

國 立 交 通 大 學

理學院碩士在職專班應用科技學程

碩士論文

高功率光激發式半導體雷射之自鎖模研究

Self-Mode-Locking Investigation of High-Power

Optically Pumped Semiconductor Laser

研究生：李易純

指導教授：陳永富教授

中華民國 九十九 年 七 月

# 高功率光激發式半導體雷射之自鎖模研究

學生：李易純

指導教授：陳永富教授

國立交通大學理學院碩士在職專班應用科技學程



## 摘要

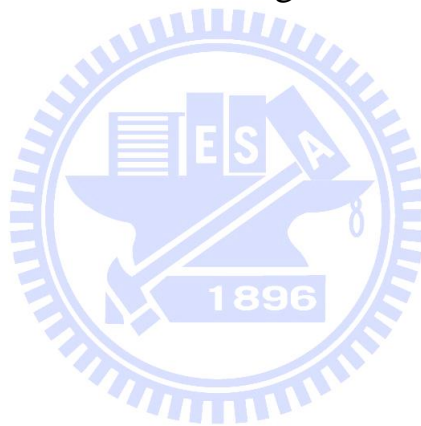
我們利用高功率雷射二極體當作雷射激發光源，再利用鋁鎵銻砷半導體材料當作增益介質，產生波長為 1060nm 的雷射，並且藉由改變輸出鏡的反射率及曲率來優化雷射的輸出功率。除此之外，在實驗的過程中發現了光激發式半導體雷射會有自發性鎖模的現象，其輸出模態為非單一基態，而是有高階橫向模態的耦合，因此其輸出脈衝會有拍頻的產生，而且會隨著位置的不同拍頻的程度也有所不同，在本文中會詳細的探討。

# Self-Mode-Locking Investigation of High-Power Optically Pumped Semiconductor Laser

Student : Yi-Chun Lee

Advisor : Yung-Fu Chen

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



## Abstract

The research used high-power laser diode to be a pumping source and monolithic III-V semiconductor chip contains GaAs layers as gain medium to absorb the IR light alternated with InGaAs quantum wells. In the progress, different values of reflection of output coupler and radius are used as parameters to optimize the laser output power. During the research, self-mode-locking is found as a phenomenon in the operating laser system. However, the laser pattern in time domain was observed not a single mode, but coupled with several high order modes and induce to beating in the laser. The details are discussed in the thesis.

## 誌 謝

在職專班兩年的碩士生涯是很快樂的，回想起每天下班之後要到學校上課的日子，從進學校的那一刻起，肩頭上的重擔與壓力似乎就像是瞬間釋放一樣，讓忙碌的心情得到了些許喘息的機會；這種感覺似乎在讀大學的時候是從來沒有過的，直到經過了職場的洗禮，才開始懂得去珍惜讀書時美好的時光。在職專班的學生與一般生在程度上是有差距的，我們已經離開學校太久，所學的早就還給了老師，因此在學習上，我們必須比別人再用功一點才可以趕上進度，但是這並不會影響到學習的情緒，因為與在工作上所承受的壓力比較起來，這些又像是微不足道了。

感謝實驗室的同學們熱心的幫助，讓我們在學校裡感受到在公司感受不到的溫暖，也謝謝陳永富老師用心的、耐心的、絞盡腦汁的想出一些讓我們聽得懂、容易學、記得住的教導方式，也不時的會關心我們工作的情形及身體的狀況，這所有的一切，都讓沾有濃厚社會氣息的我們感受到讀書的美好與窩心的感動。特別感謝梁興弛、黃依萍、黃育仁、張漢龍、蘇老大，你們給我的鼓勵與幫助，讓我感受到大學時期從來沒有發現的，讀書的樂趣與學習的快樂，謝謝你們!!

# 目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
誌謝	III
目錄	IV
圖表目錄	V
第一章 簡介	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 本論文組織	2
第二章 光激發式半導體雷射系統	3
2.1 光激發式半導體雷射系統導論	3
2.2 實驗架構	11
2.3 實驗結果與討論	14
第三章 自發式鎖模雷射	21
3.1 自發式鎖模雷射導論	21
3.2 實驗架構	24
3.3 實驗結果與討論	25
第四章 自發式鎖模雷射的理論與分析	40
4.1 鎖模雷射基本理論	40
4.2 高階橫向模態鎖模雷射理論	43
4.3 理論分析與實驗對照	44
第五章 結論與未來展望	52
5.1 結論	52
5.2 未來展望	53
參考文獻	54

## 圖表目錄

圖 2-1 光激發式半導體雷射的基本結構	4
圖 2-2 光激發式半導體雷射架構圖及半導體雷射晶片的結構圖	5
圖 2-3 雷射產生的機制	6
圖 2-4 位能井的排列方式	7
圖 2-5 不同的基材及混合濃度產生不同雷射波長的對應圖表	8
圖 2-6 Coherent 光激發式半導體雷射系統示意圖	12
圖 2-7 光激發式半導體雷射系統實驗架構示意圖	12
圖 2-8 曲率為 50mm 平凹輸出鏡的雷射 IP 圖	14
圖 2-9 曲率為 250mm 平凹輸出鏡的雷射 IP 圖	15
圖 2-10 曲率為 2000mm 平凹輸出鏡的雷射 IP 圖	16
圖 2-11 曲率為 50mm 的平凹輸出鏡在不同腔長下的雷射 IP 圖	17
圖 2-12 曲率為 250mm 的平凹輸出鏡在不同腔長下的雷射 IP 圖	18
圖 2-13 曲率為 2000mm 的平凹輸出鏡在不同腔長下的雷射 IP 圖	19
圖 3-1 系統相位分布與脈衝強度關係圖	22
圖 3-2 光激發式半導體雷射系統實驗架構示意圖 3	24
圖 3-3 雷射在時域中產生的調制現象 1	26
圖 3-4 雷射在時域中產生的調制現象 2	26
圖 3-5 雷射在時域中產生的自鎖模現象 1	27
圖 3-6 雷射在時域中產生的自鎖模現象 2	27
圖 3-7(a) 腔長為 25cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 比較圖	29
圖 3-7(b) 腔長為 25cm 時，能量與自鎖模最佳化的光譜分佈比較圖	29
圖 3-7(c) 腔長為 25cm 時，自鎖模最佳化在時域上的分佈	29

圖 3-8(a) 腔長為 18.75cm 時, 能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 比較圖	30
圖 3-8(b) 腔長為 18.75cm 時, 能量與自鎖模最佳化的光譜分佈比較圖	30
圖 3-8(c) 腔長為 18.75cm 時, 自鎖模最佳化在時域上的分佈	30
圖 3-9(a) 腔長為 12.5cm 時, 能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 比較圖	31
圖 3-9(b) 腔長為 12.5cm 時, 能量與自鎖模最佳化的光譜分佈比較圖	31
圖 3-9(c) 腔長為 12.5cm 時, 自鎖模最佳化在時域上的分佈	31
圖 3-10(a) 腔長為 8.6cm 時, 能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 比較圖	32
圖 3-10(b) 腔長為 8.6cm 時, 能量與自鎖模最佳化的光譜分佈比較圖	32
圖 3-10(c) 腔長為 8.6cm 時, 自鎖模最佳化在時域上的分佈	32
圖 3-11 能量最佳化時的光斑	34
圖 3-12 鎖模狀態最佳化時的光斑	34
圖 3-13 雷射光斑掃描位置在時域上的分佈情形	36
圖 3-14 功率頻譜分析儀量測其頻率的分佈	37
圖 3-15 模擬縱向模態與橫向模態在空間上耦合的情形	38
圖 4-1 方程式理論計算鎖模雷射的結果	40
圖 4-2 調控兩個電場的比例來表示兩個模態耦合的情況	42
圖 4-3 方程式所模擬的雷射光斑	45
圖 4-4 實際拍攝的雷射光斑	45
圖 4-5 實驗中將雷射光斑作十字型的掃描	46
圖 4-6(a) 雷射光斑掃描點 1 實驗與模擬在時域上的圖形對照	47
圖 4-6(b) 雷射光斑掃描點 2 實驗與模擬在時域上的圖形對照	47
圖 4-6(c) 雷射光斑掃描點 3 實驗與模擬在時域上的圖形對照	47
圖 4-6(d) 雷射光斑掃描點 4 實驗與模擬在時域上的圖形對照	48
圖 4-6(e) 雷射光斑掃描點 5 實驗與模擬在時域上的圖形對照	48
圖 4-6(f) 雷射光斑掃描點 6 實驗與模擬在時域上的圖形對照	48

圖 4-6(g) 雷射光斑掃描點 7 實驗與模擬在時域上的圖形對照.....48

圖 4-6(h) 雷射光斑掃描點 8 實驗與模擬在時域上的圖形對照.....49

圖 4-6(i) 雷射光斑掃描點 9 實驗與模擬在時域上的圖形對照.....49

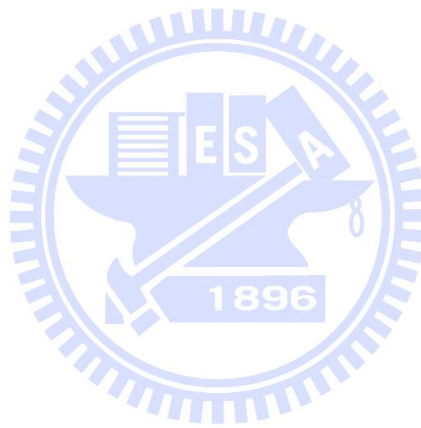
圖 4-6(j) 雷射光斑掃描點 10 實驗與模擬在時域上的圖形對照.....49

圖 4-6(k) 雷射光斑掃描點 11 實驗與模擬在時域上的圖形對照.....49

圖 4-7 雷射光斑掃描位置在時域上模擬的分佈情形.....51

表 2-1 不同三五族的化合物材料設計的光激發半導體雷射.....10

表 2-2 為 Coherent 的光激發式半導體雷射模組之詳細規格.....13





# 第一章 簡介

## 1.1. 研究動機與目的

光激發式半導體雷射技術是利用高功率雷射二極體當作雷射激發光源，再利用鋁鎵銻砷半導體材料當作增益介質來產生雷射，這個技術自發展以來已經在許多的應用領域上嶄露頭角，它並且改變了在固態雷射技術上波長被限制的缺點。光激發式半導體雷射技術中藉由鋁鎵銻砷半導體增益介質的控制與設計，產生從 920nm 到 1154nm 的近紅外光波長，進而藉由二倍頻或三倍頻的技術產生 355nm 到 577nm 的可見光波長。而這些特別的波長，在應用上不管是醫療、生命科學或工業的領域裡，目前都已經廣泛的被應用。

本論文因此選擇了光激發式半導體雷射做為研究，實驗的架構主要建立在 Coherent 的光激發式半導體綠光雷射模組，會選擇 Coherent 光激發式半導體雷射模組的原因，是因為此模組是目前市面上可以產生功率最高的半導體綠光雷射，我們利用模組中高功率的二極體雷射做為雷射激發源及其中的半導體元件當作增益介質，希望能找出此半導體雷射的參數，並將其優化，進而產生更高的輸出能量，然而在實驗的過程中，也意外的發現了在半導體雷射上有自鎖模的現象，因此我們也針對此自鎖模的現象做了深入的探討。

在早期的研究中，自鎖模的現象可以在 He-Ne 雷射、紅寶石雷射及氫離子雷射中被發現；近期的自鎖模雷射研究裡，發現了光纖雷射系統也有此現象的產生；在交通大學電子物理研究所的

固態雷射實驗室也成功的以 Nd:YVO<sub>4</sub> 材料做出連續波自鎖模雷射；然而在光激發式半導體雷射系統的研究中，有關於自鎖模的研究較不完整，因此我們針對此現象做了深入的分析及研究，並且希望能找出其形成此現象的條件、參數及機制。

## 1.2. 本論文組織

本文自第二章光激發式半導體雷射開始，除了介紹其原理、架構，並對於其雷射優化的參數有深入的研究，實驗中改變了輸出鏡的曲率半徑、雷射腔的腔長，同時分別做交叉的比對，最後統計其結果並找出最適合的參數；第三章中針對自鎖模的現象及理論做完整的分析與討論，除了將自鎖模的狀態最佳化之外，也在空間上分別觀察其高階模態耦合的情形；第四章主要分為三部分，第一部分先介紹了自鎖模雷射的理論分析級方程式架構，第二部分則加入了高階模態的耦合，並將方程式加入時間與空間的函數，最後一部分則是分別對於第三章實驗的結果與現象做研究，並且加入理論分析做為印證。最後在第五章裡檢討目前實驗的結果並將所得到的結論做個統整，同時探討本實驗未來可行之研究方向。

## 第二章 光激發式半導體雷射系統

### 2.1 光激發式半導體雷射系統導論

M. Kuznetsov, F.Hakimi 和 A. Mooradian 在 1997 年發展出了光激發式垂直外共振腔面射型雷射 (optically pumped vertical-external-cavity surface emitting laser) [1-2]，將高功率半導體雷射技術帶向了一個新的層面。這種半導體雷射技術改善了原本半導體雷射散熱不良，能量損耗過高的缺點，也同時融合了在固態雷射系統裡才有的高能量，雷射發散角小的優點，一般而言，要達到這種雷射光的光束品質，是固態雷射的增益介質才能擁有的特性。然而，光激發式半導體雷射同時兼具了半導體雷射中波長可因增益介質的設計不同而改變的優勢，因此不管是在工業上、商業上或是學術應用的領域上有了廣泛的應用。

半導體增益介質之於固態雷射的增益介質的不同是，半導體所形成的增益介質是由兩面散式布拉格反射鏡 (Distributed Bragg Reflection) 平行於一個晶元反應區的表面，此反應區是由一到數個量子井所構成，使雷射光帶存在於其中。一個平面的散式布拉格反射鏡是由幾層不同高低折射率的透鏡所組成，每層透鏡的厚度設計為四分之一的雷射波長，並且在每層都鍍上反射率超過 99% 的反射膜，其目的是為了平衡在垂直外共振腔面射型雷射中增益區域的短軸長，因此高反射率的透鏡是必要的。在一般的垂直外共振腔面射型雷射中，通常會在較高和較低的兩個透鏡分別鍍上了 p 型材料和 n 型材料，形成一個接面二極體，而在較為複雜的結構中，p 型和 n 型區域可能會埋在透鏡中，使較複雜的半導體在反應區上加工做電路的連接，並除去

在散式布拉格反射鏡結構中電子能量的耗損。在散熱的系統的設計上，散式布拉格反射鏡直接貼附在散熱座上以達到良好的散熱系統，並且有效的減少了因為能量聚集產生熱而衍生的熱透鏡效應，達到能量增強的效果[3-5]。

