

# 國立交通大學

理學院應用科技學程

## 碩士論文

熱效應對連續波雷射與脈衝雷射的影響：  
傳統晶體與鍵合晶體之比較

Thermal effects in continuous-wave and pulsed operations :  
comparison between conventional and diffusion-bonded crystals.

研究生：葉士瑋

指導教授：陳永富 教授

中華民國 100 年 一 月

熱效應對連續波雷射與脈衝雷射的影響：  
傳統晶體與鍵合晶體之比較

Thermal effects in continuous-wave and pulsed operations :  
comparison between conventional and diffusion-bonded crystals.

研究生：葉士瑋

Student : Shih-Wei Yeh

指導教授：陳永富

Advisor: Yung-Fu Chen

國立交通大學  
理學院應用科技學程  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of applied technology

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Applied technology

January 2011

Hsinchu, Taiwan

中華民國 100 年一月

# 熱效應對連續波雷射與脈衝雷射的影響： 傳統晶體與鍵合晶體之比較

學生：葉士瑋

指導教授：陳永富 教授

國立交通大學 理學院應用科技學程 碩士班



本論文使用單一鍵合晶體能有效降低熱效應和提高雷射性能，由於雷射晶體前端為非摻雜的同質晶體，可使內部摻雜的雷射晶體激發所產生的熱，經由前端非摻雜的同質晶體均勻吸收熱的通過，有效地改善晶體中心和側面的溫度梯度，減少晶體端面，因熱變形所引起的熱透鏡效應，達到雷射晶體均勻的散熱，有利於雷射系統的穩定性及高功率運轉。

在本實驗中，使用端面激發固態二極體架構之連續波雷射與脈衝雷射的輸出，比較傳統  $\text{Nd:YVO}_4$  與單一鍵合晶體  $\text{YVO}_4/\text{Nd:YVO}_4$  對熱效應的影響。實驗中我們改變 200mm、300mm、400mm 腔長距離，以最大平均輸出功率的比較，在連續波雷射的輸出，單一鍵合晶體比傳統晶體分別增

加了 42%、74% 和 99%。在脈衝雷射的輸出，單一鍵合晶體對熱效應的改善遠大於傳統的晶體，最大可增加到 168%，由實驗證實鍵合晶體能有效減少熱效應。因此將單一鍵合晶體應用在被動式半導體鎖膜雷射的操作中，發現可獲得較寬廣的脈衝寬度，利用鍵合晶體非摻雜的部分，可減少 spatial-hole-burning(SHB)的效應，獲得更寬的脈衝寬度。



Thermal effects in continuous-wave and pulsed operations :  
comparison between conventional and diffusion-bonded crystals.

Student : Shih-Wei , Yeh

Advisor : Dr. Yung-Fu Chen

Department of Degree program of Applied Science and Technology

National Chiao Tung University



The composite crystal, which is fabricated by the diffusion bonding of a doped crystal to an undoped crystal as a heat sink for the pump surface, can efficiently reduce the thermal-induced problems such as thermal lensing, thermal distortion, thermal fracture and so on. As a result, the composite crystal is expected to be potentially beneficial for laser power-scaling as well as power-stability enhancement.

In this thesis, we design a scheme of a diode-pumped solid-state laser to comparatively study the thermal effects between the conventional crystal and composite crystal under continuous-wave (cw) and pulsed operation. In cw operation, the maximum average output power of composite crystal were 42%, 74%, 99% larger than the results obtained with conventional crystal in the cases

of  $L=200\text{mm}$ ,  $L=300\text{mm}$ , and  $L=400\text{mm}$ , where  $L$  is the cavity length. In pulsed operation, the improvement of laser performance with the composite crystal was also realized due to the reduction of thermal effects compared with the conventional crystal. Furthermore, we observed that the mode-locked pulse width obtained with the composite crystal was considerably broader than that obtained with the conventional crystal. The pulse broadening was experimentally verified to come from the length of the undoped part that brings in a reduction of the spatial-hole-burning (SHB) effect.



## 誌謝

回首剛回到校園進修時的期待，以及現在收成的喜悅，這一切都要感謝許多人對我的提攜與幫助。首先當然是要感謝我的指導教授陳永富老師，除了學業上認真的指導外，工作上有關於雷射異常的現象，老師都不厭其煩的分析並清楚講解其現象的源由，以及給我方向性的實驗方法，使我能在解決之於學習到寶貴的知識與經驗。而且老師在我工作繁忙而影響到課業時，不斷的提醒與辛勞的叮嚀論文進度，真的非常感謝老師的用心。在老師身上不只學到課業上的指導，也在老師身上學習到對於工作上該有的責任與態度，還有老師對於領導與人生該有的態度都給了我無比的收穫，並常對我們說學校的學習只是短暫的，畢業後要不斷的學習。再來要感謝黃郁仁 博士對我實驗上的指導、雷射疑問的解說、論文編寫的要領、幫我修正論文…等，而且在他忙碌於家裡的事情時，還不忘提醒我進度，並非常仔細的幫我校稿論文，真的很感謝您!!

再來要感謝我的家人，感謝父母對我的支持、大姐二姐對我論文寫作上的需求與關心，舅舅與舅媽精神上的鼓勵，我終於完成了這份遲來的期盼，謝謝你們!!

最後要感謝豪晶科技何 總經理與張 會計師在公司上給我的資源，還有豪晶的同事們，謝謝你們提供的援助，感恩。

## 目錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	III
誌謝 .....	V
目錄 .....	VI
圖表目錄 .....	IX
第一章 介紹 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 本論文組織 .....	6
第二章 簡介 .....	8
2.1 傳統摻釹釩酸鈮(Nd:YVO <sub>4</sub> )的介紹 .....	8
2.1.1 摻釹釩酸鈮(Nd:YVO <sub>4</sub> )的偏振吸收特性 .....	9
2.1.2 雷射晶體吸收效率與偏振特性實驗 .....	10
2.2 單一鍵合晶體(diffusion-bonded crystal)的介紹 .....	20
2.3 Q-開關的簡介 .....	23
2.3.1 Q 開關的分類 .....	24
2.3.2 主動式 Q 開關動作機制 .....	25
2.3.3 被動式 Q 開關動作機制 .....	26



第三章 連續波雷射系統實驗.....	30
3.1 介紹.....	30
3.2 CW(Continuous Wave)連續波實驗架構.....	31
3.3 CW(Continuous Wave)連續波實驗架構光學元件之規格.....	33
3.4 CW(Continuous Wave)連續波實驗結果與分析.....	34
3-5 結論.....	36
第四章 Q-開關脈衝波雷射系統實驗.....	41
4.1 介紹.....	41
4.2 Q-開關脈衝波實驗架構.....	42
4.3 Q-開關脈衝波實驗架構光學元件之規格.....	43
4.4 Q-開關脈衝波實驗結果與分析.....	44
4.5 結論.....	45
第五章 鎖模雷射的介紹與實驗.....	53
5.1 介紹.....	53
5.2 實驗架構.....	54
5.3 實驗結果與分析.....	58
5.4 結論.....	63
第六章 結論與未來展望.....	64

6.1 結論 .....	64
6.2 未來展望 .....	65
參考文獻 .....	66



## 圖表目錄

圖 2-1 雷射晶體吸收不加偏振鏡片之實驗架構圖 一 .....	17
圖 2-2 雷射晶體吸收加偏振鏡片之實驗架構圖 二 .....	17
圖 2-3 a-cut Nd:YVO <sub>4</sub> doping:0.2% 3mm x 3 mm x 12mm 吸收光譜圖 ..	18
圖 2-4 c-cut Nd:YVO <sub>4</sub> doping:0.5% 5mm x 5mm x 10mm 吸收光譜圖 ...	18
圖 2-5 Nd :YAG doping:0.5% 5mm x 5mm x 20mm 吸收光譜圖 .....	19
圖 2-6 單端鍵合晶體示意圖 .....	22
圖 2-7 雙端鍵合晶體示意圖 .....	22
圖 2-8 多層濃度堆疊鍵合晶體示意圖 .....	22
圖 2-9 中心摻雜鍵合晶體 .....	22
圖 2-10 (a) Q-開關共振腔內累積能量示意圖 .....	28
圖 2-10 (b) Q-開關產生脈衝光輸出示意圖 .....	28
圖 2-11 主動式聲光 Q 開關動作示意圖 .....	29
圖 2-12 被動式 Q 開關以 Cr <sup>4+</sup> :YAG 飽和吸收體為例之操作原理(a)光開 關 OFF (b)光開關 ON .....	29
圖 3-1 CW(Continuous Wave) 連續波實驗架構圖 .....	39
圖 3-2 連續波腔長 L= 200mm 輸入功率與輸出功率圖 .....	39
圖 3-3 連續波腔長 L= 300mm 輸入功率與輸出功率圖 .....	40

圖 3-4 連續波腔長 $L=400\text{mm}$ 輸入功率與輸出功率圖 .....	40
圖 4-1 Q 開關脈衝波實驗架構圖 .....	49
圖 4-2 腔長 $L=200\text{mm}$ , 頻率 (a)10 kHz (b)20 kHz (c)30 kHz (d)40 kHz(e)50 kHz 輸入功率與輸出功率比較圖 .....	50
圖 4-3 腔長 $L=300\text{mm}$ , 頻率 (a)10 kHz (b)20 kHz (c)30 kHz (d)40 kHz(e)50 kHz 輸入功率與輸出功率比較圖 .....	51
圖 4-4 腔長 $L=400\text{mm}$ , 頻率 (a)10 kHz (b)20 kHz (c)30 kHz (d)40 kHz(e)50 kHz 輸入功率與輸出功率比較圖 .....	52
圖 5-1 被動式半導體鎖模雷射實驗架構圖 .....	57
圖 5-2 傳統 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶體 .....	57
圖 5-3 鍵合晶體 $\text{GdVO}_4/\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ .....	57
圖 5-4(a) 傳統晶體與鍵合晶體在鎖模操作下輸入功率與輸出功率曲線圖 .....	60
圖 5-4 連續鎖模脈衝波(b)穩定狀態(c) 不穩定狀態下的輸出波形 .....	60
圖 5-5 (a)傳統晶體(b)鍵合晶體在鎖模操作下輸出脈衝波寬度的 FWHM .....	61
圖 5-6 鎖模雷射(a)在傳統晶體(b)在鍵合晶體輸出光譜的 FWHM .....	61
圖 5-7 增益介質與前腔鏡分開的距離和鎖模雷射輸出的脈衝寬度與輸	

出光譜寬度的關係圖 .....	62
表 1-1 DPSSL 雷射熱門應用領域.....	7
表 2-1 Nd:YVO <sub>4</sub> 與 Nd:YAG 之物理特性 .....	15
表 2-2 Nd:YVO <sub>4</sub> 與 Nd:YAG 之熱學性質 .....	15
表 2-3 Nd:YVO <sub>4</sub> 與 Nd:YAG 之光學特性 .....	16
表 2-4 Q 開關雷射技術優劣比較.....	27
表 3-1 CW 連續波實驗數據分析比較表 .....	38
表 4-1 脈衝波輸出 L=200mm,PRF=10~50kHz 實驗數據分析比較表 ..	47
表 4-2 脈衝波輸出 L=300mm,PRF=10~50kHz 實驗數據分析比較表 ..	47
表 4-3 脈衝波輸出 L=400mm,PRF=10~50kHz 實驗數據分析比較表 ..	48
表 4-4 脈衝波輸出,固定輸入功率,以不同頻率之輸出功率分析比較表	48

# 第一章 介紹

## 1.1 研究動機

在現今生活中，固態雷射的應用已非常廣泛，不論是在工業上、醫療上、國防工業中，處處可見其雷射的應用。以往固態雷射常用的激發光源乃是惰性氣體電弧燈(flash lamp)(亦即燈內充入氬等惰性氣體)，但其電光轉換輸出的效率極差(小於15%)，因其輻射光譜太寬，固態介質的吸收譜帶有限，絕大部分輸入的能量皆被工作物質及共振腔所吸收，其他無用的紫外輻射，使固態介質的壽命降低，多餘的紅外輻射加熱了晶體的溫度，進而造成系統溫度升高熱效應嚴重的現象，使得輸出光束品質不佳，光轉換效率差；加上本身體積大，增加了組合成雷射系統的空間限制；且惰性氣體電弧燈的使用壽命短。

然而，二極體激發固態雷射(Diode-Pumped Solid-State Laser，簡稱DPSSL)，實現了高轉換效率、結構的緊密性佳、可靠度高的特性。由於雷射二極體體積小，易於緊密貼合散熱導槽(Heat Sink)冷卻系統上，以水冷卻或是致冷晶片散熱，可減小冷卻系統的空間，在組合成雷射系統時緊密性佳，結構簡單，安裝、調整、維修都方便，且雷射二極體使用壽命長，典型的壽命為 $10^5\sim 10^9$ 小時。以二極體激發的光源，可針對固體工作介質的吸

收光譜，來選擇其匹配的二極體激發光源，減少激發光對固體工作介質輻射損耗造成的熱效應，使二極體激發光源完全匯聚在工作介質上，進而增加輸出功率及更好的光束品質，轉換效率可高達25%以上。二極體激發固態雷射，在應用領域非常廣闊，如(表1-1)所示為目前已知DPSSL雷射熱門應用領域。

而在固態二極體雷射中，以激發方式的不同，可分為端面激發(end-pumping)與側面激發(side-pumping)兩種方式，由輸出光功率的大小及輸出光束的品質特點來區分，側面激發固態二極體雷射具有較高的光功率輸出，但輸出光束品質不佳為多模結構，常應用在高功率的加工，如焊接、切割等不要求模態品質的加工上；端面激發固態二極體雷射擁有高密度的激發功率與較好的光束品質，是中小功率常用的一種方式，以現今產品追求輕、薄、短、小的情況下，端面激發二極體雷射的應用，常應用在工業上微加工與製程的改善更是不勝枚舉。例如:在我工作上實際的應用:客戶為背光導光板的製造廠，在製做背光導光板網點的模板時，希望從傳統的濕蝕刻製程，改為乾式蝕刻的雷射製程，以減少研發模板開發的時間。剛開始所使用的雷射是以側面激發固態二極體雷射，因為初期背光板網點佈點密度大，所以雷射點(spot size)的要求只在 50 $\mu$ m~100 $\mu$ m 之間，但隨著背光板的均度與輝度的提升，背光板網點佈點密度越來越小，雷射點要求至 30 $\mu$ m~45 $\mu$ m

之間。為了達到此要求，需要更好的光束品質與更小的雷射加工點，所以使用端面激發固態二極體雷射的應用。

本文使用的端面激發固態二極體雷射架構中，雷射共振腔內主要是由固態二極體 808nm 的激發光源，經由傳統的 Nd:YVO<sub>4</sub> 的增益介質(gain medium)轉換成 1064 nm 雷射光。由於傳統 Nd:YVO<sub>4</sub> 的增益介質存在著許多熱效應的問題，例如：在晶體內由於吸收部分的激發光而產生熱量的空間分佈，導致晶體內形成徑向的溫度梯度變化，造成晶體內、外材料熱脹情況不同而產生熱應力，隨著入射端激發光功率增加，溫度梯度增大，熱應力也隨著變大，當熱應力增大至增益介質的閾值時，增益介質即會發生破裂的現象，此現象稱為熱破裂(thermal fracture)。還有在晶體內的溫度梯度和熱應力會導致折射率的變化，使晶體的中心處折射率較高，由晶體中心向外逐漸減小，當光通過時，晶體中心的光線光程大，通過晶體邊緣的光線光程較小，這與光通過一個匯聚透鏡相似，此現象即為一個熱透鏡(thermal lens)現象。因為上述之熱效應會導致雷射最大輸出平均功率與效率的下降，且光束品質變差，所以為了改善增益介質內部溫度梯度的分佈能均勻的散熱，在本論文實驗中我們以單一鍵合晶體(diffusion-bonded crystal)來改善晶體內部溫度梯度的分佈。由於單一鍵合晶體是由一塊摻雜的雷射晶體和一塊純的非摻雜同質基底材料膠合後，在高溫條件下通過分子擴散



