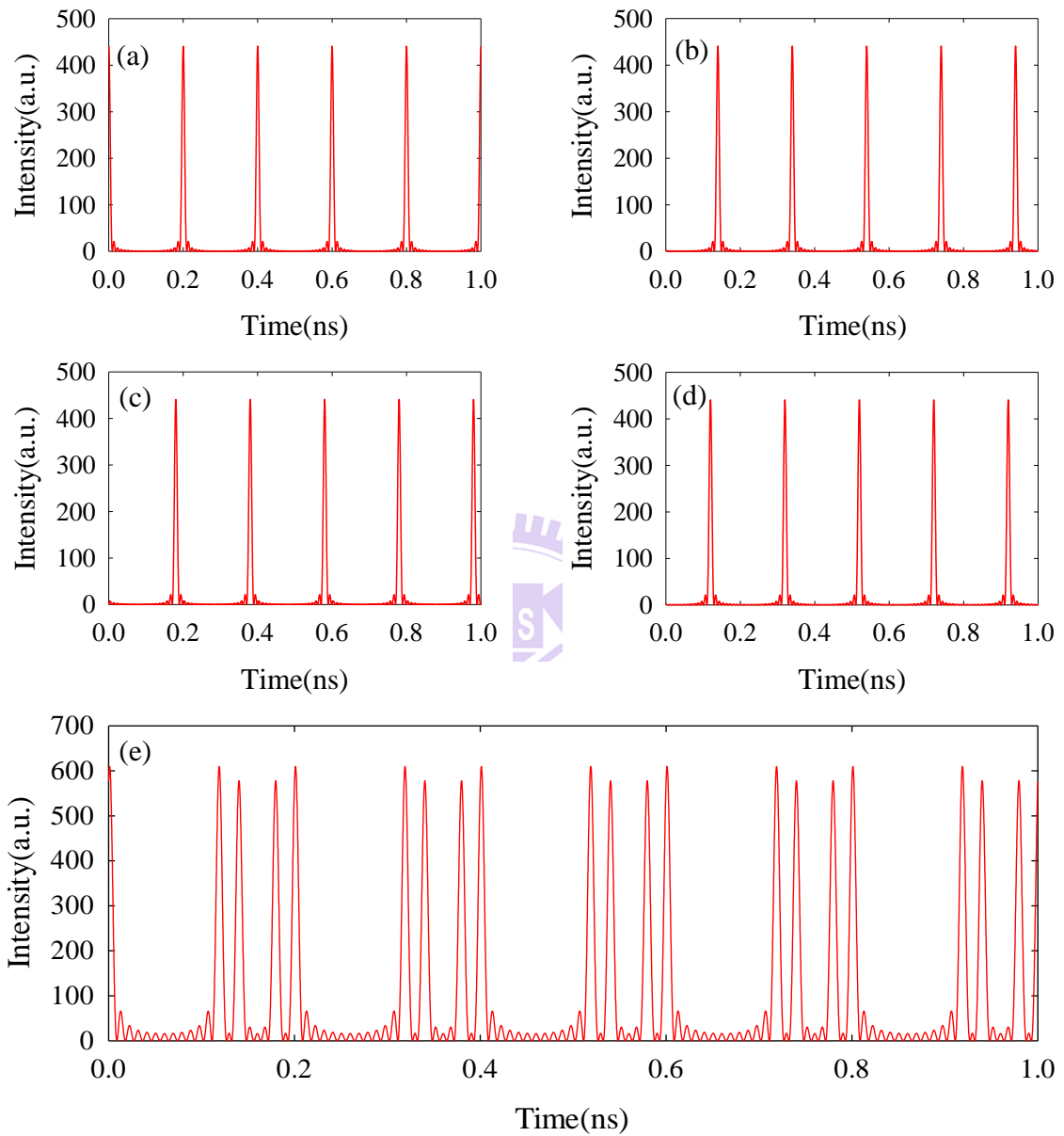


圖 3-5 多脈衝鎖模輸出 (a)  $E_0$  with  $\phi_0 = 0$  (b)  $E_1$  with  $\phi_1 = \frac{3\pi}{5}$  (c)  $E_2$  with  $\phi_2 = \frac{\pi}{5}$  (d)  $E_3$  with

$\phi_3 = \frac{4\pi}{5}$  (e)  $E_0$ 、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  多脈衝鎖模調制後輸出隨時間變化

雷射與自鎖模雷射三種類型，以下分別簡介之：

### 3-4-1 主動式鎖模雷射 (Active Mode-locked Laser)

在實驗中，鎖模現象於 1963 年首先由 Gürs 與 Müller 在激射器(Maser)中第一次觀察到這種現象 [12]，其後於 1964 年，由 Hargrove、Fork 與 Pollack 在 1964 年以聲光調制器 (acousto-optical modulator)調變氦氖雷射腔內的損耗使其與腔內往返時間一致研發出第一台主動式鎖模雷射 [13]，同年，Harris 與 Targ 以頻率調制器研制得頻率鎖模 (FM mode-locking)氦氖雷射 [14]。

主動式鎖模雷射主要是在共振腔內置入一個控制耗損的機械裝置，通常是電光調制器 (electro-optical modulator)或是聲光調制器，以此裝置調控不同縱模間的振幅或頻率，形成鎖模機制，由於可控制調變，故稱之為主動式，而主動式鎖模又可依調制器區分為振幅調制與頻率調制兩種。

振幅調制又稱為損耗調制，主要係在共振腔中放入一調制光耗損的裝置，從頻率特性來探討鎖模過程，當光通過調制器時，由於損耗調制，在中心縱模處，除了原本的中心頻率外，將會產生兩個邊頻，由於邊頻初始相位與原中心縱模相同，故邊頻通過調制器時，再次受到調制，而再度產生 2 倍的邊頻光，由於邊頻光與相對縱模互相耦合，將使增益曲線內所有縱模振盪起來，將縱模疊加，就形成超短雷射脈衝；若從時間軸來看鎖模機制，因為調制器給定損耗週期，當光經過調制器時，若損耗不為零，則有部份光被損耗掉，且唯有當損耗為零時，此時光會不斷的放大增強，得到調制脈衝。

另外頻率調制亦可稱為相位調制，其在共振腔內置入調制光相位的裝置，從頻率特性分析之，當光通過調制器，調相後的光成份則為無限個邊頻光所組成，且邊頻光具有相同相位，而中心縱模一致，僅具相同頻率間隔，故若將相對應縱模產生激發耦合時，可達鎖模現象；若從時間軸來分析，由於相位被週期性調制，當經過調制器時，將致產生一個頻率移動，經過連續通過調制器後，光將被移出增益曲線外而消失，只有在相對應時間通過調制器的光，頻率才不會移動，可在腔內往返振盪將光放大，唯因頻率調制會造成雷射輸出時隨機漂移的不穩定性，故要採取其它措施來防止此效應發生。[15]

### 3-4-2 被動式鎖模雷射(Passive Mode-locked Laser)

主動式鎖模雷射有其缺點在，比如說需外加一調制器來驅動鎖模，調變頻率需準確與腔內模態達到匹配，另外，調制器也會限制脈衝寬度等，為了改善這些缺點，於是研發出被動式鎖模雷射。

1965 年，Mocker 與 Collins 使用飽和吸收染料盒(saturable absorber dye cell)研發出第一台被動式鎖模雷射 [16]，在實驗中，他們發現 Q 開關脈衝會在共振腔振盪分裂成許多時間軸間隔相同的短脈衝。1972 年，Ippen、Shank 與 Dienes 第一台可連續輸出的被動式鎖模雷射 [17]，其後於 1974 年，他們研發出次皮秒(sub-picosecond)等級的脈衝雷射 [18]。

被動式鎖模雷射是將主動式的外部調制器調制成會隨共振腔內光強改變其損耗的非線性元件，損耗隨光強增加而減少。有關利用飽和吸收體做為元件的被動式鎖模雷射，其中，飽和吸收體係利用其非線性吸收效應特性，這種元件初期是被運用於 Q 開關脈衝固態雷射裡，由可對應激發雷射光源波長的有機染料所組成，當有足夠強的激發光源時，染料中基態電子會被激發至高能階，當共振腔內光強度逐漸增強時，腔內耗損會逐步減少；但要用作鎖模雷射元件的飽和吸收體必須符合吸收譜線與激發光源雷射波長一致，且吸收譜線線寬要大於或等於雷射增益曲線線寬，另外，飽和吸收體的復原時間(recovery time)要短於光在腔內的往返時間，此時受激發光源影響會不斷改變吸收率，使飽和吸收體達到上述主動式鎖模雷射中調制器的作用，在腔內產生邊頻光，進而輸出鎖模雷射。

近市面上的被動式連續輸出鎖模雷射都會加上腔內半導體飽和吸收鏡 (intracavity semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)來啟動與維持鎖模[19-21]。

### 3-4-3 自發性鎖模雷射(Spontaneous Mode-locked laser)

自發性鎖模雷射是指在整個雷射架構中，沒有外加調制裝置或是任何的非線性元

件，以增益介質產生自發性鎖模現象的雷射架構。早期鎖模雷射研究中，自發性鎖模雷射在氦氖 (He-Ne)雷射 [22]、紅寶石 (Ruby)雷射 [23]、摻釹玻璃晶體 (Nd:glass) [24] 及氬離子 (Argon ion)雷射 [25]系統中被發現，但是在 1960 年代，由於對鎖模雷射的技術不純熟，科學家們不認為這種現象可以用來產生穩定的脈衝雷射源並加以運用。在 1990 年代，被動式鎖模染料雷射漸漸被被動式固態雷射所取代，1991 年，Spence、Kean 與 Sibbett 使用鈦-藍寶石(Ti: sapphire)當作增益介質與鎖模元件，產生 60 飛秒的脈衝 [26]，這是一種相對簡單即可產生超短脈衝雷射的方法，被稱為克爾透鏡鎖模 (Kerr lens mode-locking, KLM)，這種鎖模方法通常是利用人造的飽和吸收體的非線性折射率，亦稱為光學克爾效應 (Optical Kerr effect)來達成鎖模目的，在這些雷射中除了要有很快的振幅調制之外，其相位調制也非常重要，克爾透鏡鎖模雷射的自我相位調制機制扮演如同飽和吸收晶體的功能，而不需要其它額外的調制器，故也可以稱為自鎖模雷射 (self-mode-locked laser)，克爾透鏡鎖模雷射是一種可有效產生超短脈衝雷射的方法，其可以產生飛秒等級甚至更短的脈衝。

所謂光學克爾效應係指介質的折射係數  $n$  會隨著光強度而變化，可表為下式

$$n = n_0 + n_1 I(t) \quad (3-3-2)$$

其中， $I(t)$ 指的是脈衝光強度， $n_1$ 為非線性折射係數， $n_1$ 值通常很小到可以忽略不計，唯在高強度脈衝條件下，其效應將變得明顯，假設光通過一長度  $L$  的非線性材料，則其非線性相位偏移現象可表為下式

$$\Delta\phi(t) = \frac{-\omega}{c} n_1 I(t)L \quad (3-3-3)$$

上式經代數變換亦可寫成

$$\Delta\phi(t) = \frac{-2\pi}{\lambda} n_1 I(t)L \quad (3-3-4)$$

3-3-4 式可視為由一個隨時間變化的相位調制，轉換成振幅調制的機制，藉以穩定鎖模脈衝，已有許多研究證實可行。

光學克爾效應的第一種應用方式，是利用非線性相位偏移來調整兩個耦合共振腔造成相互干涉，這種方法，稱之為附加脈衝鎖模 (additive pulse mode-locking, APM)或稱之

為耦合共振腔鎖模(couple cavity mode-locking)。APM 技術是將原本共振腔中輸出的雷射，導入另一個外加的共振腔中，使光在外加共振腔中經過非線調制後再導回原本的共振腔當中，並與原光源產生相互干涉產生鎖模的現象，這個外加共振腔，通常是利用光纖來構成，於 1984 年發表的光固子雷射 (soliton laser)是第一個利用光纖作為外加共振腔的 APM 鎖模雷射[27]，其後，這種技術被應用在增加主動式鎖模雷射效能上，1989 年，Goodberlet 等人將這種技術應用於鈦藍寶石雷射 [28]，研發出自發被動式鎖模雷射 (self-starting, passive APM)。

此外，克爾透鏡鎖模雷射 (kerr lens mode-locking laser)為另一種常見應用克爾效應的鎖模技術，尤其常見於鈦-藍寶石雷射中，1991 年 Spence 等人所研發的 60 飛秒等級脈衝雷射，即是應用這種技術。在技術發展初期，由於現象機制尚未被了解，故稱其為自鎖模現象，之後才確定現象是因為非線性透鏡效應所造成的非線性自我調制鎖模現象，現今的鈦-藍寶石雷射研究領域中，克爾透鏡鎖模是一種極為重要的方式，主要因為這種技術可以產生飛秒等級的鎖模脈衝，或應用在其它類型的固態雷射增益介質上。

自發性鎖模現象為本論文主要研究的方向，主要利用固態雷射作為激發光源，並搭配新型的晶體作為增益介質，透過共振腔的設計，使激發光源於共振腔中產生自鎖模現象，以摻鈹釩酸鹽類混晶當作雷射增益介質，以同樣摻雜濃度為 1% 的 Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.4</sub>Y<sub>0.6</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 等 4 顆混晶，尺寸為 3\*3\*6 mm<sup>3</sup>，晶體表面鍍膜條件相同等晶體當作增益介質，觀察比較各種情況下自鎖模效應的優劣、利弊，以作為爾後雷射設計參考應用。

### 3-5 超短脈衝雷射量測技術

現今的超短脈衝雷射脈寬等級已達到皮秒甚至飛秒的尺度，由於其已超越任何光電轉換偵測器的反應時間，如何精確解析完整波形，卻是非常的困難，當脈衝寬度尺度不斷變小，量測技術愈顯重要，難度也更提高，目前的技術一般必須藉助於非線性光學效應來進行時域上的光取樣 (optical gating)或頻域上的剪頻干涉 (spectral shearing)技術，再透過適當演算法間接擷取波的訊息，而本實驗所使用的量測儀器原理係利用目前最為



