

國立交通大學

理學院應用科技學程

碩士論文

先進固態雷射技術與應用

Advanced Solid-State Laser Technology and
Application

研究生：陳紀暉

指導教授：陳永富 教授

中華民國九十六年六月

先進固態雷射技術與應用
Advanced Solid-State Laser Technology and
Application

研究生：陳紀暉

Student : Chi-Wei Chen

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 Degree Program of Applied Science and Technology

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Degree Program of Applied Science and Technology

June 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年六月

先進固態雷射技術與應用

學生：陳紀曄

指導教授：陳永富教授

國立交通大學理學院應用科技學程碩士班



摘 要

本論文為高功率 Q-開關全固態雷射技術之研發，以半導體雷射作為激發光源，以摻釷之鈮鋁石榴石晶體($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)作為增益介質，所研發之雷射波長為 1064nm 與 1123nm，並使用 KTP 與 BBO 非線性晶體將基頻雷射二倍頻，得到波長 532nm 的綠光和波長 561nm 的黃綠光輸出。且使用共振腔設計達成高功率基模雷射輸出，最後將所完成之雷射系統應用於細微加工並與傳統設計做完整之比較。

Advanced of Solid-State Laser Technology and Application

student : Chi-Wei Chen

Advisors : Dr.Yu-Fung Chen

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



The research and development of high-power Q-switched all solid-state laser pumped by semiconductor laser is presented here. The gain medium is Nd^{3+} :YAG for lasing wavelength of 1064 nm and 1123 nm. By use of nonlinear crystals, KTP or BBO, frequency-doubled laser of 532-nm green light and 561-nm yellow-green light can be obtained with the average output power of 10 W and 3.3 W. We design the resonant cavity to achieve the output of fundamental transverse mode and high power simultaneously. At last, we report the results of applying green laser on micro machining, and the comparison between our laser design and tradition laser design.

誌謝

兩年的時光就這麼匆匆的過去了，在這短短的兩年邊工作邊求學的階段，話雖辛苦可是也得到不少人的協助，讓我能順順利利的畢業。首先當然是要感謝我的指導教授陳永富老師，讓對光學、雷射系統一無所知的我，成長到有一定的專業水準，除了在學業上的指導，也在老師身上學到了不少對於工作、領導、人生該有的態度，真的很謝謝老師的指導。再來要感謝的就是實驗室的每一個好伙伴，要是沒有你們我想我的研究所之路，想必會走的相當坎坷，其中要特別感謝老大蘇冠暉總是不厭其煩的回答我對雷射的疑問、幫我修正論文…等，還有黃哲彥、梁興弛在我缺 Stage 的時候，想辦法幫我找一組出來，再實驗上也一直給我寶貴的意見。實驗室真的是太溫暖了，再次的感謝大家。

再來要感謝我的最愛的家人，在這兩年中讓我無後顧之憂的完成學業，包容我、關心我，最後我要將這份榮耀獻給我在遠方的老爸，我終於完成了您的期盼，雖然來的有點遲，不過我始終還是達成了。謝謝您！

中文摘要

英文摘要

誌謝

目錄

圖表目錄

第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 本論文組織.....	1
第二章 簡介.....	2
2.1 Nd:YAG LASER.....	2
2.1.1 能階結構.....	2
2.2 Q 開關簡介.....	4
2.2.1 Q 開關分類.....	5
2.2.2 主動式 Q-開關動作機制.....	5
2.2.3 被動式 Q-開關動作機制.....	6
2.3 非線性頻率轉換導論.....	8
2.4 非線性光學原理.....	8
2.5 二倍頻轉換.....	9
2.6 相位匹配.....	10
2.7 影響頻率轉換的參數.....	12
2.7.1 晶體溫度：.....	12
2.7.2 非線性係數：.....	12
2.7.3 走離效應:.....	12
2.8 非線性晶體 KTP.....	13
2.9 非線性晶體 BBO.....	13
第三章 實驗架構與結果討論.....	18

3.1 波長 1064nm 倍頻為波長 561nm 之綠光雷射	18
3.2 波長 1064nm 之實驗架構.....	18
3.2.1 波長 1064nm 實驗結果與討論.....	18
3.3 波長 1064nm 使用 KTP 倍頻為波長 532nm 之實驗架構	19
3.3.1 波長 1064nm 使用 KTP 倍頻為波長 532nm 之實驗結果與討論	19
3.4 波長 1064nm 使用 BBO 倍頻為波長 532nm 之實驗架構.....	26
3.4.1 波長 1064nm 使用 BBO 倍頻為波長 532nm 之實驗結果與討論....	26
3.4 KTP 與 BBO 之長時間可靠度測試	29
3.5 波長 1123nm 倍頻為波長 561nm 之黃綠光雷射	32
3.5.1 波長 1123nm 連續波雷射之實驗架構.....	32
3.5.2 波長 1123nm 連續波雷射之實驗結果與討論.....	33
3.5.3 波長 1123nm 使用 BBO 倍頻之連續波黃綠光雷射	33
3.5.4 波長 1123nm 使用 BBO 倍頻之連續波黃綠光雷射實驗結果	33
3.5.5 波長 1123nm 脈衝雷射之實驗結果.....	34
3.5.6 波長 1123nm 脈衝雷射使用 BBO 倍頻之實驗結果	34
第四章 單模雷射設計	42
4.1 傳統設計與新設計之比較	43
4.2 實際加工	43
第五章 結論與未來展望	49
5.1 結論	49
5.2 未來展望	49
參考文獻	50

圖表目錄

圖 2.1	YAG 吸收光譜	3
圖 2.2	Nd:YAG 能階圖	3
圖 2.3	Q 開關產生光脈衝示意圖(a) 低品質因素 (b) 高品質因素.....	7
圖 2.4	當 RF 訊號送入 Q 開關，光路因繞射而產生偏轉示意圖	7
圖 2.5	Δk 對轉換效率的影響關係	15
圖 2.6	相位不匹配的情況下，轉換效率與晶體長度的關係.....	15
圖 2.7	相位匹配示意圖	16
圖 2.8	o-ray 與 e-ray 相對應之折射率	16
圖 2.9	雙折射晶體走離效應示意圖	17
圖 3.1	波長 1064nm 實驗架構.....	20
圖 3.2	Cutting Edge Optronics RB 系列 DPSS Nd : YAG Rod Laser module	20
圖 3.3	波長 1064nm 連續波輸出之電流與功率關係圖.....	21
圖 3.4	CEO pumping module 雷射輸出模態	21
圖 3.5	KTP 倍頻實驗架構.....	22
圖 3.6	波長 532nm 連續波輸出之電流與功率關係圖	22
圖 3.7	(a)重複率為 60KHz 之 KTP 倍頻，綠光雷射輸出脈衝波型圖	23
	(b) 強度對時間分佈圖	23
圖 3.8	KTP 倍頻之改變腔長之電流與功率關係圖	24
圖 3.9	KTP 倍頻之頻譜	24
圖 3.10	(a)重複率為 10KHz 之 KTP 倍頻，綠光雷射輸出脈衝波型圖	25
	(b) 強度對時間分佈圖	25
圖 3.11	KTP 倍頻之電流與功率、脈衝寬度關係圖.....	26
圖 3.12	BBO 倍頻之針對不同重複率的電流與功率關係圖	27
圖 3.13	重複率為 60KHz 之 BBO 倍頻，強度對時間分佈圖	27