實現穩固結合的一種產品，我們可利用單一鍵合晶體前端非參雜的同質晶體結構，均勻的吸取內部激發晶體的熱通過，使雷射晶體達到均勻散熱，減少晶體的熱效應，改善晶體內部溫度梯度的分佈較為緩和，提高雷射的性能。

因為在工作領域中所接觸的背光板廠，目前使用的端面激發固態二極體雷射系統，還是傳統的雷射介質晶體，由於背光板模板網點的製程，以目前每片網點的設計已經增加到 200 ~ 400 萬的加工網點，加工時間長達 3~4 小時，且全天 24 小時的加工情況下，為了達到客戶端雷射的穩定度，減少熱效應影響所造成的不穩定現象，本論文針對傳統晶體與單一鍵合晶體，改變其共振腔的長度，以連續波 CW(Continuous Wave) 和脈衝波 (Q-switching, mode locking) 的輸出功率，比較其熱效應的改善，將可提供公司對於端面激發固態二極體雷射優化的重要依據，也可讓客戶端有更穩定的雷射加工器，得到更好的加工品質。

而在目前雷射發展中，改善熱效應的方法有：

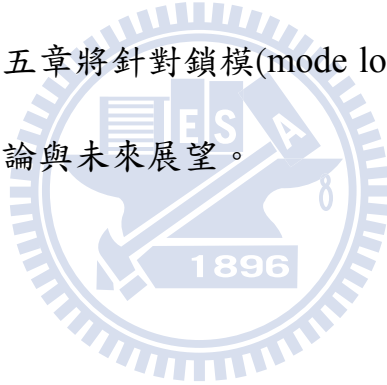
1. 在 Nd doped 的雷射晶體中，傳統都是以 808nm 的二極體為激發光源，因為 808nm 對雷射晶體有較強的吸收率，若不考慮波長的吸收效率，提高激發光源的波長，改用 880nm 波長為激發波段，由 880nm 轉換 1064nm，可縮短能階轉換所產生的熱，晶體內吸收熱效應較 808nm 少，

可減少熱效應，但由於 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體對 880nm 吸收波段效率較 808nm 差，所以輸出轉換效率也較低。

2. 微型增益介質共振雷射 (thin-disk laser): 介質晶體的薄型化，厚度大約只有 100~200 $\mu\text{m}$ ，直接貼於銅座散熱導槽上，由於介質晶體薄，散熱速度快，所累積的熱效應較少，但需增加激發雷射共振次數，提高介質晶體的吸收效率。
3. 單一鍵合晶體 (diffusion-bonded crystal): 直接更換原來的增益介質，不需更改原本共振腔架構，只需微調光學共振腔與單一鍵合晶體的最佳位置，達到最直接的改善與低成本的考量。
4. 光學補償法: 修磨介質晶體的端面呈凹面，以抵消熱效應所產生的透鏡，適合用於穩定的熱焦距情況下。

## 1.2 本論文組織

本文自第二章簡介：針對增益介質(gain medium)，傳統的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體與單一鍵合晶體(diffusion-bonded crystal)的特性介紹，包括以單光儀量測晶體吸收的光譜實驗；還有光學元件 Q-開關的簡介。第三章以連續波 CW(Continuous Wave)的實驗架構，針對傳統 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體與單一鍵合晶體，改變不同共振腔長的實驗數據分析討論。第四章以 Q-開關脈衝雷射的實驗架構，針對傳統 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體與單一鍵合晶體，改變不同共振腔長的實驗數據分析討論。第五章將針對鎖模(mode locking)雷射的介紹，實驗分析與討論。第六章為結論與未來展望。



科學研究	工業與民生
材料特性量測：tunable、UV 科學用激發光源：>2W, 532 nm 太空遙測與資源探測：>1mJ, 532 nm pulse	材料處理：微機電系統加工、晶片標記 水下攝影與海底探測：532 nm 非破壞性檢測：532 nm 半導體晶圓檢測：532 nm
國防工業	醫療用途
雷射測距儀：eye safe,>1.4 μm 雷射追蹤掃描系統：單頻 雷射防衛武器：>1MW/cm <sup>2</sup>	眼科治療：眼底止血, 532 nm 皮膚治療：532 nm 牙齒治療：532 nm、1064 nm 外科手術：1.34、1.44、1.54 μm

表 1-1 DPSSL 雷射熱門應用領域



## 第二章 簡介

### 2.1 傳統摻釹釩酸鈮(Nd:YVO<sub>4</sub>)的介紹

釩酸鈮(YVO<sub>4</sub>)是非常重要的光學晶體，可應用在光通訊技術中的光隔離器；當釩酸鈮基質晶體摻入了釹離子(Nd<sup>3+</sup>)組合而成的活性介質，則為目前被廣泛使用於固態雷射的活性介質晶體摻釹釩酸鈮(Nd:YVO<sub>4</sub>)，它是一種性能優良的雷射介質晶體。Nd:YVO<sub>4</sub> 它屬於四方晶系(tetragonal)，石英結構，為正單軸晶體，目前 Nd:YVO<sub>4</sub> 釹離子(Nd<sup>3+</sup>)的摻雜濃度可達 3%；反觀 Nd:YAG 屬於立方晶格(cubic)，只能摻雜 Nd<sup>3+</sup> 濃度 0.9%~1.1%左右，若將濃度增加至 3%左右，會造成晶格的變形，導致雷射晶體的光學特性劣化，因此 Nd:YVO<sub>4</sub> 高摻雜濃度可具有較高雷射增益。在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體有些光譜特性更適合於二極體激發雷射系統中，例如：Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體的吸收係數高，其發射截面積(emission cross section)大於常見 Nd:YAG 晶體的 5 倍，同樣發射 1064 nm 雷射光而言，Nd:YVO<sub>4</sub> 雷射效益即比 Nd:YAG 雷射效益更高。Nd:YVO<sub>4</sub> 吸收光譜寬，因此在雷射二極體的選擇上，可以不須這麼嚴格的選擇何種二極體與控制二極體的激發波長，就能達到很好的激發效率。Nd:YVO<sub>4</sub> 對於激發光源 809 nm 的波長有很強的吸收帶寬，而且其吸收帶寬變化不大，因此更可適應二極體激發光源因溫度變化所造成波長的改變。

而 Nd:YVO<sub>4</sub> 也並非都無缺點的介質晶體，它的螢光壽命就比較短，只有 Nd:YAG 的 42%；熱傳導係數(thermal conductivity)也較差，只有 Nd:YAG 的一半。從上述的比較發現，Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:YAG 晶體互有其優劣特性，可由(表 2-1、2-2、2-3) 晶體的物理特性、熱學性質、光學特性可看出 Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:YAG 各項特性。

### 2.1.1 摻釹釩酸鈮(Nd:YVO<sub>4</sub>)的偏振吸收特性

Nd:YVO<sub>4</sub> 屬於四方晶系，在晶格學上 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體，在三維軸向的分量可定義為:a 軸方向(a-axis)、b 軸方向(b-axis)、c 軸方向(c-axis)，對 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體的特性來說，a-axis 與 b-axis 特性是一樣的，c-axis 與 a-axis 和 b-axis 的特性不同，也就是說 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體的特性  $a\text{-axis} = b\text{-axis} \neq c\text{-axis}$ 。在晶體的製程上，依切割的方向不同可分為 a 軸切割(a-cut)與 c 軸切割(c-cut)，所謂 a 軸切割(a-cut):是沿著 a-axis 的方向切割晶體，由整個切割橫截面所看到的等效 b-axis 和 c-axis;c 軸切割(c-cut):是沿著 c-axis 的方向切割晶體，由整個切割橫截面所看到的等效 a-axis 和 b-axis。所以選擇晶體的使用時，會有 a-cut 與 c-cut 的區分。當使用 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體時，對  $\pi(c\text{-axis})$  偏振激發光的吸收係數遠大於對  $\sigma(b\text{-axis})$  偏振激發光的吸收係數，因此，為了充分利用激發光能量，通常可以採用  $\pi$  偏振方式的激發光源，可使雷射

晶體吸收激發光源效率更好。若使用 c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體時，因為晶體 a-axis 和 b-axis 的特性一樣，所以不管晶體放置任何軸向，對激發光源的吸收效率都是一樣的。Nd:YVO<sub>4</sub> 為自然雙折射晶體，除了具有很強的偏振吸收特性外，還具有很強的偏振幅射特性，雷射輸出沿著特殊的  $\pi$  方向，呈線性偏振，這樣的偏振輸出可避免多於的熱致雙折射損失。

### 2.1.2 雷射晶體吸收效率與偏振特性實驗

背景介紹:

雷射增益介質(gain medium)是雷射系統的主要關鍵，它決定了雷射的主要特性。因此，選擇適當的增益介質是雷射研究的第一步。在眾多 Nd<sup>3+</sup> 離子摻雜(doping)的增益介質中，Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:YAG 因同樣具有良好的物理、光學及熱的特性，而廣泛的被應用於各雷射系統當中。兩者雖有相同活性離子(active ion)，但由於活性離子存在於不同的基質材料中，承受不同的晶格場(crystal field)，使得 Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:YAG 晶體在偏振光的吸收特性有所差異。因此依實際的研究，詳細的實驗出偏振光對 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub>、c-cut Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YAG 晶體的吸收特性，還有 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub>、c-cut Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YAG 晶體的實際吸收光譜。

實驗方法與架構:

使用交大電子物理系實驗室的單光儀設備，在實驗架構圖一中(如圖 2-1)，不加偏振鏡片(Non Polarization)，激發光源輸入 700nm~1000nm 的激發波段，針對(a) a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> (b) c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> (c)Nd:YAG 三種雷射晶體，以單光儀量測出三種晶體的吸收光譜波段強度。在實驗架構圖二中(如圖 2-2)，輸入 700nm~1000nm 的激發光，加入偏振鏡片，分別以 b-axis 和 c-axis 的偏振光輸出，針對(a) a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> (b) c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> (c)Nd:YAG 三種雷射晶體，以單光儀量測出 b-axis 偏振光與 c-axis 偏振光對三種晶體的吸收光譜波段強度。

最後依據以上的量測分別繪出:

(a)a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> doping:0.2% 3mm x 3mm x 12mm 晶體(不加偏振鏡、加 b-axis 偏振光、c-axis 偏振光)三種方式的吸收光譜圖(如圖 2-3)。

(b) c-cut YVO<sub>4</sub> doping:0.5% 5mm x 5mm x 10mm(不加偏振鏡、加 b-axis 偏振光、c-axis 偏振光)三種方式的吸收光譜圖(如圖 2-4)。

(c) Nd:YAG doping:1.1% 5mm x 20mm 晶體(不加偏振鏡、加 b-axis 偏振光、c-axis 偏振光)三種方式的吸收光譜圖(如圖 2-5)。

依據吸收光譜圖來分析，不加偏振與加了 b-axis 和 c-axis 的偏振光，對三種晶體的吸收特性與實際的吸收波段的強度。



實驗結果:

(a)在 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體的波長吸收中，由圖(2-3)可看出，c-axis 的吸收效率最高；其次是不加偏振鏡片(total)的吸收率，因為不加偏振鏡片的吸收光譜線，激發光涵蓋了 b-axis 和 c-axis 偏振的部分分量，所以對 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體的吸收率大小會介於 b-axis 與 c-axis 偏振之間；吸收率最小的為 b-axis 的偏振光。吸收波長分別落在 750nm、809nm、880nm 有較高的吸收率。

(b)由圖(2-4)可看出，c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體在不加偏振鏡片(total)與光偏振 0°(0-polarization)和 90°(90-polarization)的吸收光譜，三條譜線是重合在一起的，由此可見 c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體對偏振光的吸收率是沒有差異性的。這與之前敘述，當 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體為 c-cut 時，晶體特性 a-axis=b-axis，在不加偏振鏡片與將光偏振 0°和 90°的偏振光，對 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體 a-axis 與 b-axis 吸收率都是一樣的，所以其吸收光譜線會重合。而其吸收波長也分別落在 750nm、809nm、880nm 有較高的吸收率，與 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體差異不大。

(c)由圖(2-5)可看出 Nd:YAG 的晶體，對不加偏振鏡片(total)、0°(0-polarization)和 90°(90-polarization)偏振光的吸收光譜線也是重合的。由於 Nd:YAG 的晶體特性為任意偏振光的吸收特性；所謂任意偏振

(random polarization):就是在任意方向的光輸入，對 Nd:YAG 晶體只要是符合其吸收波段的光都可吸收的特性。所以 total、0-polarization 和 90-polarization 偏振光的吸收光譜線是重合的。而 Nd:YAG 晶體的吸收波長分別落在 750nm、810nm、870nm 有較強的吸收群。

結果討論:

在雷射晶體的吸收實驗，可以看出 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體不論是 a-cut 或是 c-cut 的切割方式，吸收光譜的分佈在 750 nm、809 nm、880 nm 這三個譜線有較高的吸收率；而 Nd:YAG 晶體的吸收波長分別落在 750nm、810nm、870nm 有較強的吸收群，由圖(2-5)顯示出 Nd:YAG 晶體吸收光譜圖，有比較多的不同尖峰的波長，吸收能階較複雜性，所以在同樣波段內可看出 Nd:YAG 的波峰數較多，但主要的吸收波長與 Nd:YVO<sub>4</sub> 大致是相同的。所以當在選擇激光二極體時，盡量挑選符合雷射晶體吸收的激發光源，可增加其雷射轉換的效率。

然而在偏極光對雷射晶體本身的吸收特性，若是選擇 Nd:YVO<sub>4</sub> 的晶體，a-cut 的晶體特性  $\pi(\text{c-axis}) > \sigma(\text{b-axis})$ ，所以吸收率大小  $\pi(\text{c-axis})$  遠大於  $\sigma(\text{b-axis})$ ，若是 c-cut 的晶體，其晶體特性  $\text{b-axis} = \text{c-axis}$ ，所以偏振光對 c-cut 的晶體吸收率大小是相同的。當雷射晶體為 Nd:YAG 時，因 Nd:YAG 晶體的任意偏振(random polarization)特性，所以偏振光對 Nd:YAG 晶體的

吸收效率都是一樣的。偏振光對晶體的吸收特性，在裝調雷射是很重要的一環，如果將 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體與偏極性為  $\sigma$  偏振的輸入光波，會導致吸收效率較差。



晶體	Nd:YAG	Nd:YVO <sub>4</sub>
晶體結構	Cubic	Zircon Teragonal
晶格常數	12.01Å	a-axis=7.12Å, c-axis= 6.29Å
摻雜濃度	0.9% ~ 1.1%	0.1% ~ 3%
熔點	1970°C	1810 ~ 1940 °C
密度	4.65 g/cm <sup>3</sup>	4.22 g/cm <sup>3</sup>
莫氏硬度	8.5	~5
折射率	1.82 @ 1.06μm	n <sub>0</sub> =1.96, n <sub>e</sub> =2.16 @1.06μm

表 2-1 Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:YAG 之物理特性

晶體	Nd:YAG	Nd:YVO <sub>4</sub>
熱膨脹係數	8.6x10 <sup>-6</sup> /K [100],0-250°C 7.7x10 <sup>-6</sup> /K [110],0-250°C 7.8x10 <sup>-6</sup> /K [111],0-250°C	a-axis = 4.43x10 <sup>-6</sup> /K c-axis = 11.37x10 <sup>-6</sup> /K
熱傳導率	14W/m-K @ 20 °C 10.5W/m-K @ 100°C	c-axis : 5.23W/m-K a-axis : 5.10W/m-K
熱光係數	7.3x10 <sup>-6</sup> /K	8.2x10 <sup>-6</sup> /K for a-axis 3.9x10 <sup>-6</sup> /K for c-axis