人熟知的脈衝檢測方法-自相關儀的原理，接下來簡介與本論文相關的超短脈衝雷射量測技術。

### 3-5-1 $g_1(\tau)$ 電場自相關 (Electric Field Autocorrelation)量測

電場自相關量測主要是利用邁克生干涉儀 (Michelson interferometer)的概念，實驗裝置如圖 3-6(a)，將欲量測的入射脈衝經分光鏡後分成兩道光，經過兩面反射鏡反射後在分光鏡重組，其中  $M_1$  反射鏡以步進馬達控制其可前後移動，使得兩道光脈衝相差延遲時間  $\tau$ ，經相互干涉重組後進入偵測器中，並紀錄其平均功率值，兩個波形一致的脈衝光，在中心頻率只相差少許相位  $\phi$ ，待進入頻譜儀後，將形成相互干涉條紋，分析干涉條紋在當頻率相差非常小時，可得到相位與頻率的函數關係，經過積分運算後取得相位函數關係  $\phi(\omega)$ ，頻譜的測量等同於電場自相關函數  $g_1(\tau) = \int E(t)E^*(t-\tau)dt$  的傅氏轉換，可表為

$$|E(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \quad (3-5-1)$$

由於  $g_1(\tau)$  為功率頻譜(power spectrum)之逆傅立葉轉換，而功率頻譜可利用光譜儀(spectrometer)量得，由偵測器量到的功率頻譜，經儀器計算一階電場自相關函數  $g_1(\tau)$ ，並對其作傅立葉轉換後，即可得到脈衝寬度 (pulse width) 訊息。

### 3-5-2 $g_2(\tau)$ 強度自相關 (Intensity Autocorrelation)量測

自相關儀 (autocorrelator)是目前最廣為應用在超短脈衝雷射量測脈寬的檢測方法，圖 3-6(b)為典型的光強度自相關儀，其原理是利用非線性效應中之二階諧波產生 (second harmonic generation, SHG)機制，利用非線晶體產生二倍頻光，並利用移動自相關儀其中一道光程造成時間延遲 (time delay)，經此過程得到二階自相關函數曲線後，再透過數學運算推得脈衝寬、波型等資訊。

光強度自相關函數可表為下式

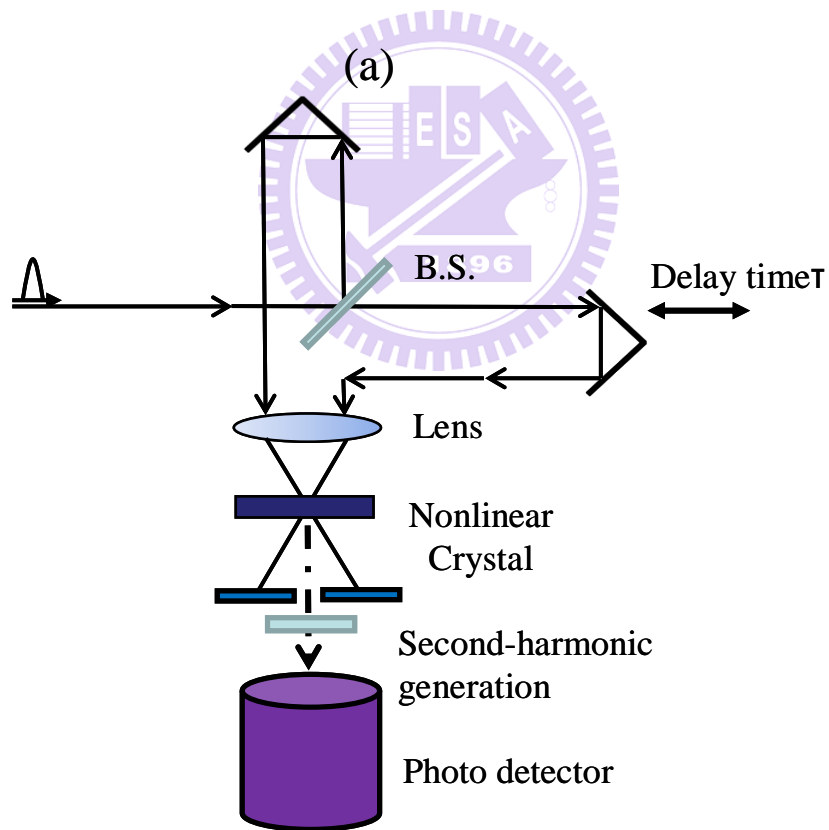
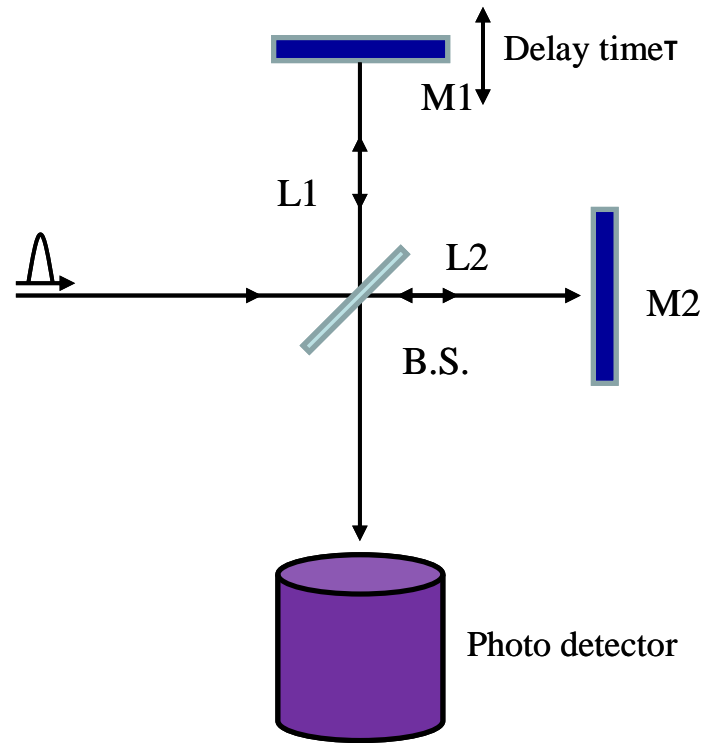
$$g_2(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t-\tau)d\tau \quad (3-5-2)$$

上式  $I(t)$  表示光強度分佈函數，經由量測得的自相關函數可推得時脈寬度、波形等特性，由於實際波形並不能由此種方法確定，因為從數學分析的觀點，自相關函數在頻域所對應的函數

$$\tilde{g}_2(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g_2(\tau) e^{-i\omega\tau} dt \quad (3-5-3)$$

上式為一個多對一函數，亦即在不同強度函數下有可能會對應到相同的自相關函數 [29]，故在實際上，應用強度自相關函數量測，尚須搭配對脈衝波形作合理的假設，才能計算出實際的參數，比如克爾透鏡鎖模(Kerr-lens mode-locking)雷射，由於脈衝形成的機制具有光固子 (soliton) 的形式，因此波形是  $\text{sech}(t)$  函數，可推算出自相關函數寬度  $\Delta T = 1.543\Delta t$ ，其中  $\Delta t$  為光場時寬 [30]，因為干涉式自相關儀產生的訊號本身就帶有相位資訊，在 1985 年，J.C. Diels 等人以干涉式自相關儀搭配光譜的量測來計算光脈衝的波形 [31]。





(b)

圖 3-6 超短脈衝量測技術示意圖(a)  $G_1(\tau)$  電場自相關儀：邁克森干涉儀示意圖 (b)  $G_2(\tau)$  強度自相關量測技術儀

# 第四章 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 自鎖模雷射輸出在波長 1064nm 鎖模特性探討

有鑑於增益介質晶體是二極體激發雷射中最為重要的元件之一，近年的雷射增益介質材料研究當中發現，摻釷釷酸鹽混晶 (Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>)以釷元素取代釷元素可作為調整激發截面積、螢光週期及熱傳導係數等影響雷射輸出的調整參數[32,33]，在應用上除了被動式 Q 開關雷射、自激發拉曼雷射 (self stimulated Raman lasers, SRS)[34,35]外，鎖模雷射特性的優化亦已被證實可行[36,37]，本章主要探討不同混合濃度釷酸鹽混晶架構自鎖模雷射輸出脈衝波長在 1064nm 時，鎖模特性的比較探討。

## 4-1 實驗架構

在第二章探討增益介質材料時，我們曾探討過 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 混晶的材料特性，發現其對 808nm 波長具有良好的吸收特性，另外，光激發螢光能量強度最強波長在 1064nm，次強波長在 1342nm 與 914nm，本章以此混晶材料輸出波長在 1064nm 的雷射，並形成自鎖模現象，進而對形成鎖模原因與特性探討。

圖 4-1 為實驗架構示意圖，雷射增益介質分別選用摻雜濃度為 1% 的 Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.4</sub>Y<sub>0.6</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 等 4 顆混晶，尺寸為 3x3x6 mm<sup>3</sup>，晶體表面鍍膜條件相同，於前、後表面鍍上對 808nm 與 1064nm 有抗反射鍍膜，輸入鏡規格為直徑  $\phi=12.7\text{cm}$ ，厚 3mm，聚焦半徑 500mm，鍍膜條件為對 1064nm (R>99.8%)有高反射，使激發光作二次反射，對波長 808nm (T>95%)有高穿透特性，輸出鏡規格為直徑  $\phi=25.4\text{cm}$ ，厚 6.35mm，切角 1°，鍍膜條件為對 1064nm 有高反射(R:90%)特性，共振腔結構為凹平腔，在激發光源的部份，以連續輸出波長為 808nm 的二極體雷射作為激發光源，並採用水冷控制系統以求連續穩定輸出，聚焦鏡組以 2:1 大小成像，使聚焦於晶體上，焦距為 25mm，耦合效率約為 87%，共振腔長度於  $L_{\text{cay}}=4\text{cm}$  左右進行實驗。

分析儀器部分，鎖模脈衝輸出由一高速砷化銦鎵 (Indium Gallium Arsenide, InGaAs)

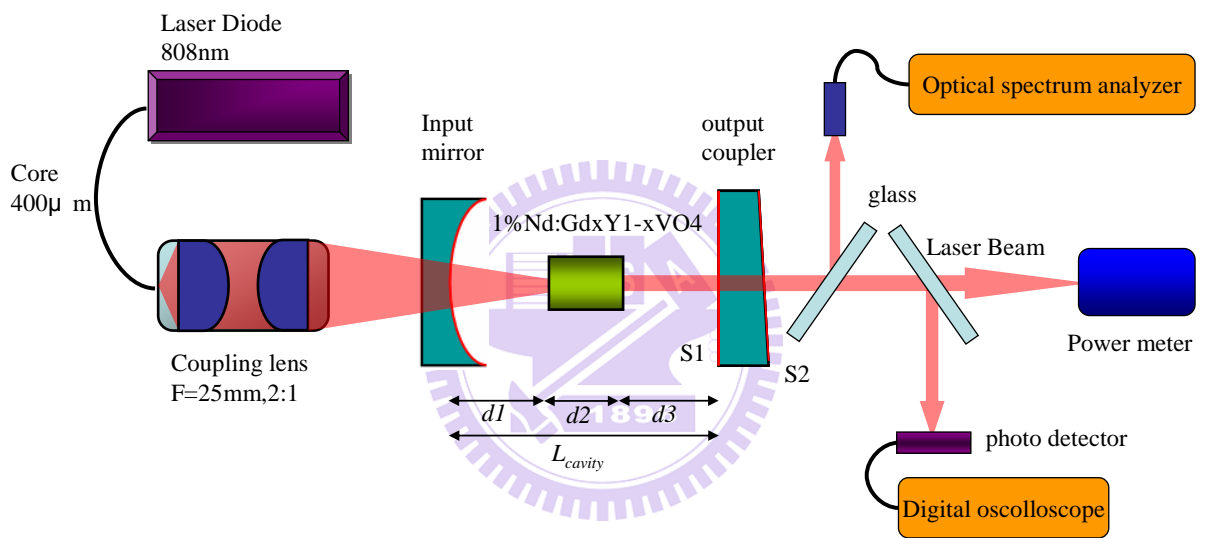


圖 4-1 以 1% Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 為增益介質輸出波長 1064nm 雷射實驗架構示意圖

光感測器 (Electro-optics Technology Inc. ET-3500)偵測，上升時間 35ps，輸出雷射光譜資訊由一部傅氏光學頻譜分析儀 (Fourier optical spectrum analyzer, Advantest, Q8347)，內含邁克森干涉儀，解析度達到 0.003nm，另外，輸出訊號連接至一數位示波器 (digital oscilloscope, Agilent, DSO 80000)，具有 12GHz 頻寬偵測範圍及取樣間隔至每 25ps 取樣一次規格，並由一功率電表量測輸出功率值，以做為後續數據分析數據取得儀器。

## 4-2 實驗結果與討論

首先我們先以  $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$  為增益介質晶體並量測其輸入與輸出功率關係圖，如圖 4-2 所示，在激發光源雷射二極體輸出波長 808nm，電流值 15A 時，輸入功率為 7.85W，輸出波長 1064nm 雷射，輸出功率為 2.51W，轉換效率約為 31.97%，斜率效率 (slope efficiency) 為 34.36%。