圖 3.14 (a)重複率為 10KHz 之 BBO 倍頻，綠光雷射輸出脈衝波型圖.....	28
(b) 強度對時間分佈圖	28
圖 3.15 非線性晶體 End-pump 測試架構	30
圖 3.16 KTP 之長時間測試之前 44 小時，功率與時間關係圖	30
圖 3.17 KTP 之長時間測試發生問題後持續測試 1 小時，功率與時間關係圖..	31
圖 3.18 KTP Gray Tracking.....	31
圖 3.19 BBO 之長時間測試 72 小時，功率與時間關係圖	32
圖 3.20 Nd : YAG 螢光光譜	35
圖 3.21 波長 1123nm 實驗架構	36
圖 3.22 連續波 1123nm 輸出，電流與功率關係圖	36
圖 3.23 波長 1123nm 輸出光譜	37
圖 3.24 波長 1123nm 在重複率 10KHz，低安培數之脈衝輸出	37
圖 3.25 波長 1123nm 在重複率 10KHz，24 安培之脈衝輸出.....	38
圖 3.26 重複率 5KHz、佔開控時間 5u sec 波長 1123nm 輸出之電流與功率與脈衝寬度關係圖.....	38
圖 3.27 重複率 5KHz、佔開控時間 5u sec 波長 561nm 輸出之電流與功率與脈衝寬度關係圖	39
圖 3.28 561nm 波段輸出之紅外波段光譜測量	39
圖 3.29 加一紅外光高穿透，可見光波段高反射的濾鏡後，561nm 波段輸出之電流與功率關係圖	40
圖 3.30 1123nm 波段經 BBO 倍頻後輸出功率頻譜	40
圖 4.1 凹平腔不加改變的原始數據	44
圖 4.2 加上孔徑光欄後，電流與出功率關係圖	44
圖 4.3 CEO Laser module 電流與熱透鏡效應關係圖	45
圖 4.4 不穩定凹凸腔，電流與出功率關係圖.....	45
圖 4.5 凹凸腔雷射實際切割陶瓷基板.....	46

圖 4.6 凹凸腔雷射加工(a)汽車連桿-厚烤漆 (b)鋼材之手工具	46
圖 4.7 凹凸腔雷射在不銹鋼板打點，蝕刻形狀與深度	46
凹凸腔雷射數學模型.....	47
表 2.1 Nd:YAG 之光學與機械特性	4
表 2.2 KTP 特性與參數	14
表 2.3 BBO 特性與參數.....	14
表 3.1 非線性晶體 BBO 特性針對 1123nm 波段	41
表 3.2 重複率 100KHz、電流 25 安培，佔閘控時間與功率關係表	41



第一章 緒論

1.1 研究動機

雷射在二十一世紀的今天在普及性方面已經是見怪不怪，人手或多或少都至少有一至二樣的雷射應用產物如光碟機、指示筆.....等，在市面上工業級或者是醫療級的應用更是不在話下，在工業上的應用，由於產品越來越追求輕.薄.短.小，所以有些製程上在傳統的刀模，切割.鑽孔.焊接....等，都已達到傳統加工的極限，無法再繼續往微米、奈米的加工精度與細膩度向下發展，此時雷射應用帶給人類繼續發展的空間。因為雷射加工上擁有著非接觸式加工，改善加工物的形變與汙染等問題。而固態雷射與半導體雷射的出現也改善了傳統閃光燈雷射、氣體雷射效率低、體積大、壽命短、維修困難等問題，所以十分具有競爭力。

因為在雷射加工上有著其加工的結果與精度會因雷射波長的不同產生不同的加工特性，所以只要選擇對的雷射在細微加工度上更因此輕鬆達到微米或以下的程度，逐漸取代了傳統加工。在目前雷射發展中，可見光波段也已經越來越被重視，在市場上或是學術研究的論文上，更是有著不少利用各種技術與設計來產生短波長的文獻。而我們在此篇論文則是在共振腔中使用非線性晶體，在利用主動式聲光 Q 開關來提高轉換效率而得到高功率的綠光與黃綠光雷射輸出。

1.2 本論文組織

本文第二章針對實驗所用到的光學元件如 Nd:YAG、Q-開關、非線性晶體的原理與特性介紹。第三章介紹經由非線性晶體做頻率轉換，其實驗架構與目前相關的實驗結果做一分析與討論。在第四章則主要是為了得到高瓦特輸出功率和雷射光單模輸出，針對雷射共振腔的設計與改良後的實驗成果加以討論，並與原始設計的多模雷射作一比較。第五章為總結、討論與未來展望

第二章 簡介

2.1 Nd:YAG LASER^[2]

Nd:YAG 因具有良好的物理性、導熱性與機械性，所以在目前固態雷射中常被拿來使用當增益介質且常見的一種晶體。Nd:YAG 是屬於立方晶格(cubic)結構，故其輸出光不具有偏折性且增益線寬非常的窄(3~5nm)，因有高增益與低臨界功率的特性，由表 2.1 看出其硬度頗高，且生命週期與輻射截面積的特性也皆顯示出 YAG 極為適合用在工業上與拿來作為半導體雷射激發之固態雷射的晶體材料。而 Nd:YAG 在 808nm 波段有強吸收，其螢光光譜在 946nm、1064nm、1342nm，這三個波段有較高的強度，其中 1064nm 和 1342 這兩個波長幾乎占據絕大部份的增益，在這幾個高增益的波段，不論在學術界研究中，論文發表中與工業界產品的開發，都不難發現其蹤跡，近年來也有不少針對低增益波段(例如 1123nm)部分的研究，且也有這方面的商品推出，如 Coherent、Lumenis 等公司。所以 Nd:YAG 能在半導體激發的固態雷射發展中佔有一席之地，能一直受到廣泛的研究、討論與應用不是沒有原因的。

2.1.1 能階結構

由圖 2.1 可知 ND:YAG 的主要吸收頻帶在 750nm、807nm、890nm，而使用 808nm、890nm 為激發波長可得較高的量子轉換效率，在轉換過程中的熱輻射現象也相對比較小，在圖 2.2 得知其為能階躍遷為四階系統，主要雷射能階為 ${}^4F_{3/2}$ 、 ${}^4I_{15/2}$ 、 ${}^4I_{13/2}$ 、 ${}^4I_{11/2}$ 、 ${}^4I_{9/2}$ ，最強為 ${}^4F_{3/2}$ 躍遷到 ${}^4I_{11/2}$ 所得到的 1064nm 之螢光^[3]，除了 1064nm 波段外，0.94um、1.3um 的波段也有著許許多多的研究與應用，而我們則著重在 1064nm 與 1064nm 相同為 ${}^4F_{3/2}$ 躍遷到 ${}^4I_{11/2}$ 波段，但針對 ${}^4I_{11/2}$ 去探討更細微的能階結構所得到的低增益波段 1123nm 輸出，將在第三章有一更完善的討論。