表 2-2 Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:YAG 之熱學性質

晶體	Nd:YAG	Nd:YVO <sub>4</sub>
雷射中心波長	946nm, 1064nm	914nm, 1064nm
有效輻射截面	2.8x10 <sup>-19</sup> cm <sup>2</sup> @1064nm 2.8x10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> @946nm	25.0x10 <sup>-19</sup> cm <sup>2</sup> @1064nm
吸收係數	10 cm <sup>-1</sup> @807.5nm, 1 % doping	31.4 cm <sup>-1</sup> (π), 10.5 cm <sup>-1</sup> (σ) @808nm, 1.1 % doping
增益頻寬	0.6nm	0.96nm
幫浦中心波長	807.5nm	808nm
吸收頻寬	1nm @ 807.5nm	15nm(π), 8nm(σ) @ 808nm
自發輻射生命期	230μs	90μs
其他	非極化輻射 熱雙折射性強	平行光軸之極化輻射 具雙折射性

表 2-3 Nd:YVO<sub>4</sub> 與 Nd:YAG 之光學特性

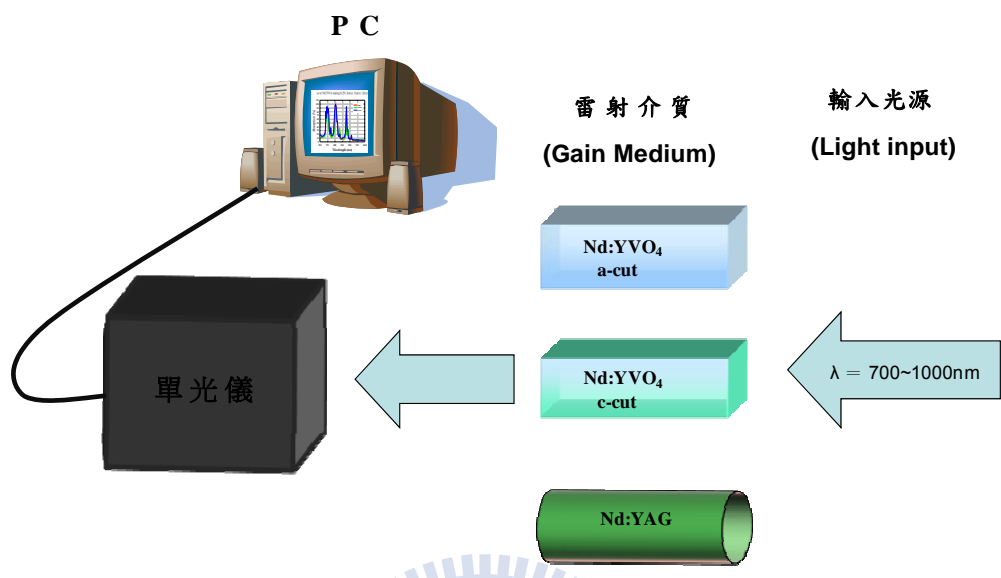


圖 2-1 雷射晶體吸收不加偏振鏡片之實驗架構圖 一

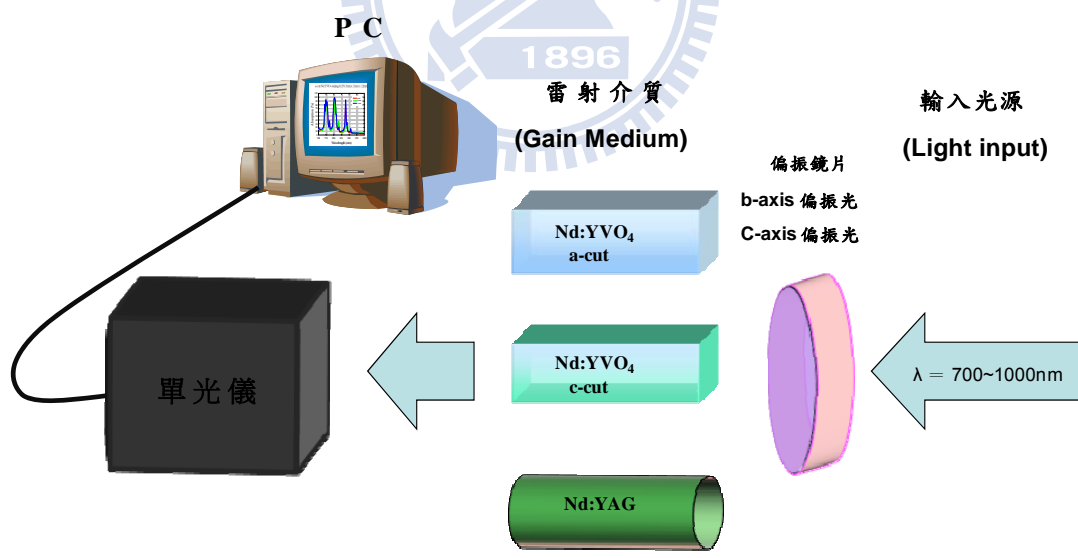


圖 2-2 雷射晶體吸收加偏振鏡片之實驗架構圖 二

a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> doping:0.2% 3mm x 3mm x 12mm

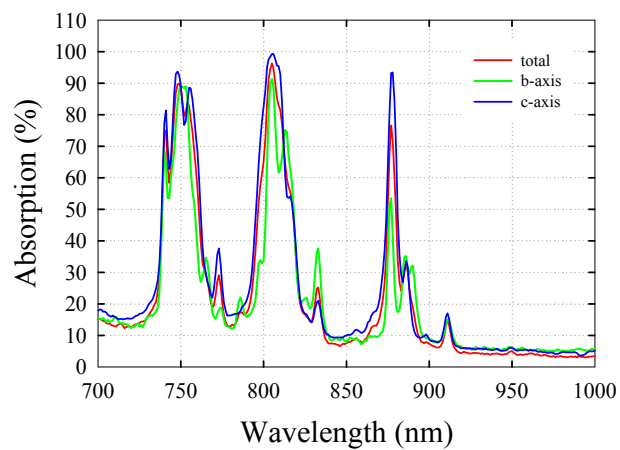
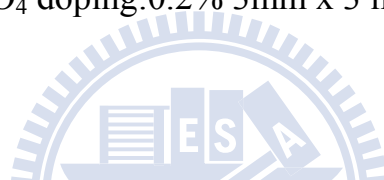


圖 2-3 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> doping:0.2% 3mm x 3 mm x 12mm 吸收光譜圖



c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> doping:0.5% 5mm x 5mm x 10mm

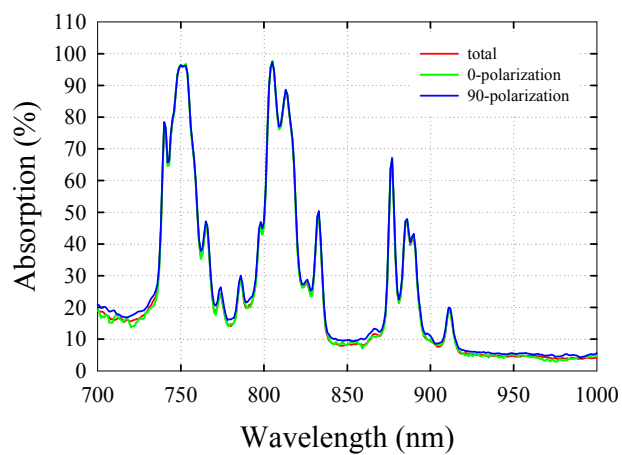


圖 2-4 c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> doping:0.5% 5mm x 5mm x 10mm 吸收光譜圖

Nd:YAG doping:1.1% 5mm x 20mm

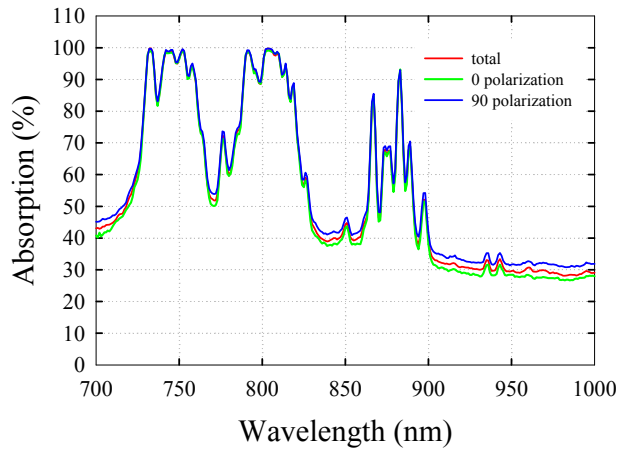


圖 2-5 Nd :YAG doping:0.5% 5mm x 5mm x 20mm 吸收光譜圖





## 2.2 單一鍵合晶體(diffusion-bonded crystal)的介紹

單一鍵合晶體(diffusion-bonded crystal)是把一塊雷射晶體和一塊純的非摻雜同質基底材料通過無膠熱鍵合的技術，實現穩固結合的一種產品。鍵合晶體可有效降低熱效應和提高雷射光束的品質，由於雷射晶體前端為非摻雜的同質晶體，可使內部摻雜的雷射晶體激發所產生的熱，經由前端非摻雜的基質晶體均勻吸收熱的通過，有效地改善了晶體中心和側面的溫度梯度，減小了由晶體端面變形引起的熱透鏡效應，達到雷射晶體均勻的散熱，有利於雷射器穩定及高功率運轉。(在相同激發條件下，以單一鍵合晶體： $\text{YVO}_4\text{-Nd:YVO}_4$  替代傳統 $\text{Nd:YVO}_4$ 晶體，單一鍵合晶體比傳統 $\text{Nd:YVO}_4$ 晶體可改善晶體的熱效應，最大可達23.4%)。

而所謂鍵合晶體技術，也就是一種利用無膠熱鍵合的技術(熱鍵合也稱為擴散鍵合)，是將兩塊晶體或多塊晶體，經過一系列表面處理後，緊密地貼在一起，在室溫下形成光膠，然後再對晶體進行熱處理，在無須其它黏接劑和高壓的情況下形成永久性鍵合，目前美國、日本和英國等國都已經成功地實現了這項技術，完成了如YAG、GGG、 $\text{YVO}_4$ 等許多光學晶體的熱鍵合技術，並將其應用到了各種領域。

以目前所知道適合無膠鍵合的雷射材料，如氧化物(YAG、GGG、藍寶石、尖晶石)、氟化物(YLF、 $\text{LuLiF}$ 、SFAP)、釩酸鈮( $\text{YVO}_4$ 、 $\text{GdVO}_4$ )、

晶體和玻璃。在相異的材料也可以鍵合，如YAG/尖晶石、YAG/藍寶石、YAG/玻璃。而目前最常使用的組合，如YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YAG/YAG、Yb:YAG/YAG等。

在雷射介質晶體的熱鍵合有以下幾種方式：

- a. 單一鍵合晶體：將前端為非摻雜的同質基底材料，與一塊純的雷射晶體通過無膠熱鍵合成的雷射晶體(如圖2-6)。
- b. 雙端鍵合晶體：將雷射晶體的前端與後端為非摻雜的同質基底材料，中間為一塊純的雷射晶體通過無膠熱鍵合而成的雷射晶體(如圖2-7)。
- c. 多層濃度堆疊的鍵合晶體：將不同摻雜濃度的雷射晶體，通過無膠熱鍵合堆疊而成的雷射晶體如圖(2-8)。
- d. 中心摻雜的鍵合晶體：將晶體中心內部為摻雜雷射晶體，與外部包覆非摻雜的基質材料通過無膠熱鍵合而成的鍵合晶體(如圖2-9)。

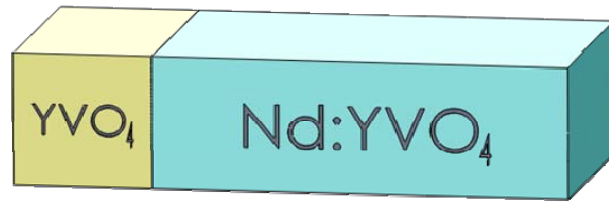


圖 2-6 單端鍵合晶體示意圖



圖 2-7 雙端鍵合晶體示意圖

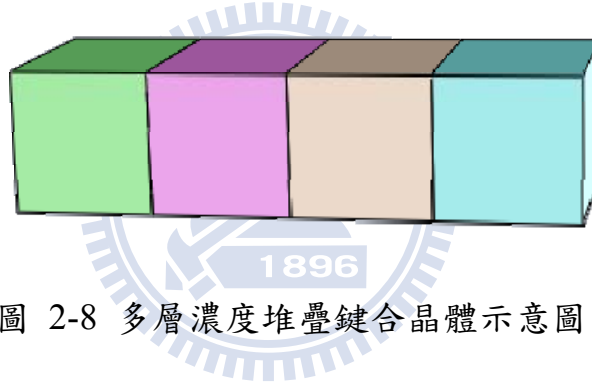


圖 2-8 多層濃度堆疊鍵合晶體示意圖

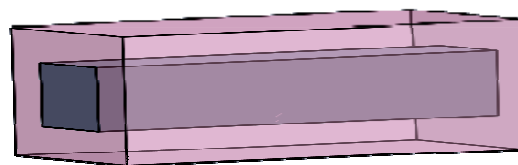


圖 2-9 中心摻雜鍵合晶體

## 2.3 Q-開關的簡介

記憶中，有許多快樂的回憶，也啟發了我們對一些知識的理解~相信大家就在就讀小學時期或許都有被分配到打掃廁所的經驗，其中打掃廁所需要的器具，少不了刷子、清潔劑、水管、還有同學。當廁所沖洗乾淨時，水男孩們的玩樂就此展開，比比看誰可以將水管的水噴的遠，此時將水龍頭的水開最大，提高輸入端水的能量，此現象猶如雷射的連續輸出(CW)；為了讓水更有power的可以噴到同學，利用手的加壓當成調制開關(Q-switch)，並累積水管內的水，此時管內的水大量累積，若以極短的時間將手放開，使水在瞬間全部放射出去，此時水的峰值能量很高，可以噴射到很遠的同學，以此開與關的循環，便可得到一連串的脈衝輸出(pulse wave)，便可噴到更多的同學。此現象猶如Q開關雷射的工作原理:利用外加的光開關，調制雷射共振腔Q值，以提高共振腔儲存的能量，並將累積的所有能量於極短的時間(約只有幾十奈秒)內全部釋放出來，產生高峰值功率的脈衝雷射。

Q 值乃是共振腔的品質因子(quality factor)，定義為：

$$Q = \text{共振腔內儲存之能量} / \text{單位時間內共振腔耗損之能量}$$

當光開關OFF時，光開關以吸收或阻擋的等方式阻止自發輻射光子於共振腔內來回震盪，此時共振腔屬於高耗損的情況，品質因子下降(Low-Q)。光因無法於共振腔內來回共振放大，所以無法產生雷射輸出，而激發光源

輸入增益介質的能量持續累積，使得雷射的增益隨著激發光源的增加而提升，直到增益介質等於共振腔的損耗如圖2-10(a)所示。當雷射增益提高到共振腔損耗相當時，光開關迅速打開以提高品質因子(High-Q)，讓共振腔回復到低損耗的情況下，此時少量的自發輻射經由輸出鏡(output coupler)的反射於共振腔內來回震盪，由於雷射增益遠大於損耗，因此光以極快的速度放大，所累積的能量在幾十奈秒內被全部釋放出來，產生一峰值功率極高的雷射短脈衝如圖2-10 (b)所示。

### 2.3.1 Q 開關的分類

在Q開關雷射中，依其控制的方式可分為2種:

1. 為主動式 Q 開關:開關的重複率可以由外部訊號控制。例如:聲光晶體 (Acousto-Optic Q-switch:簡稱 AO)、光電開關(Electro-Optic:簡稱 EO)、機械式元件…等。Q 開關雷射技術優劣比較如表 2-4 所示。
2. 另一種為被動式 Q 開關:開關的重複率只能由材料的本身特性來決定，而不能由外在條件所決定。早期常以各種染料(dye)做為飽和吸收體(saturable absorber)，但由於染料有毒性，且易分解、變質，需要龐大的循環系統，並且經常需要更換染料，造成使用上的不便。因此，近幾年來染料已被新開發的固態晶體:摻四價鉻的鈮鋁石榴石晶體