接著，我們探討所量得同調長度 (coherent length) 關係圖，同調分析範圍自 -165mm 至 165mm，可得  $2L = 95.3\text{mm}$ ，代入下式

$$f = \frac{c}{2L} \quad (4-2-1)$$

可得  $f \approx 3.15\text{GHz}$ ，並將結果代入 4-2-2，求解  $\Delta\lambda$

$$f = \Delta\lambda \cdot \frac{c}{\lambda^2} \quad (4-2-2)$$

$c$  為光速  $3 \times 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ ， $\lambda$  為輸出波長 1064nm，可得  $\Delta\lambda = 0.012\text{nm}$ ，以此結果與所量得之光學頻譜 (optical spectrum) 圖比對結果是否吻合，由量測結果輸出脈衝圖形如圖 4-3(a) 所示可得  $\Delta\lambda = 0.012\text{nm}$ ，此結果與同調長度關係圖所推導得之  $\Delta\lambda$  完全相符，此外，由圖 4-3(c)、(d) 顯示由示波器所量得之輸出脈衝雷射在不同時域 (time domain) 上所測得脈衝串結果，由於頻率與時間週期呈倒數關係，將測得週期  $T = 317.25\text{ps}$  代入

$$f = \frac{1}{T} \quad (4-2-3)$$

可得其頻率  $f = 3.15\text{GHz}$ ，與前面所得結果近似相同。

由示波器 (oscilloscope) 測量結果可知，由此實驗架構共振腔，並以 808nm 波長二

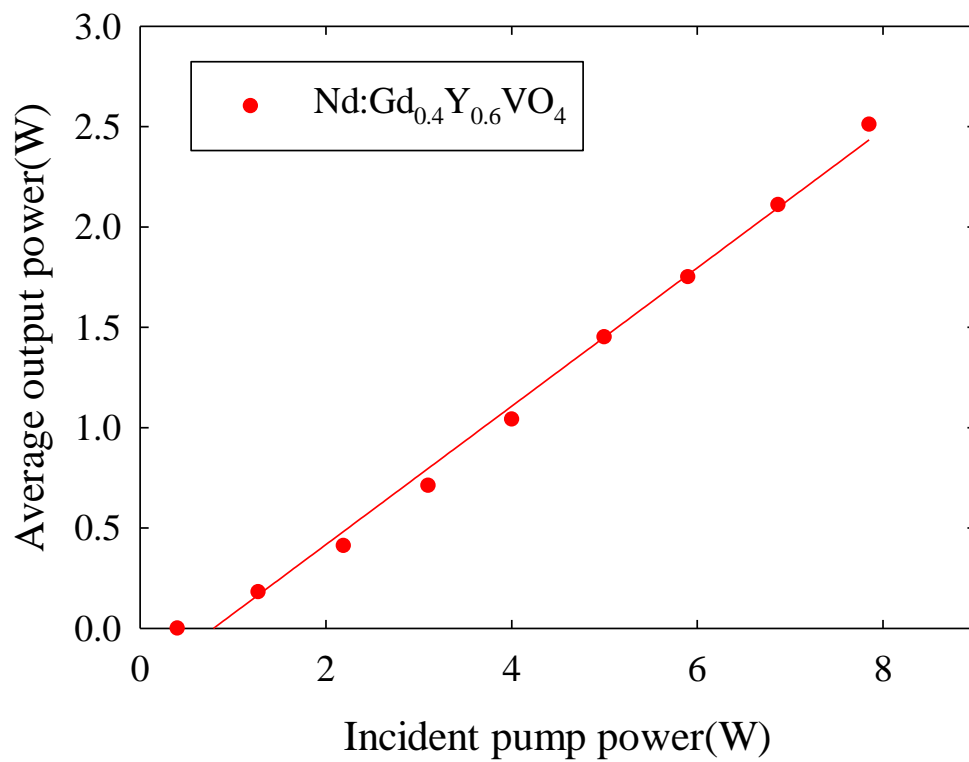


圖 4-2 以  $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$  為增益介質晶體輸出 1064nm 波長雷射輸入與輸出功率關係圖

極體雷射為激發光源可輸出穩定的 1064nm 波長單脈衝雷射，形成第三章所介紹的基本鎖模現象，在  $0\sim 2\pi$  的光程往返週期 (round trip time) 時間內，形成單一脈衝輸出，其重複率達到 3.18GHz，由儀器量測所得光學頻譜圖、相干長度關係圖與示波器所量得結果，並推導其輸出脈衝雷射重複頻率，可得到相同的結果；接著，由光學共振腔結構推導其輸出脈衝雷射重複頻率理論值，由已知條件代入 4-2-2 式，可求出此架構輸出脈衝雷射重複率理論值為 3.18GHz，因此，我們可歸納結論為在此種雷射共振腔架構、條件下，輸出雷射形成良好穩定的單一脈衝，造成這個良好的基本鎖模 (fundamental mode-locking) 現象的原因，是因為共振腔長的關係。

為了驗證這個推論，我們接著以相同尺寸及相同摻雜濃度的 Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 等 3 顆混晶作為增益介質，架構相同結構雷射共振腔，在晶體材料特性討論中，我們可以發現 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 的材料特性，諸如吸收光譜、螢光光譜等非常相近，以其它 3 顆混晶進行實驗時，能夠以相同的激發光源及同一面輸出、輸入鏡達到相同的輸出效果；接下來驗證此理論是否為真，我們先予量測餘 3 顆混晶個別輸入與輸出功率關係圖，如圖 4-4 所示，在最大輸入功率 7.85W 的條件下，Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.4</sub>Y<sub>0.6</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 等 4 顆混晶輸出功率值分別為：2.53W、2.51W、2.5W、2.42W，功率轉換效率分別為：32.2%、32.0%、31.8%、30.8%，可見在相同輸入功率條件，其輸出功率趨勢相近，但是不同的摻雜濃度會對輸出功率值造成影響，我們發現摻釷 (Gd) 濃度愈低、摻釷 (Y) 濃度愈高混晶，其輸出功率值愈高，亦即輸出功率與摻釷濃度呈反比，與摻釷濃度呈正比關係。

摻雜濃度除了對輸出功率造成影響外，觀察 4 顆不同摻雜濃度混晶輸出脈衝串在時間解析度 100ns 情況下如圖 4-5，比較 4 顆混晶輸出脈衝在時域 (time domain) 的變化，時間掃描範圍為 1 $\mu$ s，可以發現，Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub> 的脈衝鎖模輸出最為穩定，隨著摻釷 (Gd) 濃度愈高，其脈衝鎖模現象愈來愈不穩定，尤其是 Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>，已經開始出現不穩定的現象，歸納結論，摻釷濃度愈低、摻釷濃度愈高混晶，其輸出脈衝愈穩定，此外，4 顆晶體光學頻譜及同調長度圖如圖 4-6 所示，由於設定腔長條件相同，4 顆混晶所對應到的同調長度結果均一致為 95mm 左右。



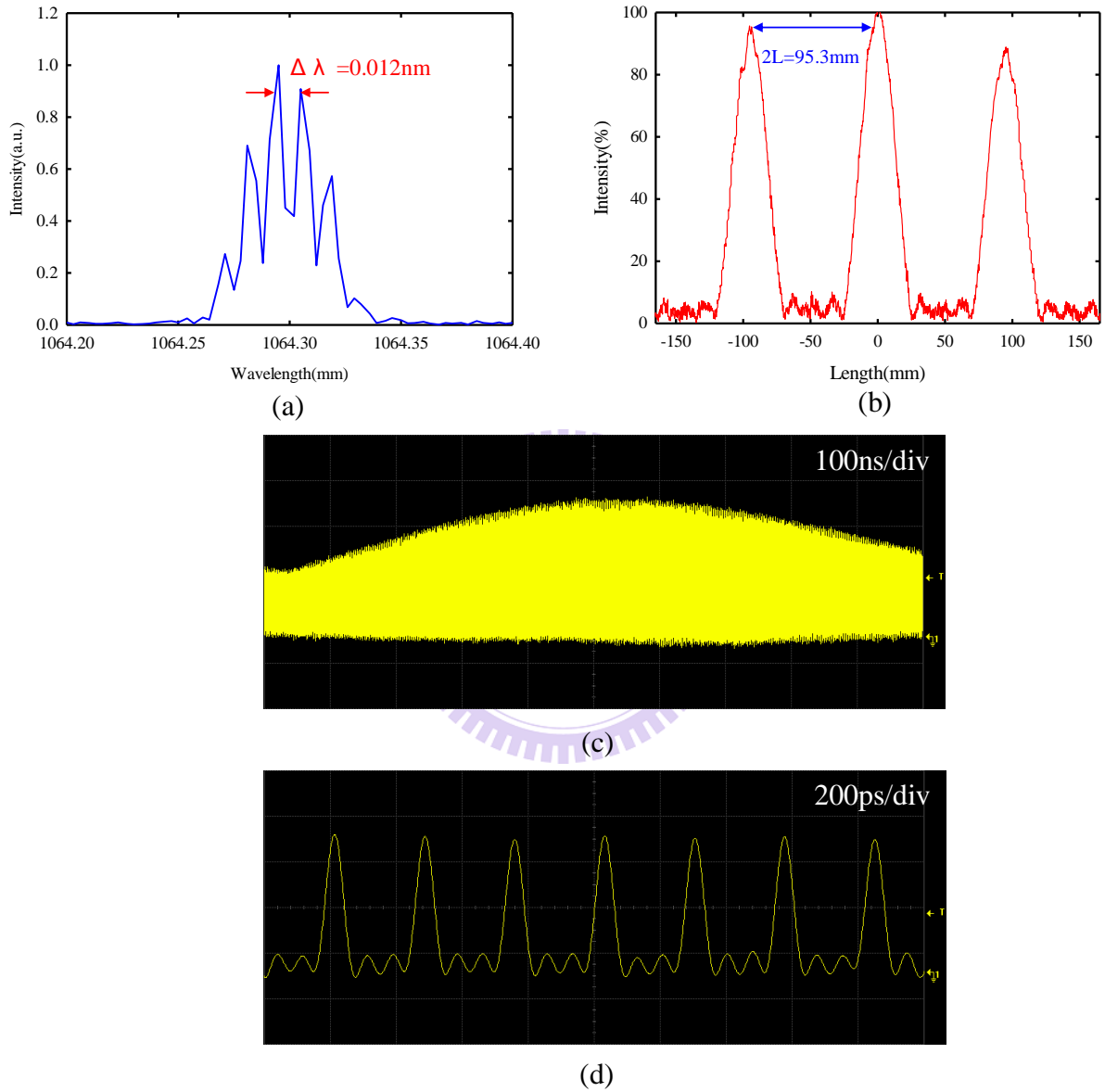


圖 4-3 以  $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$  為增益介質晶體輸出 1064nm 波長雷射 (a) 1064.2nm 至 1064.4nm 光學頻譜 (optical spectrum)圖 (b)同調分析範圍  $\pm 165\text{mm}$  同調長度 (coherent length)關係圖 (c)脈衝串時間解析維度  $1\mu\text{s}$  鎖模脈衝圖 (d) 脈衝串時間解析維度  $2\mu\text{s}$  振幅振盪脈衝輸出圖

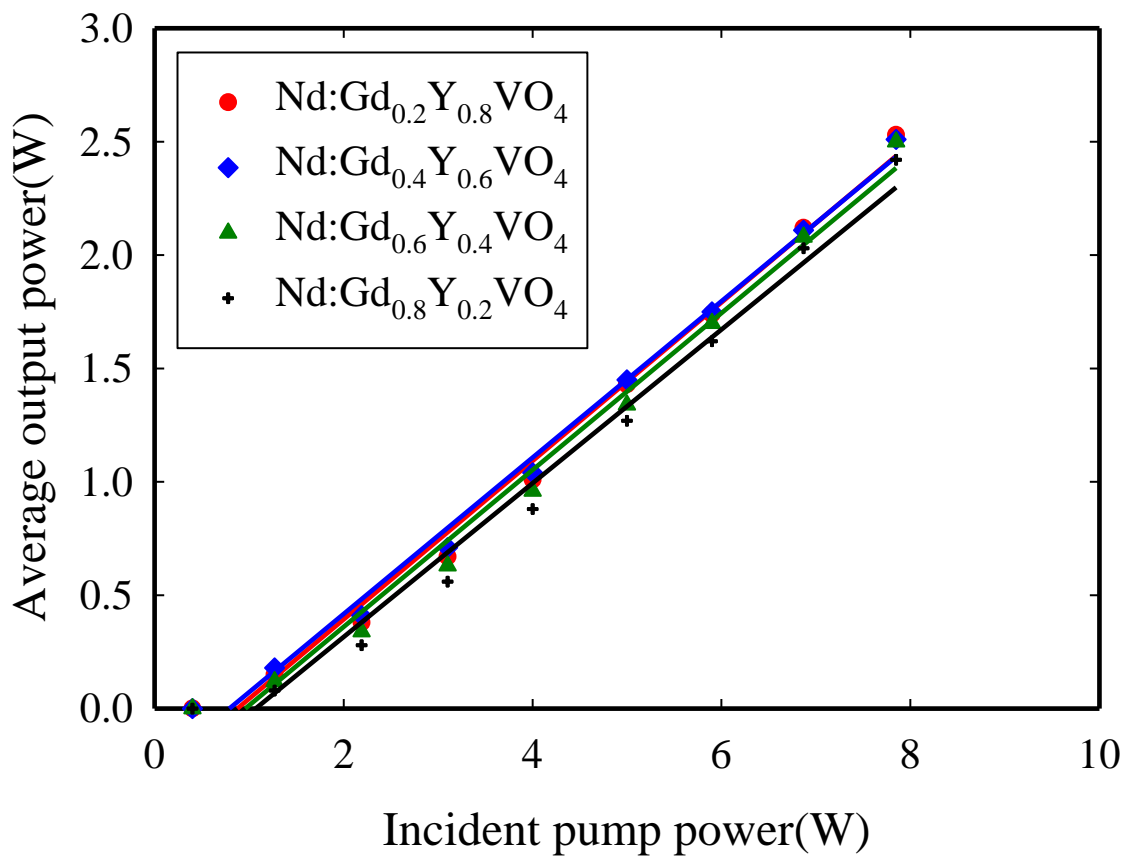


圖 4-4 以  $\text{Nd:Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{VO}_4$  等 4 類混晶作為增益介質輸出波長 1064nm 脈衝雷射輸入與輸出功率關係圖