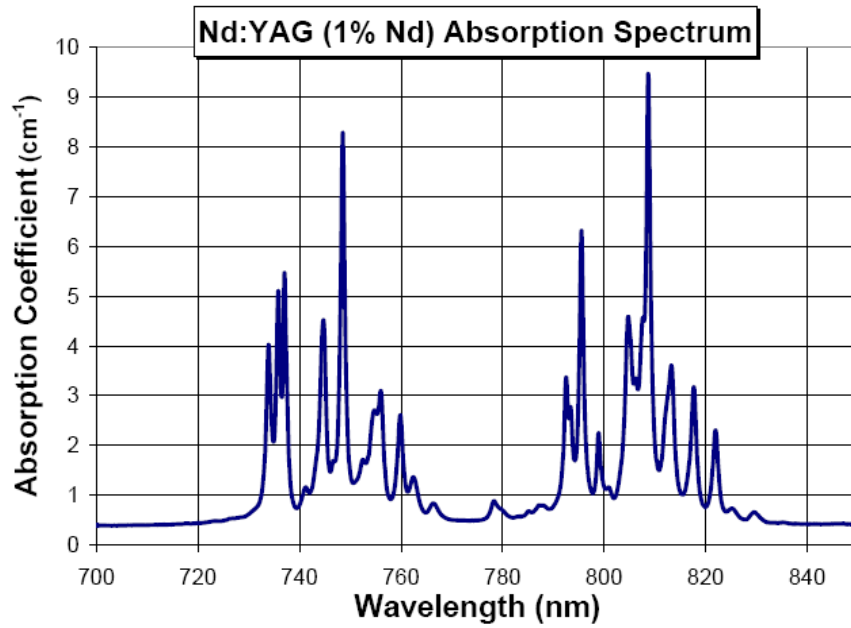


圖 2.1 YAG 吸收光譜

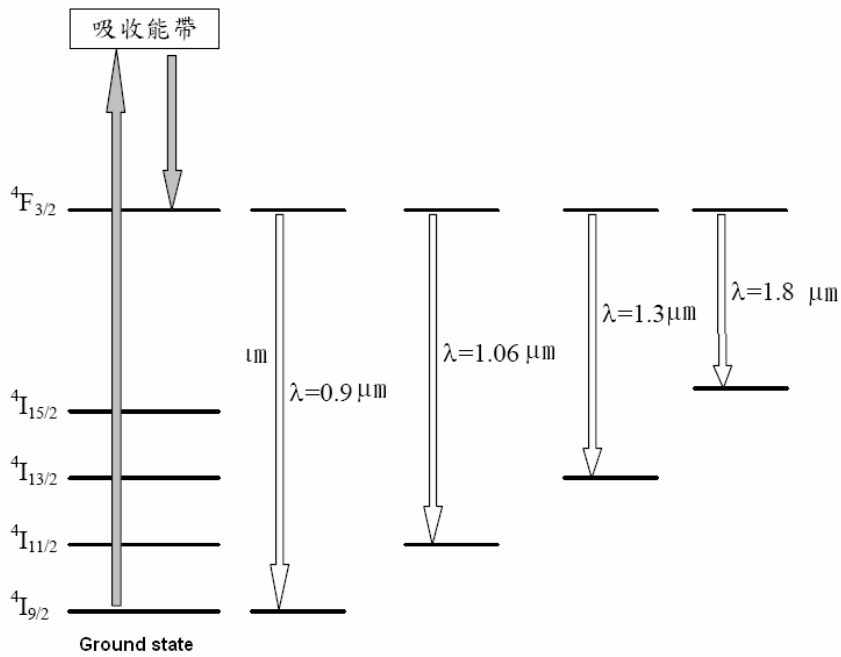


圖 2.2 Nd:YAG 能階圖

晶體	Nd:YAG ($\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
中文名稱	摻釹鈮鋁石榴石
英文名稱	Neodymium-doped Yttrium Aluminium garnet
晶體結構	立方晶格(cubic)
輻射截面積	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$ $1.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2 @ 1123 \text{ nm}$
吸收線寬	1nm@808nm
晶格常數	12.01Å
折射率	1.82@1064nm
熱膨脹係數	$7.7 \times 10^{-6} / \text{K}$
熱傳導率	12W/m-K
莫氏硬度	8.5
自發輻射生命週期	230us
幫浦中心波長	807.5nm
偏極性	隨機(Random)

表 2.1 Nd:YAG 之光學與機械特性

2.2 Q 開關簡介^[2]

由於雷射的應用越來越廣泛，其在功率需求上也越來越高，若一般連續波輸出的雷射光，想提高功率只能不斷提高激發的功率來提升輸出功率這種方式在經濟考量下與製作上的難易度也會提高許多。為了改善這窘境，Q 開關雷射因此而產生，其平均輸出功率或許沒連續輸出來的高，可是其瞬間所產生的峰值脈衝功率，卻可以達到千或萬瓦以上等級，使得 Q 開關的應用在各類應用上佔有其重要性，也在非線性晶體作頻率轉換上，因為著擁有高峰輸出，所以能有效的提高轉換效率。利用 Q 開關可以產生高能量短脈衝的優點，我們將其引入頻率轉換的架構中。以 1064nm 倍頻 532nm 綠光雷射來說如果我們使用連續輸出(CW)的雷射架構來倍頻，轉換效果明顯小於使用 Q-開關的脈衝雷射架構。

Q 開關其主要動作為為調變共振腔的品質因素(Q factor)，使原本是連續波雷射的輸出轉變成脈衝雷射輸出，其工作示意如圖 2.3 所示，當 Q-開關使共振腔內的損耗增加，讓品質因素下降 (LOW-Q)時，光源激發增益小於腔內損耗，此時雷射

共振腔是無法共振出光的。此時增益介質上的居量反轉濃度沒有因為無共振出光而下降，反而在激發光源不斷激發下，增益介質的能量不斷向上提升，在居量反轉濃度持續大量累積之下，且其閾值反轉濃度會持續增加至比穩定態(CW 連續波輸出)高，假若這時 Q-開關提高品質因素(HIGH-Q)，使腔內損耗突然減小，此時增益遠大於損耗，光子在瞬間大量產生，使得光以極快的速度放大產生，其累積的能量在短短幾十奈秒的時間內全部被釋放出來，因此產生一個高能量的脈衝雷射輸出，同時增益也會快速的往下掉，當增益掉到與共振腔損耗之下時，光子即很快的消失，而脈衝的寬度越窄，所得到的峰值功率也就越高。

2.2.1 Q 開關分類^[4]

Q 開關主要分 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 (Acoust-Optic 簡稱 AO)、光電開關(Electro-Optic 簡稱 EO)、機械式元件....等。
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，所使用的材料有摻四價鉻的鈮鋁石榴石晶體 ($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$)，被動式 Q 開關雖不用其他驅動電路，晶體也比較便宜但是其本身材料對可見光波段會有不錯的吸收，故不利於我們將飽和吸收體當為 Q 開關的動作元件，所以在本實驗接使用主動式 Q 開關藉由外部訊號調變，來達到最佳轉換效率。

2.2.2 主動式 Q-開關動作機制

其聲光 Q 開關裝置即是以射頻(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，其光學得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。週期性的變化的折射率就向縱波一般，又因光速約為聲速的 100000 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 2.4，如同是布拉格散色(Bragg Scattering)的效果

2.2.3 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 Cr^{4+} :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值更高達 $500\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上。