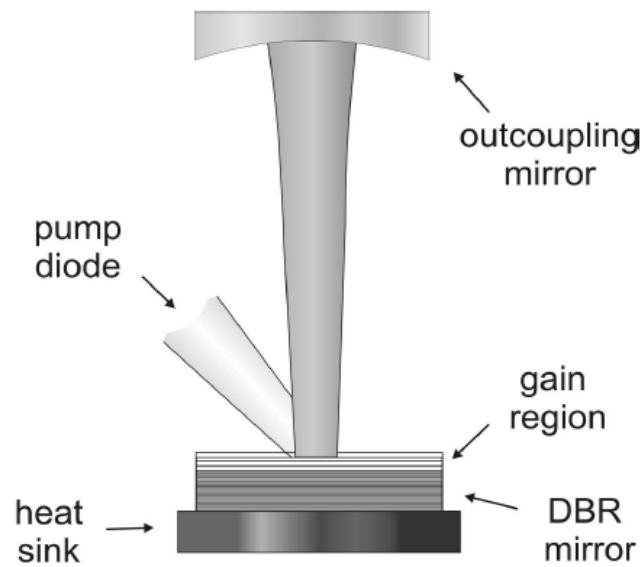


圖 2-1 光激發式半導體雷射的基本結構。

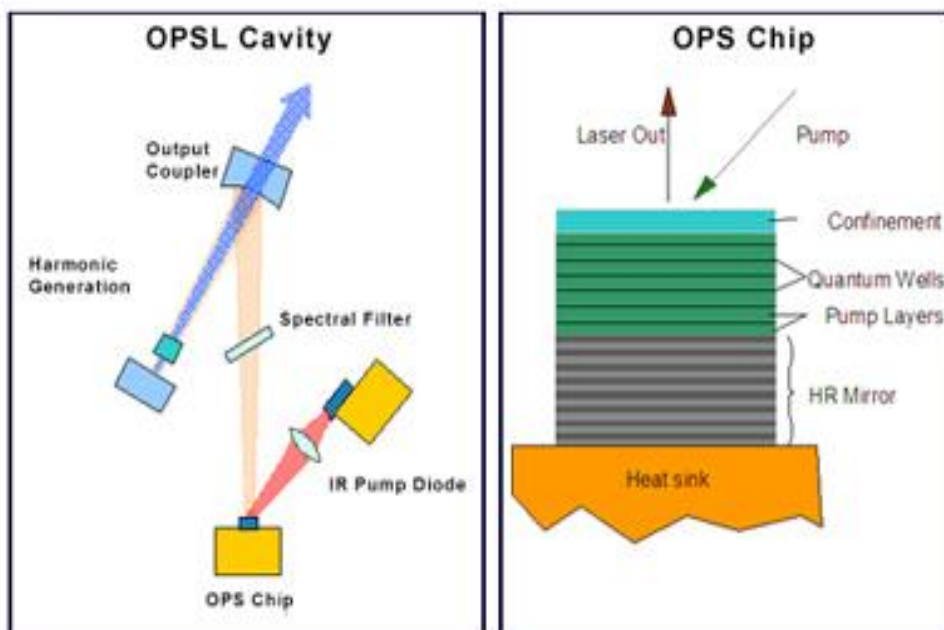


圖 2-2 光激發式半導體雷射架構圖及半導體雷射晶片的結構圖。

本論文使用的垂直面射型雷射增益層的結構是由數個量子井以週期性的方式排列而成，並且架構在砷化鎵的基材(GaAs-Base)上，在最外部加上一層保護層(capping layer)防止氧化。此系統以高功率的二極體雷射當激發源，透過微透鏡聚焦至量子井材料上，使得位於量子能障(barrier)中的電子電動對吸收能量躍遷至激發態，大量的激發態電子電動對遷移至量子井過程中，形成了粒子反轉(population Inversion)的現象，進而以產生光子的形式釋放能量，達到增益介質的效果，這種產生光子的形式稱為光激發螢光(photoluminescence)，此時螢光利用散式布拉格反射鏡搭配輸出鏡形成雷射共振腔，再利用共振腔儲存累積能量，產生雷射。

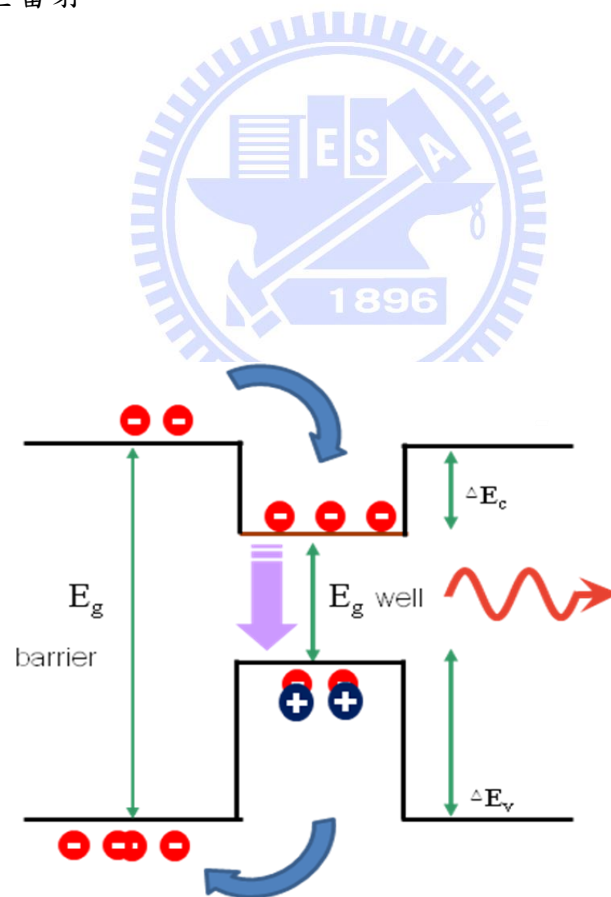


圖 2-3 雷射產生的機制。

以半導體為增益介質通常在結構上都設計成量子井的形式，而量子井與量子井之間的排列週期為雷射波長的二分之一，此排列的目的是為了讓各量子井位於雷射週期的波峰上，讓電子電動對更容易躍遷，並且使產生的螢光與雷射模態之間有更強烈的干涉與共振，同時也可以讓輸出的波長更穩定的。圖 2-4 所表示的是位能井是以週期性的排列方式而形成，而在位能井的設計上，排列週期通常為雷射波長的二分之一 [4-7]。

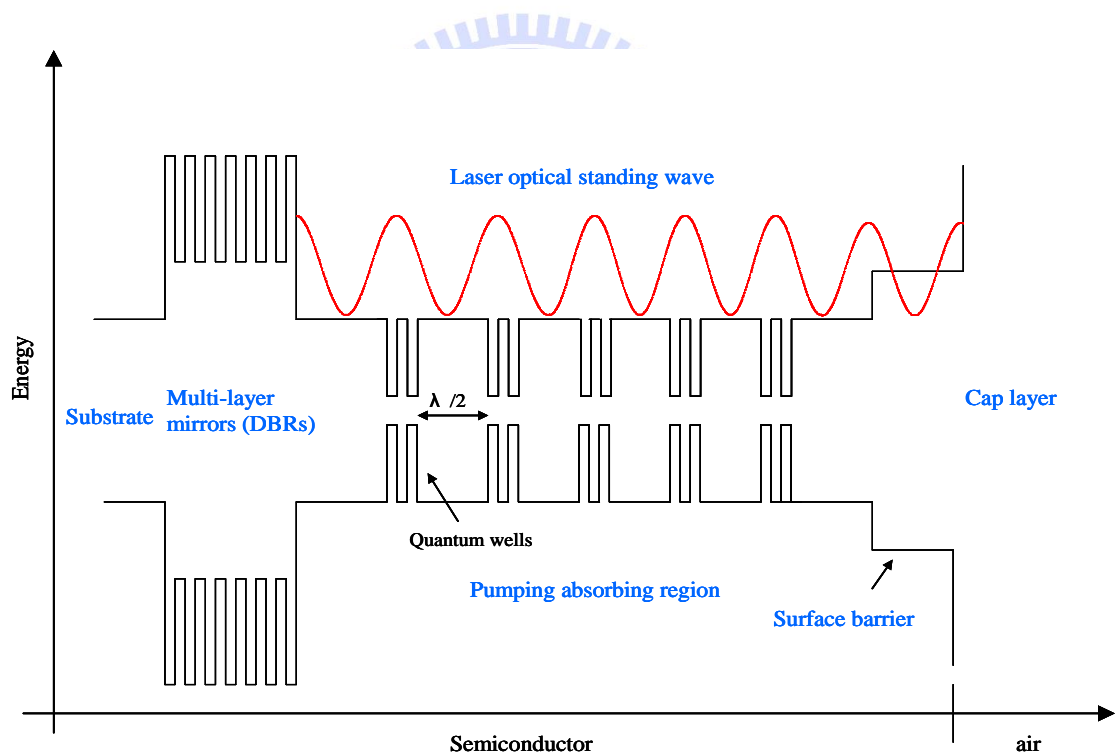


圖 2-4 位能井以週期性的方式排列，排列週期通常為雷射波長的二分之一。

光激發式半導體雷射最大的優勢在於此系統可經由不同的半導體增益介質的設計，而產生不同的波長，其中關鍵的技術有二，一是基材的選擇，另一個則是量子井的設計。在基材的選擇上，目前具有比較成熟技術的基材有兩種，一種是以砷化鎵為基底(GaAs Based)的基材，另一種則是以磷化銦為基底(InP Based)的基材。通常砷化鎵為基底(GaAs Based)的基材可以藉由混合不同材料及調配不同濃度的方式，產生從 800nm 到  $1.5 \mu\text{m}$  的雷射波長，而以砷化鎵為基底(GaAs Based)的基材則是產生大於  $1.3 \mu\text{m}$  的雷射波長。圖 2-5 所示為在不同的基材下混合不同材料及調配不同濃度可以產生不同雷射波長的對應圖表[8-17]。

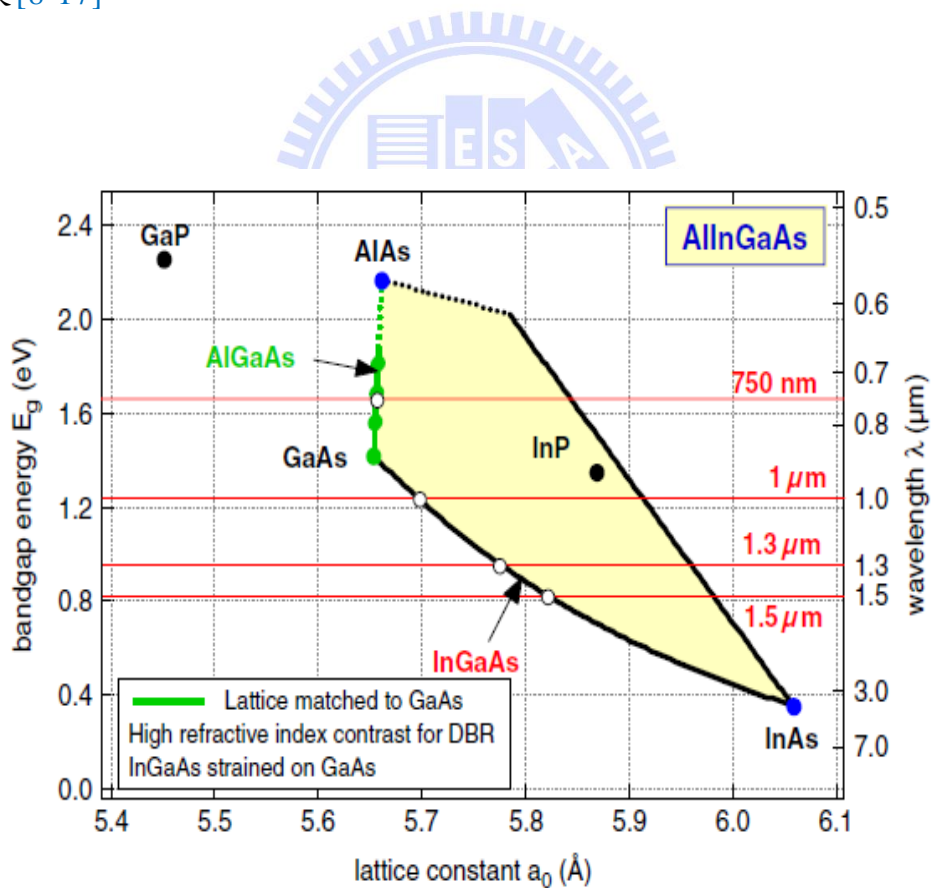
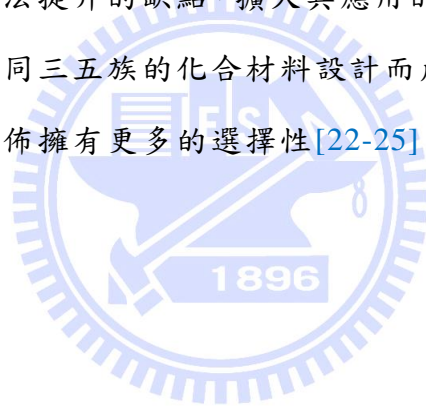


圖 2-5 不同的基材下混合不同材料及濃度而產生不同雷射波長的對應圖表。



而在量子井的設計上面，其原理在改變量子井的寬度，及經由製程上的控制進而改變量子井中的能階態，而達到可以微調雷射的波長，但是這種方式只能微調雷射的波長，真正雷射波長區段的選擇還是取決於基材及材料混合的濃度[18-21]。

由這兩種關鍵技術我們可以得知，以半導體為增益介質的雷射系統其雷射波長的範圍可以從 870nm 到 1.5  $\mu\text{m}$ ，如果再搭配上雷射倍頻技術，便可以使產生波長從 355nm 到 577nm 的可見光雷射波段，相較於固態雷射增益介質的特定能階，如此一來，光激發式的半導體雷射系統在應用上將可以擁有更多選擇，並且突破在固態雷射技術上某些特定波長能量無法提升的缺點，擴大其應用的範圍及領域。表 2-1 所示是近年來利用不同三五族的化合物材料設計而成產生的光激發半導體雷射，其波長的分佈擁有更多的選擇性[22-25]。



Gain	$\lambda_{\text{lasing}}$	$\lambda_{\text{pumping}}$	Max Power	Reference
<b>GaN-based</b>				
InGaN/GaN	391nm	335nm		APL 2003
<b>GaAs-based</b>				
AlGaInP	668-678nm	532nm	390mW	Opt Express 2005
AlGaAs	830-860nm	660nm	523mW	IEEE PTL 2003
AlGaAs	850nm	808nm	135mW	APL 2004
InGaAs	1000nm	808nm	8W (CW) at RT	APL 2003
InGaAs	1060nm	808nm	10W(CW) at RT	APL 2006
GaInNAs	1320nm	810nm	0.612W at 5°C	Electronic Lett 2004
<b>InP-based</b>				
InGaAsP	1550nm	980nm	45mW	Opt Comm 2004
InGaAsP	1538-1545nm	1250nm	780mW	IEEE PTL 2004
<b>GaSb-based</b>				
AlGaAsSb	2.3 $\mu$ m	830nm	8.5mW	Cryst Growth 2004
AlGaAsSb	2.33 $\mu$ m	1064nm	0.6W at -18°C	IEEE PTL 2004

表 2-1 利用不同三五族的化合物材料設計而成產生的光激發半導體雷射。

## 2.2 實驗架構

本實驗的系統是選取 Coherent 公司所生產的光激發式半導體雷射模組做為研究，其型號為 Genesis 532-5000S，波長為 532nm，詳細規格如表 2-2。此模組為市面上輸出功率最高的綠光光激發式半導體雷射模組，其輸出功率可以到達 5.0W。一般而言，在光激發式半導體雷射系統的設計上，目前所需要克服的瓶頸是半導體增益介質的散熱不良，也由於這個原因，光激發式半導體雷射目前在市面上的功率都普遍不高，因此我們認為在 Coherent 光激發式半導體雷射系統的架構中，或是在半導體增益介質的設計上，一定有其特殊的地方；因此本實驗想藉 Coherent 模組中的高功率二極體雷射及半導體增益介質為基礎，研究其雷射形成的參數與特性並加以優化。

Coherent 的光激發式半導體雷射模組主要分為兩個部分，一是二極體雷射激發源加上半導體增益介質，另一部分則是倍頻模組，在實驗的架構上，我們將 Coherent 的光激發式半導體雷射模組上倍頻模組的部分拆卸下來，只利用此模組的二極體雷射激發源加上半導體增益介質做為實驗架構的一部份，並在光學桌上架設平凹鏡做為雷射的輸出鏡；實驗的過程中，我們藉由更換不同曲率的輸出鏡並搭配不同的雷射腔長交叉比對，進而找出最佳的輸出功率並加以統計分析。圖 2-6 為 Coherent 光激發式半導體雷射系統示意圖，2-7 為實驗架構的示意圖。