(Cr<sup>4+</sup>:YAG)取代。被動式 Q 開關雖不用其他驅動電路，晶體也比較便宜，但是被動式 Q 開關的重複率只能由材料的本身特性來決定，而不能由外在條件來決定，故不利於我們控制開關的重複率，所以在實驗中，我們需要控制開關不同重覆率，觀察晶體熱效應的現象，所以在本實驗我們使用主動式聲光晶體 Q 開關。

### 2.3.2 主動式 Q 開關動作機制

主動式聲光 Q 開關裝置是以射頻(RF)輸入至一穿透性的光學材料，當 RF 通過時使光學材料產生變化，使入射光線產生繞射。此元件的行為就像是一個光學的相位光柵，其原理為在材料側面加上一壓電元件，利用 RF 訊號來控制 A-O 晶體的動作，因其 A-O 晶體本身受到外力時，其光學的折射率會跟著其外來訊號而改變，所以我們將擾動訊號輸入壓電材料，讓電能轉為壓力波傳入 A-O 晶體，晶體隨著此訊號而擾動，其內部的原子密度成疏、密之週期性變化。週期性變化的折射率就像縱波一般，又因光速約為聲速的  $10^5$  倍，所以當光進入晶體時，A-O 的效果對光來說就像是個光柵。當光進入光柵，大部分的光即會被繞射而偏離原本的方向如圖(2-11)所示，如同是布拉格散色(Bragg Scattering)的效果。

### 2.3.3 被動式 Q 開關動作機制

被動式 Q 開關又稱飽和吸收體，其中又以  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  更是被廣泛的使用，因其為固態晶體，不單是堅固耐用且其臨界損壞閾值更高達  $500 \text{ MW/cm}^2$  以上。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  之所以能當作被動式 Q 開關的關鍵為他的吸收波段寬(900~1150nm)、基態有效吸收面積小，及基態回復時間短(ns)。其原理為當入射光大部分被飽和吸收體吸收時，飽和吸收體具透射率較低，對雷射系統而言，此時飽和吸收體如同一個關閉的光開關，如圖 2-12(a)。而當入射光很強時，基態電子大量被激發，即使激發態電子經過生命週期(Life time)返回基態能階，因入射光很強基態電子立即再度被激發致激發態能階，所以大量電子都躍遷至激發態後，飽和吸收體便無法在吸收入射光，此時飽和吸收體具透射率很高，對雷射系統而言，飽和吸收體如同一個 ON 的光開關，如圖 2-12(b)。所以控制入射光強弱不同而改變穿透率的特性，故可用來調制雷射腔內的 Q 值，便可產生一連串的雷射脈衝光。

Q 開關技術	優點	缺點
機械式Q開關 Mechanical Q-switch	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 最簡單直接的Q開關</li> <li>◆ 成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 開關速度緩慢易產生多重脈衝</li> <li>◆ 雷射可靠性與穩定性差</li> <li>◆ 馬達軸承壽命短需經常維修</li> </ul>
電光式Q開關 Electro-optical Q-switch	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 反應速度最快效率最高的光開關</li> <li>◆ 可精確且穩定地控制脈衝的重複頻率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 驅動電路與Pockel cell價格昂貴</li> <li>◆ 雷射系統的體積龐大</li> <li>◆ Pockel cell 損壞值較低，不適合高功率的Q開關雷射</li> </ul>
聲光式Q開關 Acousto-optic Q-switch	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 吸收體的透明度高光插入損耗較低</li> <li>◆ 關閉調變信號即可轉換成連續波輸出</li> <li>◆ 射頻驅動電路較為簡單</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 開關的啓閉速度較慢只適用低增益的Q開關雷射</li> </ul>
被動式Q開關 Passively Q-switch	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 成本低廉</li> <li>◆ 使用簡單</li> <li>◆ 體積小</li> <li>◆ 光損壞閾值高適合高功率Q開關雷射</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 無法自由控制脈衝重複頻率</li> <li>◆ 時序擾動問題嚴重</li> </ul>

表 2-4 Q 開關雷射技術優劣比較



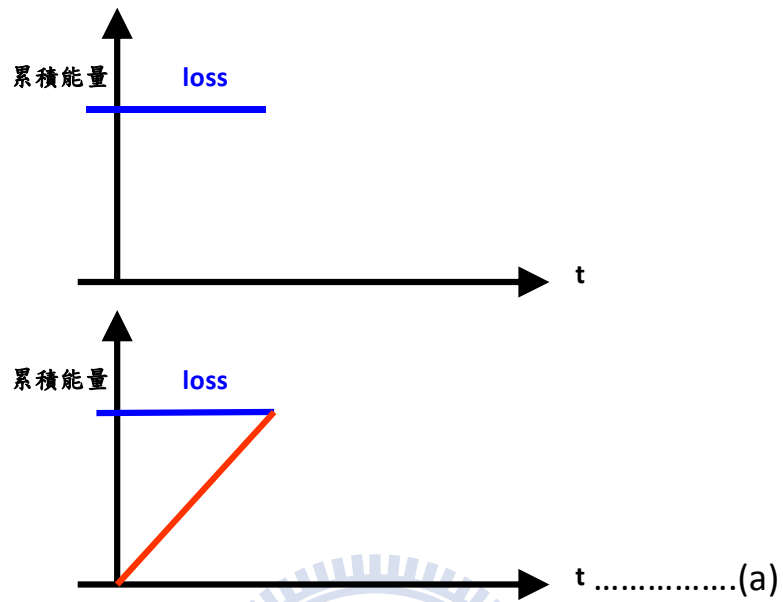


圖 2-10 (a) Q-開關共振腔內累積能量示意圖

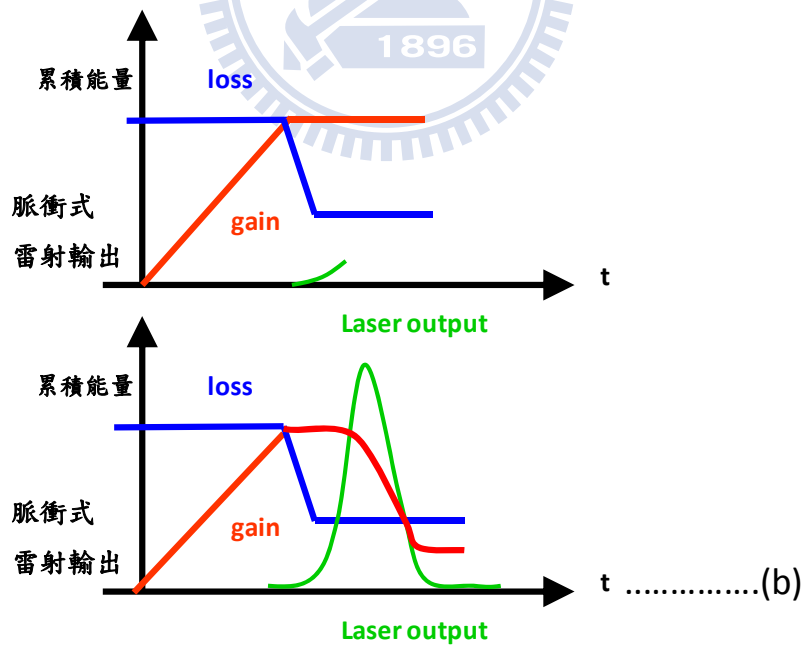


圖 2-10 (b) Q-開關產生脈衝光輸出示意圖

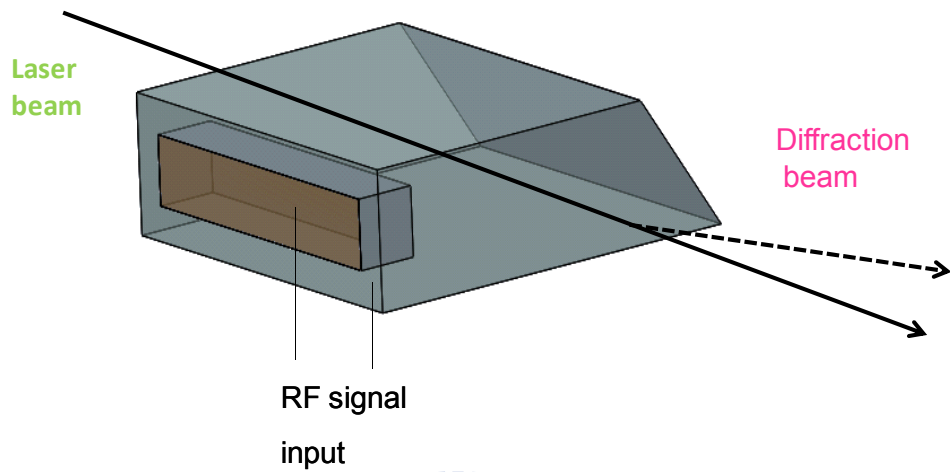


圖 2-11 主動式聲光 Q 開關動作示意圖

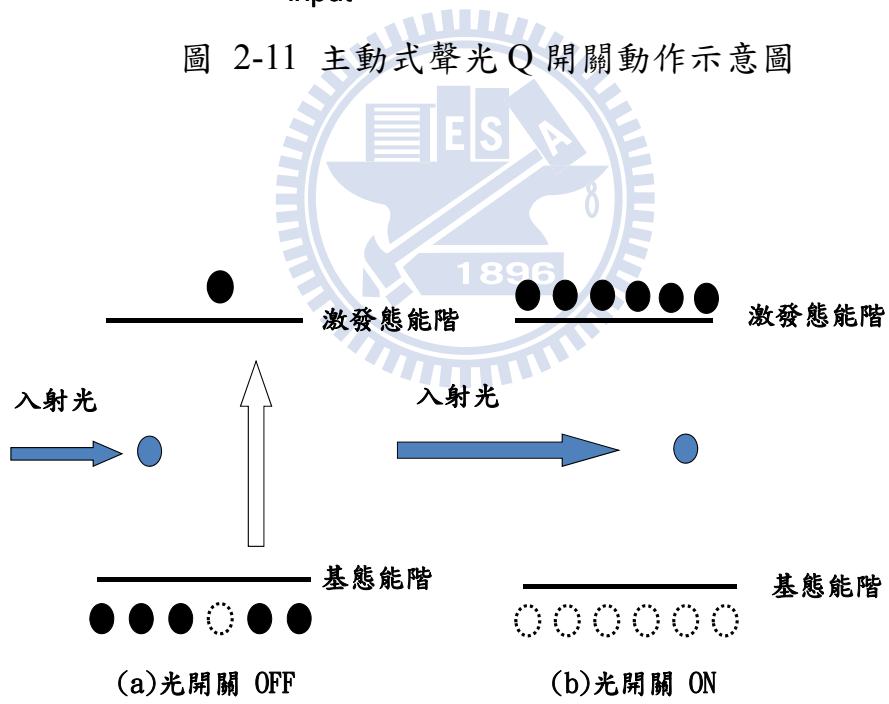


圖 2-12 被動式 Q 開關以  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  飽和吸收體為例之操作原理(a)光開關 OFF (b)光開關 ON

## 第三章 連續波雷射系統實驗

### 3.1 介紹

端面激發固態二極體雷射已被廣泛的採用，由於它具有高效率、結構緊密和可靠的操作性能，相對於側面激發固態二極體雷射的比較，端面激發固態二極體雷射擁有較小的雷射光腰與高密度的激發功率。在端面激發固態二極體雷射的結構中，由於雷射晶體內部不同質的加熱所造成(thermal lensing)熱效應，已成為非常嚴重的問題。雷射晶體端面吸收二極體的激發光源，激發光源引導出熱在雷射晶體中心的改變，使雷射晶體溫度不一致的分佈，可以一個拋物線對數函數來表示，由此可知，雷射晶體折射率依靠著溫度的變化和端面膨脹效應的作用，造成雷射晶體如同一個熱透鏡效應；在高激發功率操作下，雷射晶體端面溫度不一致的分佈，溫度梯度形成了應力，當應力大於雷射晶體可承受的極限值，雷射晶體造成(thermal fracture)熱破壞的損壞，因此高激發功率存在了 thermal fracture 的極限值，也限制了較高平均功率的輸出。端面激發固態二極體雷射的性能包含了：雷射的穩定性、最大可完成的平均功率、效率和熱效應影響所造成雷射光束品質的下降，都是值得注目的，因此減少熱效應將能達到雷射性能的提升，設計一個理想的端面激發固態二極體雷射腔，將決定了熱透鏡的聚焦長度。

在端面激發固態二極體雷射晶體發現許多的方法，是可以改善熱透鏡的聚焦長度，過去幾年，在端面激發固態二極體雷射晶體中，使用鍵合晶體已經被視為有效的方法，它利用晶體端面不可吸收非參雜的部分，使雷射晶體達到均勻的散熱，提高雷射性能。隨著溫度與應力的減小，使縱向溫度變化一致，將可提高熱破壞的極限值與較高平均功率的輸出。

因此，在本章節的實驗中，我們以一個連續輸出的端面激發固態二極體雷射系統去做比較與研究，我們以傳統晶體 Nd:YVO<sub>4</sub> 與單一鍵合晶體 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> 兩種型式的雷射晶體，分別改變其腔長的研究，比較在穩定的腔長下，傳統雷射晶體與鍵合晶體對於熱效應的改善效率，並將腔長拉長，觀察兩種雷射晶體對最大平均輸出功率的變化。實驗結果顯示，由於鍵合晶體減少了熱效應，分別在不同腔長中，以最大平均輸出功率的比較，鍵合晶體比傳統晶體分別增加了 42%、74% 和 99%，隨著腔長的增加，thermal lensing 造成雷射操作在不穩定區域現象更提早出現，因此鍵合晶體對於腔長愈長，比起傳統的晶體熱效應的改善更明顯，參考表 3-1 所示。

### 3.2 CW(Continuous Wave)連續波實驗架構

實驗架構如圖 3-1 所示，端面激發固態二極體雷射晶體是使用標準 CW Nd:YVO<sub>4</sub> 的雷射系統，雷射共振腔內包含了：一個前腔鏡、增益介

質、輸出耦合鏡。增益介質使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 的雷射晶體，它具有吸收係數高、較寬的吸收帶寬與高激發效率…等優點。我們實驗中準備了兩種型式的雷射晶體來做比較，一個是傳統的晶體，晶體切刻方向:a-cut，摻雜濃度為 0.25% at Nd:YVO<sub>4</sub>，尺寸:3x3x9 mm<sup>3</sup>，另一個為尺寸 4 x 4 x 12 mm<sup>3</sup> YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> 的晶體，前端非摻雜的晶體結構 YVO<sub>4</sub>，利用分子擴散熱結合的技術，與一個摻雜濃度為 0.3% at Nd:YVO<sub>4</sub> 雷射晶體結合而成的鍵合晶體，兩種型式雷射晶體的雙端，分別鍍上 808nm 與 1064nm 的阻抗反射膜，雷射晶體使用薄金箔的銅片包覆，增加熱傳導的效率，然後固定於銅製散熱座內，將晶體所產生的熱藉由銅座傳導至鋁質底座自然冷卻散熱。激發光源使用 808nm 光纖耦合式的雷射二極體，最大輸出功率 27 W，中心半徑 400μm、數值孔徑 0.16 的光纖傳輸。在雷射晶體前端放置一個由曲率半鏡 R=5 mm 凸面與平面(CX/PL)結合的前腔鏡(front mirror)，CX 端鍍上 808nm 的阻抗反射膜，PL 端鍍上 1064nm 高反射和 808nm 高穿透膜，藉由 CX 端使激發光束能達到一致性的耦合放大匯聚到雷射晶體端面，經過活性晶體轉換出 1064 nm 波長的雷射光子，使用 PR:80% 的部分反射平面輸出鏡(output coupled)，與前腔鏡形成一個光學共腔系統，光子於共振光腔內，經由多次往返於活性介質，誘發介質內處於激發狀態的粒子，使光子來回共振放大後，由