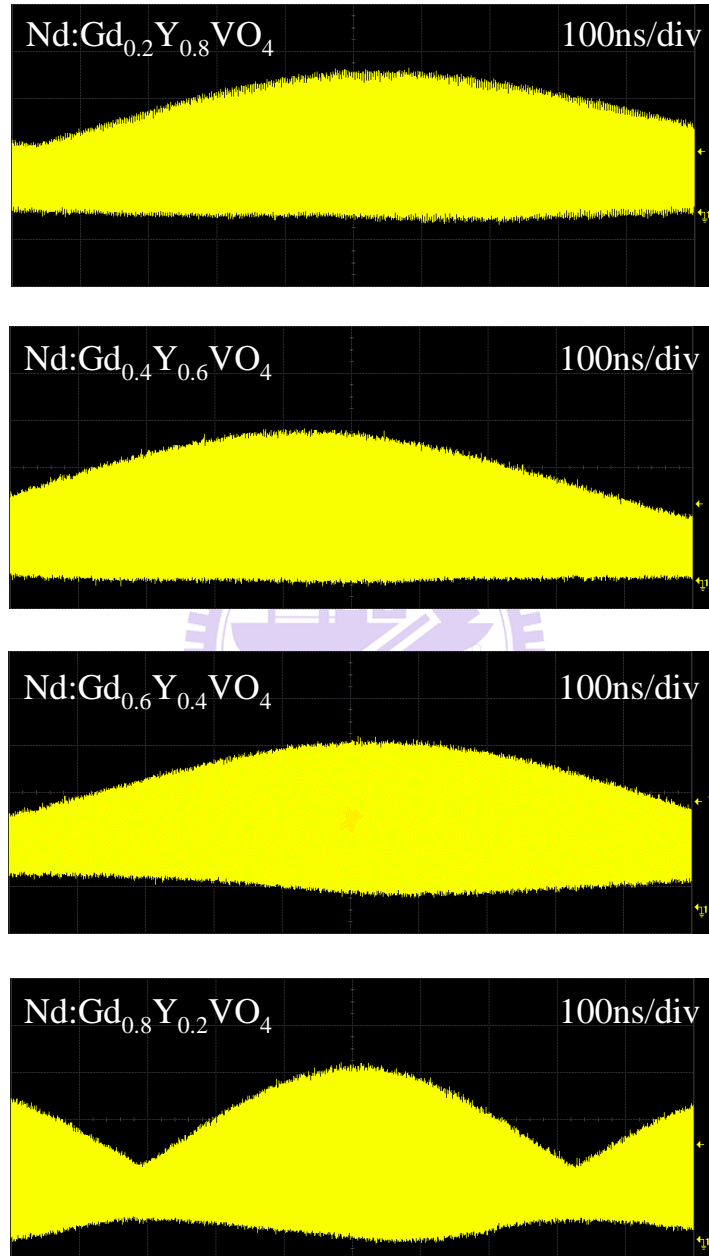


圖 4-5 以  $\text{Nd:Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{VO}_4$  等 4 類混晶作為增益介質  
輸出波長 1064nm 脈衝雷射示波器 (oscilloscope) 解析度 100ns 脈衝輸出圖

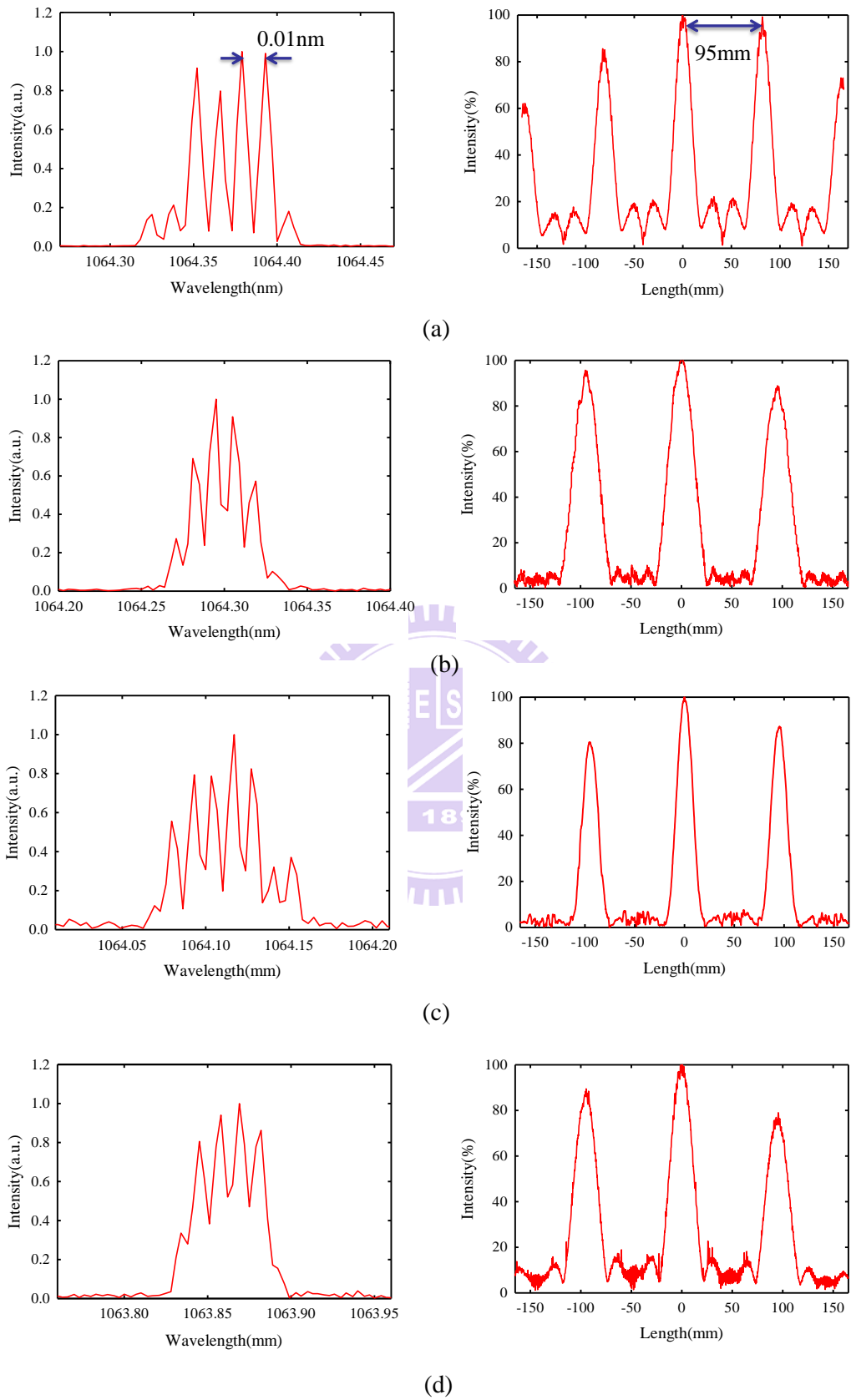


圖 4-6 以(a)Nd:Gd<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>VO<sub>4</sub>、(b)Nd:Gd<sub>0.4</sub>Y<sub>0.6</sub>VO<sub>4</sub>、(c)Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>、(d)Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>等4類混晶作為增益介質輸出波長1064nm脈衝雷射光學頻譜與同調長度圖

# 第五章 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 自鎖模雷射輸出在波長 1342nm 鎖模特性探討

近年來，為數眾多的摻釹晶體被用來發展輸出波長在 1342nm 的雷射，不論運作模式為連續輸出或脈衝輸出皆然 [38-42]，由於 1342nm 波長雷射有非常廣泛的應用，諸如長程通訊、光纖感測、光學測距與資料儲存等領域；由於 Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 雷射增益介質晶體已被廣泛研究應用於架構二極體激發固態雷射系統，主要由於此類雷射具有架構簡單、良好的熱效應、物理、化學特性與優良的雷射特性，它們已被證實在輸出在波長 1064nm 或 1342nm 的高功率雷射架構中為非常良好的雷射增益介質晶體選擇 [43-47]，摻雜釷 (Gd) 元素後，使其具有更佳的热效應 [48]。

在前面的實驗中，我們曾經以單光儀就 Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 實施螢光光譜量測，結果如圖 5-1，可發現其發出螢光強度最強的波長在 1064nm，次強波長在 1342nm，在前一章的研究討論中，發現輸出鎖模雷射波長在 1064nm 時，可形成基本鎖模現象 (fundamental mode-locking effect)，脈衝重複率達約 3.18GHz，但是沒有發現形成更高重複率的諧波鎖模現象 (harmonic mode-locking effect)，接下來本章以輸出波長在 1342nm 脈衝雷射為出發點，同樣以簡易的直線型雷射共振腔進行實驗，以同樣的增益介質，搭配不同鍍膜條件的輸入、輸出鏡，以控制其輸出波長在 1342nm，使其在無其它外加元件的條件下，形成自鎖模現象，並以改變晶體傾角及共振腔長度等方式，觀察不同 Gd 與 Y 比例混晶輸出脈衝雷射鎖模現象的比較與探討。

## 5-1 實驗架構

本章實驗架構圖如圖 5-2，共振腔設計為簡單的直線型凹平共振腔，激發光源部分，與前章相同，選擇以輸出波長在 808nm 的光纖耦合二極體雷射為激發源，纖芯直徑為 400 μm，當控制電流達 15A 時，輸出功率為 7.85W，聚焦鏡組以 2:1 大小成像，使光源聚焦於晶體上，焦距為 25mm，耦合效率約為 87%，輸入鏡規格為直徑  $\phi = 12.7\text{cm}$ ，厚 3mm，聚焦半徑 500mm，鍍膜條件為對波長 1342nm 有高反射(99.8%)，

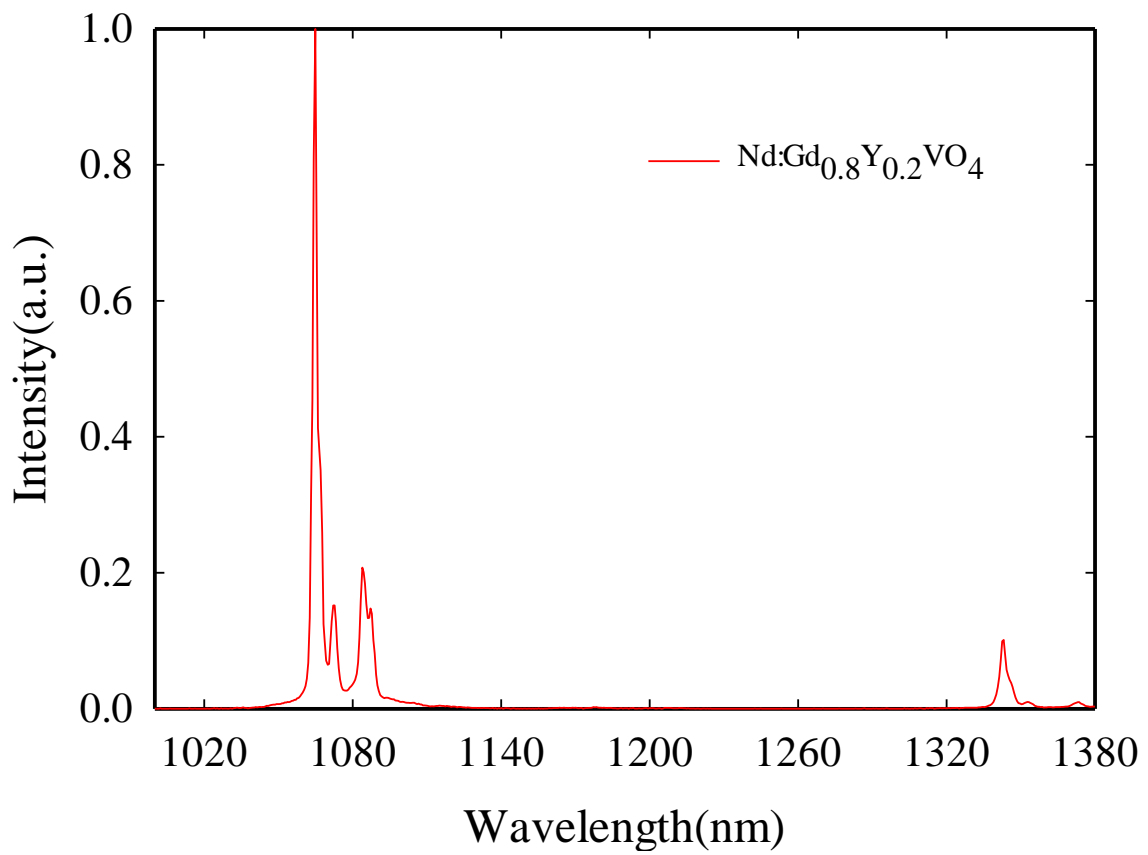


圖 5-1 以單光儀量測 Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> 混晶的螢光光譜，掃描範圍介於 1000nm~1380nm，螢光光譜最強在波長 1064nm 處，次強波長在 1342nm

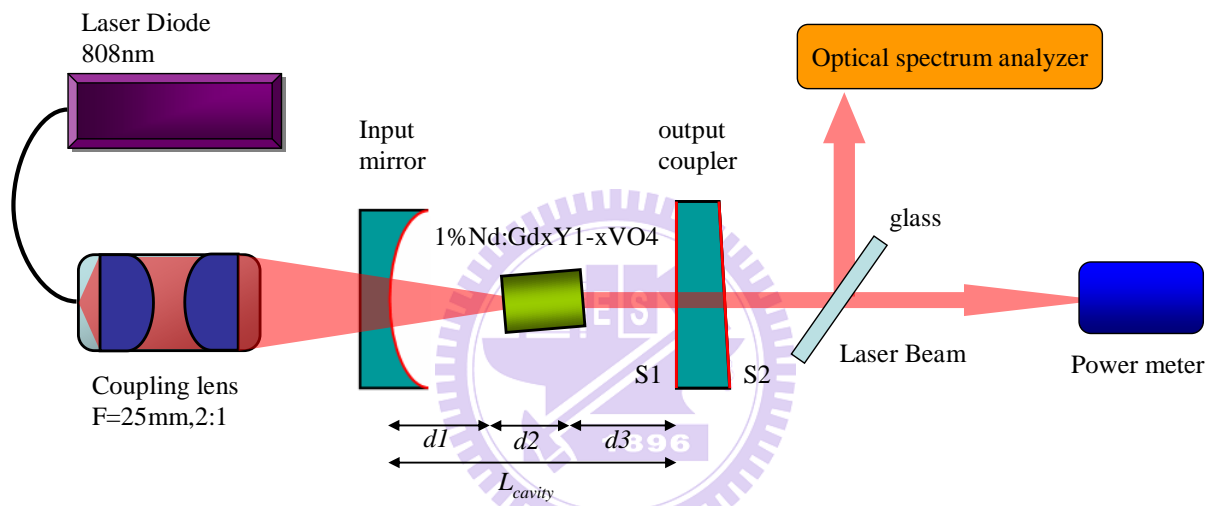


圖 5-2 二極雷射激發以 1% Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> 為增益介質輸出自鎖模脈衝雷射波長在 1342nm 實驗架構圖