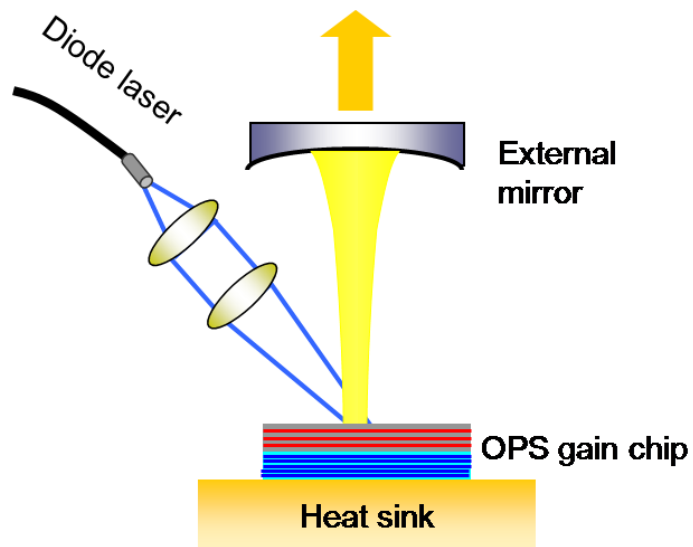


圖 2-6 Coherent 光激發式半導體雷射系統示意圖。

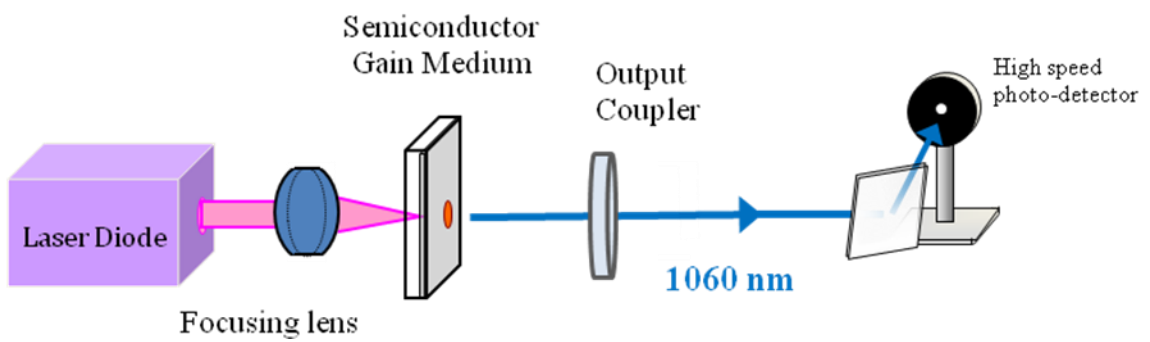


圖 2-7 光激發式半導體雷射系統實驗架構的示意圖。

<b>Optical Specifications1 Genesis 532-5000 S</b>	
Wavelength (nm)	532 ±2
FWHM Linewidth (GHz)	<30
Pulse Format	CW
Spectral Purity (%)	>99
Output Power (W)	5
Spatial Mode	TEM00
Beam Quality	<1.1
Beam Circularity	1.0 ±0.1
BeamWaist Diameter (mm)(FW, 1/e <sup>2</sup> )	2.25 ±10%
Beam Divergence1 (mrad)(FW, 1/e <sup>2</sup> )	<0.5
BeamWaist Location (m)	±0.5
Beam Pointing Stability <sup>5</sup> (μrad/°XC)	<2
Horizontal Beam Position Tolerance <sup>6</sup> (mm)	±<1.0
Vertical Beam Position Tolerance <sup>6</sup> (mm)	±<1.0

表 2-2 Coherent 公司所生產的光激發式半導體雷射模組之詳細規格。

## 2.3 實驗結果與討論

實驗的過程中分別使用了曲率為 2000mm, 250mm, 50mm 反射率為 97% 的 1060nm 輸出鏡，並且搭配不同的腔長，將雷射輸出功率調至最高，並記錄其電流與能量的曲線分布。藉由輸出鏡曲率的改變可以發現在雷射功率的輸出上也有所不同，實驗中分別更換曲率為 2000mm、250mm、50mm 的輸出鏡，發現在曲率為 250mm 輸出鏡的架構底下，可以得到最佳的輸出功率 8.0W，圖 2-8 至 2-10 為搭配不同曲率的輸出鏡所得到最佳的功率輸出。

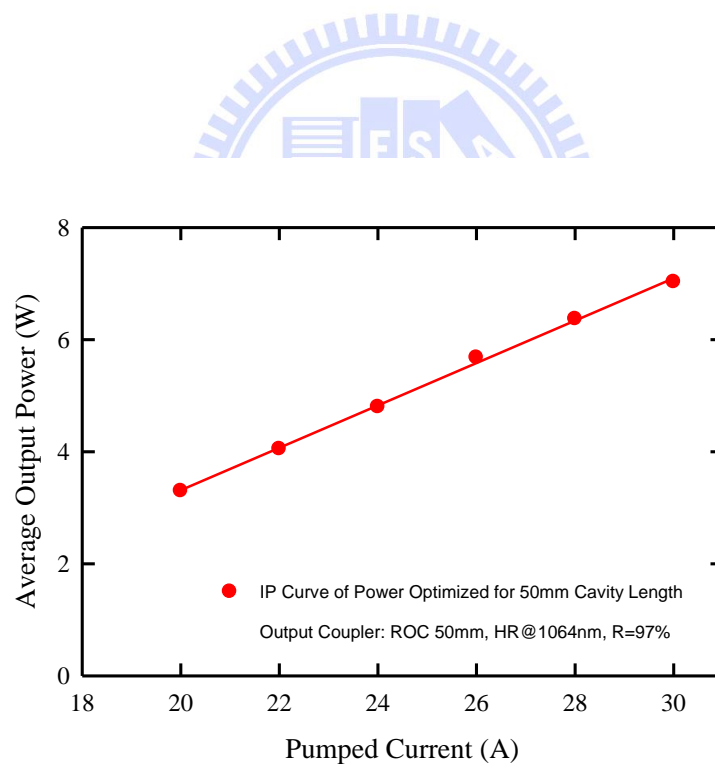


圖 2-8 使用曲率為 50mm 的平凹鏡當輸出鏡，共振腔長設置為 50mm，所得到的 1060nm 雷射輸出功率為 7.03W。

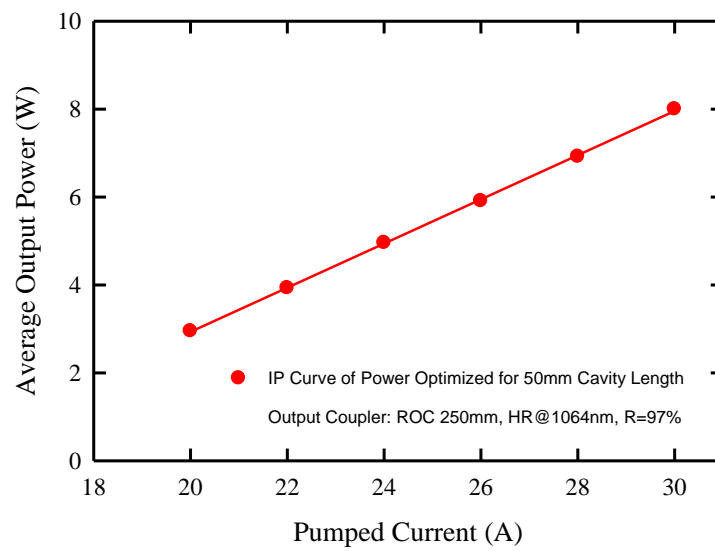


圖 2-9 使用曲率為 250mm 的平凹鏡當輸出鏡，共振腔長設置為 50mm，所得到的 1060nm 雷射輸出功率為 8.0W。

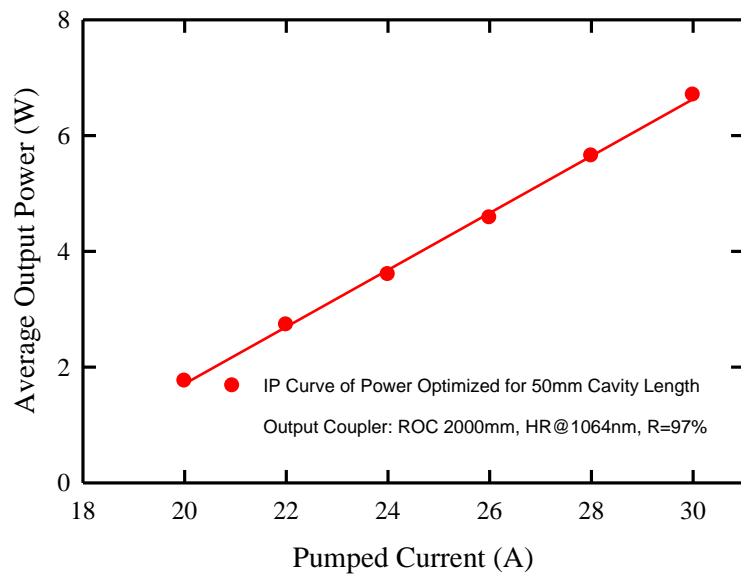


圖 2-10 使用曲率為 2000mm 的平凹鏡當輸出鏡，共振腔長設置為 50mm，所得到的 1060nm 雷射輸出功率為 6.7W。



接下來再固定以 50mm、250mm、2000mm 為曲率的平凹鏡當輸出鏡，只改變雷射腔的腔長，並將各個腔長的輸出功率做統計比較，實驗結果發現使用曲率 250mm 的平凹鏡，並且腔長設置為 50mm 時，所得到的輸出功率為最高 8.0W。圖 2-11 至 2-13 為改變不同雷射腔長所得到之最佳功率。

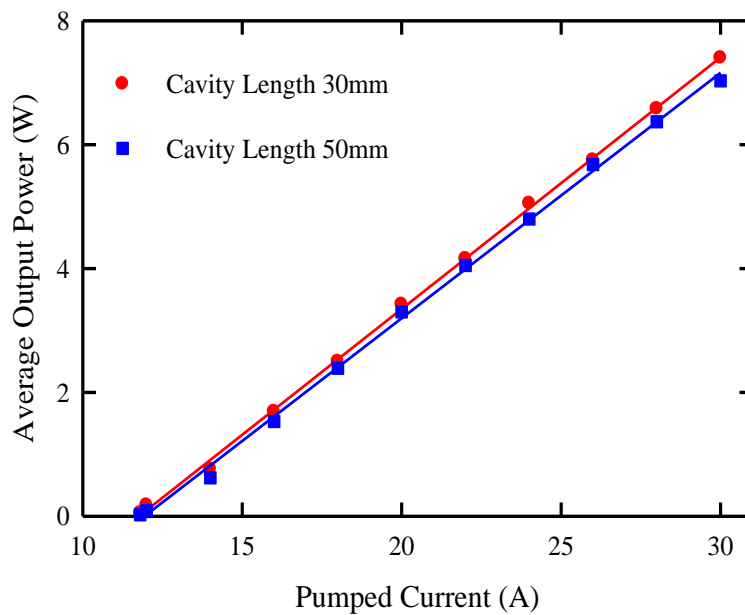


圖 2-11 使用曲率為 50mm 的平凹鏡當輸出鏡，共振腔長設置為 30mm 及 50mm，所得到的 1060nm 雷射輸出功率，分別為 7.4W 與 7.03W。

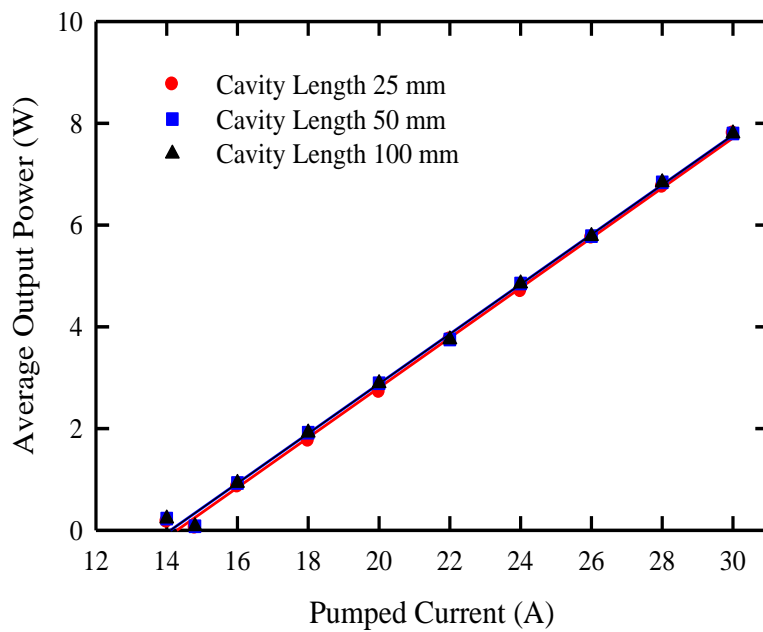


圖 2-12 使用曲率為 250mm 的平凹鏡當輸出鏡，共振腔長設置為 25mm、50mm 及 100mm，所得到的 1060nm 雷射輸出功率，分別為 7.8W、8.0W 和 7.8W。

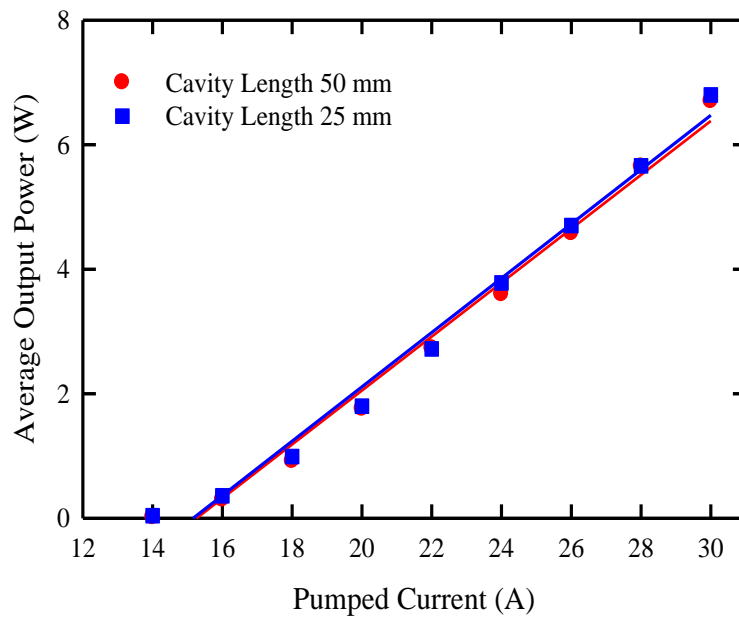


圖 2-13 使用曲率為 2000mm 的平凹鏡當輸出鏡，共振腔長設置為 25mm 及 50mm，所得到的 1060nm 雷射輸出功率，分別為 6.8W 和 6.7W。

在實驗當中，我們發現如果使用曲率半徑為 50mm 的輸出鏡，會容易產生高階的模態，造成在雷射的共振當中，其模態間的交互作用會使功率降低；而如果使用曲率半徑為 2000mm 的輸出鏡則因為曲率半徑過大，不易產生共振，因此要產生雷射相當不容易，並且此系統不容易調整，導致雷射的輸出功率也十分不穩定，因此曲率半徑為 250mm 的輸出鏡將會是較好的選擇。而本實驗的另一個重點，雷射腔長也會影響其雷射輸出的功率，如果雷射腔長架設的越長，則越容易有熱效應的產生，以致二極體雷射在高功率輸出的時候，1060nm 雷射的輸出能量無法呈現線性，輸出功率會趨近於平緩的狀態，無法再有效的爬升。

經由統計這些實驗結果並分析之後，我們發現此實驗架構使用曲率為 250mm，1060nm 反射率 97% 的輸出鏡可以得到最好的模態匹配 (Mode Matching)，並且搭配雷射腔長的選擇，可以使光激發式半導體雷射系統輸出最高的能量到達 8.0W 的 1060nm 雷射輸出，因此我們也鎖定曲率半徑為 250mm 的輸出鏡做為之後的實驗架構，進行更深入的研究。

## 第三章 自發式鎖模雷射

### 3.1 自發式鎖模雷射導論

自發式鎖模雷射顧名思義就是在整個雷射系統中，在沒有任何非線性的元件只有增益介質的狀況下，而產生自發性鎖模的現象。在早期鎖模技術的研究中，自發性鎖模的現象在氦氖雷射(He-Ne)、紅寶石雷射(Ruby)、摻釹玻璃晶體(Nd:glass)和氬離子(Argon ion)的雷射系統中被發現，但是在 1960 年的那個時期，因為對於鎖模雷射技術的不純熟，自發性鎖模雷射的脈衝現象並沒有在當時被認為可以用來產生穩定的超短脈衝雷射。然而，在近期的研究裡，自發性鎖模雷射脈衝在摻鏡 Q 開關光纖雷射的實驗裡又再一次的被探討；P. Glas et al 在實驗中發現了，自發性鎖膜雷射不只僅僅存在脈衝雷射系統裡，也存在於連續性的雷射系統中，實驗的結果顯示，自發性產生脈衝的現象除了在連續激發的摻釹光纖雷射，也可以在矽化鹽、磷酸鹽、二氧化矽雷射系統裡發現此一現象。儘管如此，自發性鎖膜雷射的機制大部分還是比較容易從脈衝雷射的系統中被發現，因此，對於一個鎖模的脈衝雷射來說，自發性鎖模雷射的機制仍然需要更進一步且深入的研究。