輸出鏡輸出波長 1064 nm 的 CW 雷射光。在端面激發固態二極體雷射 CW 連續波輸出的系統，我們改變 output coupled 與 front mirror 分開的距離為腔長距離，分別設定 200mm、300mm 和 400mm 三種腔長，以傳統晶體與鍵合晶體的輸出功率與輸入功率去做比較(如圖 3-2、3-3、3-4)，可由我們實驗數據圖的比較可看出，因熱效應會造成雷射操作在不穩定的區域，鍵合晶體在最大輸入功率的臨界值(Critical input power)、最大輸出功率的值(Critical output power)、斜效率的曲線都比傳統晶體明顯增加。



### 3.3 CW(Continuous Wave)連續波實驗架構光學元件之規格

i. Diode Type : Fiber-coupled 808nm Laser diode

由 Coherent 公司所生產，輸出光波長 808nm，其型號為:FAP-81-16C-800B，後端 800B 所標示意思為激發光束輸出的大小 (code size) =800 $\mu$ m，所以光纖線 code size 的選擇，須選擇以 800 $\mu$ m 大小的光纖線。

ii. 耦合光纖線 : Armo-800 $\mu$ m-2m

由 Coherent 公司所生產的硬質金屬保護殼光纖耦合線，其標示型號

為:Armo-800 $\mu$ m-2m, 光纖線長度 2 米, code size =800 $\mu$ m 的光纖耦合線。

- iii. 前腔鏡(front mirror) : CX(凸鏡)/PL(平鏡), AOI= 0°, Diameter: 10mm x 2.3mm, CX=AR@808 nm (R < 0.2%), PL=HR@1064 nm (R > 99.8%)&HT@808nm (T > 95%)。
- iv. Conventional Nd:YVO<sub>4</sub> : a-cut, Doping : 0.25%, W x H x L : 3x3x9 mm<sup>3</sup>, S1/S2:AR/AR@1064nm+808nm。
- v. diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub> : a-cut, Doping:0.3%, W x H x L : 4x4x12 mm<sup>3</sup>, S1/S2:AR/AR@1064nm+808nm。
- vi. 輸出鏡(output coupled): PL(平鏡)/PL(平鏡), Diameter:0.5" x 6 mm  
PL1:HR@808nm & PR80%@1064nm, PL2:AR@1064nm。

### 3.4 CW(Continuous Wave)連續波實驗結果與分析

如圖 3-2 所示, 傳統晶體輸入功率增加到 21W 時, 雷射共振腔內所產生的熱效應嚴重, 造成共振腔不穩定, 當輸入功率超過 21W, 輸出功率由於熱效應影響開始下降, 當輸出功率下降時, 所對應的輸入功率值定義為輸入功率臨界點(Critical input power)。我們以輸入功率臨界點來分析連續波實驗數據, 並由分析表 3-1 輔助說明, 單一鍵合晶體遠比傳統晶體可使

用較大的輸入功率區域。

由圖 3-2 可看出，腔長  $L=200$  mm 單一鍵合晶體完全不會有功率衰減現象，輸入功率與輸出功率的曲線呈現一個上升的拋物線曲線；傳統的晶體在輸入功率 21W 時，因熱透鏡效應造成雷射操作在不穩定區域，導致最大輸出功率受到限制，當輸入功率超過 21W，輸出功率開始下降，因此傳統晶體的輸入功率臨界點被限制在 21W，而所對應下降的輸出功率點即為輸出功率臨界值(Critical output power)，鍵合晶體比傳統晶體最大平均輸出功率可增加 42%，斜效率的比值大約增加了 7%。在圖 3-3 傳統晶體與鍵合晶體的輸入功率與輸出功率曲線所示，腔長  $L=300$  mm，圖中可發現鍵合晶體與傳統晶體的斜效率，分別為 0.35 與 0.32 大致相同。輸入功率臨界值分別是 21W 與 15.8W，單一鍵合晶體輸入功率臨界值也出現下降趨勢，若以兩者最大平均輸出功率的比較，單一鍵合晶體比傳統的晶體效率增加 74%。如圖 3-4 所示，當共振腔長拉長到  $L=400$  mm，熱透鏡效應更提早反映了雷射操作在不穩定區域的產生，單一鍵合晶體與傳統晶體輸入功率的臨界值分別只有 9.56W 與 8.5W，同時也導致輸出功率下降許多，分別只有 2.69W 與 1.35W，由於熱效應的減少，單一鍵合晶體還是比傳統晶體增加了 99%。因共振腔長太長，造成共振腔的繞射損失會比較明顯，所以相對於比較短的腔長會比較不穩定，輸出功率較無法預測；由實驗結果的斜效



率觀察出，當腔長  $L=200\text{mm}$  與  $L=300\text{mm}$  時，傳統晶體與鍵合晶體斜效率比值都相差不多，大約只增加 6%、7%，當腔長  $L=400\text{mm}$  傳統晶體與鍵合晶體斜效率比值高達 66%，因此相對於短腔長的雷射，輸出功率較無法預測。

由表 3-1 可看出，單一鍵合晶體的腔長與輸入功率臨界值的關係:當腔長為 200mm、300mm、400mm 時，與輸入功率臨界值分別為  $\max(27\text{W})$ 、21W、9.56W，隨著腔長的增加輸入功率臨界值下降；傳統晶體的腔長與輸入功率臨界值的關係:分別為 21W、15.8W、8.5W，也隨著腔長的增加輸入功率臨界值下降。同樣在輸入功率臨界值下降的功率點，所對應的輸出功率點即為輸出功率臨界值(Critical output power)，我們可由實驗數據發現腔長與輸出功率臨界值關係，也是隨著腔長增加輸出功率臨界值會下降，由此可知共振腔長愈長，雷射共振效率愈差，腔長與輸入功率臨界值和輸出功率臨界值呈反比的關係。

### 3-5 結論

在連續輸出端面激發固態二極體雷射系統，對於傳統晶體與鍵合晶體的比較與研究中，實驗結果發現，在增加腔長的改變下，單一鍵合晶體輸

入功率臨界值和輸出功率臨界的比值，遠遠大於傳統的晶體，由此可證實 CW 端面激發固態二極體雷射，使用單一鍵合晶體可有效的改善雷射晶體因熱效應所造成的熱透鏡現象，可提高雷射輸出的效能。在實驗結果的說明，共振腔長愈長，造成雷射共振效率愈差，繞射的損失較為明顯，腔長與輸入功率臨界值和輸出功率臨界呈反比的關係。



	diffusion-bonded Nd:YVO <sub>4</sub>	conventional Nd:YVO <sub>4</sub>	比值
腔長 L=200 mm	Critical input power : max (27W)	Critical input power : 21W	> 29%
	Critical output power : 10.5 W	Critical output power : 7.4 W	42%
	斜效率:0.41	斜效率: 0.38	7%
腔長 L=300 mm	Critical input power : 21 W	Critical input power : 15.8W	33%
	Critical output power : 8 W	Critical output power : 4.6 W	74%
	斜效率:0.35	斜效率:0.33	6%
腔長 L=400 mm	Critical input power : 9.56 W	Critical input power : 8.5W	13%
	Critical output power : 2.69 W	Critical output power : 1.35 W	99%
	斜效率:0.37	斜效率: 0.23	66%

表 3-1 CW 連續波實驗數據分析比較表

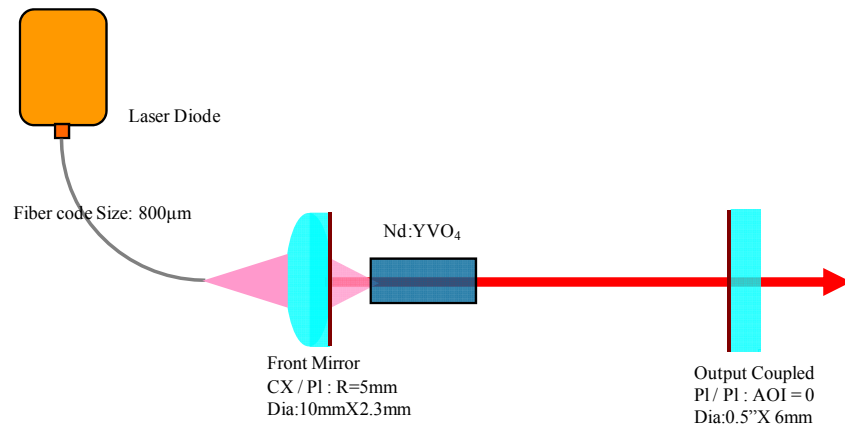


圖 3-1 CW(Continuous Wave) 連續波實驗架構圖

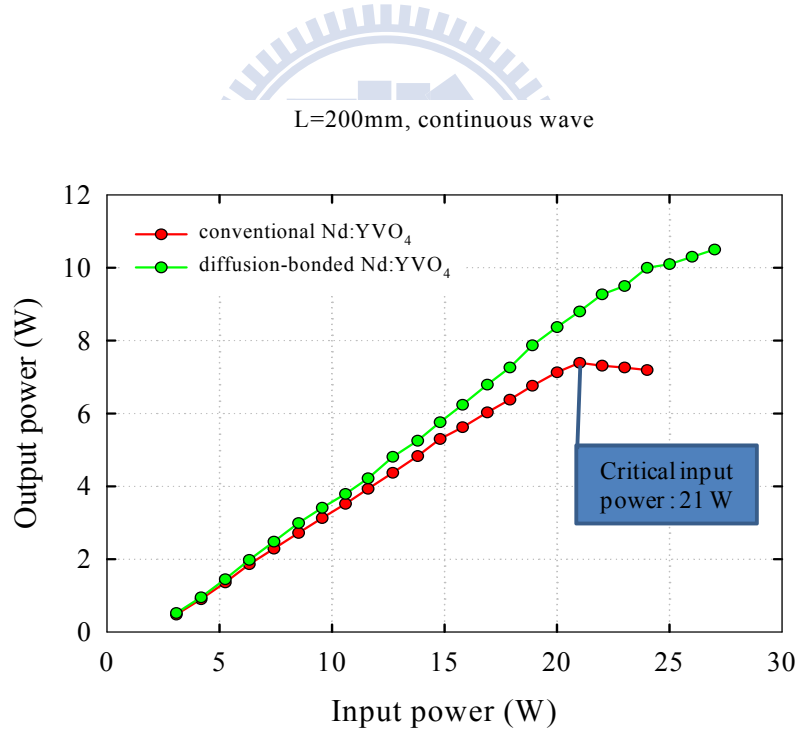


圖 3-2 連續波腔長 L= 200mm 輸入功率與輸出功率圖

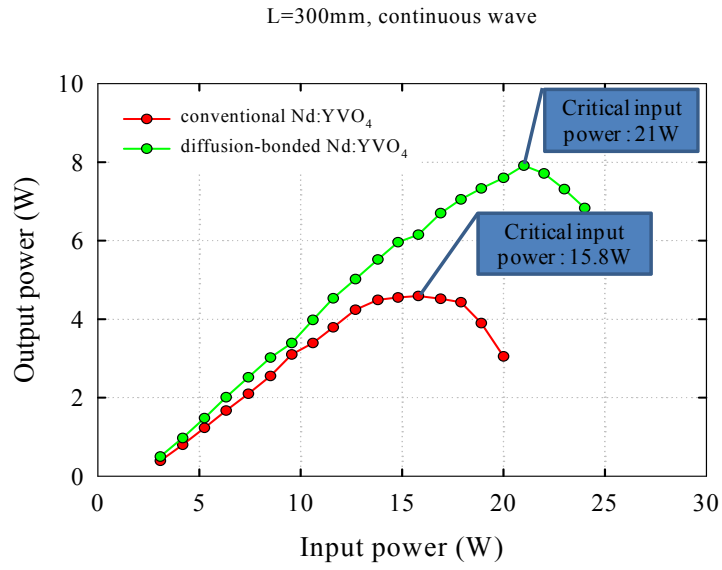


圖 3-3 連續波腔長 L= 300mm 輸入功率與輸出功率圖

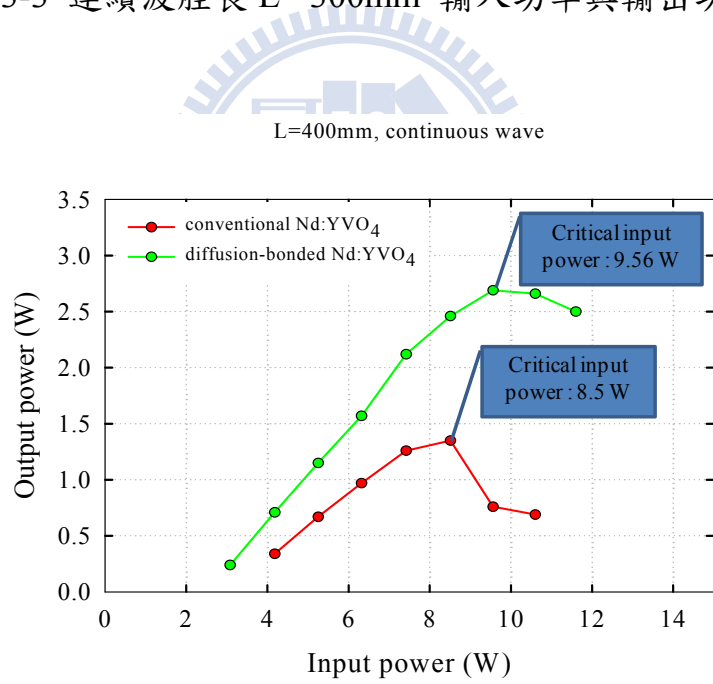


圖 3-4 連續波腔長 L= 400mm 輸入功率與輸出功率圖

## 第四章 Q-開關脈衝波雷射系統實驗


### 4.1 介紹

一般雷射的輸出為連續波(CW Laser)型式，若想要提高其輸出功率，得使用更強的激發光源與雷射晶體的組合，提高雷射轉換的輸出功率，這樣的方法不但成本提高，而且在提高輸出功率轉換的同時，雷射晶體對激發光轉換所產生熱效應的問題，是需要去克服的難題，會有製作上的難度，因此，產生高能量短脈衝的 Q 開關雷射因應而生。Q 開關雷射利用對雷射共振腔的品質因子 Q 做週期性的改變，使雷射形成一個高峰值功率的脈衝輸出；近年來因應許多技術發展的需求，Q 開關雷射應用的非常廣泛，如工業上許多精密的加工、醫學上雷射脈衝光的應用、量測技術等等，都需要高峰值功率的脈衝雷射。由於主動式聲光 Q 開關(Acousto-optic)具有：本身吸收體透明性高、光的插入損耗低、開關重覆率可由調變信號自由控制、關閉調變信號即可轉換成 CW 連續波輸出、射頻驅動電路較為簡單，且控制非常方便的優點；因此在本實驗中，我們以端面激發固態二極體雷射系統為實驗的架構，加入開關重覆率可由調變信號自由控制的聲光 Q 開關，操作在不同重複率，以 10~50 kHz 的操作頻率，分別使用傳統晶體與鍵合晶體並改變不同的腔長，紀錄輸入功率與輸出功率的曲線圖，分別比較傳

統晶體與鍵合晶體對熱效應改善的效能；並觀察操作在不同重複率下輸出功率的變化。

實驗結果顯示，鍵合晶體與傳統晶體以最大平均輸出功率的比較，在不同共振腔長中，不同操作頻率的脈衝輸出，鍵合晶體最大平均輸出功率都比傳統晶體還要高，由此可見鍵合晶體有效減少了熱效應的產生，提高了輸出功率最大值與輸入功率的臨界值。在實驗中我們發現，在穩定的雷射共振腔下，頻率增加，最大平均功率的輸出也隨著增加。