對 808nm 波長有高穿透性(95%)，輸出鏡規格為直徑  $\phi=25.4\text{cm}$ ，厚 6.35mm，前表面  $S_1$  鍍膜對 1064nm 與 1342nm 波長有高反射性，使激發光進行二次反射，後表面  $S_2$  鍍膜對 1342nm 波長具有高反射(94%) 特性，對 1064nm 波長具有高穿透性鍍膜，雷射增益介質同樣以摻雜濃度為 1% 的  $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{VO}_4$  等 4 顆混晶，尺寸為  $3*3*6\text{mm}^3$ ，晶體表面鍍膜條件相同，於前、後表面鍍上對 808nm 與 1064nm 有抗反射鍍膜(AR coating)，未做任何切角處理，良好包覆以銦鉛(indium foil)，並裝置固定於以水冷系統散熱的銅座上，冷卻水溫控制在  $25^\circ\text{C}$ ，以確保穩定的雷射輸出。

分析儀器部分，鎖模脈衝輸出由一部傅氏光學頻譜分析儀( Fourier optical spectrum analyzer, Advantest, Q8347 )，內含邁克森干涉儀，解析度達到 0.003nm，以此記錄輸出脈衝雷射的光學頻譜與相干長度，並由一功率電表量測輸出功率值。

## 5-2 實驗結果與討論

雷射共振腔架設完成後，經微調得到最大平均輸出功率後開始記錄輸出與輸入功率關係圖，以  $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$  為增益介質晶體，可量測得到輸入功率與輸出功率關係圖如圖 5-3，在最大輸入功率 7.85W 時，輸出功率達 1.37W，轉換效率為 17.45%，斜率效率 (slope efficiency) 為 17.74%，較輸出波長在 1064nm 所量得轉換效率值 35.29% 為低 (如第 4 章圖 4-2)。

微調得最大平均輸出功率後，光學頻譜顯示輸出雷射並沒有特別的規律性，但是實驗中過程中，經過微調晶體傾角時，發現不穩定波動會趨於穩定，並得到一群有規律性的脈衝輸出，所量測得光學頻譜 (optical spectrum)、相干長度(coherent length) 如圖 5-4 所示，從圖 5-4 的結果，可知鎖模脈衝的重複率為 10.7GHz，脈衝輸出狀態穩定，呈一群分佈且等間隔的脈衝輸出，此現象恰符合於第三章 3-2 所討論到的諧波鎖模現象，為了探討造成諧波鎖模現象的原因，將此時的共振腔條件分別為  $d_1=10\text{mm}$ 、 $d_2\approx 6.3\text{mm}$ 、 $d_3=4\text{mm}$ 、 $L_{\text{opt}}=26.6\text{mm}$ ，分別代入重複率計算式，可分別求得所造成的重複率理論值為 15 GHz、10.8 GHz、37.5 GHz、5.6 GHz，顯示造成 10.7GHz 重複率的主要原因為  $d_2$ ，



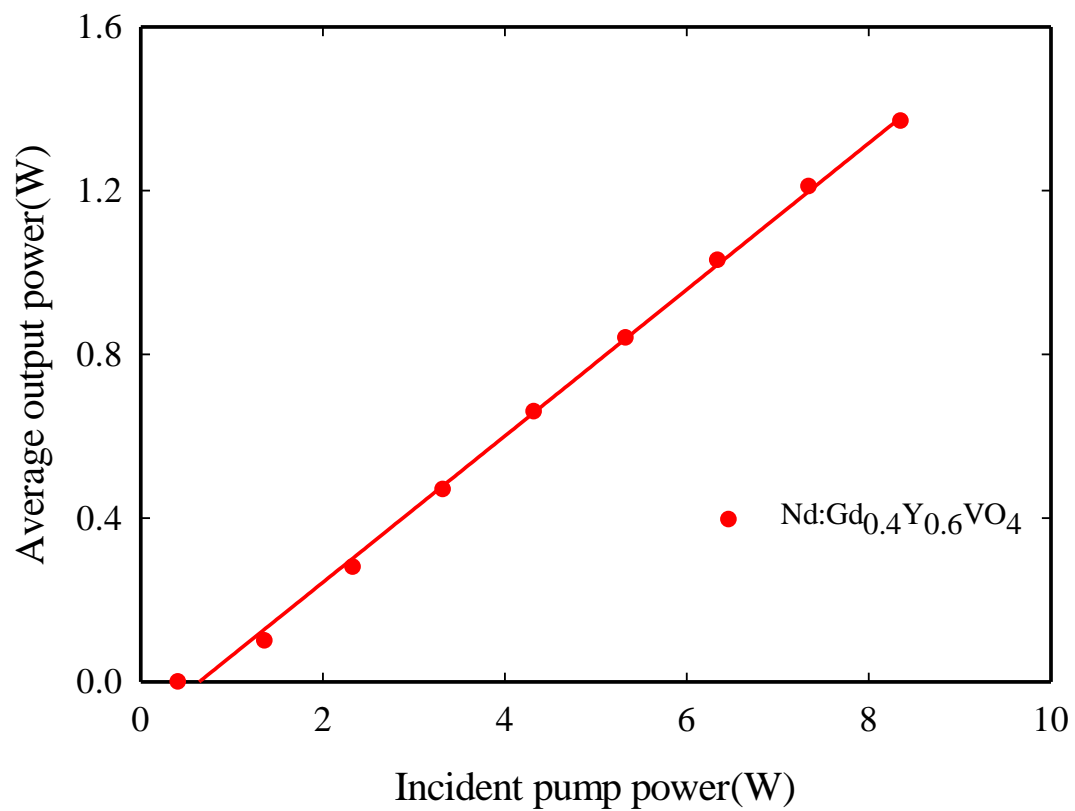
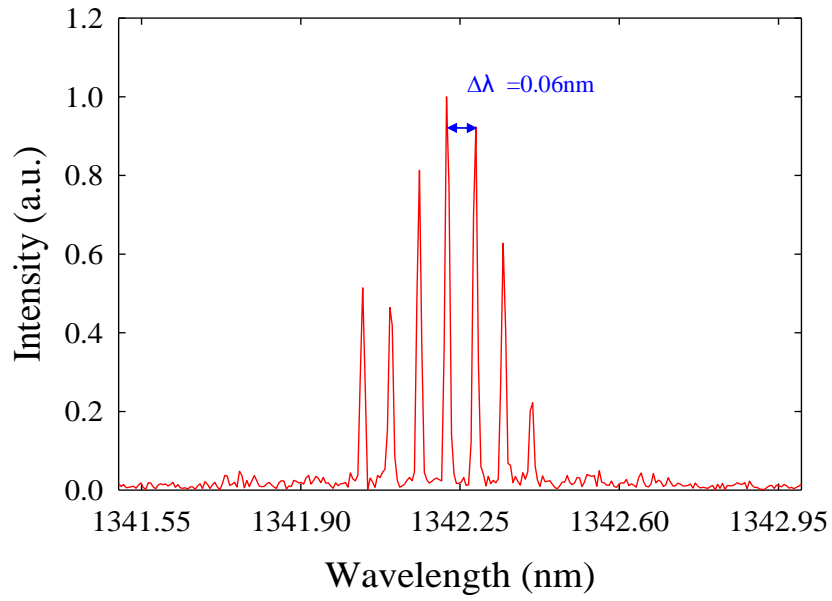
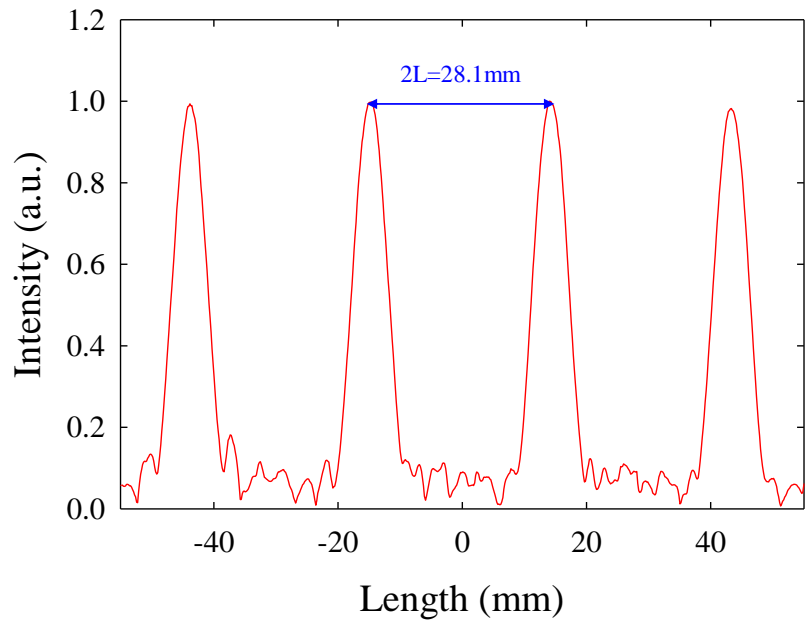


圖 5-3 以  $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$  為增益介質晶體架構輸出波長在 1342nm 鎖模雷射的平均輸出功率與連續輸入激發功率關係圖



(a)



(b)

圖 5-4 以  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  為增益介質，脈衝雷射輸出波長在 1342nm 形成重複率 10.7GHz 的諧波鎖模現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖

意即晶體本身形成一共振腔所造成的結果。

此種諧波鎖模現象是由晶體本身形成一共振腔，致使輸出脈衝形成諧波鎖模現象，為了探討造成這種現象的原因，我們接著以單光儀量測 Nd:Gd<sub>0.4</sub>Y<sub>0.6</sub>VO<sub>4</sub> 晶體的吸收光譜，波長掃描範圍自 1000nm 至 1400nm，量測結果如圖 5-5，比較光波長在 1064nm 與 1342nm 時的穿透效率，從量測結果可以發現，光波長在 1342nm 時，其穿透效率較在 1064nm 波長時略低約 2%，由於晶體條件即對 1064nm 波長光有抗反射鍍膜，故穿透效率高，反之在 1342nm 時，由於未做抗反射鍍膜，致使穿透效率較差，易造成反射，導致光更容易於晶體內形成共振現象，故增益介質晶體表面的抗反射鍍膜(AR coating) 條件便成為關鍵的因素，在輸出脈衝雷射在波長 1342nm 的情況下，激發光源會在晶體內部產生共振現象，這種現象即所謂的標準具效應(etalon effect)，由於晶體自身的這種現象，致使我們可以觀察到輸出脈衝雷射波長在 1342nm 時，可以觀察到諧波鎖模現象，並且以不同的腔長條件形成重複率更高的脈衝輸出雷射。

除了調整增益介質晶體的傾角可以得到重複率達 10.7GHz 的諧波鎖模脈衝輸出外，接下來，我們試著改變拉長增益介質晶體至出光鏡的距離，亦即如圖 5-2 的 d3 距離，藉以改變整體共振腔長度，觀察此諧波鎖模脈衝輸出有何變化，實驗中，進行了共振腔長自 20mm 至 64mm，每 1mm 量測紀錄其光學頻譜與相干長度關係，並且發現在特定腔長時，會有重現相同重複率的現象，我們以其光學頻譜圖與相干長度圖比較討論之。

在所量測記錄的光學頻譜圖中，我們發現到，在某些特定腔長條件時，光學頻譜結果將重現在共振腔長為 20mm 時相同的現象，輸出脈衝雷射呈穩定一群分佈且等間隔的脈衝輸出，脈衝間距(spacing, 2L) 等距為 28.1mm，可重現此現象的共振腔長分別在 20, 21, 34, 35, 36, 49, 50, 51, 64, 65 mm 時，其光學頻譜圖與相干長度圖如圖 5-4 所示，光學頻譜圖中  $\Delta\lambda = 0.06\text{nm}$ ，相干長度  $2L = 28.1\text{mm}$ ，形成重複率為 10.7GHz 的鎖模脈衝輸出。

另外，當共振腔長度在 27, 42, 43, 57, 58 mm 時，我們所量得之光學頻譜圖與相干長度輸出均穩定相同且脈衝輸出相同，如圖 5-6 所示，此時  $\Delta\lambda = 0.12\text{nm}$  與  $2L = 14\text{mm}$  代

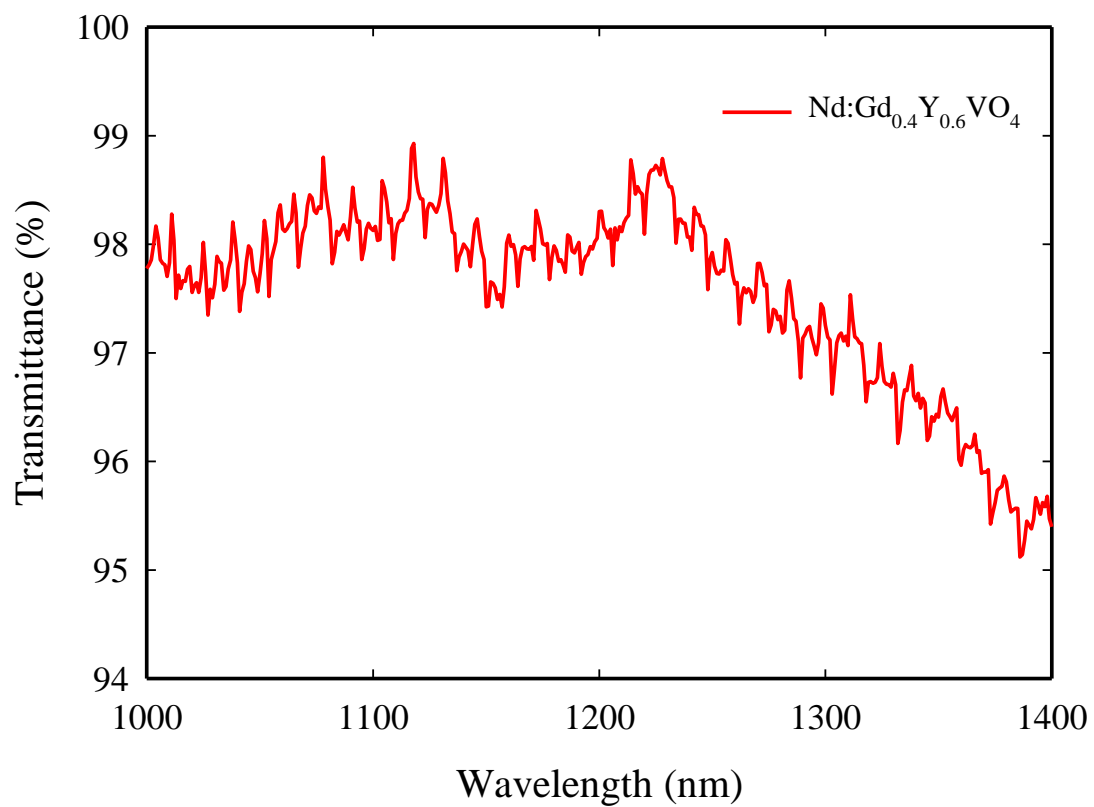


圖 5-5 以單光儀 (TRIAX 320) 量測 Nd:Gd<sub>0.4</sub>Y<sub>0.6</sub>VO<sub>4</sub> 晶體的吸收光譜，波長掃描範圍自 1000nm 至 1400nm 的量測結果