在雷射系統中，如果要產生自發性鎖模的現象，先決條件就是所有的縱模都必須在固定的頻率上，然而，實際的情況卻會因為色散的關係造成頻率的漂移而產生頻率的不等間距，除此之外，系統相位的擾動也會造成影響，經由統計的分析發現，不同的系統相位擾動下，其產生的自發性鎖模脈衝也有所不同，如圖 3-1 所示。

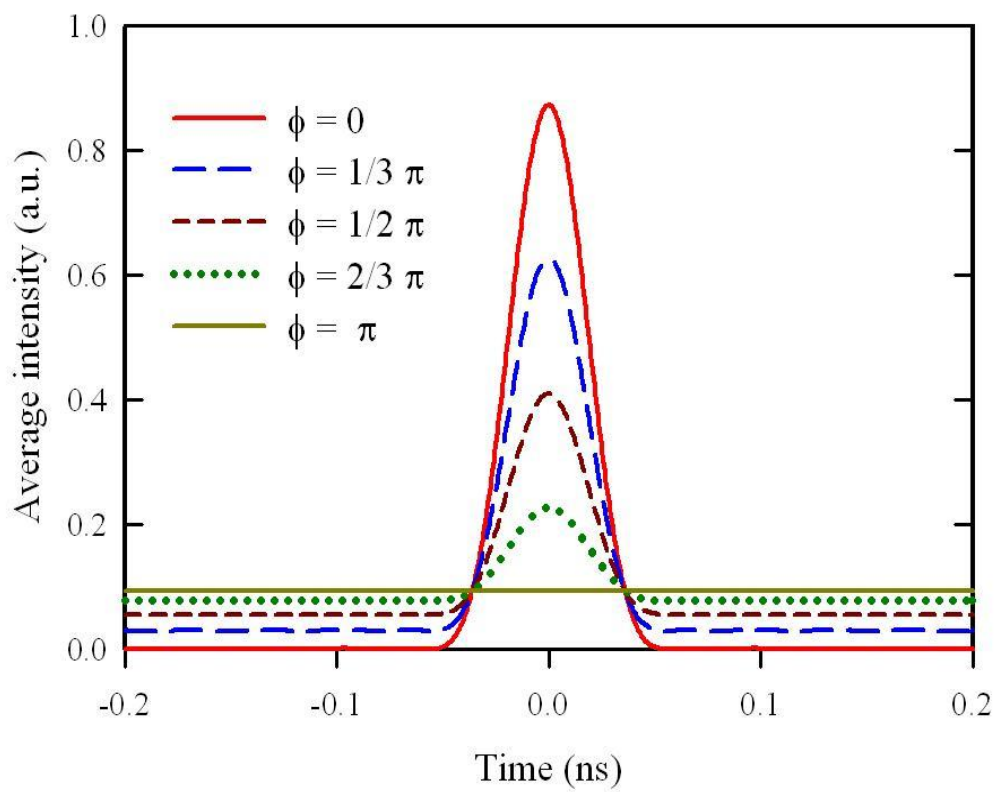
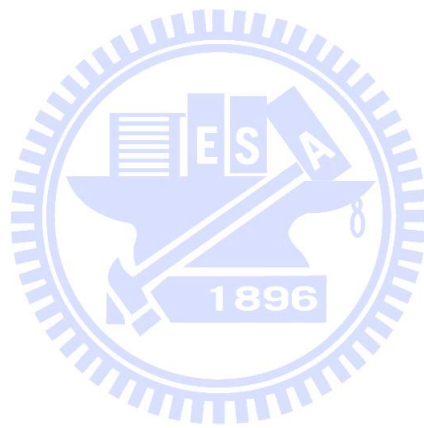


圖 3-1 可以發現當系統相位分布為 $-1/3 \pi$ 到 $+1/3 \pi$ ，產生的自發性脈衝只有些微的直流訊號，當系統相位擾亂的分布從 $-\pi$ 到 $+\pi$ 時，輸出完全為直流訊號而非脈衝。

由圖 3-1 可以發現當系統相位分布不是很大時(如  $-1/3\pi$  到  $+1/3\pi$ )，其產生的自發性脈衝只有些微的直流訊號，但是當系統相位擾亂的分布從  $-\pi$  到  $+\pi$  時，其輸出完全為直流訊號而非脈衝。然而許多的實驗發現，當系統具有很大的三階非線性時，可以改善頻率漂移的現象，讓鄰近的縱模回到等間距的狀態，因此自發性的鎖模雷射是存在於各種的雷射系統中，且第三階非線性效應扮演非常重要的角色，由此推測，在光激發式半導體雷射系統中也會有此現象[29-32]，本文中有詳加探討。



### 3.2 實驗架構

本實驗利用 Coherent 提供的光激發式半導體雷射模組中的高功率二極體雷射做為激發源，銦鎵砷量子井(InGaAs Quantum Well)做為其增益介質，並在光學桌架設針對 1060nm 波長鍍膜反射率為 97%，曲率為 250mm 的平凹鏡當作輸出鏡產生 1060nm 的光激發式半導體雷射系統。如圖 3-2 所示，Coherent 光激發式半導體模組的雷射激發源加上半導體增益介質做為整個系統的一部份，平凹鏡做為雷射的輸出鏡，產生 1060nm 的雷射。

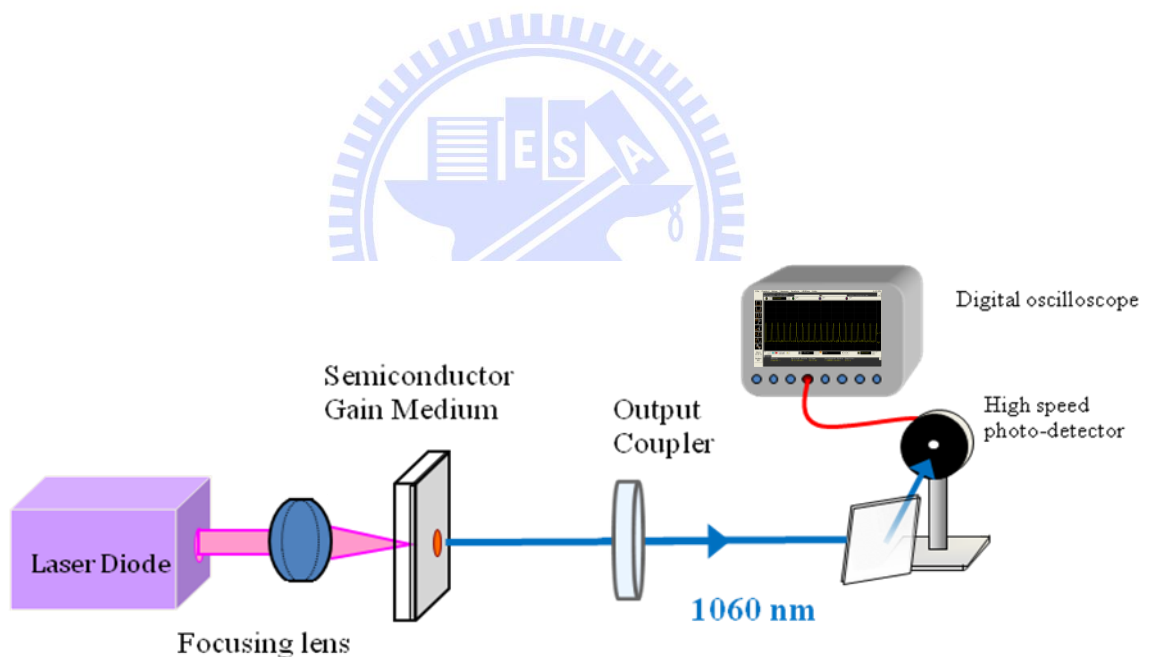


圖 3-2 Coherent 的光激發式半導體模組，利用其二極體雷射激發源加上半導體增益介質做為整個系統的一部份，再架設平凹鏡做為雷射的輸出鏡，產生 1060nm 的雷射。



### 3.3 實驗結果與討論

在實驗的過程中，先將 1060nm 雷射的輸出功率調整至最佳化，並且藉由示波器觀察其雷射在時域上的分佈，此時在時域上發現了雷射並不是穩定的連續波輸出，而是產生了調制現象。進一步分析此調制現象可以發現這種現象具有一定的週期性，因此我們利用

$$T_R = \frac{2L}{C} \quad (3-1)$$

$T_R$  代表雷射在共振腔來回行進一次的時間， $L$  為雷射共振腔的長度， $C$  為光的速度。

由此公式可以計算出雷射在共振腔來回腔長的時間，並且與示波器比對，發現在示波器上所顯示的時間週期符合我們計算出來的結果，因此可以說明這些調制現象是由縱向模態所造成的自發性鎖模現象。如圖 3-3 是表示在 500ns/div 中所觀察到的調制現象，圖 3-4 所表示的則是在 500ps/div 中所觀察到的調制現象。

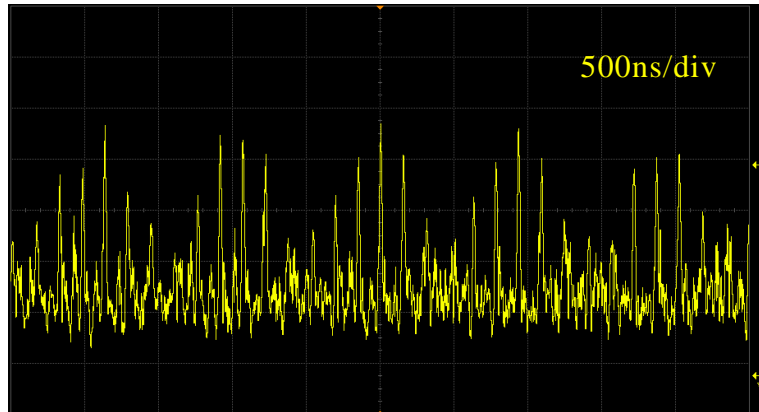


圖 3-3 示波器觀察到在時域中產生調制現象 1。

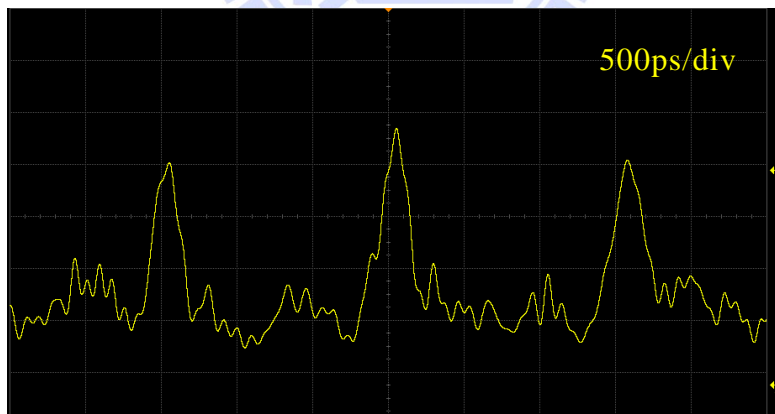


圖 3-4 示波器觀察到在時域中產生調制現象 2。

此時進一步的去調整輸出鏡的位置及傾仰角，並且配合著示波器觀察，發現可以將調制現象消除並且使鎖模狀態達到最佳化，而當鎖模狀態達到最佳化的時候，觀察時域可以發現，各個脈衝的強度幾乎接近一致，並且形成一種有規律的連續自鎖模現象，其脈衝寬度占週期的約十分之一。如圖 3-5、3-6 所示。

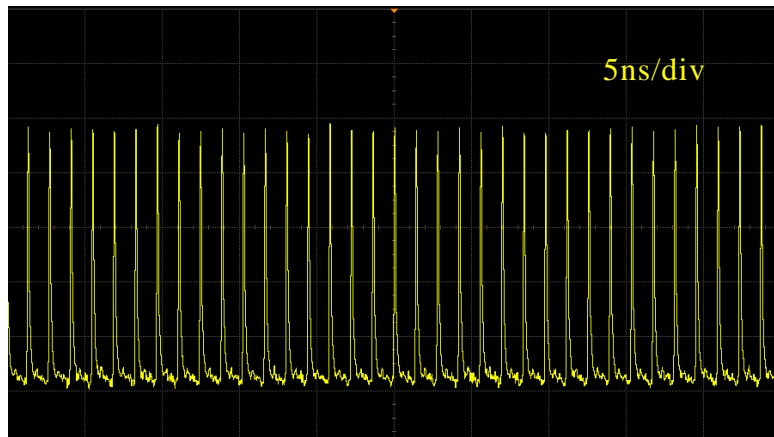


圖 3-5 經由調整輸出鏡可以產生規律的連續自鎖模現象 1。

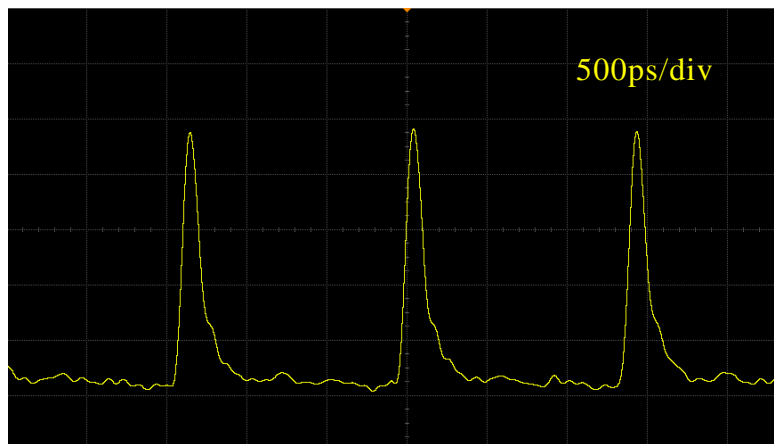


圖 3-6 經由調整輸出鏡可以產生規律的連續自鎖模現象 2。

接著我們試著去改變其雷射共振腔的長度，並且在不同的雷射腔長下把鎖模狀態調整至最佳化，量測其電流對輸出功率的變化及示波器上時域的變化。實驗中改變了四種不同的腔長，25cm、18.75cm、12.5cm、8.6cm，實驗的第一步先將各個腔長的輸出能量調整至最佳化之後，再試著改變輸出鏡的位置及傾仰角，找出鎖模狀態最佳化，並分別量測其電流對輸出功率的變化及光譜分佈，想要試著找出在不同的腔長下自鎖模的情形是否會隨著腔長的不同而產生變化。如圖 3-7 至 3-10 為 (a) 能量最佳化與鎖模狀態最佳化其激發光源功率與雷射輸出功率的比較，(b) 能量最佳化與鎖模狀態最佳化光譜分佈的比較，(c) 示波器所觀察到時域的情況。

實驗中我們發現雷射共振腔的長度會影響自鎖模狀態的輸出功率；在雷射腔長越長的時候，要調整到完美的自鎖模脈衝輸出，調整輸出鏡的範圍就會越大，而輸出鏡調整的越多，其自鎖模的輸出功率就會越小；但是如果雷射腔長過短，時域上的波型會出現直流的背景訊號，也不是形成良好的脈衝，因此在光激發式半導體雷射系統中，雷射腔長的選擇除了影響自發性鎖模雷射的輸出品質也會影響其輸出的功率。