#### 4.2 Q-開關脈衝波實驗架構



實驗架構如圖 4-1 所示，我們以脈衝波輸出的端面激發固態二極體雷射系統為實驗的架構，端面激發固態二極體雷射晶體是使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 的雷射晶體，基本上雷射共振腔內包含的光學元件與第三章相同，只多增加了一個主動式聲光調制 Q 開關，放置雷射共振腔內，增益介質與輸出耦合鏡之間，以外部訊號控制光開關 ON/OFF，藉由聲光 Q 開關的控制 OFF，使光子對活性晶體內不斷累積能量，當聲光 Q 開關在極短時間內 ON，將儲存的光子能量釋放出來，經由輸出鏡透射出雷射光，即可獲得峰值極高的雷射脈衝輸出。我們針對聲光 Q 開關不同頻率的控制(10kHz~50kHz)，改變共振腔長 (1) L=200 mm (2) L=300 mm (3) L=400 mm，分別記錄傳統晶

體與鍵合晶體輸入功率與輸出功率的比較圖表，如圖 4-2、4-3、4-4。

#### 4.3 Q-開關脈衝波實驗架構光學元件之規格

- i. Diode Type : FAP-81-16C-800B
- ii. 光纖耦合線: Armo-800 $\mu$ m-2m
- iii. 前腔鏡(front mirror) : CX(凸鏡)/PL(平鏡) , AOI= 0° , Diameter:10mm x 2.3mm , CX=AR@808 nm (R < 0.2%) , PL=HR@1064 nm (R > 99.8%)&HT@808nm (T > 95%) 。
- iv. Conventional Nd:YVO<sub>4</sub> : a-cut , Doping:0.25% , W x H x L:3x3x9 mm<sup>3</sup> , S1/S2:AR/AR@1064nm+808nm 。
- v. diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub> : a-cut , Doping:0.3% , W x H x L : 4x4x12 mm<sup>3</sup> , S1/S2:AR/AR@1064nm+808nm 。
- vi. Q-Switch : NEOS 33041-25-2-I  
由 NEOS 公司所生產，聲光頻率(Acoustic Frequency) : 41MHz，驅動功率(Driver Power) : 25W 。
- vii. Output Coupled Lens: PL1(平鏡)/PL2(平鏡) , Diameter:0.5" x 6 mm  
PL1:HR@808nm & PR80%@1064nm , PL2:AR@1064 nm 。



#### 4.4 Q-開關脈衝波實驗結果與分析

一個穩定的共振腔輸入功率與輸出功率的功率曲線圖，會呈現上升的拋物線曲線，但是共振腔內由於熱效應會導致最大輸入功率臨界值受到限制，拋物線曲線在此臨界點開始下降，所對應的輸出功率便開始下降，所以熱效應同時也導致輸出功率的下降，此下降的功率點即為輸出功率的臨界值。由圖 4-2、4-3、4-4 單一鍵合晶體與傳統晶體的實驗數據比較圖可看出，由於熱效應導致最大輸入功率臨界值受到限制，單一鍵合晶體最大輸入功率臨界值都比傳統晶體增加，其增加的比值，最大比值與最小比值的區間分別為：腔長  $L=200$  mm 時 10kHz~50kHz 增加了 14%~32%，腔長  $L=300$  mm 時 10kHz~50kHz 增加了 6%~21%，腔長  $L=400$  mm 時 10kHz~50kHz 增加了 14%~29%，參考表 4-1、4-2、4-3。

因為熱效應同時也導致輸出功率的下降，此下降的功率點即為輸出功率的臨界值，所以熱效應同時也導致輸出功率的下降；若以輸出功率臨界值做比較，單一鍵合晶體輸出功率臨界值也會比傳統晶體增加，其增加的比值，最大比值與最小比值區間分別為：腔長  $L=200$  mm 時 10kHz~50kHz 增加了 21%~41%，腔長  $L=300$  mm 時 10kHz~50kHz 增加了 31%~49%，腔長  $L=400$  mm 時 10kHz~50kHz 增加了 113%~168%，參考表 4-1、4-2、4-3。由實驗結果顯示，在 Q 開關雷射改善熱效應的能力，單一鍵合晶體遠比傳

統晶體顯著，與第三章 CW 的實驗結果一致，單一鍵合晶體輸入功率臨界值和輸出功率臨界值的比值，遠遠大於傳統的晶體，對熱效應的改善，鍵合晶體遠比傳統晶體增加許多。

由於主動式聲光 Q 開關雷射重複率可自由的調整，在腔長與重複率的關係中，由表 4-4 我們發現，穩定的共振腔中，在相同的輸入功率下，腔長  $L=200\text{mm}$  與  $L=300\text{mm}$ ，若頻率增加，輸出功率隨著增加；因為當重複率提高時，脈衝的損失會減少，所以當頻率增加，輸出的平均功率隨著變大。但由於共振腔長太長，所造成共振腔的繞射損失會比較明顯，所以相對比較短腔體，會比較不穩定，其輸出功率較無法預測；由表 4-4 可看出， $L=400\text{mm}$  以相同的輸入功率，頻率的增加，輸出功率就較無法觀察出其趨勢。

#### 4.5 結論

在端面激發固態二極體雷射系統中，加入主動式聲光 Q 開關，操作不同的重覆頻率，以脈衝波的輸出，去比較傳統晶體與鍵合晶體的研究，我們發現腔長的改變與操作不同的頻率，鍵合晶體始終對熱效應的改善遠大於傳統的晶體，由此可證明鍵合晶體的確是解決熱效應的好方法。雖然單一鍵合晶體在不同腔長中都實現了改善熱效應的結果，但我們由表 4-4 可

看出， $L=400\text{mm}$  由於共振腔長太長，所造成共振腔的繞射損失會比較明顯，所以相對腔長  $L=200\text{mm}$  與  $L=300\text{mm}$ ，會比較不穩定，其輸出功率較無法預測出其趨勢。



腔長	頻率	diffusion-bonded Nd:YVO <sub>4</sub>	conventional Nd:YVO <sub>4</sub>	比值
L = 200 mm	10 KHZ	Critical input power : 25 W	Critical input power : 18.9 W	32%
		Critical output power : 3.86 W	Critical output power : 2.74 W	41%
	20 KHZ	Critical input power : 24 W	Critical input power : 20 W	20%
		Critical output power : 5.64 W	Critical output power : 4.28 W	32%
	30 KHZ	Critical input power : 24 W	Critical input power : 21 W	14%
		Critical output power : 6.26 W	Critical output power : 5.16 W	21%
	40 KHZ	Critical input power : 24 W	Critical input power : 20 W	20%
		Critical output power : 6.7 W	Critical output power : 5.16 W	30%
50 KHZ	Critical input power : 25 W	Critical input power : 20 W	25%	
	Critical output power : 7.05 W	Critical output power : 5.26 W	34%	

表 4-1 脈衝波輸出 L=200mm,PRF=10~50kHz 實驗數據分析比較表

腔長	頻率	diffusion-bonded Nd:YVO <sub>4</sub>	conventional Nd:YVO <sub>4</sub>	比值
L = 300 mm	10 KHZ	Critical input power : 16.9 W	Critical input power : 14.8 W	14%
		Critical output power : 3.81 W	Critical output power : 2.85 W	34%
	20 KHZ	Critical input power : 16.9 W	Critical input power : 15.8 W	6%
		Critical output power : 4.33 W	Critical output power : 3.3 W	31%
	30 KHZ	Critical input power : 17.9 W	Critical input power : 14.8 W	21%
		Critical output power : 5.03 W	Critical output power : 3.74 W	34%
	40 KHZ	Critical input power : 16.9 W	Critical input power : 15.8 W	6%
		Critical output power : 5.24 W	Critical output power : 3.75 W	40%
50 KHZ	Critical input power : 17.9 W	Critical input power : 15.8 W	13%	
	Critical output power : 5.83 W	Critical output power : 3.91 W	49%	

表 4-2 脈衝波輸出 L=300mm,PRF=10~50kHz 實驗數據分析比較表

腔長	頻率	diffusion-bonded Nd:YVO4	conventional Nd:YVO4	比值
L = 400 mm	10 KHZ	Critical input power : 8.51 W	Critical input power : 7.42 W	15%
		Critical output power : 1.77 W	Critical output power : 0.83 W	113%
	20 KHZ	Critical input power : 9.56 W	Critical input power : 7.42 W	29%
		Critical output power : 1.72 W	Critical output power : 0.79 W	117%
	30 KHZ	Critical input power : 9.56 W	Critical input power : 7.42 W	29%
		Critical output power : 1.67 W	Critical output power : 0.72 W	132%
	40 KHZ	Critical input power : 8.51 W	Critical input power : 7.42 W	14%
		Critical output power : 1.6 W	Critical output power : 0.63 W	154%
	50 KHZ	Critical input power : 8.51 W	Critical input power : 7.42 W	15%
		Critical output power : 1.53 W	Critical output power : 0.57 W	168%

表 4-3 脈衝波輸出 L=400mm,PRF=10~50kHz 實驗數據分析比較表

腔長 L: 200 mm	input power : 15.8 W	10 KHZ	20 KHZ	30 KHZ	40 KHZ	50 KHZ
	diffusion-bonded Nd:YVO <sub>4</sub> output power	2.78 W	4.42 W	5.2 W	5.42 W	5.56 W
conventional Nd:YVO <sub>4</sub> output power	2.52 W	3.79 W	4.75 W	4.86 W	4.92 W	
腔長 L: 300 mm	input power : 15.8 W	10 KHZ	20 KHZ	30 KHZ	40 KHZ	50 KHZ
	diffusion-bonded Nd:YVO <sub>4</sub> output power	3.81 W	4.15 W	4.77 W	5.05 W	5.83 W
conventional Nd:YVO <sub>4</sub> output power	2.74 W	3.3 W	3.68 W	3.75 W	3.91 W	
腔長 L: 400 mm	input power : 6.32 W	10 KHZ	20 KHZ	30 KHZ	40 KHZ	50 KHZ
	diffusion-bonded Nd:YVO <sub>4</sub> output power	1.24 W	1.2 W	1.1 W	1.16 W	1.07 W
conventional Nd:YVO <sub>4</sub> output power	0.64 W	0.59 W	0.5 W	0.45 W	0.4 W	

表 4-4 脈衝波輸出,固定輸入功率,以不同頻率之輸出功率分析比較表

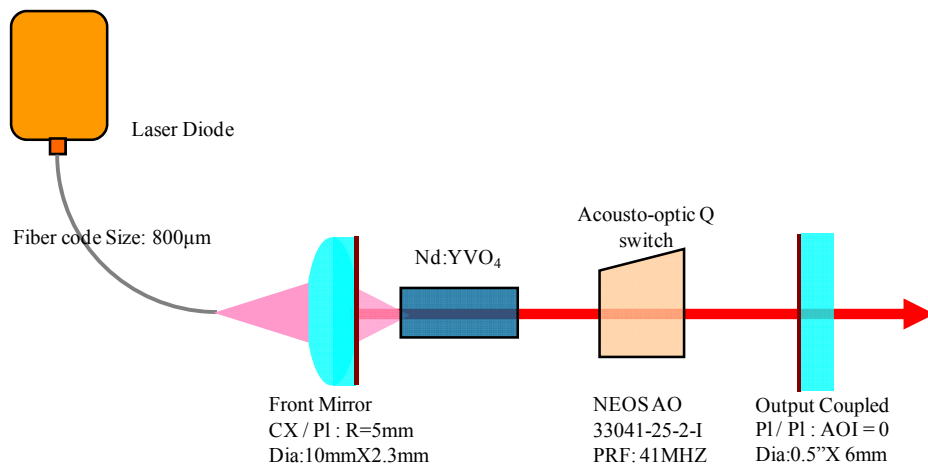


圖 4-1 Q 開關脈衝波實驗架構圖



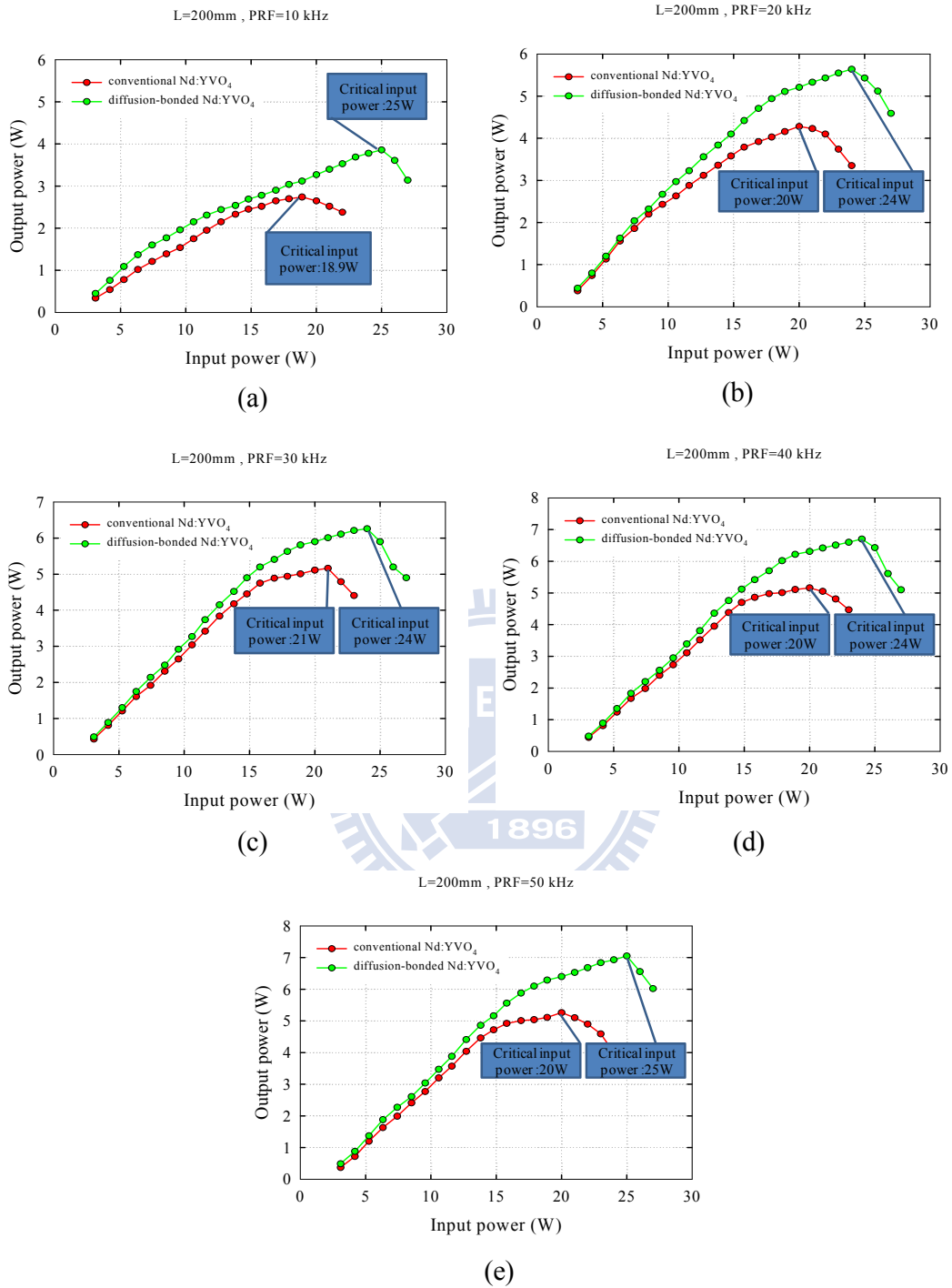


圖 4-2 腔長  $L=200\text{ mm}$ ，頻率 (a)10 kHz (b)20 kHz (c)30 kHz (d)40 kHz (e)50 kHz 輸入功率與輸出功率比較圖