入 4-2-1 與 4-2-2 式，可求得此時穩定輸出脈衝雷射重複率均相同為 21.4GHz，光學頻譜圖顯示脈衝間隔相同， $\Delta\lambda = 14\text{nm}$ ，這樣的頻譜分佈也是屬於諧波鎖模現象，且其脈衝重複率恰為 10.7GHz 的 2 倍，印證於第三章 3-2 節所討論當  $N=2$  時，其輸出脈衝重複率為原先的 2 倍的現象。

當共振腔長  $L_{\text{cavity}}$  為 31, 40, 45, 60 mm 條件下，光學頻譜圖與相干長度圖如 5-7 所示，圖 5-7(a) 為其光學頻譜圖，顯示  $\Delta\lambda = 0.18\text{nm}$ ，圖 5-7(b) 為其相干長度圖，可得  $2L = 9.35\text{nm}$ ，並可推知其脈衝重複率在這幾個腔長組合時均相同為 32.1GHz，重複率為 10.7GHz 的 3 倍，印證輸出為  $N=3$  的諧波鎖模現象。

除了在特定的共振腔長組合中，可以觀察到重複率相同的諧波鎖模現象外，在非特定共振腔長中，可以觀察到另外兩種不同的現象，在某些特定腔長條件下，光學頻譜圖會呈現拍頻 (beating) 波包現象，輸出脈衝呈兩群分佈，此種現象會出現在腔長在 23, 33, 37, 38, 47, 48, 52, 62, 63 mm 的時候，所量得的光學頻譜圖與相干長度圖如圖 5-9 所示。另外，在部分腔長組合中，無論如何微調元件，頻譜輸出均無穩定輸出，而呈不規則脈衝輸出，這樣的現象會出現在腔長組在 26, 28, 29 mm 的時候，所量得的光學頻譜圖與相干長度圖如圖 5-10 所示，以上兩種情形為在實驗中所觀察到的現象，但非本實驗主要探討的重點，本實驗主要探討發生諧波鎖模現象的情況與原因。

將前面所觀察到在不同共振腔長條件下所形成不同重複率的諧波鎖模現象所量得的相干長度圖以小尺度數據繪製成圖 5-11，可觀察到脈衝輸出重複率為 10.7GHz 時的脈寬與重複率為 21.4GHz 時的脈寬相當接近約為 11ps，而當脈衝輸出重複率達 32.1GHz 時所量得脈寬 5.5ps，由於 10.7GHz 與 21.4GHz 所估算脈寬數值相當接近，實驗中稍有人為操作、誤差則有可能改變結果，實驗結果顯示以此實驗裝置可輸出重複率最高達到 32.1GHz，最窄脈寬寬度約為 5.5ps 的諧波鎖模脈衝雷射輸出，大致符合鎖模雷射理論分析在輸出脈衝重複率愈高時，其脈寬愈窄的趨勢。

脈衝重複率與晶體本身所造成輸出脈衝重複率比值為 1 的情形，在  $N=2, 3$  的結果則顯示在不同的腔長條件下會造成輸出脈衝重複率達 2~3 倍的諧波鎖模現象，此外，在前面的實驗結果討論中，我們證明二極體激發固態雷射以  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  做為增益介

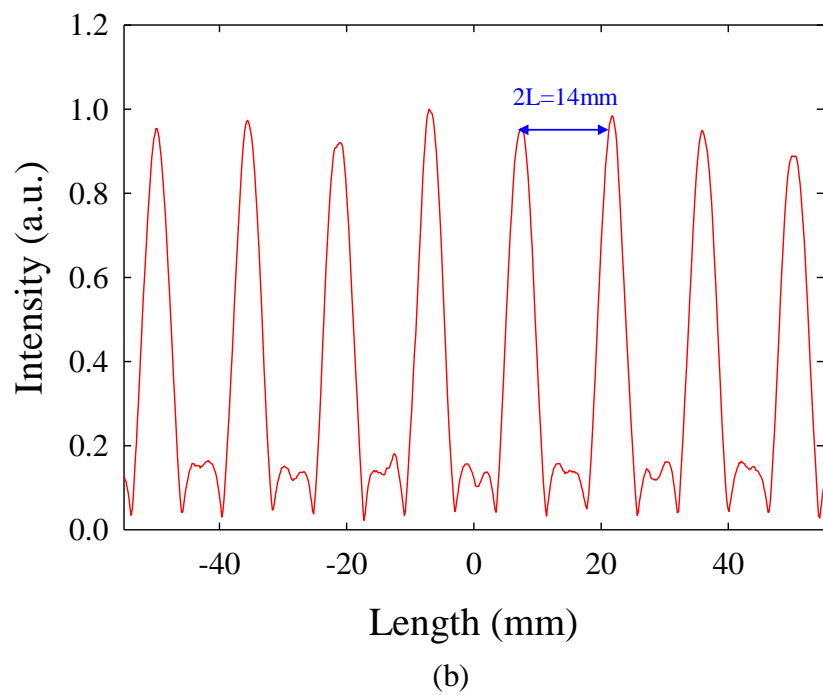
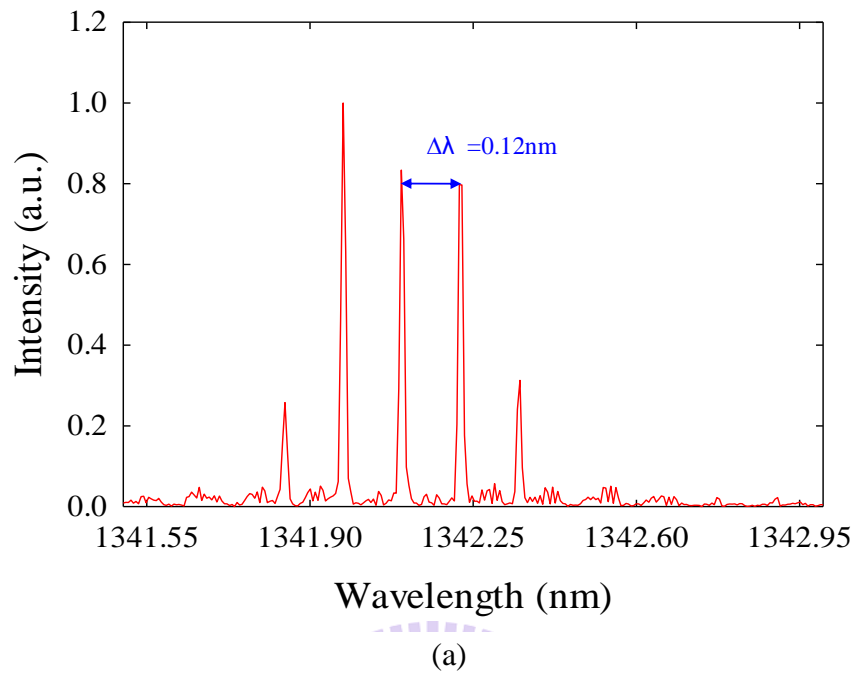
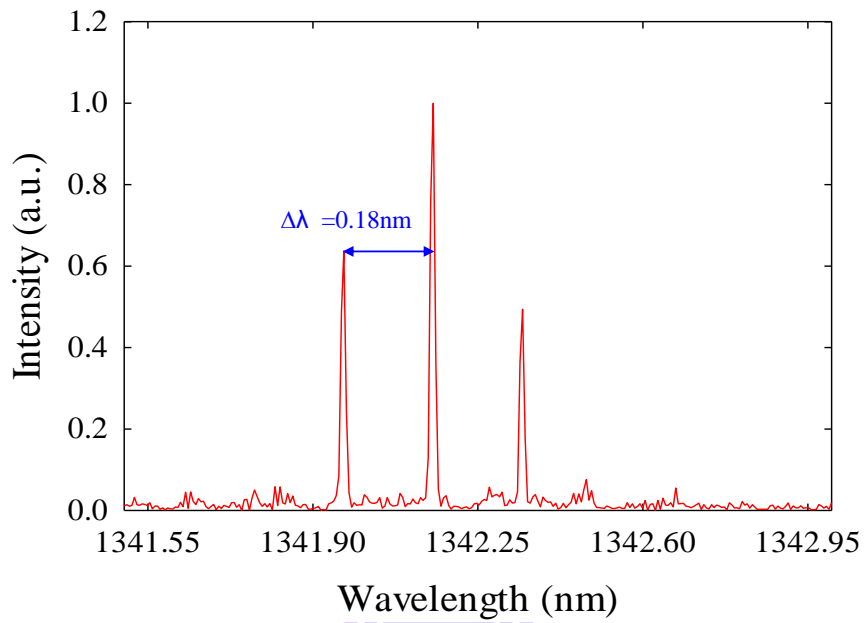
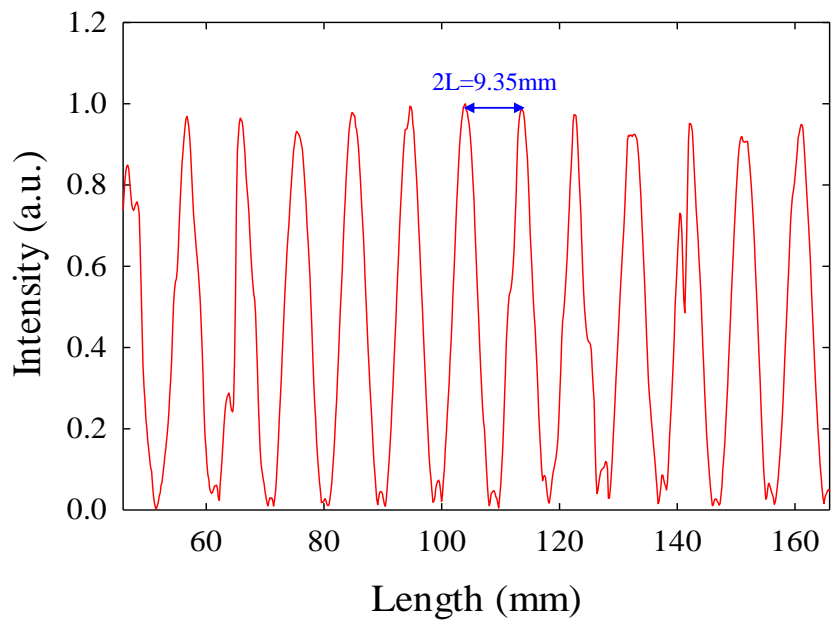


圖 5-6 以  $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  為增益介質，脈衝雷射輸出波長在 1342nm 形成重複率 21.4GHz 的諧波鎖模現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖



(a)



(b)

圖 5-7 以  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  為增益介質，脈衝雷射輸出波長在 1342nm 形成重複率 32.1GHz 的諧波鎖模現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖