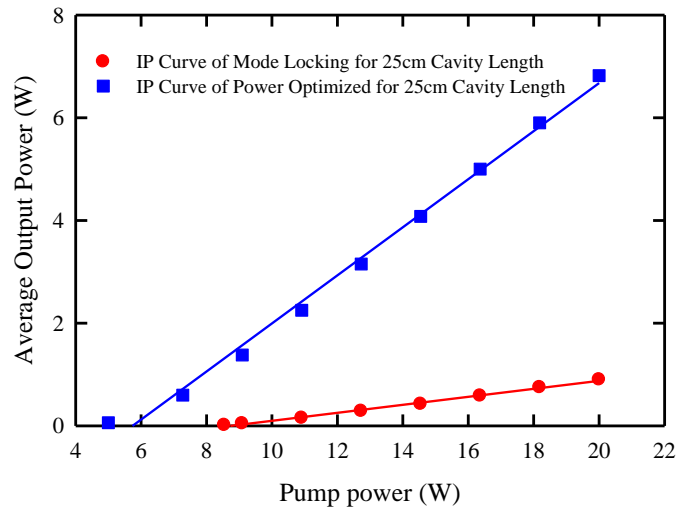


圖 3-7(a) 腔長為 25cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 曲線。

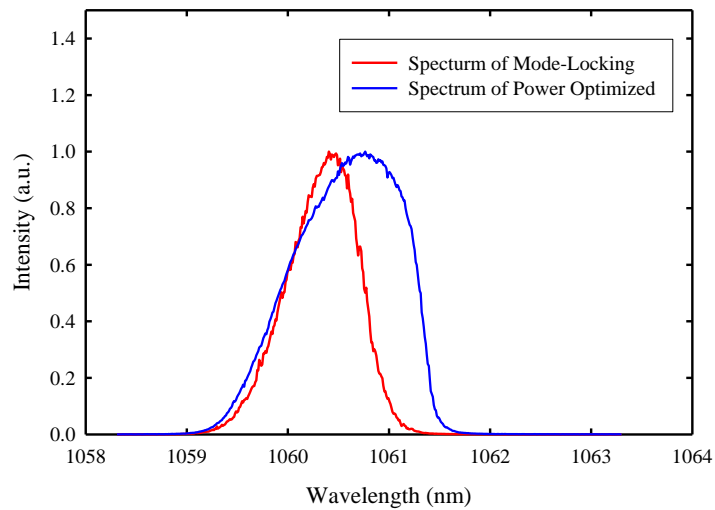


圖 3-7(b) 腔長為 25cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的光譜分佈。

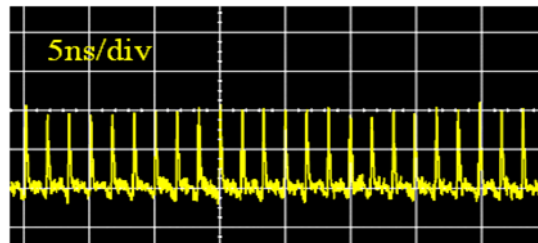


圖 3-7(c) 腔長為 25cm 時，自鎖模最佳化在時域上的分佈情形。

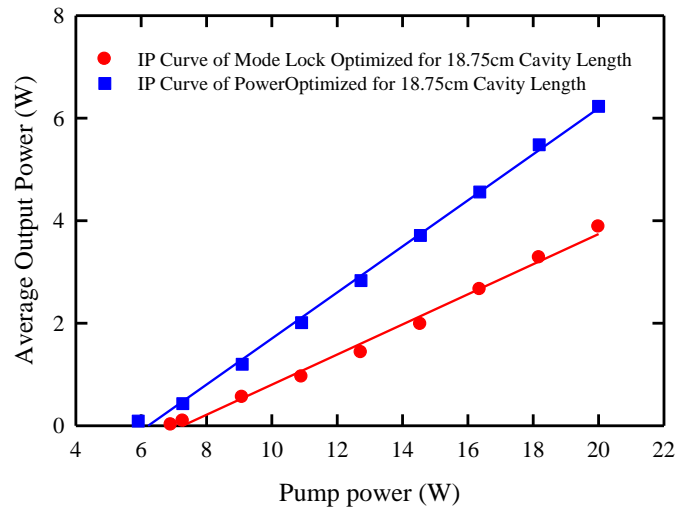


圖 3-8(a) 腔長為 18.75cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 曲線。

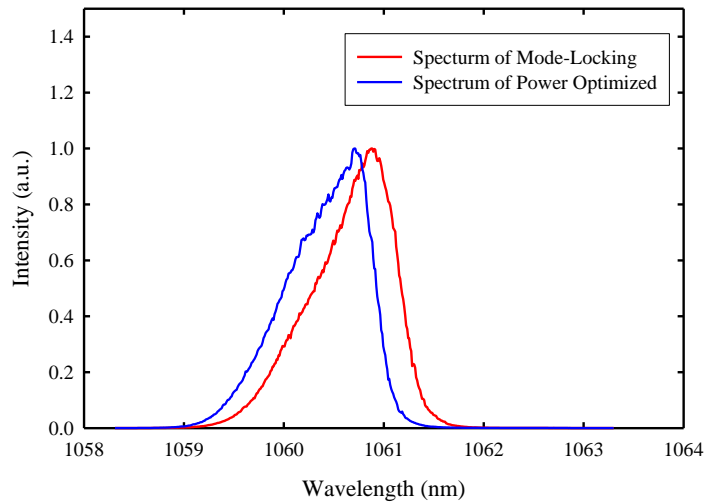


圖 3-8(b) 腔長為 18.75cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的光譜分佈。

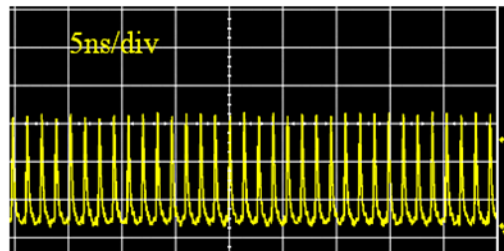


圖 3-8(c) 腔長為 18.75cm 時，自鎖模最佳化在時域上的分佈情形。

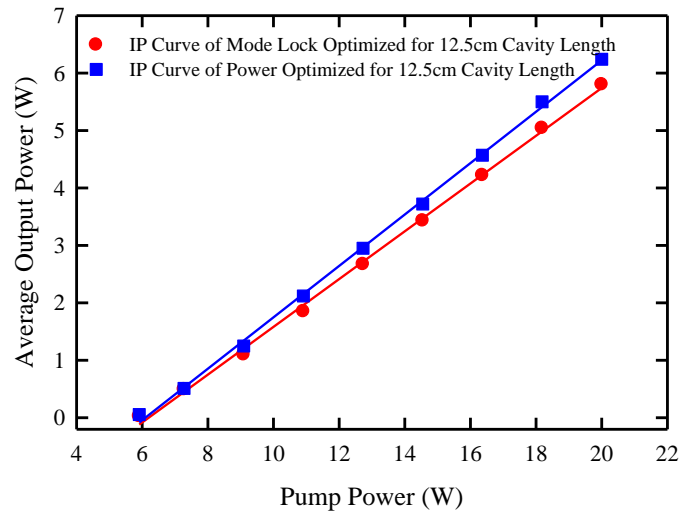


圖 3-9(a) 腔長為 12.5cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 曲線。

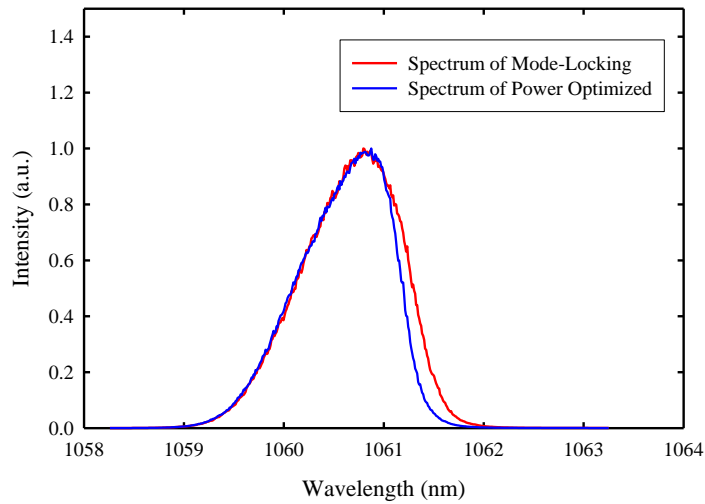


圖 3-9(b) 腔長為 12.5cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的光譜分佈。

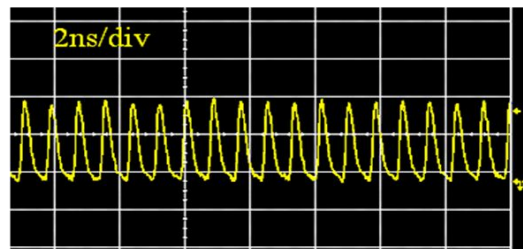


圖 3-9(c) 腔長為 12.5cm 時，自鎖模最佳化在時域上的分佈情形。

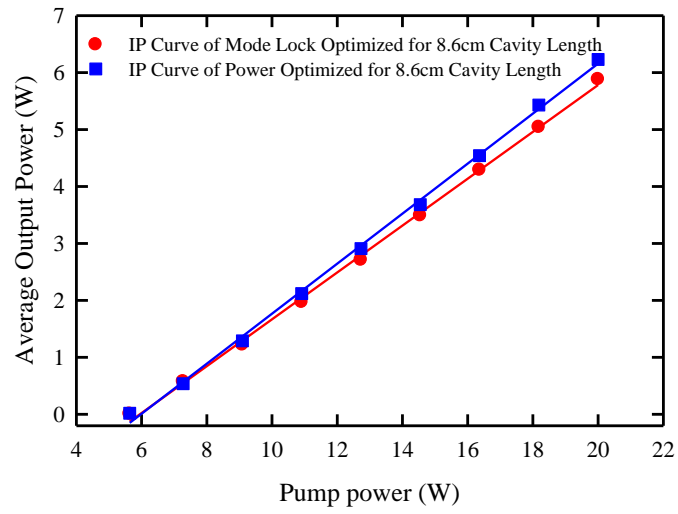


圖 3-10(a) 腔長為 8.6cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的 IP 曲線。

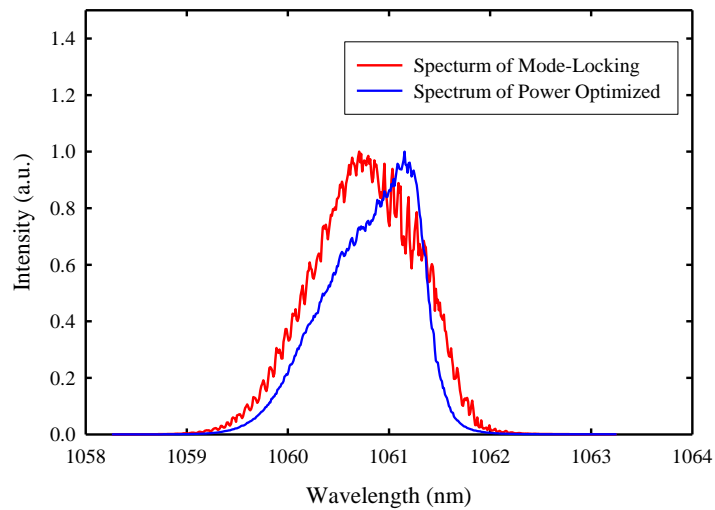


圖 3-10(b) 腔長為 8.6cm 時，能量最佳化與自鎖模最佳化的光譜分佈。

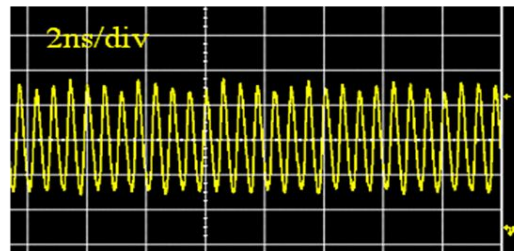


圖 3-10(c) 腔長為 8.6cm 時，自鎖模最佳化在時域上的分佈情形。



試過不同的共振腔的長度之後，我們發現 12.5cm 腔長是自鎖模最佳化的輸出能量同時在時域上的波型也可以達到最好的狀態，此時自發性鎖模雷射電流對功率值也有不錯的表現，輸出功率大約是能量最佳化時的 93%，可以達到 5.8W。然而在更短腔長的時候雖然能量最佳化與自鎖模最佳化的輸出能量可以更高，但是在時域上的波型會出現直流的背景訊號，也不是形成良好的脈衝，因此我們選定 12.5cm 的雷射腔長做接下去更深入的研究。

因為移動了輸出鏡的位置及傾仰角，因此在能量最佳化與鎖模狀態最佳化時的光斑就會產生不同的變化，我們將其光斑分別使用特別的照相機照下，如圖 3-11、3-12 所示，圖 3-11 為能量最佳化的光斑，而圖 3-12 為鎖模狀態最佳化的光斑，我們可以發現當能量最佳化的時候，其光斑呈現的形狀像是高階模態，在照片中可以約略看見其光斑分佈像是兩個圓形光斑的重疊，反觀鎖模狀態最佳化時的光斑，就比較趨近於高斯分佈的光斑。此現象也說明了，如果要得到良好的自鎖模現象，高階橫模的耦合是重要的關鍵，如果高階橫模的數量越少，所得到的鎖模現象也會越好，而反應出的光斑也會趨近於高斯分佈，我們也可以由圖 3-7 到圖 3-10 中發現，當雷射被調整的到鎖模狀態最佳化的時候，其光譜分佈也會較窄，這也說明了此時模態數目是相對減少的，也因為模態數目的減少，因此在能量最佳化時的輸出功率會比在鎖模狀態最佳化時的輸出功率高。



圖 3-11 能量最佳化時的光斑



圖 3-12 鎖模狀態最佳化時的光斑

因為本實驗架構所使用的雷射激發源能量很高，加上又是使用曲率為 250mm 的平凹鏡當作輸出鏡，使高階橫模有機會形成共振。此時雷射輸出模態為多模的形式，並且各個不同階的模態在空間上彼此疊合；因為不同階的模態有不同的相位以及共振頻率，這些重疊的模態在時域上相互耦合，則形成了拍頻波，而此拍頻波也會因空間上的分佈，產生不同的耦合程度，因此在接下來的實驗中我們針對此雷射光斑做時域上十字型的掃描，希望可以藉由掃描分析出其模態在每個位置上的分佈，也可以了解在每個位置上模態耦合的程度。

我們將雷射腔長設定在 12.5cm，將其調整至能量最佳化的狀況，再將整個雷射光斑分為 11 個掃描點，利用移動平台將探測器做橫向及直向的掃描，並在每一個點上記錄其時域所呈現的狀態，目的希望可以藉由每一個偵測點經過個別分析之後，大略模擬出此光斑上縱向模態與橫向模態互相耦合的程度與分佈。在實驗的過程中我們發現，儘管在每一點的位置高階模態耦合的程度都不相同，但是越靠近光斑的中心，其拍頻的程度就趨於減緩，相反如果越靠近光斑的周圍，其拍頻的程度就越加嚴重，這也說明了此光斑確實不是只有縱向模態的輸出，也同時參雜了高階橫向模態的耦合，而我們也可以由所量到的結果推論，此高階橫向模態應該是耦合在雷射光斑的上下及左右兩側，如圖 3-13 所示。

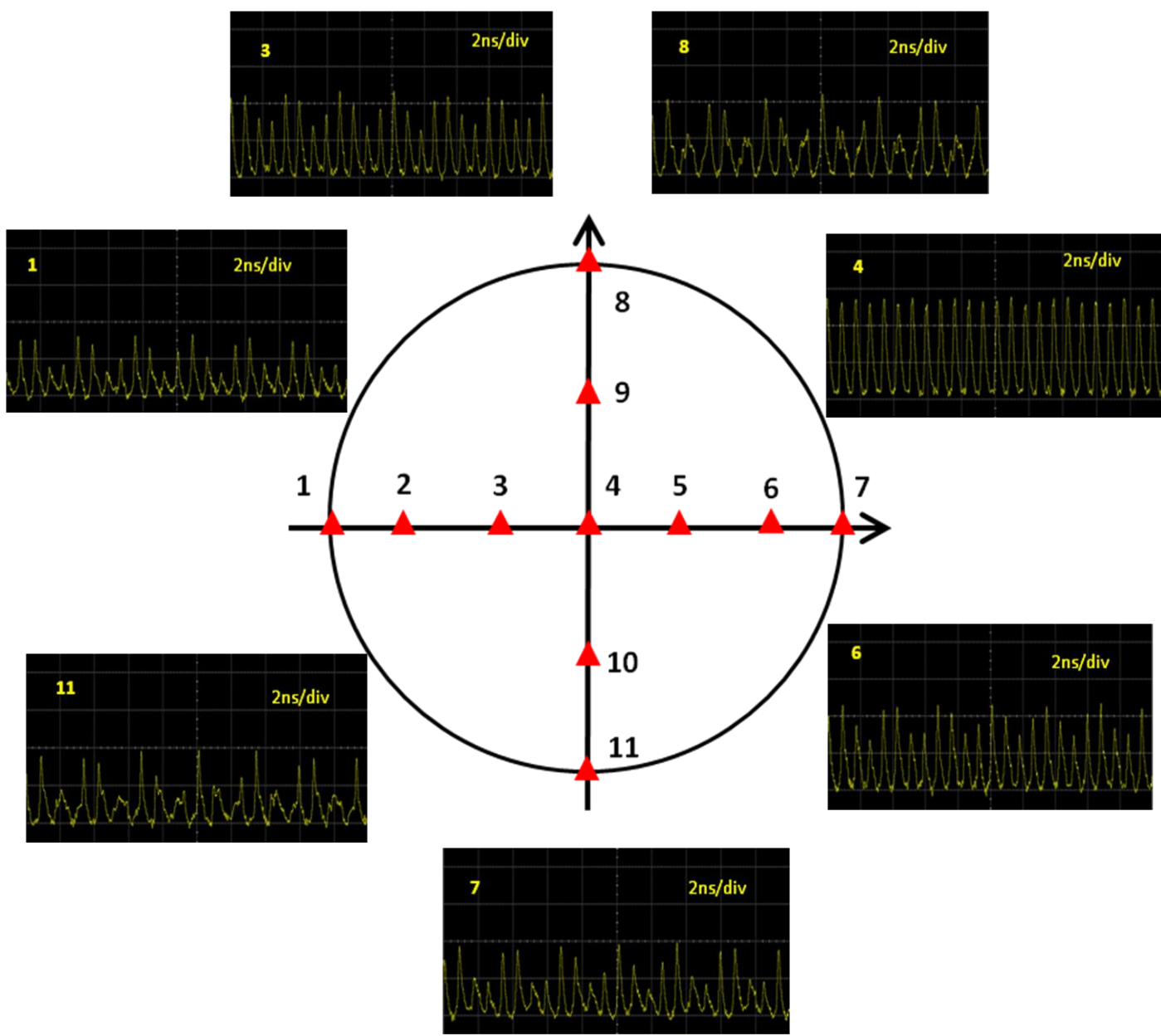


圖 3-13 雷射光斑分成 11 個掃描的位置，分別記錄每個位置在時域上的分佈情形。

由圖 3-13 的時域分佈，可以發現的確在不同的位置上所觀查到時域的狀況都不一樣，這也代表著在每一個不同的位置上，高階橫模耦合的程度也不同，因此我們進一步使用功率頻譜分析儀試著量測其頻率的分佈，也發現的確有不同於縱模的頻率發生。如圖 3-14。