Cr^{4+} :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)。

其原理為當飽和吸收體吸收光能量之後，部份低能階的原子躍遷到高能階，使得吸收率逐漸降低，當吸收到大量基態原子都在高能階時便會達到飽和成為透明體，即不在吸光讓共振腔 Q 品質由低變高，瞬間受激放射產生，能量得到釋放產生脈衝，當能量釋放後飽和吸收體將不再飽和，慢慢使腔內損耗大於激發增益後，使腔內又成為低品質狀態，如此反覆的進行週期性的脈衝輸出。

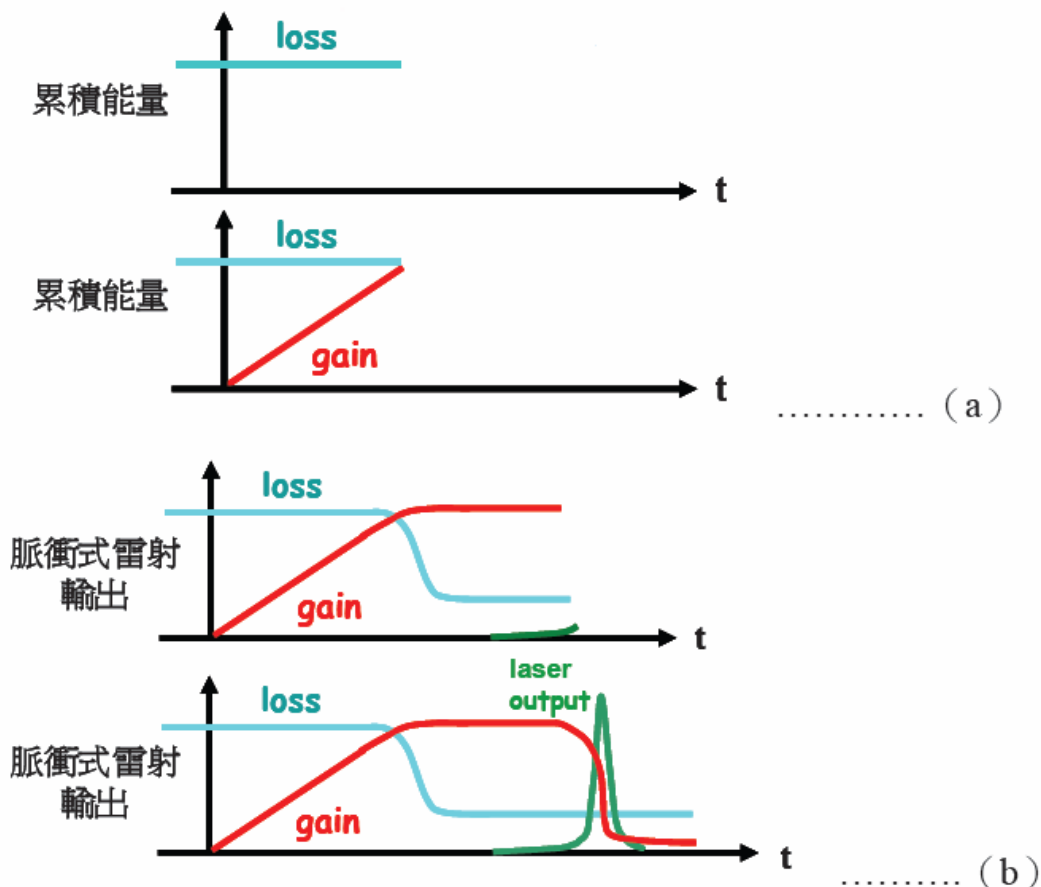


圖 2.3 Q 開關產生光脈衝示意圖(a) 低品質因素 (b) 高品質因素

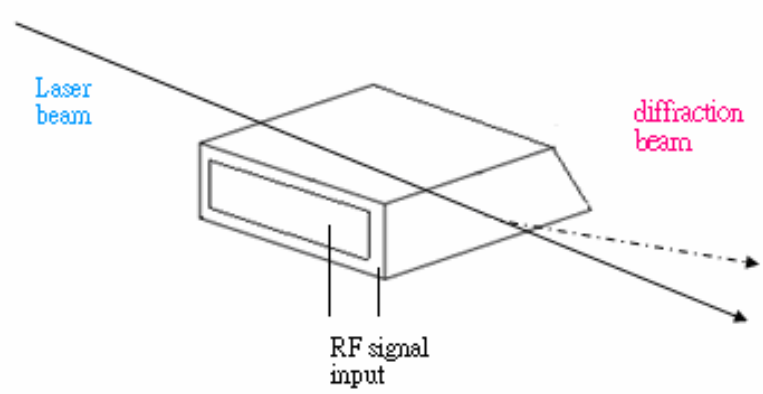


圖 2.4 當 RF 訊號送入 Q 開關，光路因繞射而產生偏轉示意圖

2.3 非線性頻率轉換導論

在固態雷射增益介質上要直接產生可見光波段的能階躍遷是不容易的，而市面上所常見的可見光雷射大部分為氣態雷射，不過氣態雷射也面臨著功率的瓶頸，無法製作成大瓦數的可見光雷射，現在還有許多波段並無法直接吸收放光產生。因此為了增加雷射的使用領域，使用頻率轉換來提升可見光雷射功率是便是一個極重要的方法。

頻率轉換乃利用了非線性晶體，利用其特性使在單一頻率強光輻射場通過非線性晶體後，產生出新頻率的電磁波，而當固態雷射引入非線性晶體時，若我們選擇適當的非線性晶體，則可產生出二倍頻光、三倍頻光、四倍頻光的諧波轉換，以基頻波的轉換，來得到更多不同波長的雷射光。

也可以利用不同頻率的兩道雷射光，以合頻、差頻的轉換方式，來產生出不同頻率的雷射。而不同波長有著不同的應用，而不同的波長在其加工的效果也有所不同，所以其所涵蓋的領域也是相當的大，因此善用此轉換技術在雷射發展上可說是非常重要的。一環。

2.4 非線性光學原理

在電磁學中，我們將光波視為電磁波。當電磁波入射到介質裡，物質中的原子受光之電場作用產生偶極矩，偶極矩振盪形成對應的電極化向量(Polarization vector, \vec{P})，若只考慮非線性效應，則電極化向量與電場強度的關係如 2.1 式^[5]

$$\vec{P}(t) = \epsilon_0 \chi \vec{E}(t) \quad (2.1)$$

其中 ϵ_0 為真空中的介電係數(Permittivity)， χ 是電極化率(Susceptibility)。

在 2.1 式中， \vec{P} 為電場 \vec{E} 的線性函數，但若物質在強光作用下，電極化向量與電場強度之關係會改寫成 2.2 式。

$$\vec{P}(t) = \epsilon_0 \left[\chi^{(1)} \vec{E}(t) + \chi^{(2)} \vec{E}^2(t) + \chi^{(3)} \vec{E}^3(t) + \dots \right] \quad (2.2)$$