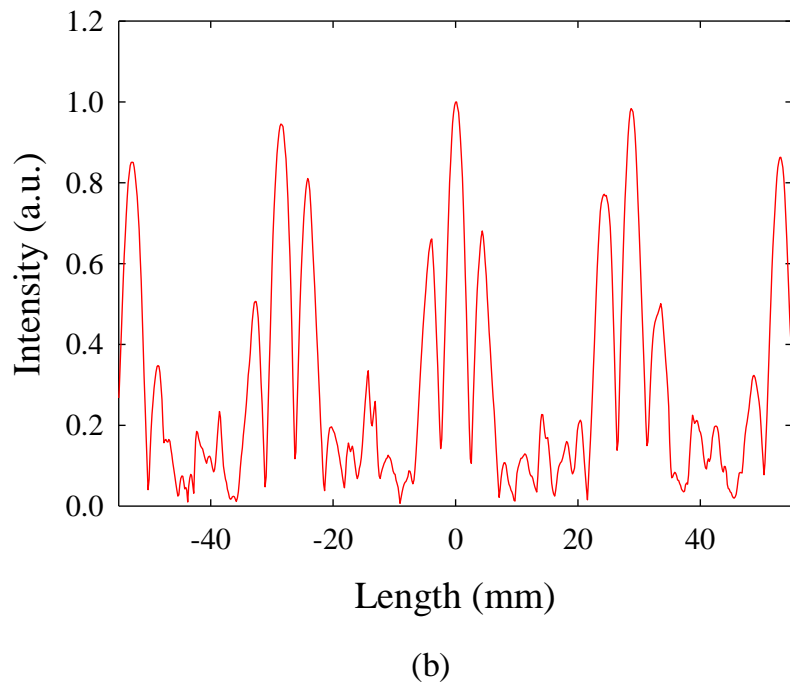
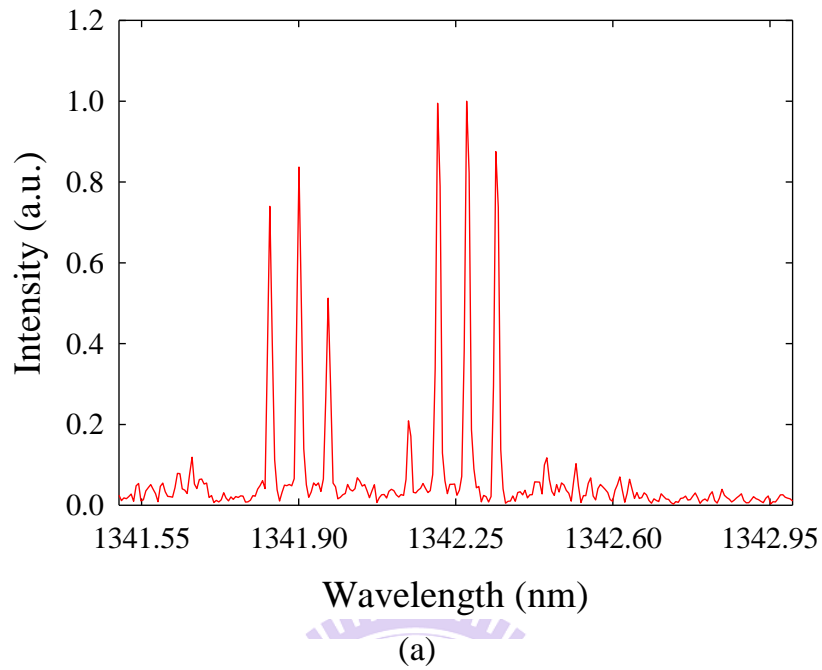
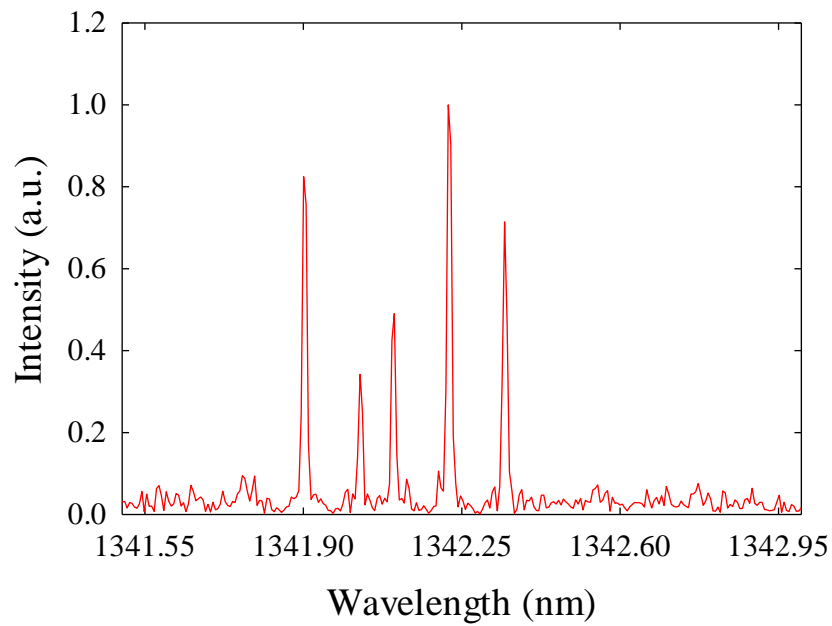
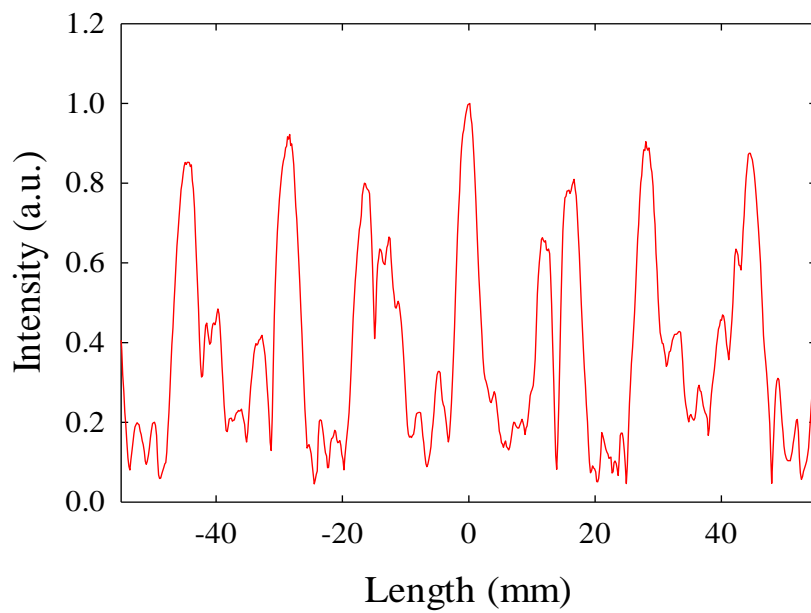


圖 5-8 以  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  為增益介質，脈衝雷射輸出波長在 1342nm 時輸出雷射呈現拍頻 (beating) 波包現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖





(a)



(b)

圖 5-9 以  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  為增益介質，脈衝雷射輸出波長在 1342nm 時輸出雷射呈現隨機分佈 (random) 波包現象 (a) 波長範圍 1341.5nm 至 1343nm 光學頻譜圖 (b) 相干長度 (coherent length) 掃描範圍自 -55mm 至 55mm 關係圖

質架構直線型凹平共振腔輸出波長在 1342nm 鎖模脈衝雷射會因為增益介質本身的高反射鍍膜( AR coating)的因素造成標準具效應( etalon effect)，在改變晶體在共振腔中的傾角時，會產生諧波鎖模現象，此諧波鎖模現象係因晶體自身形成一共振腔產生共振而造成，且在不同的腔長條件之下，可形成不同階的諧波鎖模現象，輸出晶體本身腔長造成的 10.7GHz 重複率，以及 2 倍重複率的 21.4GHz，其最高可產生 3 倍重複率達 32.1GHz 的脈衝雷射輸出，並得到脈衝寬度為 5.5ps 的諧波鎖模脈衝雷射，藉由調整腔長條件可發現在特定腔長條件形成不同重複率之整理比較圖表可由圖 5-12 清楚表示，在此我們發現一個規律性現象即腔長條件自  $20\pm 1$  mm 開始，每間隔 15mm 即會出現相同 10.7GHz 重複諧波鎖模現象，出現群組依次為  $20\pm 1$ ,  $35\pm 1$ ,  $50\pm 1$ ,  $65\pm 1$  mm，其次在 21.4GHz 重複率群組亦有相同現象，出現群組依次為  $27\pm 1$ ,  $42\pm 1$ ,  $57\pm 1$  mm，在 32.1GHz 重複率出現群組概為 30、45、60mm 附近，另外在較高重複率族群有部份預期出現腔長而未出現者，其原因是因為在低重複率族群時即已出現過諧波鎖模現象，所以在較高重複率族群時並未出現之覆蓋的現象，此外，重複率達 10.7GHz 族群、21.4GHz 族群與 32.1GHz 族群，其  $\Delta\lambda\approx 0.35\text{nm}$ ，代入 3-1 節所提內容其時間/增益頻寬  $t_p\Delta\nu\approx 0.496$ ，可印證理論值  $t_p\Delta\nu$  接近 0.44。

。

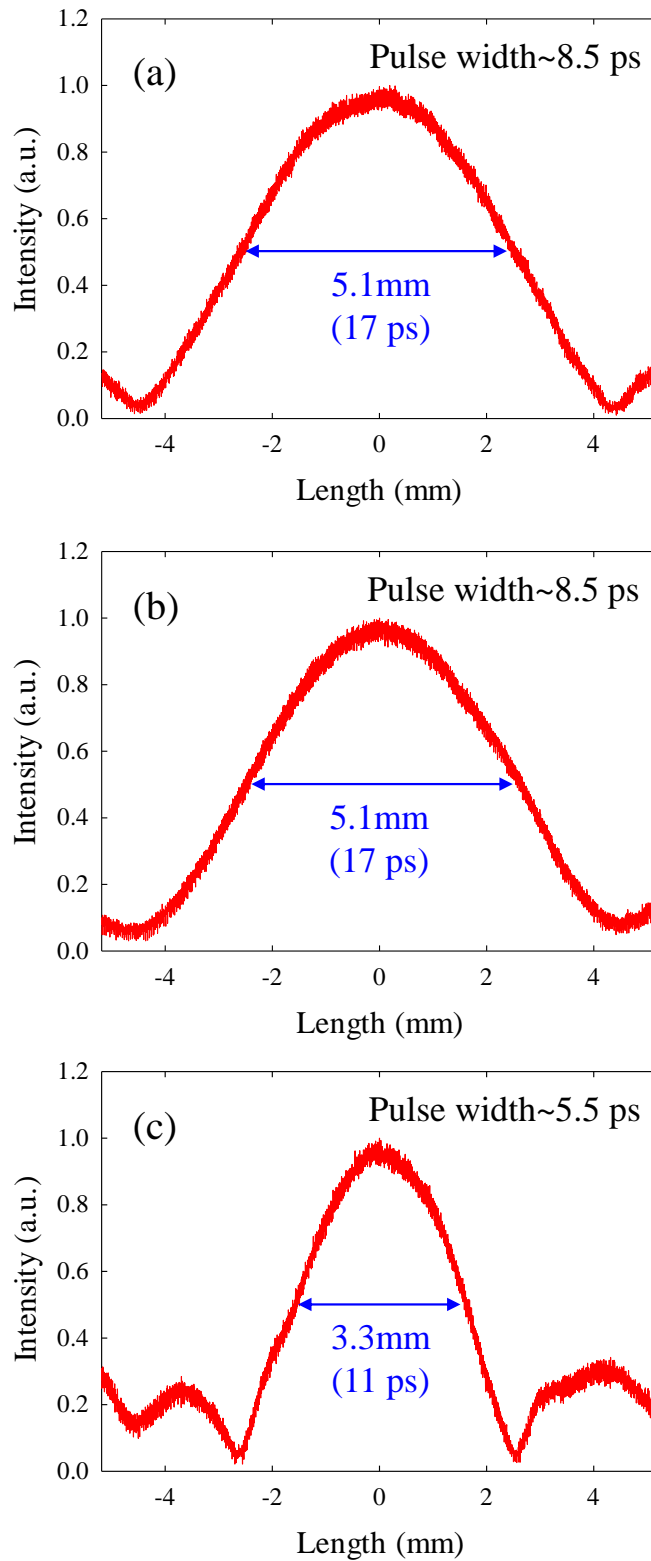


圖 5-10 以  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  為增益介質，輸出波長在  $1342\text{nm}$  諧波鎖模脈衝雷射重複率達 (a)  $10.7\text{GHz}$ 、(b)  $21.4\text{GHz}$  及(c)  $32.1\text{GHz}$  等不同重複率之小尺度相干長度圖

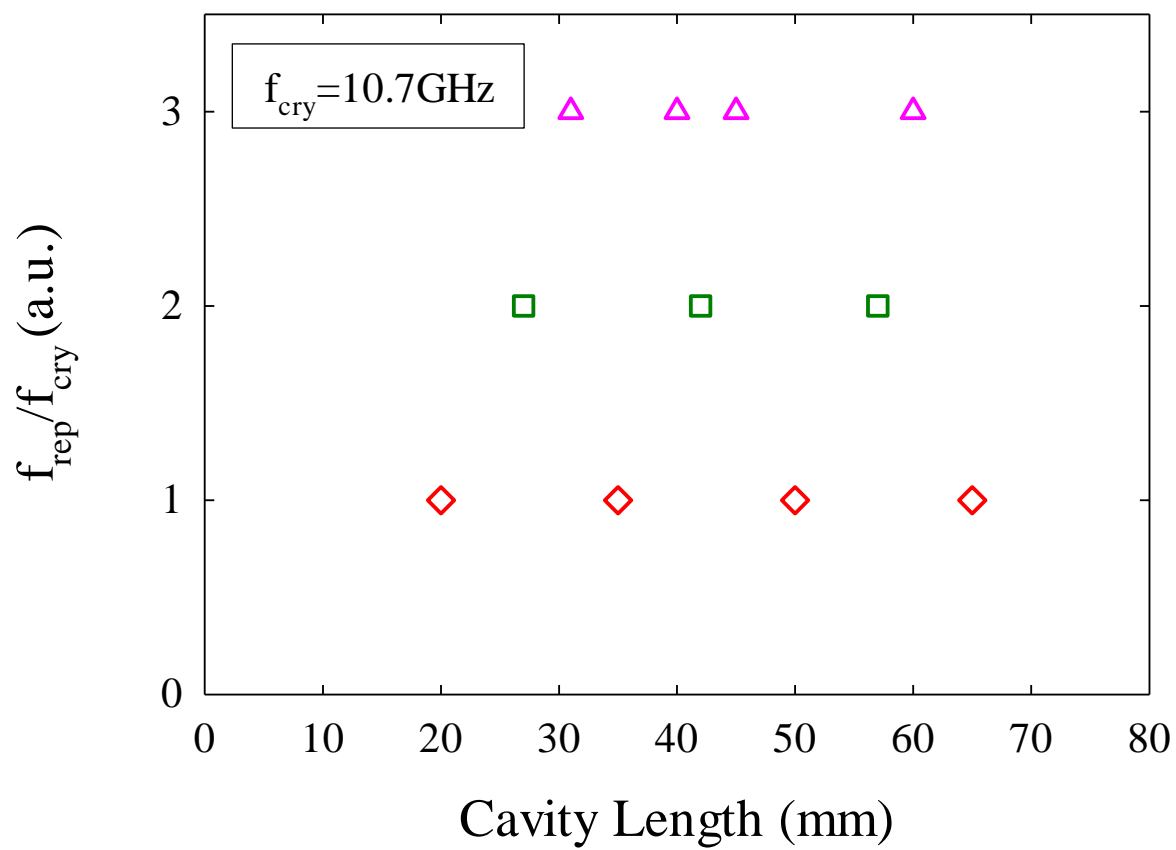
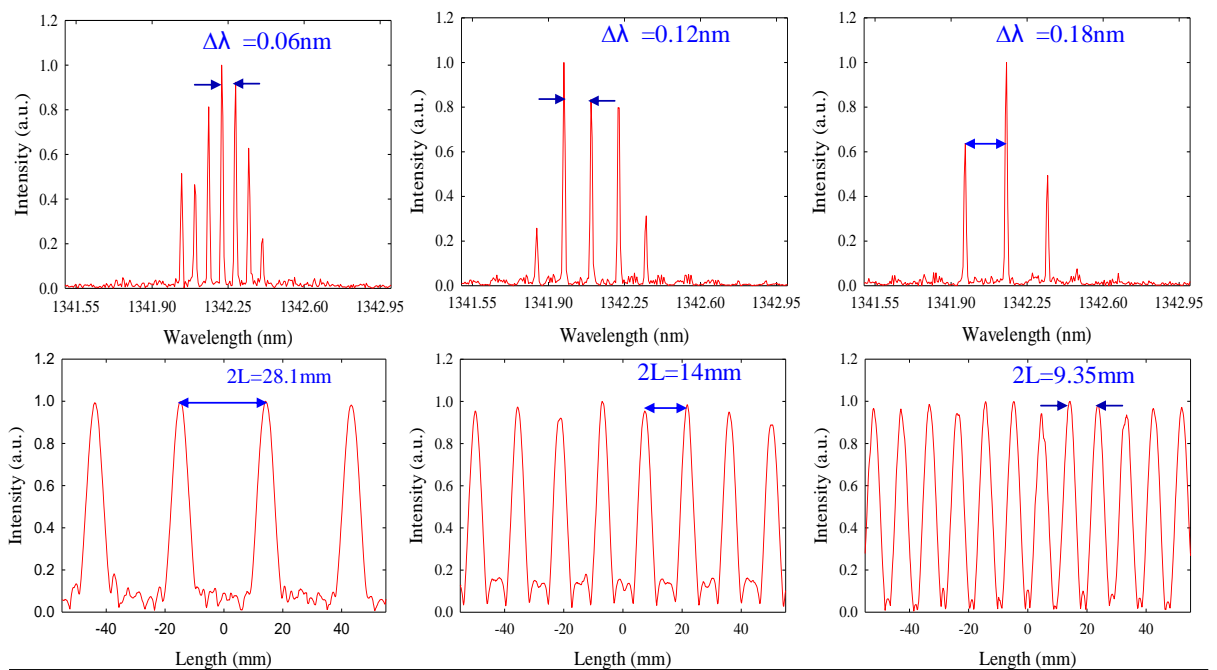