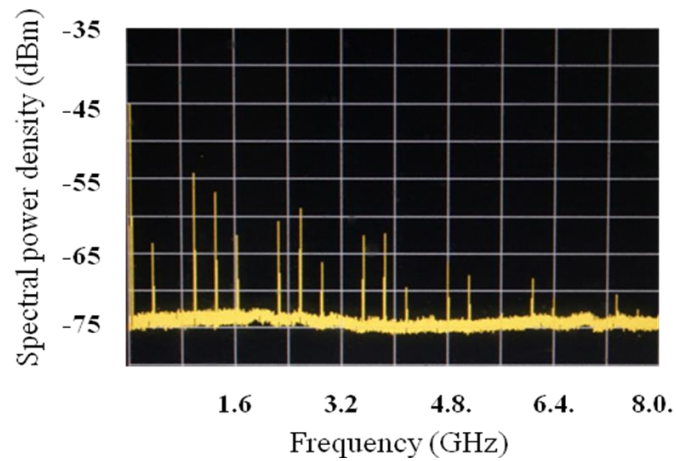


圖 3-14 功率頻譜分析儀試著量測其頻率的分佈

根據雷射腔的幾何結構，我們可以得到頻率差為下列式子。

$$\Delta f_T = \frac{1}{T_R} \frac{\cos^{-1}(\sqrt{g_1 g_2})}{\pi} \quad g_i = 1 - \frac{L}{R_i} \quad (3-2)$$

$T_R$  為雷射來回共振腔一次所需的時間， $L$  為雷射共振腔長， $R$  為輸出鏡的曲率。

將腔長及鏡子曲率半徑等參數代進此方程式後經過計算可以發現，這些不同的頻率為高階橫模的頻率，這也說明了這個光斑在空間中確實存在著高階橫模的耦合。進一步由功率頻譜分析儀中可以知道，此雷射光斑是由 TEM00、TEM01 及 TEM10 三種模態所組合而成，因此我們可以大略的模擬出其縱模與橫模在空間上耦合的情形，如圖 3-15。

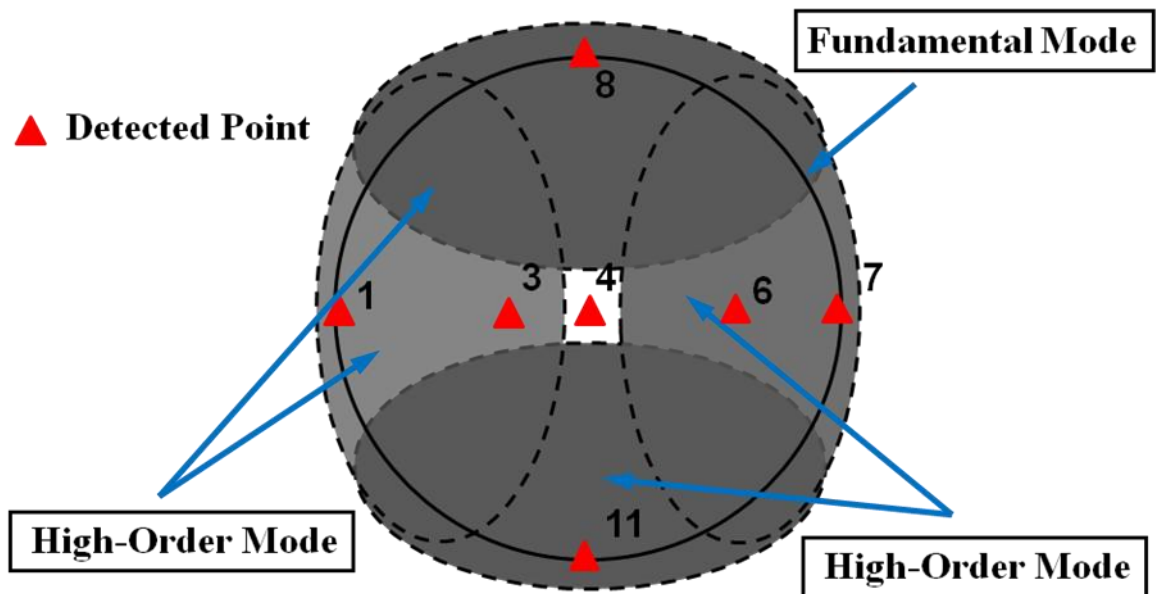


圖 3-15 初步模擬其縱向模態與橫向模態在空間上耦合的情形。

在本實驗中我們發現了光激發式半導體雷射系統具有自鎖模的現象，我們在雷射能量最佳化的時候，在時域上發現了雷射有調制的現象，並且經由理論的計算確認其調制現象為縱向模態的鎖模。實驗中也發現經由調整輸出鏡的位置與傾仰角，可以進一步的將此調制現象調整至自鎖模現象穩定連續輸出，我們也分別改變了不同的雷射腔長，將能量最佳化的輸出功率與自鎖模狀態最佳化的輸出功率做比較，在實驗的過程中使用示波器觀察雷射時域的時候，我們也發現了移動偵測頭的位置就會產生不同程度的拍頻，因此確認了雷射輸出在空間上伴隨著高階模態的耦合；我們將雷射光斑做十字形的掃描，分別記錄在各個不同位置上高階模態耦合的程度，並且藉由功率頻譜分析儀測量其高階橫模的頻率，可以發現此雷射在空間上是由 TEM00、TEM01、TEM10 等模態互相耦合而成，並且經由分析雷射光斑掃描的結果，粗略的模擬出其高階模態耦合後雷射光斑的形式。

在下一章節中，我們將用理論分析的方式，實際的將橫模及縱模利用方程式描述出來並加以耦合，方程式中加入了時間及空間的函數，其各個模態之間耦合的程度與耦合之後在空間上所呈現的分布，及方程式模擬雷射光斑的形式都將會與本章節所得到的實驗數據做比較加以印證。

## 第四章 自發式鎖模雷射的理論與分析

### 4.1 鎖模雷射基本理論

鎖模脈衝雷射是藉由疊加所有有產生共振的雷射縱向模的相位而產生週期性的脈衝，當有  $2M+1$  個縱模疊加而形成鎖模雷射時，其電場強度的表示方式如下：

$$E(t) = \sum_{n=-M}^M E_n e^{i(\omega_0 + n \cdot \omega_{FSR})t + \phi_n} \quad (4-1)$$

在方程式中， $E_n$  代表第  $n$  個縱模電場分佈的振幅， $\omega_0$  為中心頻率， $\omega_{FSR} = 2\pi/T_r$  表示相鄰的兩個縱模的角頻率差， $T_r = 2L/c$  表示來回一次的時間， $L$  代表腔長。下圖 4-1 為理論計算的結果。

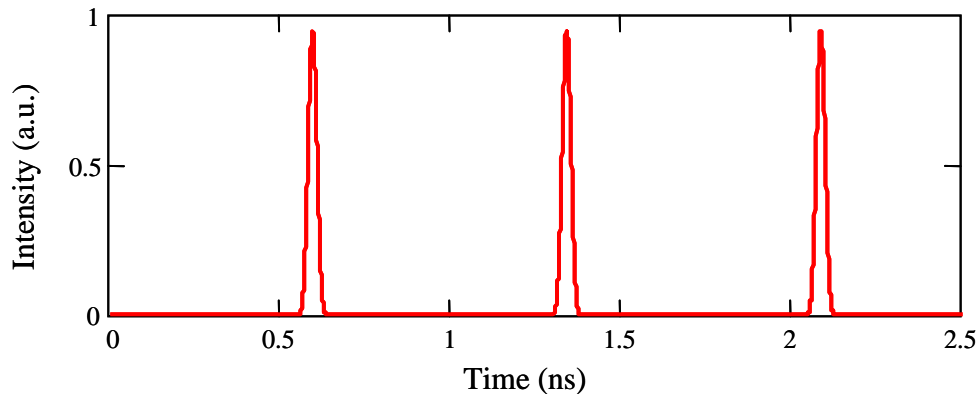


圖 4-1 方程式理論計算的結果



由上圖 4-1 所示，這是一個連續輸出的鎖模雷射，然而在實驗中觀察到的是拍頻的鎖模雷射，而這個拍頻的來源是由兩個橫向模態的耦合而造成，因此在理論分析上需要在加上另外一個電場分佈，其中心頻率較原來的相差一個橫向模態的頻率差，其數學可以表示為：

$$E_{Beating}(t) = \left( E_0 \sum_{n=-M}^M e^{i(\omega_o + n \cdot \omega_{FSR})t} \right) + \left( E_0 \sum_{n=-M}^M e^{i(\omega_o + \omega_T + n \cdot \omega_{FSR})t} \right) \quad (4-2)$$

而且在實驗上發現其拍頻的程度會因為收光的位置不同而不同，為了理論模擬這樣的現象，我們用調控兩個電場的比例來表示偵測器偵測過程中兩個模態耦合的比例，其理論模擬結果如圖 4-2，我們可以發現其拍頻的程度會隨著耦合比例的不同而有不同的變化，耦合比例差越大時，其拍頻的程度就趨於平緩，接近連續鎖模輸出，相反如果比例差越小時，拍頻的現象就越明顯。在圖 4-2 (a) 中，是描述兩種模態的耦合比例為 1:1，可以很明顯的發現拍頻的影響非常嚴重；在圖 4-2 (b) 中，其耦合比例為 1:5，其拍頻的程度稍微減緩。在圖 4-2 (c) 和 (d)，其耦合的比例分別為 1:10、1:20，由圖 4-2 可以發現，當耦合比例越差越大時，越回到原來連續輸出的鎖模雷射，這樣的理論分析，與實驗上的觀察的結果十分類似，因此我們進一步的修改程式中的參數，並且對照在實驗中所得到的數據，試著分析在第三章的實驗中雷射模態在空間的耦合分佈 [31-32]。

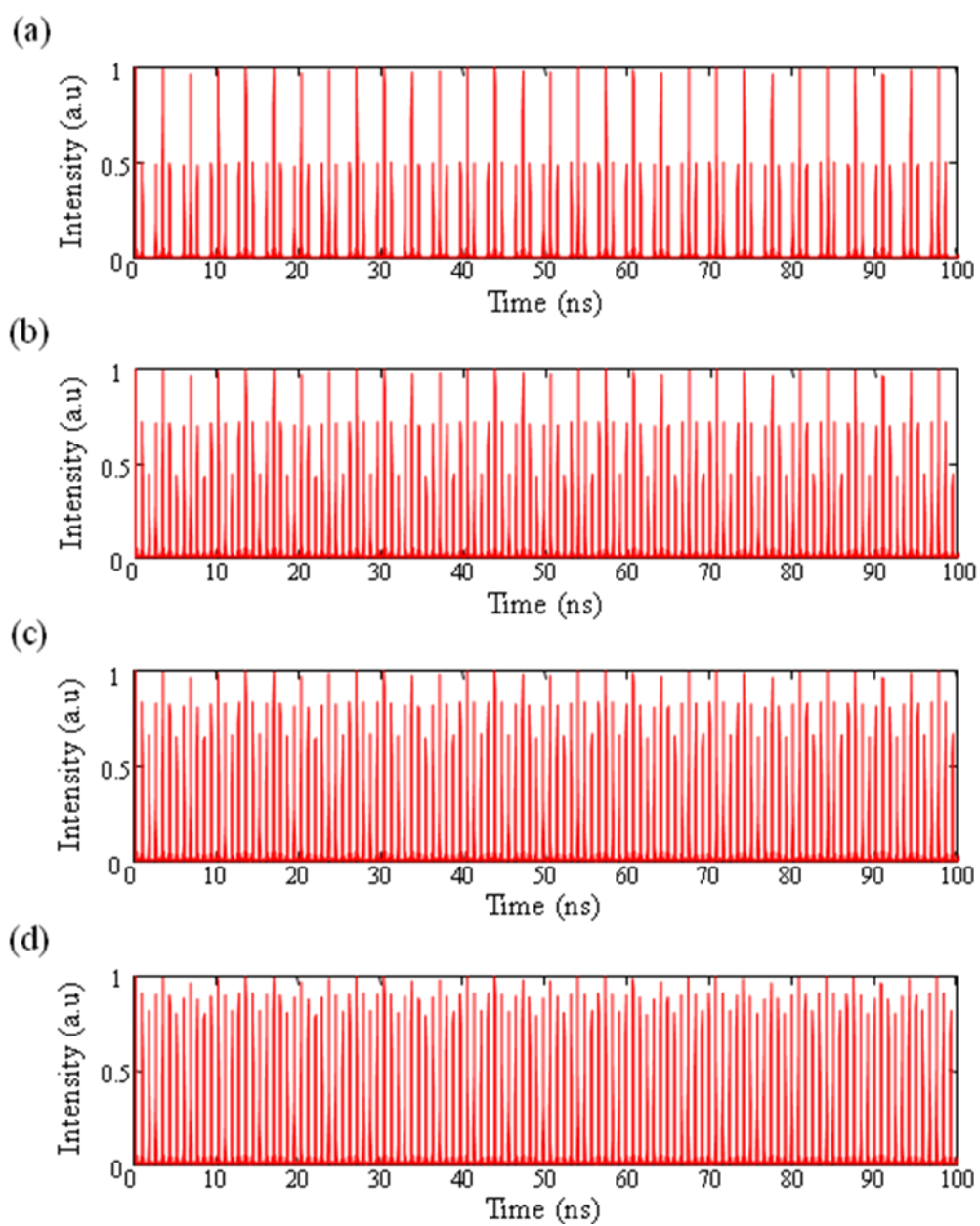


圖4-2 調控兩個電場的比例來表示偵測器偵測過程中兩個模態耦合的比例。

## 4.2 高階橫向模態鎖模雷射理論

在球形共振腔高階模態的波函數可以用下列方程式表示：

$$E_{q,m,n}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2^{m+n} \pi m! n!}} \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{\frac{-(x^2+y^2)}{\omega^2(z)}} H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega(z)}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega(z)}\right) \times e^{ik_{q,m,n} \frac{(x^2+y^2)}{2R(z)}} e^{-i\left[k_{q,m,n}z - (1+m+n)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right]} \quad (4-3)$$

$$\text{其中, } k_{q,m,n} = \frac{\omega_{q,m,n}}{c} = \frac{\pi}{l_{cav}} \left[ (q_0 + q) + \frac{1+m+n}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{1 - \frac{l_{cav}}{R}} \right] \quad (4-4)$$