$\chi^{(1)}$ 為線性電極化率， $\chi^{(2)}$ 與 $\chi^{(3)}$ 分別為二階和三階非線性電極化率，我們單純

以純量來說明電場與電極化向量的關係。當光強度不大時，電場強度小，電極化向量與電場關係以第一階的線性關係的影響最為明顯。若是光強度增強時或介質的 $\chi^{(2)}$ 與 $\chi^{(3)}$ 較大時，便會使第二階與第三階的非線性效應增強，則介質對光的非線性現象因而更為明顯。當兩頻率不同的光照射到物質時，此時可將電場表示成 2.3 式，將其代入 2.4 式中，可得到 \vec{P} 的二階展開說明的非線性光學的基本現象。

$$\vec{E} = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} \quad (2.3)$$

$$\vec{P}^{(2)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} \vec{E}^2(t) + c. \quad (2.4)$$

$$= \varepsilon_0 \chi^{(2)} (E_1^2 e^{-2i\omega_1 t} + E_2^2 e^{-2i\omega_2 t} + 2E_1 E_2 e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} + 2E_1 E_2^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t} + c. + 2\varepsilon_0 \chi^{(2)} (E_1 E_1^* + E_2 E_2^*))$$

由 2.4 式可看出，物質受到兩種頻率的電場作用下，介質的帶電粒子會受到振動，此時二階的電極化向量可能回產生下列的輻射光。

$$\text{倍頻光： } P(2\omega) = \varepsilon_0 \chi^2 E^2 \Rightarrow \omega_3 = 2\omega$$

$$\text{差頻光： } P(\omega_1 - \omega_2) = \varepsilon_0 \chi^2 E_1 E_2 \Rightarrow \omega_3 = \omega_1 - \omega_2$$

$$\text{合頻光： } P(\omega_1 + \omega_2) = \varepsilon_0 \chi^2 E_1 E_2^* \Rightarrow \omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

2.5 二倍頻轉換

二倍頻轉換(second harmonic generation SHG)，是產生使基頻光頻率加倍，波長減半的技術，所以我們以兩個相同頻率為 ω 的基頻光，經非線性晶體轉換成 2ω 的倍頻光，我們可將 P 表示成 2.5 式

$$P(2\omega) = \varepsilon_0 \chi^2 E^2(\omega) \quad (2.5)$$

將 2.5 式帶入 Maxwell's equations 中，藉由基頻光與二倍頻非線性晶體的耦合，可導出二次諧波功率 $P_{2\omega}$ 與基頻光功率 P_ω 的比值，稱為倍頻轉換效率 η_{SHG} 如 2.6 式所示_[2]：

$$\text{轉換效率} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[LK^{1/2} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)} \right]$$

(2.6)

其中

$$K = 2\eta^3 \omega^2 d_{\text{eff}}^2$$

L:非線性晶體長度

A:基頻光束截面積

d_{eff} :有效非線性係數

$\Delta k = k_{2\omega}^{(k)} - k_{\omega}^{(i)} - K_{\omega}^{(j)}$:相位差(phase mismatch)，其中 i、j、k 代表不同的偏振方向。而兩個不同頻率在晶體中傳遞的光波，所對應的光學折射也不盡相同，所以造成相位不匹配，故 Δk 可寫成

$$\Delta k = \frac{4\pi}{\lambda_{\omega}} (n_{\omega} - n_{2\omega})$$

而又當低轉換效率上式即可近似為 2.7 式

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \left[L^2 K \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right) \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)^2} \right]$$

(2.7)

2.6 相位匹配

在固定外在條件下，當 2.7 式中 $\Delta k=0$ 時可得到最高轉換效率，

即 $k_{2\omega}^{(k)} = k_{\omega}^{(i)} + k_{\omega}^{(j)}$ ，又 $k = \frac{\omega \cdot n}{c}$ 不考慮光波偏振方向下，可推出

$2\omega n_{2\omega} = 2\omega n_{\omega}$ ，故 $n_{2\omega} = n_{\omega}$ 即為相位匹配定義。要達到最大轉換效率，就必須滿足相位匹配 $\Delta k=0$ 或 $n_{2\omega} = n_{\omega}$ 。

若當相位不匹配時，即 $\Delta k \neq 0$ ，則倍頻光效率會隨著基頻光在非線性晶體內行走

距離做 $\frac{\Delta kl}{2} = \pi$ 的週期性變化如圖 2.5，定義同調長 L_c (coherent length) 為此週期一

半時之長度。

同調長 L_c 代表產生最大倍頻功率光功率時，基頻光在非線性晶體中行徑的距離長度。而如圖 2.6 所示，光轉換效率的趨勢隨著同調長度的增加而提升，尤其在 $\Delta kL=0$ 時。一般而言大部分介質具有色散(dispersion)，即折射率隨光波變化而變化。對於各向同性(isotropic)物質來說是無法達到相位匹配的要求；但在各向異性(anisotropic)的介質中，除了具色散關係外，介質的光學特性與光的偏振方向及傳播方向有關。因此可藉由調整晶體的角度，達到補償色散效果與相位匹配。

一般而言達成相位匹配的方式有兩類，分別是臨界相位匹配(critical Phase Matching, 簡稱 CPM)與非臨界相位匹配 (Non-critical Phase Matching, 簡稱 NCPM)。

CPM

CPM 是指以一特定入射角 θ 如圖 2.7 所示，利用非線性晶體本身雙折射效應去達到相位匹配，其相位匹配角不為 90 度。而 CPM 達成相位匹配又分成兩種方式

Type I Phase Matching: $e + e \rightarrow o$ 和 $o + o \rightarrow e$

Type II Phase Matching: $e + o \rightarrow o$ 和 $e + o \rightarrow e$

兩者最大的不同為所需的基頻光偏振方向不同，Type I 相位匹配需要兩作用的基頻光偏振同向；Type II 相位匹配需要兩作用的基頻光偏振互相正交。

若單一基頻光，I 類相位匹配時，因為所需的電場僅單一方向，所以基頻光偏振方向只要對著非線性晶體的 e-axis 或 o-axis 即可。而 II 類相位匹配時，所需電廠不只單一方向，須同時存在 e-axis 與 o-axis，故基頻光偏振方向就要和兩軸夾 45 度角，才能得到最佳轉換效率。

NCPM

倘若相位匹配角為 90 度時，此類型稱為非臨界相位匹配(NCPM)，此類型的相位匹配由於入射光角度為 90 度所以沒有晶體雙折射性質引起的走離效應，但此時需對晶體控溫，或外加電場來改變基頻波或是諧波對應的折射率，來達到最佳的

轉換效率。NCPM 類型的晶體的特點為長度長、有效非線性係數低，但卻可與長度短、有效非線性係數高的 CPM 晶體同樣的有高轉換效率。因此我們期待的為長度長且有效非線性係數高的 NCPM 晶體的出現，為頻率轉換的便利性與轉換效率上帶來更大的改善。

2.7 影響頻率轉換的參數

影響頻率轉換效率的參數可為兩部份，一為基頻光的性質，如基頻光功率、雷射發散角等，二是非線性晶體的參數，如晶體溫度、非線性係數、晶體長度、晶體吸收係數、相位匹配角、走離效應等，能夠有效的控制這些變因，便能掌握頻率轉換的特性，使轉化效率發揮到最大極限，而下針對非線性晶體的這些變因而做個簡單說明。

2.7.1 晶體溫度：

非線性晶體的溫度產生變化時，晶體的折射率也會隨著溫度改變，若溫度不為相位匹配溫度時，導致相位匹配程度變差，轉換效率將大幅度下降；而穩定且正確的相位匹配溫度才能使，諧波功率波變動減小，所以在實驗中藉由冷卻水或是致冷晶片來穩定且精準的控制晶體溫度，也顯得格外的重要。