圖 5-11 以  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  為增益介質，脈衝雷射輸出波長在 1342nm 時輸出諧波鎖模雷射在不同共振腔長條件下所產生鎖模脈衝雷射重複率與晶體本身所造成重複率比值關係圖



<b>10.7GHz</b>	<b>21.4GHz</b>	<b>32.1GHz</b>
<b>20±1, 35±1, 50±1, 65±1 mm</b>	<b>27±1, 42±1, 57±1 mm</b>	<b>31, 40, 45, 60 mm</b>

圖 5-12 不同腔長條件下出現相同重複率族群整理比較圖

## 第六章 總結與未來研究方向

本論文主要係利用  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  作為雷射系統的增益介質晶體，使其形成自鎖模機制而得到高重複率的鎖模脈衝雷射，實驗中，我們搭配以不同鍍膜條件的輸入鏡與輸出鏡形成不同共振條件的共振腔輸出波長在 1064nm 與波長在 1342nm 的鎖模脈衝雷射。

在輸出波長在 1064nm 的脈衝鎖模雷射實驗中，進行了  $\text{Nd:Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{VO}_4$ 、 $\text{Nd:Gd}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{VO}_4$  等 4 顆混晶作為增益介質晶體的實驗，在相同的最大輸入激發功率 7.85W 條件下，可由  $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$  得到最大輸出功率 2.51W，轉換效率為 31.97%，並觀察到輸出脈衝雷射形成穩定良好的基本鎖模 (fundamental mode-locking) 現象，重複率達到 3 點多 GHz，而造成基本鎖模現象的原因，主要是因為共振腔腔長條件所造成，在我們所調整架構的腔長條件下，形成基本鎖模脈衝雷射輸出的結果，此外，比較 4 顆  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  混晶輸出結果，可發現摻釷 (Gd) 濃度愈低、摻釷 (Y) 濃度愈高混晶，其輸出脈衝振盪愈穩定，反之，在摻釷 (Gd) 濃度愈高時，將造成輸出脈衝振盪不穩定現象。

在輸出波長在 1342nm 的脈衝鎖模雷射實驗中， $\text{Nd:Gd}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{VO}_4$  在最大輸入功率 7.85W 時，輸出功率達 1.37W，轉換效率為 17.45%，較 1064nm 所得轉換效率低，此外，在微調晶體傾角時，觀察到輸出脈衝雷射形成穩定良好的諧波鎖模 (harmonic mode-locking) 現象，脈衝重複率達到 10.7GHz，在改變共振腔長條件進行了共振腔長自 20mm 至 64mm 時輸出結果，可以得在某些特定腔長可以到  $N=2、3$  的諧波鎖模現象，輸出脈衝重複率分別達到 21.4GHz、32.1GHz，形成此現象的原因，主要係因為增益介質晶體本身的抗反射鍍膜條件，使晶體自身造成標準具效應 (etalon effect)，且在不同的腔長條件之下，可形成不同階的諧波鎖模現象，最高可產生重複率達 32.1GHz 的脈衝雷射輸出並得到脈衝寬度為 5.5ps 的諧波鎖模脈衝雷射。

本論文主要的貢獻係以不同的共振腔條件，以高摻雜濃度 (1%) 釷離子的  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  晶體作為增益介質晶體輸出波長在 1064nm 與 1342nm 不同波長的自

鎖模脈衝雷射，並探討所形成的基本鎖模現象與諧波鎖模現象產生的原因，在不同摻雜濃度以及不同共振腔條件、共振腔長情況下，會造成的情形，可作為爾後脈衝鎖模雷射設計時的參考，依不同的需求來架構雷射，得到所需的鎖模脈衝輸出雷射。

在後續研究的方向上，首先元件選擇上可以試著去探討改變聚焦鏡聚焦半徑由 500mm 縮短至 50mm 對輸出脈衝雷射造成的影響，此外，可以嘗試以離軸方式架構雷射，比較同軸與離軸共振腔體輸出脈衝雷射，進一步探討輸出脈衝雷射特性，另外可以嘗試雷射輸出波長在 1064nm 的實驗中，採用不切角且鍍膜條件較差的情形，驗證可否實現諧波鎖模現象。



## 參考文獻

- [1] Wayne H. Knox, "Ultrafast Technology in Telecommunications" IEEE journal on selected topics in quantum electronics, Vol. 6, No.6 (2000).
- [2] A.I. Zagumennyi, V.G. Ostoumov, I. A. Shcherbakov, Sov. J. Quantum Electron. **22**, 1071 (1992).
- [3] L. Qin, X. Meng, and R. Cheng, "Growth and properties of mixed crystal Nd:GdYVO<sub>4</sub>" J. Alloys Compd. **354**(1-2), 259-262 (2003)
- [4] J. Liu, X. Meng, and H. Weber, "Pulse energy enhancement in passively Q-switched operation with a class of Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> crystals," Appl. Phys. Lett. **83**(7), 1289-1291 (2003)
- [5] X. Wang, Yuanji Tang, and Suning Tang "Comparative studies of Nd:Y<sub>x</sub>Gd<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> laser with direct and indirect pumping" Proc. of SPIE Vol. 7193 71930M1 (2009)
- [6] L. J. Qin, X. L. Meng, L. Zhu, J. H. Liu, B. C. Xu, H. Z. Xu, F. Y. Jiang, C. L. Du, X. Q. Wang, Z. S. Shao "Influence of the different Gd/Y ratio on the properties of Nd:Y<sub>x</sub>Gd<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> mixed crystals" Chemical Physics Lett. **380** 273-278 (2003)
- [7] Zhu Li, Zhang Huaijin, Meng Xianlin et al.. "Grown and laser properties of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal at 1064 nm [J]" Journal of Synthetic Crystals, 1999, **28**(3): 229~232
- [8] F. Salin, P. Grangier, G. Roger, and A. Brun, "Experimental observation of nonsymmetrical N=2 solitons in a femtosecond laser," Phys. Rev. Lett. **60**, 569-572 (1988).
- [9] A. B. Grudinin, D. J. Richardson, and D. N. Payne, "Energy quantisation in figure eight fibre laser," Electron. Lett. **28**, 67-68 (1992).
- [10] C. Spielmann, P. F. Curley, T. Brabec, and F. Krausz, "Ultrabroadband femtosecond lasers," IEEE J. Quantum Electron. **30**, 1100-1114 (1994).
- [11] J. Aus der Au, D. Kopf, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller, "60-fs pulses from a diode-pumped Nd:glass laser," Opt. Lett. **22**, 307-309 (1997).
- [12] K. Gürs and R. Müller, "Breitband-modulation durch steuerung der emission eines optischen masers," Phys. Lett. **5**, 179 (1963).
- [13] L. E. Hargrove, R. L. Fork, and M. A. Pollack, "Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation," Appl. Phys. Lett. **5**, 4 (1964).
- [14] S. E. Harris and R. Targ, "FM oscillation of the He-Ne laser," Appl. Phys. Lett. **5**, 202 (1964).
- [15] 黃國維, 「摻鎳鈮鋁石榴石自鎖模雷射」, 國立交通大學, 碩士論文, 民國 101 年。
- [16] H. W. Mocker, R. J. Collins, "Mode competition and self-locking effects in a Q-switched ruby laser," Appl. Phys. Lett. **7**, 270 (1965).
- [17] E. P. Ippen, C. V. Shank, and A. Dienes, "Passive mode locking of the cw dye laser," Appl. Phys. Lett. **21**, 348 (1972).
- [18] C. V. Shank and E. P. Ippen, "sub-picosecond kilowatt pulses from a mode-locked cw



- dye laser," *Appl. Phys. Lett.* **24**, 373 (1974).
- [19] U. C. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd, T. H. Chiu, J. F. Ferguson, M. T. Asom, "Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers : an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber," *Opt. Lett.* **17**, 505 (1992).
- [20] U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek, and J. Aus der Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state laser," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **2**, 435 (1996).
- [21] I. D. Jung, F. X. Kartner, N. Matuschek, D. H. Sutter, F. Morier-Genoud, Z. Shi, V. Scheuer, M. Tilsch, T. Tschudi, and U. Keller, "Semiconductor saturable absorber mirrors supporting sub-10-fs pulses," *Appl. Phys B* **65**, 137 (1997).
- [22] M. H. Crowell, "Characteristics of mode-coupled laser," *IEEE J. Quantum Electron.* **1**, 12 (1965).
- [23] H. Statz and C. L. Tang, "Phase locking of modes in lasers," *J. Appl. Phys.* **36**, 3923 (1965).
- [24] M. A. Duguay, S. L. Shapiro, and P. M. Rentzepis, "Spontaneous appearance of picosecond pulses in ruby and Nd:glass lasers," *Phys. Rev. Lett.* **19**, 1014 (1967).
- [25] O. L. Gaddy and E. M. Schaefer, "Self locking of modes in the argon ion laser," *Appl. Phys. Lett.* **9**, 281 (1966).
- [26] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.* **16**, 43 (1991).
- [27] L. F. Mollenauer and R. H. Stolen, "The soliton laser," *Opt. Lett.* **9**, 13 (1984).
- [28] J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fujimoto, and P. A. Schulz, "Femtosecond passively mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser with a nonlinear external cavity," *Opt. Lett.* **14**, 1125 (1989).
- [29] B. Liu and N. C. Gallagher, "Convergence of a spectrum shaping algorithm," *Appl. Opt.* **13**, 2470 (1974).
- [30] L. Cohen, "Time-frequency distributions-a review," *Proc. IEEE*, **77**, 941 (1989).
- [31] J.C. Diels, J. J. Fontaine, I. C. McMichael, and F. Simoni, "Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy," *Appl. Opt.* **24**, 1270–1282 (1985).
- [32] J. Liu, Z. Shao, H. Zhang, Z. Meng, L. Zhu, and M. Jiang, "Diode-laser-array end pumped 14.3W CW Nd:GdVO<sub>4</sub> solid-state laser at 1.06  $\mu\text{m}$ ," *Appl. Phys. B* **69**, 241-243 (1999).
- [33] T. Ogawa, Y. Urata, S. Wada, K. Onodera, H. Machida, H. Sagae, M. Higuchi, and K. Kodaira, "Efficient laser performance of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystals grown by the floating zone method," *Opt. Lett.* **28**, 2333-2335 (2003)
- [34] J. Liu, Z. Wang, X. Meng, Z. Shao, B. Ozygus, A. Ding, and H. Webber, "Improvement of passive Q-switching performance reached with a new Nd-doped mixed vanadate crystal Nd:Gd<sub>0.64</sub>Y<sub>0.36</sub>VO<sub>4</sub>" *Opt. Lett.* **28**, 2330-2332 (2003)

- [35] Y. F. Chen, M. L. Ku, L. Y. Tsai, and Y. C. Chen, "Diode-pumped passively Q-switched picosecond Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser," *Opt. Lett.* **29**, 2279-2281 (2004).
- [36] S. P. Ng, D. Y. Tang, A. Q. Liu, L. J. Qin, X. L. Meng, "Short pulse passively Q-switched Nd:GdYVO<sub>4</sub> laser using a GaAs mirror," *Opt. Commun.* **259**, 256-260 (2006).
- [37] J. L. He, Y. X. Fan, J. Du, Y. G. Wang, S. Liu, H. T. Wang, L. H. Zhang, and Y. Hang, "4-ps passively mode-locked Nd:Gd<sub>0.5</sub>Y<sub>0.5</sub>VO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable-absorber mirror," *Opt. Lett.* **29**, 2803-2805 (2004).
- [38] O. Musset and J. P. Boquillon, *Appl. Phys. B* **64**, 503 (1997).
- [39] H. J. Zhang, J. H. Liu, J. Y. Wang, X. G. Xu, and M. H. Jiang, *Appl. Opt.* **44**, 7439 (2005)
- [40] H.T. Huang, J. L. He, C. H. Zuo, H. J. Zhang, J. Y. Wang, and H. T. Wang, *Appl. Phys. B* **89**, 319(2007).
- [41] Y. F. Chen, L. J. Lee, T. M. Huang, and C. L. Wang, *Opt. Commun.* **163**, 198(1999)
- [42] R. Zhou, S. C. Ruan, C. L. Du, and J. Q. Yao, *Opt. Commun.* **282**, 605 (2009)
- [43] Chr. P. Wyss, W. Lüthy, H. P. Webber, V.L. Vlasov, Yu. D. Zavartsev, P. A. Studenokin, A. I. Zagumennyi, *Appl. Phys. B* **68**, 659(1999).
- [44] H. Zhang, X. Meng, L. Zhu, J. Liu, C. Wang, Z. Shao, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 1231(1999).
- [45] C. Wang, Y. T. Chow, L. Reekie, W. A. Gambling, H. J. Zhang, L. Zhu, X. L. Meng, *Appl. Phys. B* **70**, 769 (2000).
- [46] Z. Haujijin, X. Meng, J. Liu, C. Wang, Z. Shao, J. Wang, Y. Liu, *J. Cryst. Growth* **216**, 367 (2000).
- [47] L. Qin, X. Meng, C. Du, Z. Shao, L. Zhu, B. Xu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 6018 (2002).
- [48] P. A. Studenikin, A. I. Zagumennyi, Yu. D. Zavartsev, P. A. Popov, I. A. Shcherbakov, *Quantum Electron.* **25**, 1162 (1995).