$q_0$  表示縱向模態的指標， $l_{cav}$  代表有效的共振腔長， $R$  為曲率半徑。

我們可以從方程式中知道，如果橫向模態的階層固定(固定的  $m$ 、 $n$ )，仍然可以有許多不同的縱向模態，因此我們將時間軸的相考慮進去，方程式就可以改寫成

$$E_{q,m,n}(x, y, z, t) = \frac{1}{\sqrt{2^{m+n} \pi m! n!}} \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{\frac{-(x^2+y^2)}{\omega^2(z)}} H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega(z)}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega(z)}\right) \times e^{ik_{q,m,n} \frac{(x^2+y^2)}{2R(z)}} e^{-ik_{q,m,n}(z-ct)} e^{i(1+m+n)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)} \quad (4-5)$$

此方程式所表示的是連續的波函數，如果考慮鎖模的形式，我們必須將所有的縱向模態相加起來，其方程式就可以表示如下：

$$E_{m,n}^M(x, y, z, t) = \sum_{q=0}^{M-1} E_{q,m,n}(x, y, z, t) \quad (4-6)$$

我們可以藉由  $m$ ， $n$  參數的調整描述出高階模態的波函數，並且與縱向模態相加，即可用此方程式來表示所有的模態在時間及空間上互相耦合的分布 [33,34]。

### 4.3 理論分析與實驗對照

在第三章的實驗裡發現，產生的雷射光斑中模態在空間上有不同程度的耦合，而此耦合的程度隨著移動示波器的偵測頭而有不同的變化；在功率頻譜分析儀的顯示中，也的確發現了高階橫模的共振。因此我們利用了方程式分別描述 TEM00，TEM01，TEM10 模態，並且將其疊加之後用電腦模擬出雷射光斑的形式及其拍頻的程度，並且印證實驗中所得到的數據及拍攝的光斑形狀。

我們先將敘述 TEM00、TEM01、TEM10 的方程式疊加，並模擬出雷射光斑的形式，接著試著調整 TEM01 與 TEM10 模態的係數將模擬的雷射光斑與實際拍攝到雷射光斑作應對，發現在 0.5 倍的 TEM01 與 0.3 倍的 TEM10 與 TEM00 作疊加時，其結果最符合所拍攝到的光斑形式，如圖 4-3 與 4-4 所示，圖 4-3 為調整係數後方程式所模擬的雷射光斑，圖 4-4 為實驗中實際拍攝的光斑圖像。

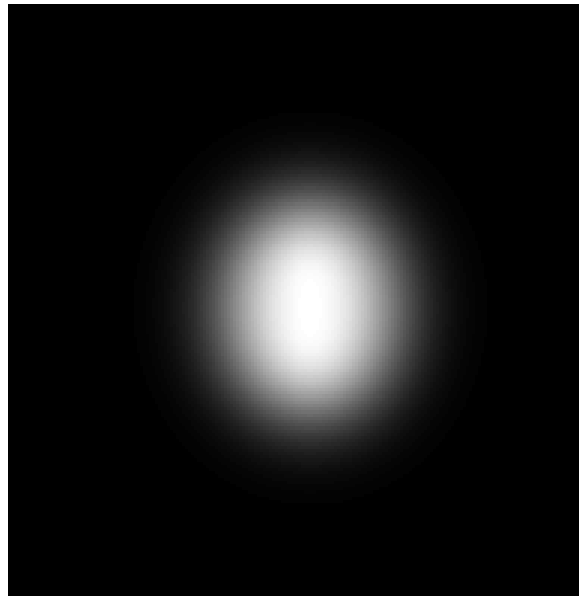


圖4-3 方程式所模擬的雷射光斑

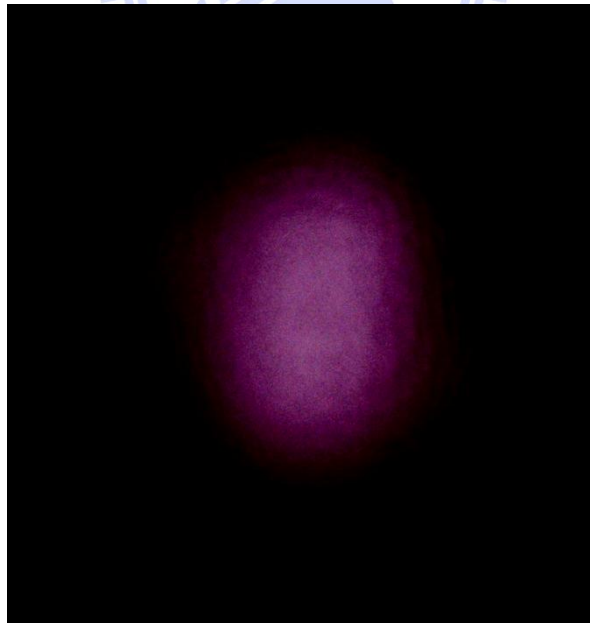


圖4-4 實際拍攝的光斑圖像

接著我們將在雷射光斑上掃描的點換算成座標，並且將這些座標帶入方程式之中，利用此方程式將每個座標上其拍頻的程度模擬出來，再將結果與實驗中用示波器量到的數據一一對照，其結果如下，

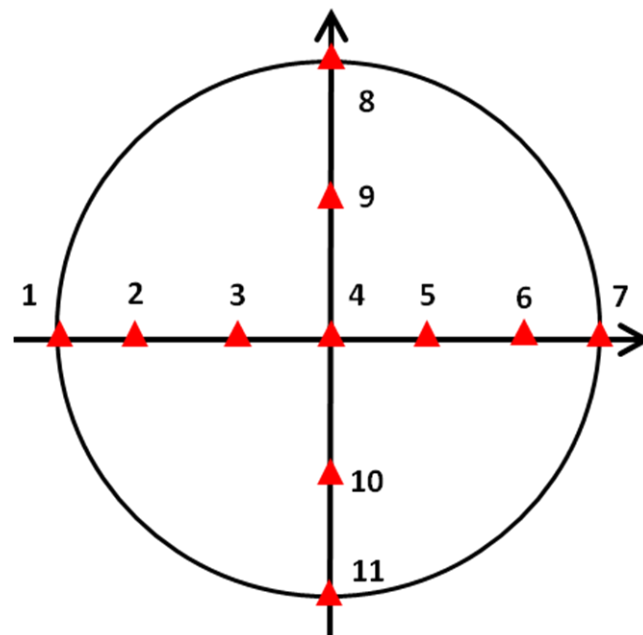
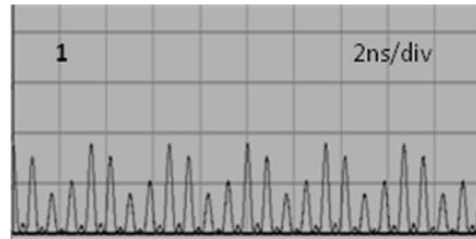
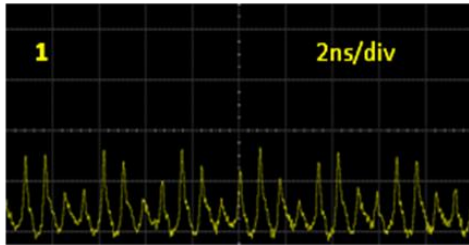


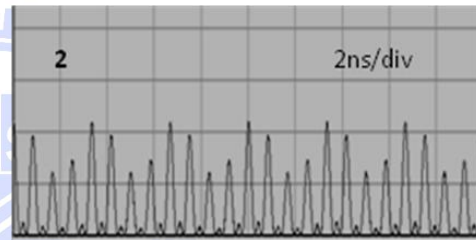
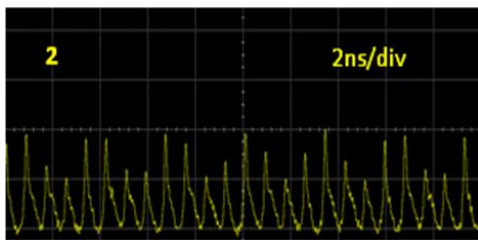
圖 4-5 實驗中將雷射光斑作十字型的掃描

圖 4-6 雷射光斑掃描點的圖形對照

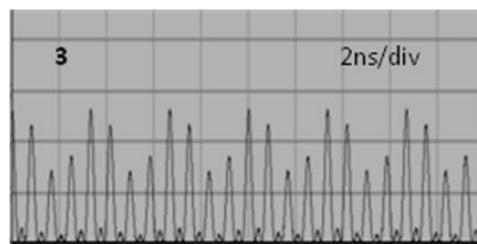
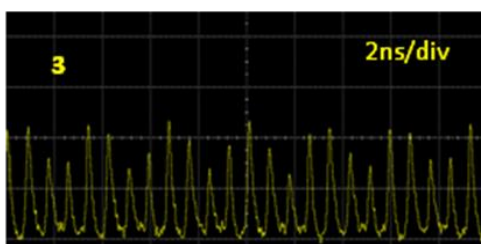
(a) 掃描點 1



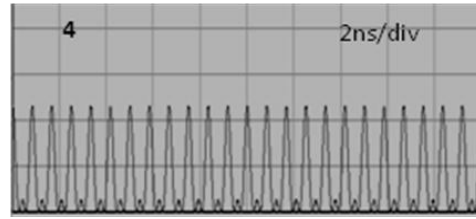
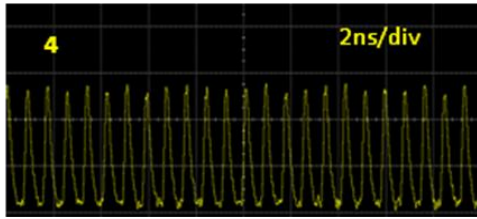
(b) 掃描點 2



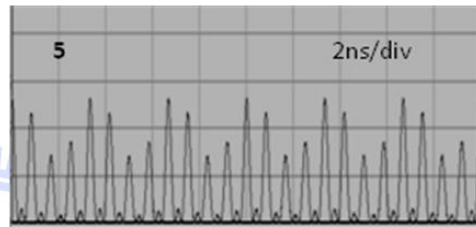
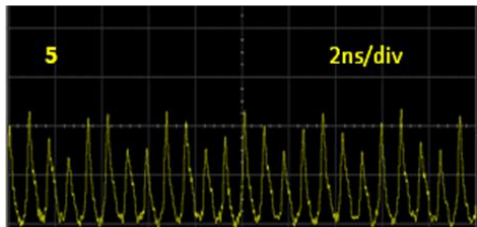
(c) 掃描點 3



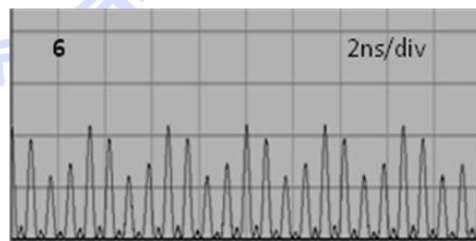
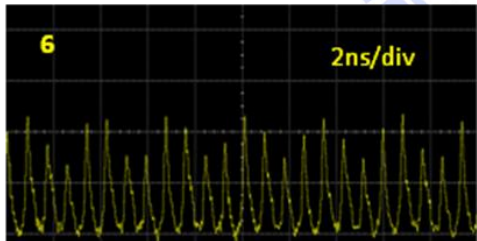
(d) 掃描點 4



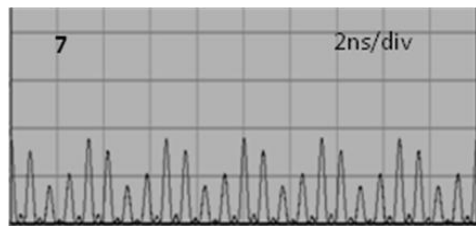
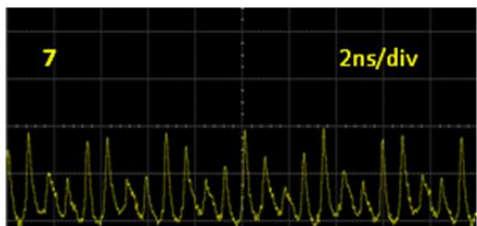
(e) 掃描點 5



(f) 掃描點 6

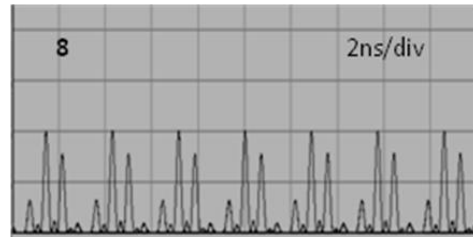
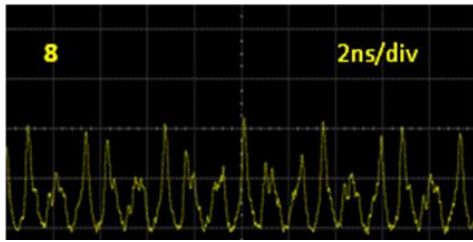


(g) 掃描點 7

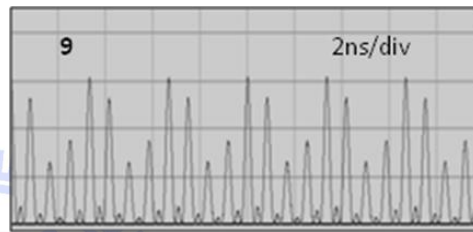
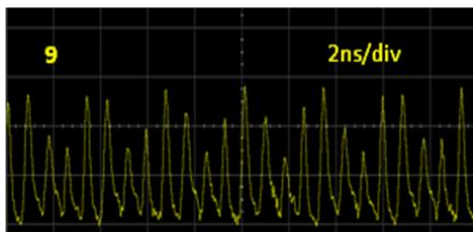




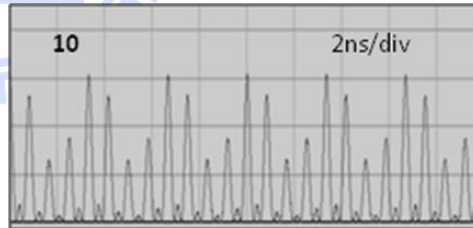
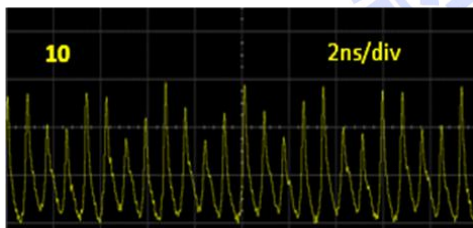
(h) 掃描點 8



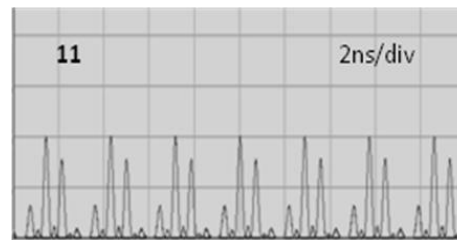
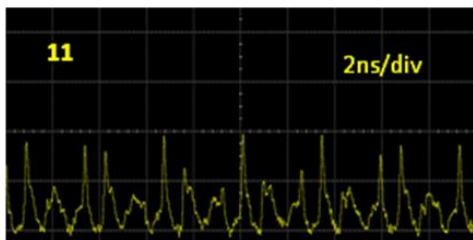
(i) 掃描點 9



(j) 掃描點 10



(k) 掃描點 11



從比對的過程中知道，其拍頻的程度隨著空間上的位置而有變化，而此變化也顯示出模態耦合比例多寡，如果各個模態耦合的比例越一致，其拍頻的程度就會越嚴重，從示波器的圖上來看也就是其波峰與波峰的震盪越明顯，相對的，如果在空間中某個模態的比例相對越強，則拍頻的程度就會越減緩，而此時也越接近連續的鎖模雷射輸出。

對照完 11 個掃描點之後可以發現，其模擬的拍頻程度與示波器鎖觀察到的現象重疊的程度相當的高，說明了此方程式的模擬與實際在實驗上得到的結果相當接近，因此在此雷射系統中確實有高階橫模的耦合，並且耦合後其拍頻的程度也隨著空間上的分布改變，以此雷射光斑為例，在光斑的中心區域其拍頻的程度最小，最接近連續的鎖模雷射輸出，而雷射光斑上下左右的位置就有明顯的拍頻現象，這是因為在雷射光斑的周圍有高階模態的產生並且耦合，而中間的區域高階模態的能量較弱，因此耦合的現象就較為趨緩，在時域上也會比較接近連續鎖模輸出。