2.7.2 非線性係數：

由 2.6 式可看出來，有效非線性係數(D_{eff})越大，轉換效率越佳。理論上有較高的非線性係數的非線性晶體，是很適合應用在非線性頻率轉換的技術裡，但實際的應用上還須考慮晶體的破壞閥值、光學品質、角度、溫度等，雖然可以利用增加晶體長度來提升非線性係數的功用，但一味的增加長度，雖然真的會提高非線性係數，但是後續也會衍伸出其他問題，所以選擇適當的非線性晶體便是一門很大的學問。

2.7.3 走離效應:

絕大部分的非線性晶體均屬於雙折射晶體，而雙折射與色散的特性可使一入射波光束有 e-axis(extra-ordinary ray)與 o-axis(ordinary ray)之分,也就是當光進入晶體中，o-ray 與 e-ray 的前進方向並不會共線，兩道光間夾了一個雙折射角度，而以不同方向入射所得到的 n_e 、 n_o 也有所不同(如圖 2.8),則此現象即為走離效應(walk-off effect)如圖 2.9 所示。而 l_{eff} 是入射至晶體中在光束走離前項互重疊的長度，稱為互作用長度。

光的走離效應使晶體中相互作用的光波經過一段距離後互相分離，而減小了互作用的長度。因此當一但有了走離效應隨著非線性晶體的長度，基頻光與階波光在晶體傳播方向漸行漸遠，所以使得轉換效率大大的降低，無法達到最佳的性能。

2.8 非線性晶體 KTP : [6]

Potassium Titany Phosghate (KTiOPO_4)，KTP 應用在輸入波長在 $1\mu\text{m}$ 附近的基頻光，做二次諧波轉換，KTP 可透光的波段也算相當的廣，由 350nm 至 4000nm ，也因它擁有高的非線性係數、寬的光學允許角與熱傳導性，所以在近年來 3 使用在 Nd-doped 的頻率轉換已經是非常的常見。而他的缺點為在長時間使用下的可靠度不佳，再長晶的長度上也有所困難所以在長度與價格比例上顯的也相當的昂貴，其晶體特性如附表 2.2

2.9 非線性晶體 BBO : [6]

BETA-Barium Borate ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)，其光譜範圍含跨紫外光波段到紅外光波段 ($3.3\mu\text{m}$)，以非線性係數來看 BBO 的係數不算是挺高，但是他對溫度的容忍範圍寬、低吸收係數與高破壞閾值，使得在工業上對 BBO 的使用更是愛不釋手，不過其主要缺點為只有 0.5mr-cm 的光學容忍角度，只要對準的光軸稍稍偏掉一些或基頻光發散角太大，其轉換效率便會大幅度滑落，而其在價格上與寬輸出波段範圍都使 BBO 在工業上遇有極高的競爭力。其晶體特性如附表 2.3

KTP

Mohs hardness	~5			
Density	2.945 g/cm ³			
Thermal conductivity	0.13W/cm/°C			
Transmitting	350nm~4500nm			
Refractive indices	λ	n_x	n_y	n_z
	1064nm	1.74	1.7469	1.8304
	532nm	1.7787	1.7924	1.8873
Absorption coefficients	$\alpha < 1\%$ @ 1064nm & 532nm			
phase-matching Type	Type2			
phase-matching angle(deg)	$\theta = 90, \varphi = 23.3^\circ$			
acceptance angle(mrad-cm)	20mrad-cm			
Nonlinear coefficient(pm/V)	8.3pm/V			
Temperature bandwidth(°C-cm)	25°C-cm			
Walk-off angle(deg)	4.5mrad			
Optical damage threshold	$> 450\text{MW/cm}^2$			

表 2.2 KTP 特性與參數

BBO

Mohs hardness	4.5		
Density	3.85 g/cm ³		
Thermal conductivity	\perp 1.2W/m/K \parallel 1.6W/m/K		
Transmitting	189nm~3500nm		
Refractive indices	λ	n_e	n_o
	1064nm	1.5425	1.6551
	532nm	1.5555	1.6749
Absorption coefficients	$\alpha < 1\%$ @ 1064nm		
phase-matching Type	Type I		
acceptance angle(mrad-cm)	1mrad-cm		
Nonlinear coefficient(pm/V)	5.3pm/V		
Walk-off angle(deg)	3.2°		
Optical damage threshold	5GW/cm ²		