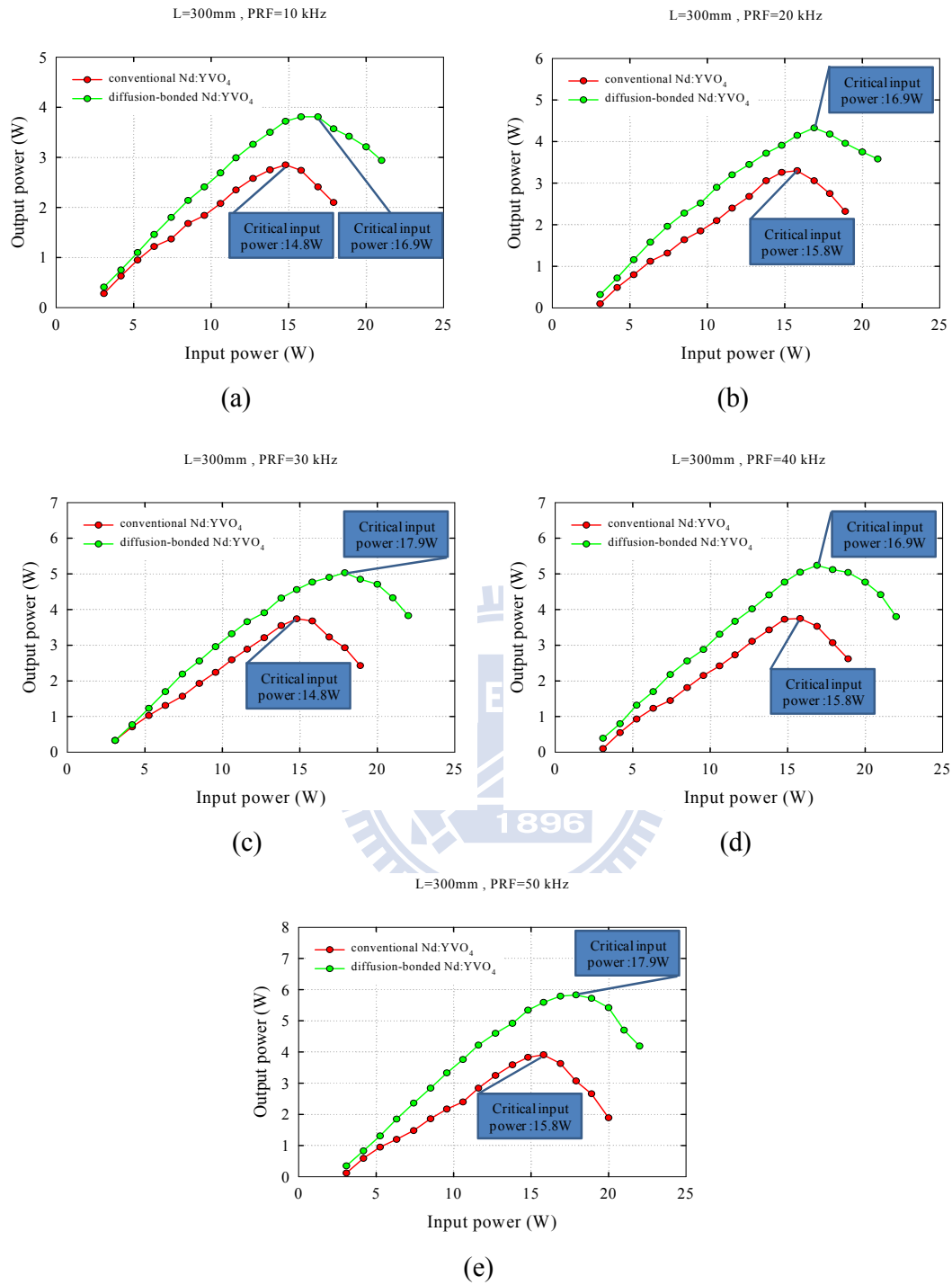


圖 4-3 腔長  $L=300\text{mm}$ ，頻率 (a)10 kHz (b)20 kHz (c)30 kHz (d)40 kHz (e)50 kHz 輸入功率與輸出功率比較圖



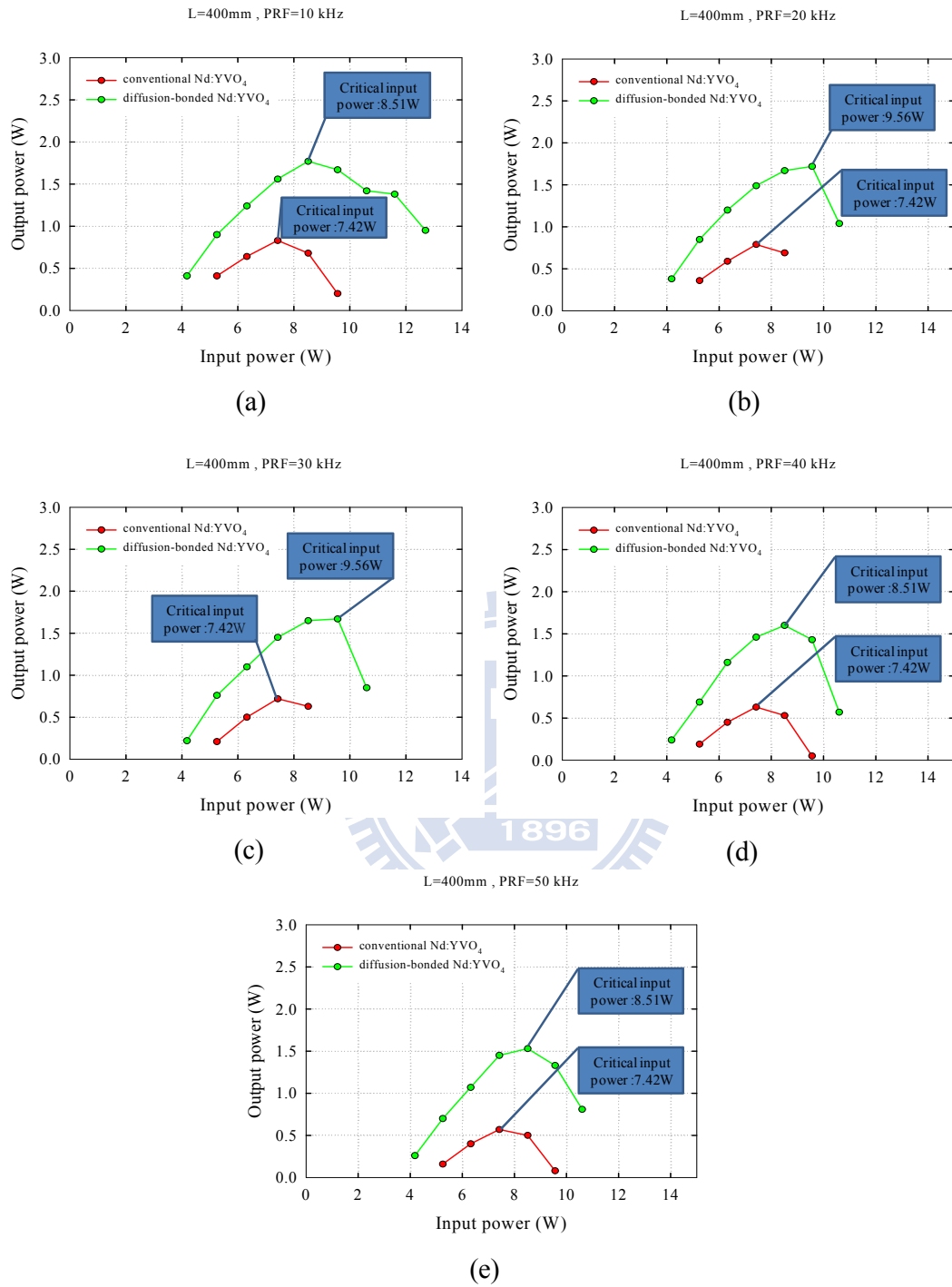


圖 4-4 腔長  $L=400\text{mm}$ ，頻率 (a)10 kHz (b)20 kHz (c)30 kHz (d)40 kHz (e)50 kHz 輸入功率與輸出功率比較圖

## 第五章 鎖模雷射的介紹與實驗

### 5.1 介紹


應用半導體飽和吸收體在端面激發全固態二極體鎖模雷射中已經被廣泛的討論與研究，由於它具有短脈衝持續時間、結構精巧、低損耗、價錢低廉、可靠的操做性能還有在可見光到紅外線波段有較寬廣的頻帶寬度…等優點，因此高功率鎖模雷射的應用，可以應用在許多的方面，例如：(laser-video)影像顯示器技術、醫學手術、材料加工、非線性波長的轉換…等。儘管許多高功率被動式鎖模技術已經被提出，但雷射晶體的熱效應仍然是主要克服的問題。

鍵合晶體的結構組成，是由一個摻雜的晶體和一個非摻雜的晶體結合成，前端非摻雜的部分當作激發端面；在前面第三章、第四章的介紹與實驗結果證實，鍵合晶體它確實是一個改善熱效應比較好的一種方法。近來，可以看到關於被動式鎖模雷射使用鍵合晶體的一些報導資料，資料指出其平均輸出功率可達 10W 以上，由此可知，鍵合晶體是有潛力實現被動式高功率鎖模雷射的雷射晶體。然而，到目前為止還沒有比較有系統的研究，是去比較傳統雷射晶體與鍵合晶體在被動式鎖模雷射中的研究。

在本章節中，我們設計一個線性的共振腔去做比較與研究，我們以傳

統的晶體(Nd:GdVO<sub>4</sub>)與鍵合晶體(GdVO<sub>4</sub>/ Nd:GdVO<sub>4</sub>)兩種，分別比較兩種晶體在被動式鎖模雷射的性能。由於鍵合晶體減少了熱效應，鍵合晶體與傳統晶體在最大平均輸出功率的比較，鍵合晶體比傳統晶體約增加了 30%，因此鍵合晶體是適合發展在高功率鎖模雷射的操作。我們更進一步發現，利用鍵合晶體非摻雜的部分，可減少 spatial-hole-burning(SHB)的效應，獲得更寬的脈衝寬度；我們實驗結果顯示，要得到鎖模雷射脈衝波寬度的最佳化，必須考慮鍵合晶體非摻雜部分的長度。

## 5.2 實驗架構



實驗架構如圖 5-1 所示，被動式半導體鎖模雷射共振腔包含了增益介質、一個聚焦鏡、和一個結合了輸出耦合鏡的半導體飽和吸收體 (SESAMOC)。增益介質使用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 的雷射晶體，對於二極體雷射的激發光束，具有較高吸收效率，較大的激發放射區域，還有較高的熱傳導率沿著<110>的方向。我們在實驗中準備了兩種型式的增益介質進行研究，一個是傳統的晶體，摻雜濃度為 0.5 % at Nd:GdVO<sub>4</sub>，尺寸為 3 x 3 x 8 mm<sup>3</sup> 如圖 5-2 所示；另一個為 3 x 3 x 10 mm<sup>3</sup> GdVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 的鍵合晶體，由前端長度 2 mm 非摻雜 GdVO<sub>4</sub> 的晶體與一個摻雜濃度 0.5 at % Nd:GdVO<sub>4</sub>

的晶體擴散結合而成的鍵合晶體如圖 5-3 所示。兩種型式的雷射晶體，在晶體激發端面分別鍍上一層 808nm 的高穿透膜與一層 1064nm 的高反射膜；另一端面則分別鍍上 1064nm 阻抗反射膜，並將此端面切成  $0.5^\circ$  楔形角的設計，抑制法布里-珀羅效應(Fabry-Perot etalon effect)。雷射晶體使用薄金箔的銅片包覆，增加熱傳導的效率，將包覆銅片的晶體固定於銅製散熱座內，將銅座通水冷卻，工作溫度設定  $20^\circ\text{C}$ 。激發光源使用 10W 808nm 光纖耦合式的雷射二極體，中心半徑  $100\mu\text{m}$ 、數值孔徑 0.16 的光纖傳輸。在雷射晶體的前端放置一個聚焦長度為 25mm 的耦合鏡，使激發光束能一致性的耦合放大到晶體端面，可達到 85% 的傳輸效率。另一個補償聚焦鏡聚焦長度為 125mm，鏡片雙面鍍上 1064nm 的阻抗反射膜。

在波長 1064nm 被動式鎖模雷射的架構中，我們利用金屬有機化學汽相乘積法，在非摻雜的砷化鎵(GaAs)結構上單獨生長成一個 SESAM 的結構。目前 SESAM 裝置已經被設計成將飽和吸收體與輸出鏡的結合，結合成 SESAMOC 的裝置。SESAMOC 半導體飽和吸收體是由兩個 8 nm  $\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$  的量子井(QWs)組合而成，其飽和能量密度為  $80\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ，其調節深度為 1.5%；布拉格鏡結構包含 10 個 AlAs/GaAs 的階層，設計成在 1064nm 有 96.3% 的反射率，且在背後  $35\mu\text{m}$  GaAs 的基質結構鍍上 1064nm 的阻抗反射膜，將 SESAMOC 固定在無任何主動式冷卻的銅座上。補償聚焦鏡放

置共振腔內增益介質與 SESAMOC 之間，與增益介質的激發端面相對距離  $L_1=500$  mm，與 SESAMOC 輸出端面的相對距離  $L_2=166$  mm，共振腔長為 666 mm，對應到重覆率 225 MHz 鎖模輸出的操作，在晶體端與 SESAMOC 上的模態半徑大小，分別是 160  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{m}$ 。我們使用一台高速的光檢測器，檢測鎖膜雷射連續輸出的脈衝波，將其連續輸出的訊號傳至數位示波器(Agilent,DSO 80000)，電子帶寬調在 12 GHz，取樣率為 25 ps。在頻譜資訊的監控，利用解析度 0.003 nm 的光譜儀(Advantest,Q8347)監看其狀態。



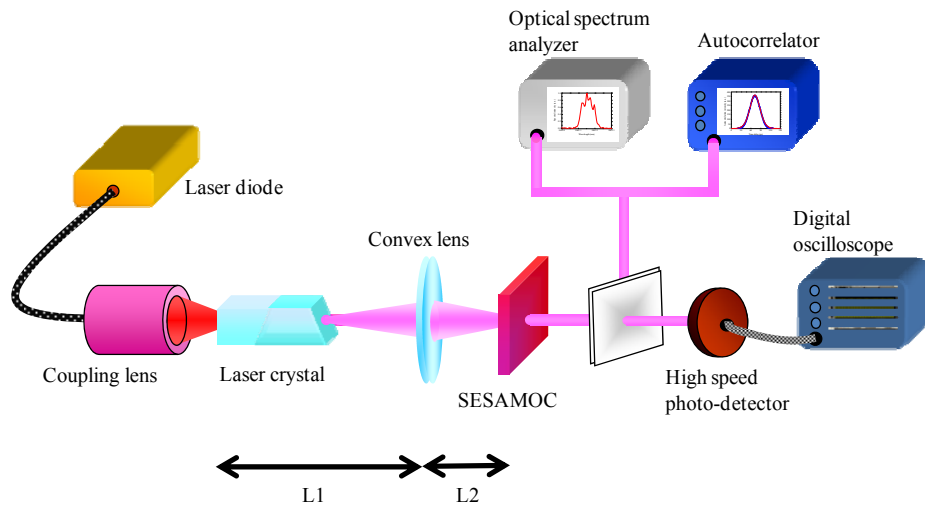


圖 5-1 被動式半導體鎖模雷射實驗架構圖

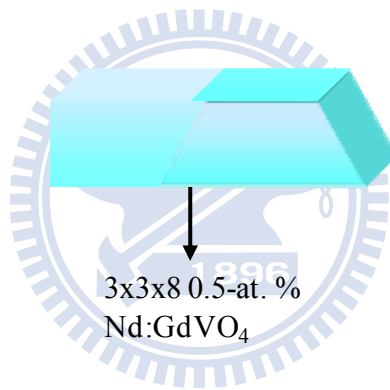


圖 5-2 傳統 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶體

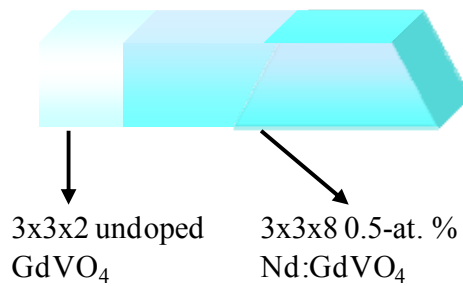


圖 5-3 鍵合晶體 GdVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub>

### 5.3 實驗結果與分析

傳統晶體與鍵合晶體的輸入功率與輸出功率曲線如圖 5-4(a)所示，由圖中可發現傳統晶體與鍵合晶體的斜效率大致相同，傳統晶體與鍵合晶體的斜效率大約 35%左右。兩種型式的晶體，操作在鎖模輸出時輸入功率的閾值，分別都在 1.7W，當輸入功率超過 1.7W 時，會產生穩定的連續鎖模脈衝波的輸出，如圖 5-4(b)所示。在連續波的鎖模操作，熱效應會導致最大輸入功率臨界值(Critical input power)與基模輸出受到限制，當輸入功率超過了最大輸入功率臨界值時，連續波開始出現不穩定的現象，如圖 5-4(c)所示。由圖 5-4(a)可看出，傳統晶體與鍵合晶體的最大輸入功率臨界值分別為 5.4W 與 7.8W；熱效應同時也導致輸出功率的下降，此下降的功率點為最大輸出功率的臨界值(Critical output power)，傳統晶體與鍵合晶體的值分別為 2.3W 與 1.75W。總而言之，在最大輸出功率的比較，鍵合晶體比傳統晶體增加約 30%，由於熱效應的降低。