此方程式加入了時間與空間的函數，可以同時模擬時間與空間的分布，因此我們可以將第三章所掃描的位置換成座標，一一帶入此方程式確認每個位置耦合的情況，我們可以發現經由比對之後，實驗結果印證此實驗與理論的分析十分吻合。此時將模擬的圖形描述在座標軸上，如圖 4-7，與第三章節的實驗結果對照，如圖 3-13，可以發現相似的程度相當的高。

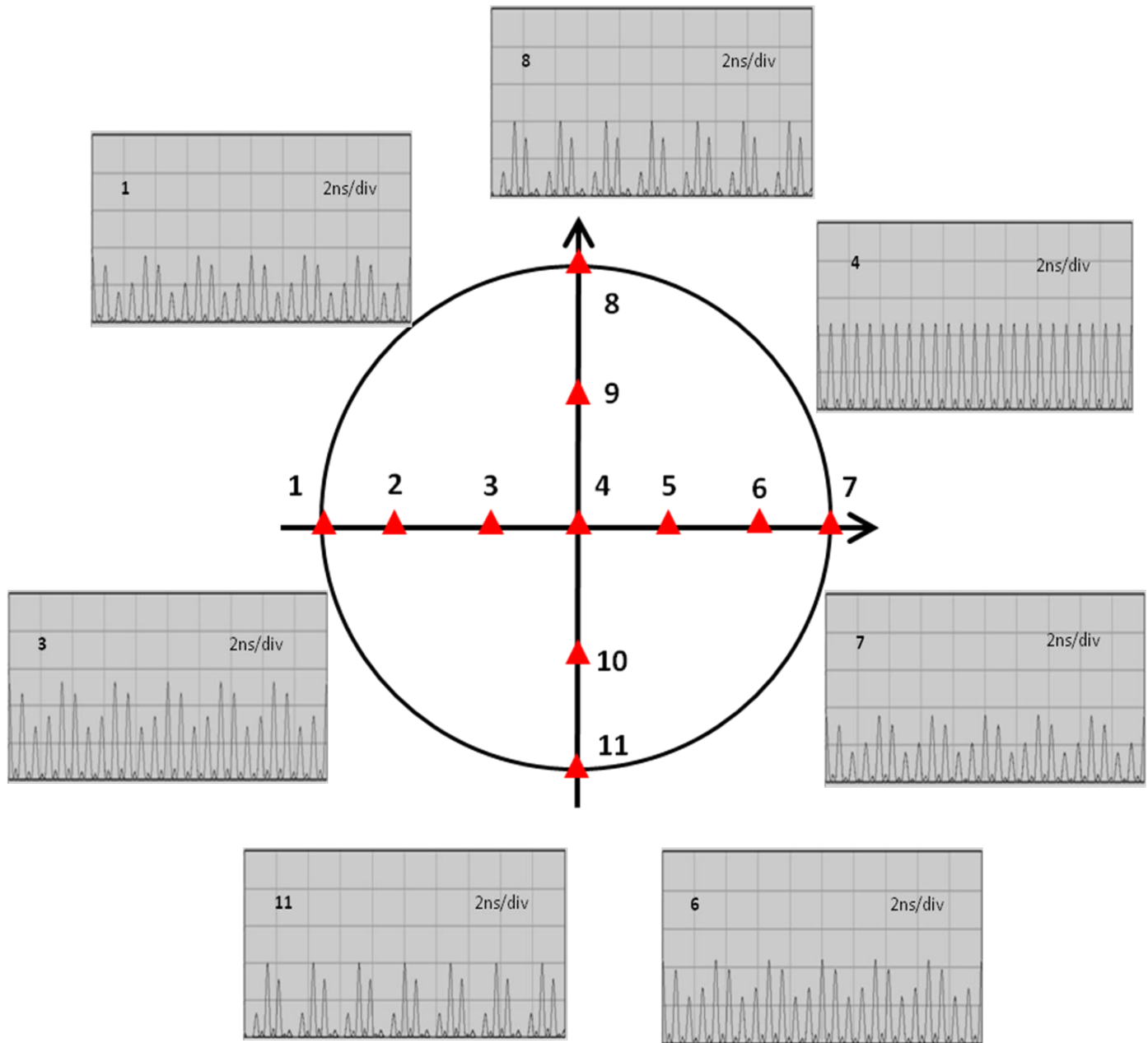


圖 4-7 用以對照圖 3-13，顯示實驗結果與理論分析十分吻合。

## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

整個實驗大致來說可以分為兩個部分，第一部分是我們利用不同曲率半徑的輸出鏡及搭配不同雷射腔長從Coherent的光激發式半導體雷射模組，找出能量最佳化以及鎖模最佳化時的參數。實驗的結果也顯示，雷射共振腔的長度以及輸出鏡曲率半徑的選擇，都會影響到雷射輸出的功率；在實驗中我們也發現雷射共振腔的長度會影響自鎖模狀態的輸出功率；在雷射腔長越長的時候，要調整到完美的自鎖模脈衝輸出，調整輸出鏡的範圍就會越大，而輸出鏡調整的越多，其自鎖模的輸出功率就會越小；但是雷射腔長也不能過短，如果雷射腔長過短，時域上的波型會出現直流的背景訊號，也不是形成良好的脈衝，因此在光激發式半導體雷射系統中，雷射腔長的選擇除了影響自發性鎖模雷射的輸出品質也會影響其輸出的功率。

而第二的部分則是我們在實驗的過程中發現了光激發式的半導體雷射系統的自鎖模現象，通常都會伴隨著高階模態的耦合，從實驗的結果發現，在光激發式的半導體雷射系統中雖然可以產生自發式的鎖模現象，但是此鎖模現象並不是只有縱向模態的鎖模，而是同時在空間及時間上也耦合了不同程度的橫向模態，而這些橫向模態的耦合可以藉由調整輸出鏡的位置及角度及改變雷射共振腔長將耦合程度降到最低，趨近於連續性的自鎖模輸出，因此，我們試著用示波器掃描雷射光斑在空間上縱向模態與橫向模態耦合的程度，並藉由理論的計算，模擬出雷射光斑的形狀與不同位置的耦合程度加以印證，可以發現利用理論的計算可以與實驗的結果在空間與時間上都可以十分吻合，進而可以利用這些參數模擬出高階模態耦合的情形。

## 5.2 未來展望

在未來的工作中，可以在此系統中加入半導體的飽和吸收體，利用其特性降低橫向模態的耦合，期望達成完美的連續性的自鎖模輸出。在近期發表的論文當中，也發現有人利用半導體的飽和吸收體並且以架設 V 型共振腔的型式，成功的將光激發式的半導體雷射產生鎖模現象，並且將雷射的脈衝寬度壓縮至 60 飛秒(femtosecond)。因為半導體增射介質被激發時含有大範圍的螢光光譜，因此我們認為如果可以将這些模態都加以控制而產生鎖模現象，應該可以将脈衝的寬度壓縮至飛秒雷射的等級。

而研究的另一個方向則是可以利用雙折射濾光鏡(birefringence filter)架設在雷射共振腔的中間，並且利用溫度的調控，控制雙折射濾光鏡過濾的波長，將大範圍的螢光光譜縮小，只留下特定的波長通過，在螢光光譜縮小的狀況下，就有機會消除高階橫模的耦合進而產生良好連續輸出的自鎖模雷射。

## 參考文獻

- [1] M.Kuzetsov, F. Hakimi, R.Sprague, A. Mooradian, "Design and Characteristics of high-power(>0.5W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> Beams." IEEE J.Sel. Top. Quantum Electron. **5**, 561, (1999)
- [2] M.Kuzetsov, F. Hakimi, R.Sprague, A. Mooradian, "High power(>0.5W CW) Diode pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor laser with circular TEM<sub>00</sub> Beam." IEEE Photonics Tech Lett. **9**, 1064 (1997)
- [3] A.C. Tropper, H.D. Foreman, A.Granache, K.G. Wilcox and S. Hoogland, "Vertical-external-cavity semiconductor lasers." J Phys D **37**, 75, (2004)
- [4] U. Keller, A.C. Tropper, "Passively mode-locked surface-emitting semiconductor lasers." Phys. report **429**, 67 (2006)
- [5] A.C. Tropper and Hoogland, "Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers." Prog. Quantum. Electron. **30**, 1 (2006)
- [6] M.Y.A. Raja, S.R.J Brueck, M Osinski, CF Schaus et al, "Resonant periodic gain surface-emitting semiconductor lasers"., IEEE J. Quantum Electron. **25**, 1500 (1989)
- [7] Li Fan, J Hader, M Schillgalies, M Fallahi, .R. Zakharian J.V. Moloney R. Bedford J.T. Murray S.W. Koch W. Stolz, "High-power optically pumped VECSEL using a double-well resonant periodic gain structure." IEEE Photo.Tech. Lett. **17**, 1764 (2005)

- [8] A. Bousseksou, S. Bouchoule, M. Kurdi .etc “Fabrication and characterization of 1.55 $\mu$ m single tranverse mode large diameter electrically pumped VECSEL” *Opt Quantum Electronic.* **38**, 1269 (2006)
- [9] A. Garnache, A. A. Kachanov, F. Stoeckel, and R. Houdré, "Diode-pumped broadband vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser applied to high-sensitivity intracavity absorption spectroscopy," *J. Opt. Soc. Am. B* **17**, 1589 (2000)
- [10] G. B. Kim, J.Y. Kim, J. Lee, J. Yoo, K.S. Kim, S.M. Lee, S. Cho, S.J. Lim, T. Kim, and Y. Park, “End-pumped green and blue vertical external cavity surface emitting laser devices.” *Appl. Phys. Lett.* **89**, 181106 (2006)
- [11] J.E. Hastie, L.G. Morton, A.J. Kemp, and M.D. Dawson, A.B. Krysa and J.S. Roberts, “Tunable ultraviolet output from an intra-cavity frequency-doubled red vertical-external-cavity surface-emitting laser,” *Appl. Phys. Lett.* **89**, 061114 (2006)
- [12] J. Rautiainen, A. Härkönen, V.-M. Korpijärvi, P. Tuomisto, M. Guina, and O. G. Okhotnikov, "2.7 W tunable orange-red GaInNAs semiconductor disk laser," *Opt. Express* **15**, 18345 (2007)
- [13] M. Fallahi, L. Fan, Y. Kaneda, C. J. Hader, H. Li, J. V. Moloney, B. Kunert, W. Stolz, S. Koch, J. Murray, R. Bedford, “5 W yellow laser by intra-cavity frequency doubling of high-power vertical external-cavity surface-emitting laser,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 1700 (2008)
- [14] Hans Lindberg, Anders Larsson, and Martin Strassner,

- "Single-frequency operation of a high-power, long-wavelength semiconductor disk laser," *Opt. Lett.* **30**, 2260 (2005)
- [15] Peter Klopp, Florian Saas, Martin Zorn, Markus Weyers, and Uwe Griebner, "290-fs pulses from a semiconductor disk laser," *Opt. Express* **16**, 5770 (2008)
- [16] A. Aschwanden, D. Lorenser, H. J. Unold, R. Paschotta, E. Gini, and U. Keller, "2.1-W picosecond passively mode-locked external-cavity semiconductor laser," *Opt. Lett.* **30**, 272 (2005)
- [17] O. Casel, D. Woll, M.A. Tremont, H. Fuchs, R. Wallenstein, E. Gerster, P. Unger, M. Zorn and M. Weyers, "Blue 489-nm picosecond pulses generated by intra-cavity frequency doubling in a passively mode-locked optically pumped semiconductor disk laser" *Appl. Phys. B* **81**, 443 (2005)
- [18] A. J. Kemp, G. J. Valentine, J.M. Hopkins, J. E. Hastie, S. A. Smith, S. Calvez, M. D. Dawson, and D. Burns, "Thermal management in vertical-external-cavity surface-emitting lasers: Finite-element analysis of a heat-spreader approach," *IEEE J. Quantum Electron.* **41**, 148 (2005).
- [19] R. G. Bedford, M. Kolesik, J. L. A. Chillac, M. K. Reed, T. R. Nelson, J. V. Moloney, "Power-limiting mechanisms in VECSELs," *Proc. of SPIE.* **5814**, 199 (2005)
- [20] A. J. Kemp, A.J. Maclean, J. E. Hastie, S. A. Smith, J.M. Hopkins, S. Calvez, G. J. Valentine, M. D. Dawson and D. Burns, "Thermal lensing, thermal management and transverse mode control in microchip VECSELs." *Appl. Phys. B* **83**, 189 (2006)



- [21] H. Lindberg, M. Strassner, J. Bengtsson and A. Larsson, "InP-based optically pumped VECSEL operating CW at 1550nm," *IEEE Photon Technol. Lett.*, **16**, 362 (2004).
- [22] Nils Hempler, John-Mark Hopkins, Alan J. Kemp, Nico Schulz, Marcel Rattunde, Joachim Wagner, Martin D. Dawson, and David Burns, "Pulsed pumping of semiconductor disk lasers," *Opt. Express* **15**, 3247 (2007)
- [23] B. Rudin, A. Rutz, M. Hoffmann, D. J. H. C. Maas, A.-R. Bellancourt, E. Gini, T. Südmeyer, and U. Keller, "Highly efficient optically pumped vertical-emitting semiconductor laser with more than 20 W average output power in a fundamental transverse mode," *Opt. Lett.* **33**, 2719 (2008)
- [24] A.R. Zakharian, J. Hader, J.V. Moloney, S.W. Koch, and S. Lutgen, "Experimental and theoretical analysis of optically pumped semiconductor disk lasers," *Appl. Phys. Lett.* **83**, 1313 (2003)
- [25] H. Lindberg, M. Strassner, E. Gerster, J. Bengtsson, and A. Larsson, "Thermal management of optically pumped long-wavelength InP-based semiconductor disk lasers," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **11**, 1126 (2005)
- [26] J. P. Turrenc, S. Bouchoule, A. Khadour, J. Decobert, A. Miard, J. C. Harmand, and J. L. Oudar, "High-Power RT CW Operation of an OP-VECSEL at 1.56  $\mu\text{m}$  with Hybrid Metallic-Metamorphic Mirrors," in *CLEO/Europe and IQEC 2007 Conference Digest*, paper CB1\_3. (Optical Society of America, 2007)
- [27] Jussi Rautiainen, Jari Lyytikäinen, Alexei Sirbu, Alexandru Mereuta,

- Andrei Caliman, Eli Kapon, and Oleg G. Okhotnikov, "2.6 W optically-pumped semiconductor disk laser operating at 1.57- $\mu\text{m}$  using wafer fusion," *Opt. Express* **16**, 21881 (2008)
- [28] Jari Lyytikäinen, Jussi Rautiainen, Lauri Toikkanen, Alexei Sirbu, Alexandru Mereuta, Andrei Caliman, Eli Kapon, and Oleg G. Okhotnikov, "1.3- $\mu\text{m}$  optically-pumped semiconductor disk laser by wafer fusion," *Opt. Express* **17**, 9047 (2009)
- [29] H. C. Liang, Y. J. Huang, W. C. Huang, K. W. Su, and Y. F. Chen, "High-power, diode-end-pumped, multigigahertz self-mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1342nm," *Opt. Lett.* **35**, 4 (2010)
- [30] H. C. Liang, Y. J. Huang, Y. C. Lin, T. H. Lu, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "Picosecond optical vortex converted from multigigahertz self-mode-locked high-order Hermite-Gaussian Nd:GdVO<sub>4</sub> laser" *Opt. Lett.* **34**, 3842 (2009)
- [31] H. C. Liang, H. L. Chang, W. C. Huang, K. W. Su, Y. F. Chen and Y. T. Chen, "Self-mode-locked Nd:GDVO<sub>4</sub> laser with multi-GHz oscillations: manifestation of third-order nonlinearity," *Appl. Phys. B* **97**, 451 (2009)
- [32] H. C. Liang, Ross C. C. Chen, Y. J. Huang, K. W. Su, and Y. F. Chen, "Compact efficient multi-GHz Kerr-lens mode-locked diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser," *Opt. Express* **16**, 21149 (2008)
- [33] Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao, C. L. Wang, and S. C. Wang, "Generation of Hermite-Gaussian modes in fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 1025 (1997)
- [34] H. Laabs and B. Ozygus, "Excitation of Hermite Gaussian modes in

end-pumped solid-state lasers via off-axis pumping,” *Opt. Laser Technol.* **28**, 213 (1996)