表 2.3 BBO 特性與參數

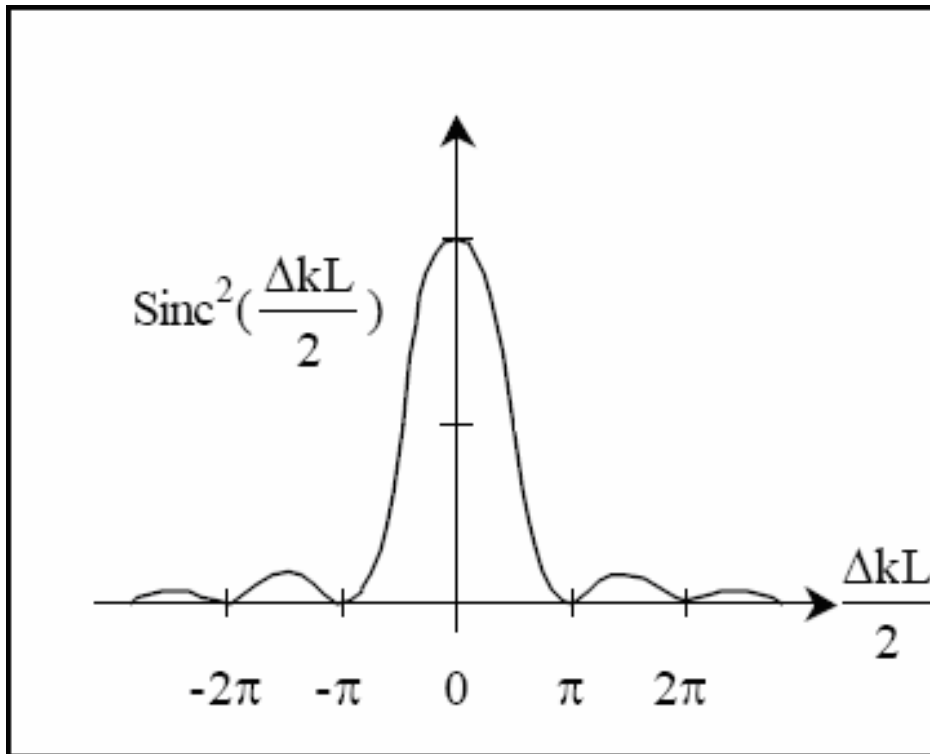


圖 2.5 Δk 對轉換效率的影響關係

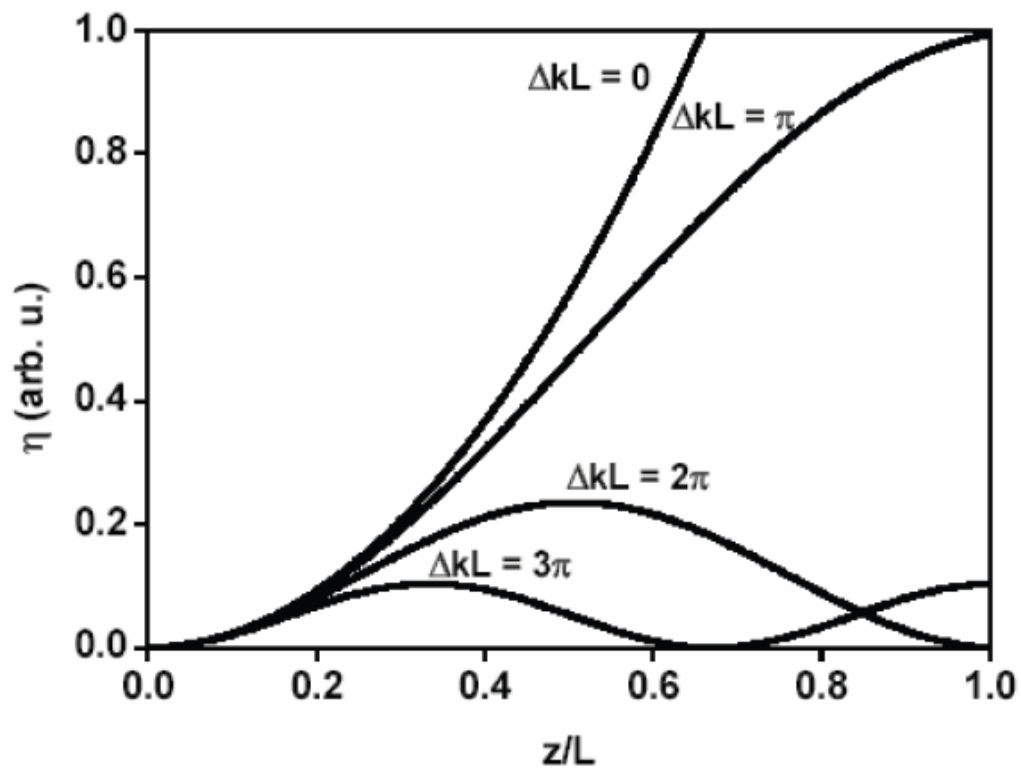


圖 2.6 相位不匹配的情況下，轉換效率與晶體長度的關係

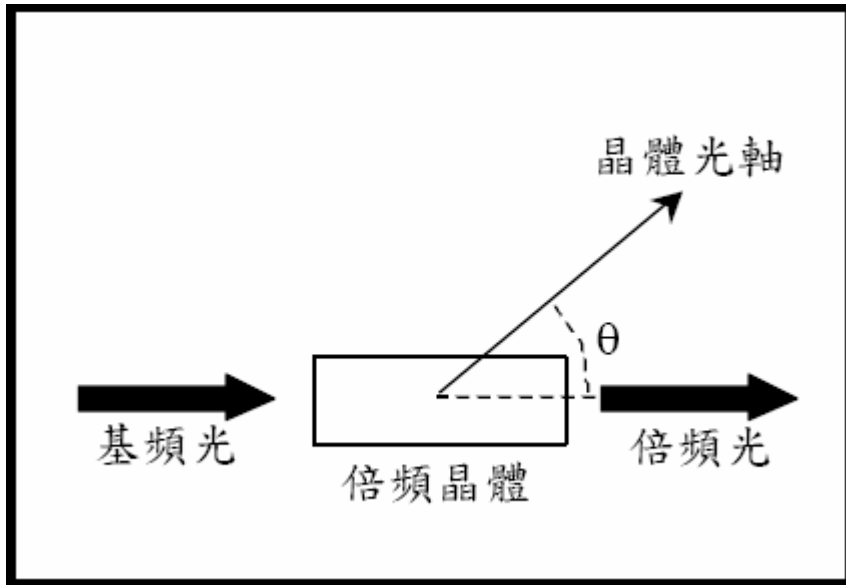


圖 2.7 相位匹配示意圖

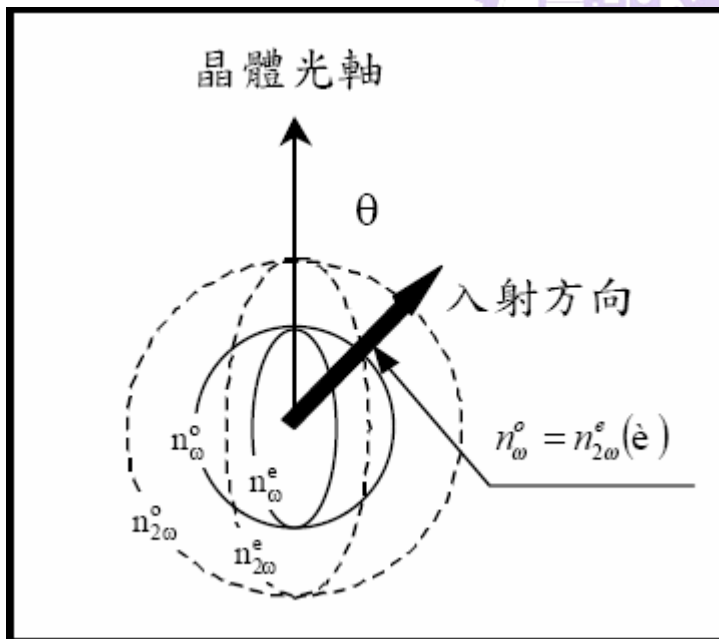


圖 2.8 o-ray 與 e-ray 相對應之折射率

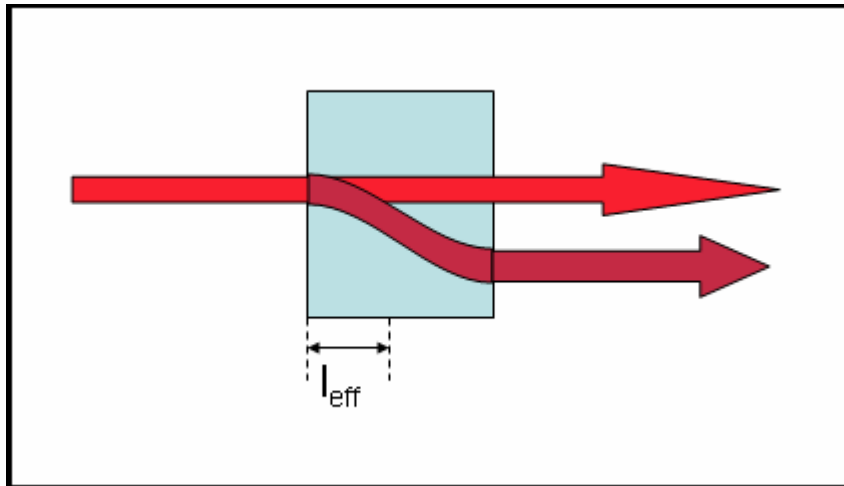


圖 2.9 雙折射晶體走離效應示意圖

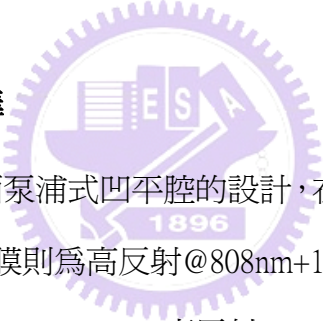


第三章 實驗架構與結果討論

3.1 波長 1064nm 倍頻為波長 532nm 之綠光雷射 [7-8]