利用自相關干涉儀的協助，我們量測鎖模脈衝波的半波寬度(FWHM)，傳統晶體與鍵合晶體分別為 8ps 與 24ps 如圖 5-5(a)和(b)所示；我們也量測鎖模雷射光譜的輸出，其輸出光譜的半波寬度，傳統晶體與鍵合晶體分別為 0.17nm 與 0.007nm 如圖 5-6(a)和(b)所示。由此可看出，共振腔使用鍵合晶體符合了輸出光譜變窄與脈衝寬度變寬的鎖模雷射，因此，利用鍵合

晶體使光譜變窄脈衝寬度變寬的起因是值得我們思索的。接下來，我們將證明一個以鍵合晶體改變前端的非摻雜部分，使 spatial-hole-burning(SHB) 的減少，導致光譜變窄的研究。

增益介質放置前端(GE)和增益介質放置中間(GM)兩種型式相互轉換的研究，在 spatial-hole-burning(SHB)的影響下，從固態鎖模雷射輸出的性能，之前的研究發現相同的共振腔結構，將固態鎖模雷射增益介質放置前端(GE)會比增益介質放置中間(GM)的脈衝寬度要短，由於 SHB 的提高。以目前實驗的共振腔，我們替換原本為 HR/AR 高反射與阻抗反射的增益介質，改換成一個 AR/AR 雙面為阻抗反射的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 雷射晶體，加上一個平面的前腔鏡。我們使用一個微型可調的載具，調整增益介質與前腔鏡分開相對的距離(d)，增益介質與前腔鏡的距離分別由 0.2mm 調整至 10mm，我們發現鎖模雷射的脈衝寬度會平順的增加，分別由 15.8ps ~ 36.6ps，如圖 5-7 所示；光譜半波寬度的變化為 0.085nm ~ 0.048nm，如圖 5-7 所示。總而言之，增益介質與前腔鏡分開的距離與鎖膜雷射輸出的脈衝寬度有強烈依存的关系。參考圖 5-7 所示實驗的結果，鍵合晶體非摻雜的等效長度大約是 4.5mm，這意味著雷射光譜變窄，脈衝寬度大約會是它的 2 倍，這與我們實驗觀察到的現象相當吻合。因此，鍵合晶體非摻雜部分最佳長度的考慮，將影響了鎖模雷射輸出的脈衝寬度。



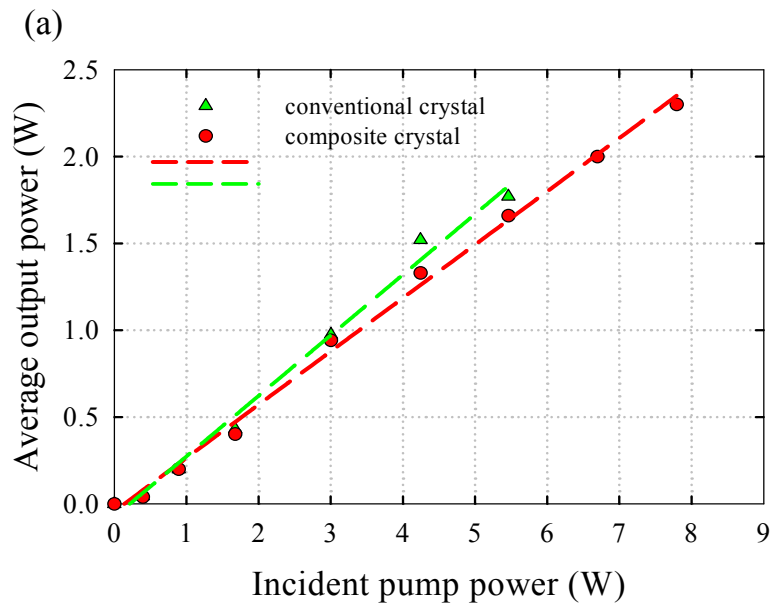


圖 5-4(a) 傳統晶體與鍵合晶體在鎖模操作下輸入功率與輸出功率曲線圖

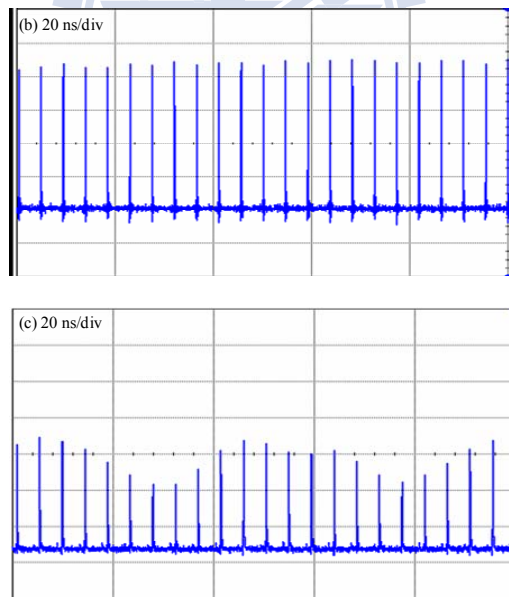


圖 5-4 連續鎖模脈衝波(b)穩定狀態(c) 不穩定狀態下的輸出波形

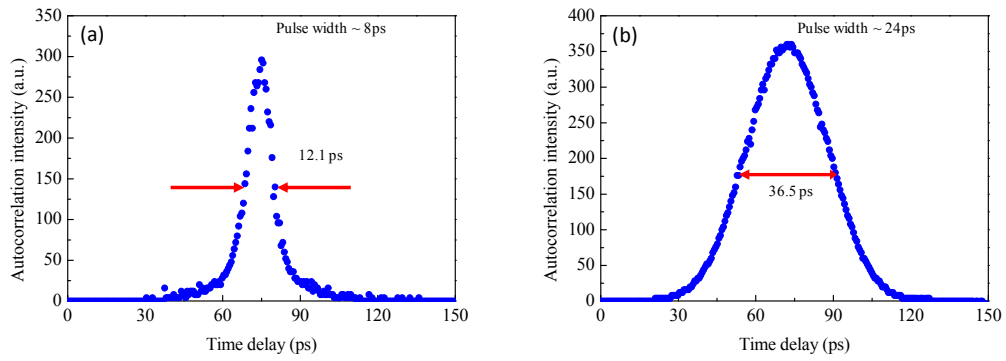


圖 5-5 (a)傳統晶體(b)鍵合晶體在鎖模操作下輸出脈衝波寬度的 FWHM

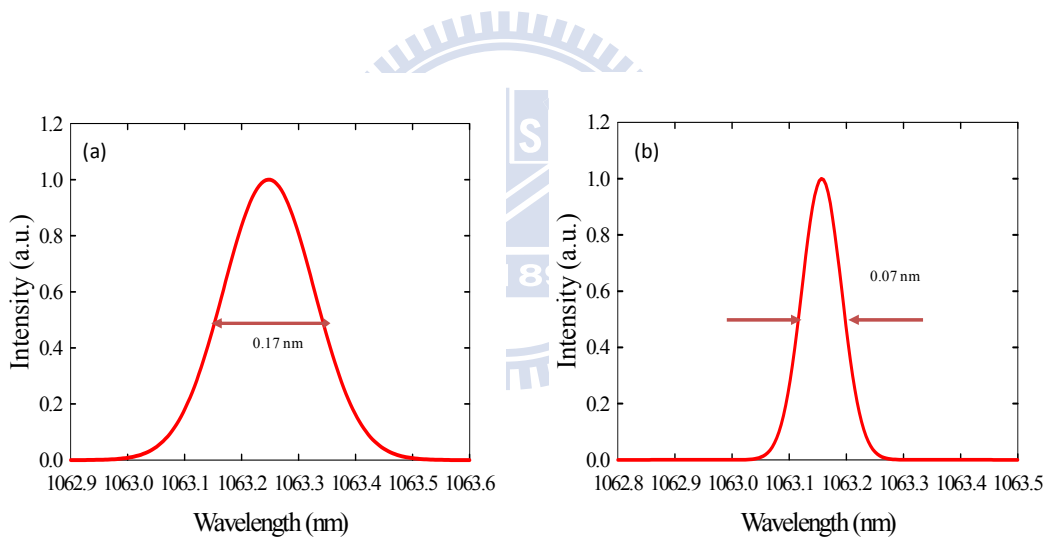


圖 5-6 鎖模雷射(a)在傳統晶體(b)在鍵合晶體輸出光譜的 FWHM

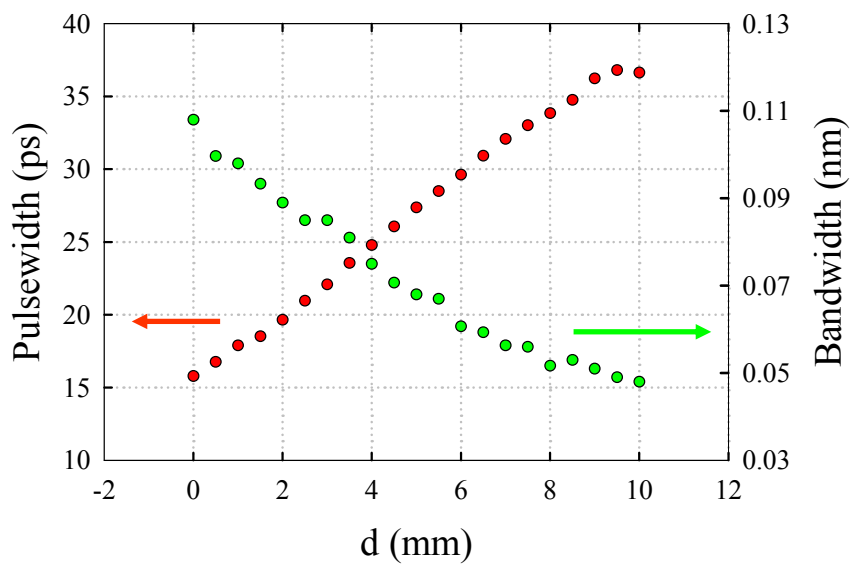


圖 5-7 增益介質與前腔鏡分開的距離和鎖模雷射輸出的脈衝寬度與輸出光譜寬度的關係圖



## 5.4 結論

在結果中，設計一個線性共振腔，執行被動式鎖模輸出的操作，去比較傳統晶體與鍵合晶體 Nd:GdVO<sub>4</sub> 的研究，我們發現儘管鍵合晶體有效降低熱效應，但是脈衝寬度卻比傳統晶體得到的還要寬。在實驗結果的說明，增益介質和前腔鏡分開的相對距離與 SHB 效應的程度有相對關係，利用此相對的關係證明了鎖模脈衝寬度的起因是使用鍵合晶體。我們的研究也顯示出，獲得一個最佳化的鎖模脈衝波寬度，必須考慮鍵合晶體非摻雜部分的長度。



## 第六章 結論與未來展望

### 6.1 結論

經由一連串的實驗與討論，整個論文的實驗大致可分為三個部分，第一個部分是我們對於 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體的特性介紹，Nd:YVO<sub>4</sub> 是一個品質非常好的雷射晶體，實驗結果使我們清楚看出 a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 的偏振特性，對  $\pi$  (c-axis) 的偏振激發光吸收係數遠大於對  $\sigma$  (b-axis) 偏振激發光的吸收係數，且對 809 nm 的激發光有較高的吸收率。

第二部分則是 CW 雷射與脈衝雷射使用鍵合晶體與傳統晶體熱效應的比較，我們發現腔長的改變與操作不同重複率的比較，鍵合晶體的最大輸入功率與最大輸出功率都遠大於傳統晶體，證明了鍵合晶體確實是解決雷射晶體熱效應的好方法。

第三部份我們利用鍵合晶體 Nd:GdVO<sub>4</sub> 在 SESAMOC 半導體飽和吸收體鎖模操作的實驗，我們發現鍵合晶體有效降低熱效應，但是脈衝寬度卻比傳統晶體得到的還要寬，實驗結果說明，鎖模脈衝寬度變寬的起因是鍵合晶體非摻雜部分長度所造成的。

## 6.2 未來展望

在未來的工作中，以此實驗的結果，建議公司將目前端面激發固態二極體雷射使用的傳統晶體，改用鍵合晶體取代，搭配到實際雷射加工機的應用，做實際加工的比較，減少熱效應的產生，提高雷射加工的性能與穩定性。另一個研究方向可針對雙端摻雜的鍵合晶體進行實驗，同樣以端面激發固態二極體雷射架構，使用單端鍵合晶體與雙端鍵合晶體熱效應的比較。



## 參考文獻

- [1] Y. T. Chang, Y. P. Huang, K. W. Su, and Y. F. Chen, “Comparison of thermal lensing effects between single-end and double-end diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub> crystals for 4F<sub>3/2</sub>→4I<sub>11/2</sub> and 4F<sub>3/2</sub>→4I<sub>13/2</sub> transitions”, Department of Electrophysics, Vol. 16, No. 25,
- [2] Masaki Tsunekane , Noboru Taguchi, Tadashi Kasamatsu , and Humio Inaba, “Analytical and Experimental Studies on the Characteristics of Composite Solid-State Laser Rods in Diode-End-Pumped Geometry ”, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 3, NO. 1, 1997,
- [3] H. Zimer, K. Albers, and U. Wittrock , “Grazing-incidence YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> composite thin slab laser with low thermo-optic aberrations ”, OPTICS LETTERS , Vol. 29, No. 23 , 2004
- [4] Akira Sugiyama, Yasunaga Nara , “Improved direct bonding method of Nd:YVO<sub>4</sub> and YVO<sub>4</sub> laser crystals”, Ceramics International , 31, 1085–1090 , 2005
- [5] Y. J. Huang, Y. P. Huang, H. C. Liang, K. W. Su, Y. F. Chen, and K. F. Huang, “ Comparative study between conventional and diffusion-bonded Nd-doped vanadate crystals in the passively mode-locked operation”, OPTICS EXPRESS, Vol. 18, No. 9,9518-9523,2010

- [6] 姚建銓，徐德剛，“全固態激光及非線性光學頻率變換技術”，科學出版社，北京，2007
- [7] 楊國輝，黃弘彥，“雷射原理與量測概論”，五南圖書出版有限公司，台北，民國九十年
- [8] 江月松，宋馭民，劉正瑜，全中興，陳積德，“光電技術”，新文京開發出版股份有限公司，台北，民國九十四年
- [9] 閻吉祥，鄭壽昌，“雷射原理與技術”，新文京開發出版股份有限公司，台北，民國九十六年
- [10] 呂助增，“雷射原理與應用”，滄海書局，台中，民國九十年