以 1064 為基頻光，經非線性晶體作二倍頻轉換，即可得到可見光波段的 532nm 綠光雷射。綠光在加工上因波長為 1064nm 的二分之一，所以經透鏡後的聚焦大小上也為 1064nm 波段的二分之一，可用於更細微的加工。其他像眼科醫療、光學儲存、瞄準器等，都不難看出他的身影，其中因為綠光對人眼的敏感度最高，所以市面上不少的綠光雷射指示筆的誕生，使用在天文觀察與簡報上更是一項利器。

3.2 波長 1064nm 之實驗架構



如圖 3.1 所示，我們採用側面泵浦式凹平腔的設計，在前鏡部分使用平凹鏡，在曲率端曲率半徑為 750mm，鍍膜則為高反射@808nm+1064nm $R>99.5\%$ ，輸出鏡部分，一端鍍膜為部份反射 1064nm $R=80\%$ & 高反射@808nm，另一端鍍膜為抗反射 @1064nm，在 Q 開關部份使用主動式 Q 開關，其震盪頻率為 27MHz 功率 50W 輸出，在核心的模組則是使用美國 CEO，它是使用 GaAlAs 的雷射二極體作環型排列，激發濃度 0.6% 長度為 63mm 直徑為 2mm 的 Nd:YAG 晶體，其外觀示意如圖 3.2，其 YAG 前後兩端均以鍍上 Nd:YAG 可發出雷射光的波段，而整體雷射腔長為 230mm。

3.2.1 波長 1064nm 實驗結果與討論

如架構所示，我們控制 RF 訊號使雷射腔體保持在 HIGH Q 的狀態，使其基頻光為連續波(CW)輸出做量測，如圖 3.3 所示 1064 輸出在 26 安培時有最高功率 33.8W 輸出。我們使用透鏡去放大雷射輸出光點觀察，發現其輸出模態為多模輸出如圖 3.4。

之後我們控制 RF 訊號使雷射系統成為脈衝式輸出，在 Q 開關動作重複率為 5KHz 時，其平均功率輸出在 23A 時有 22.5W，脈衝寬度為 82nm，峰值功率為

4.6mJ，在定電流的形況下若改變 Q 開關的重複率，則脈衝寬度會隨著重複率增加而增加，雖然其平均功率也會跟著提升，但是因為脈衝寬度的增加使得瞬間峰值功率的下降。

3.3 波長 1064nm 使用 KTP 倍頻為波長 532nm 之實驗架構^[9]

我們以上一節 1064nm 為主架構，腔體結構我們依然是使用凹平腔設計，為了提升二倍頻轉換效率，我們更換輸出鏡與前腔鏡規格，在前腔鏡部份我們依然是使用曲率為-750mm，鍍膜則為高反射@808nm+1064nm+532nm R>99%，輸出鏡部分，鍍膜則改為全反射 1064nm+高穿透@532nm，第二面鍍膜為抗反射@532nm，而在輸出鏡與側面泵浦雷設模組間加入 Type II 的非線性晶體 KTP，其規格為 3x3x20mm，在鍍膜部份為 AR@1064nm，另一面為 AR@532nm，KTP 則用銅座包覆且通水加以控溫，其架構如圖 3.5，腔長也還是沿用上一節的 L=230mm，做一比較。

3.3.1 波長 1064nm 使用 KTP 倍頻為波長 532nm 之實驗結果與討論

我們經由控制 RF 訊號，持續送入 5 伏特訊號使得 Q 開關保持在關閉即高品質因數的狀態去觀察 532nm 連續波雷射輸出，其在 25 安培時輸出功率可得 4 瓦，其轉換效率約只有 12%左右可以說是非常的低，由圖 3.6 可看出在電流與功率之間的關係也非線性的輸出。

之後我們控制 RF 訊號讓雷射產生脈衝，我們將重複率設定在 60KHz，在綠光輸出光功率明顯的得到改善，在 23 安培時有 11W 的輸出效率由原本的 12%一下提升 39.5%，在輸出脈衝在 18 安培時約為 182n sec，雖然脈寬有些寬不過整體脈衝穩定性是穩定的其輸出波型如圖 3.7。我們也試著變化整體腔長，去尋找更穩定與更高的功率輸出。我們由 185mm 每 15mm 當做變因去尋找更合適的腔長，發現在短腔長時不但功率下降，在脈衝穩定性也大不如前，用肉眼即可看出雷射有閃爍的現象，腔長越長時，雖然穩定性提高了，不過隨著腔長的變長轉換效率也跟著下降，這樣觀察下來在腔長 230mm 時還是穩定性與輸出功率的一個最佳平

衡的總腔長如圖 3.8。

再來我們用頻譜儀去檢查輸出波長，發現波長確實落在 532nm，其頻寬約在 0.3nm 左右(如圖 3.9)。之後我們改變重複率為 10KHz 得到在 23 安培時輸出功率為 10.2W(如圖 3.11)，雖略為下降 0.8W，可是其輸出脈衝有效縮短到了 80n sec。

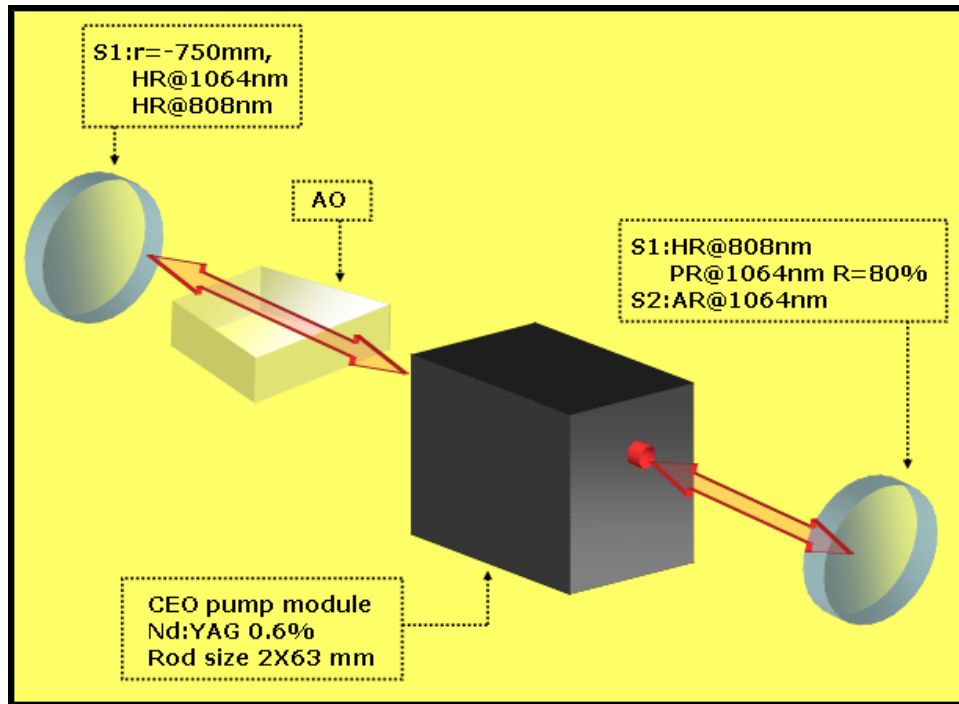


圖 3.1 波長 1064nm 實驗架構

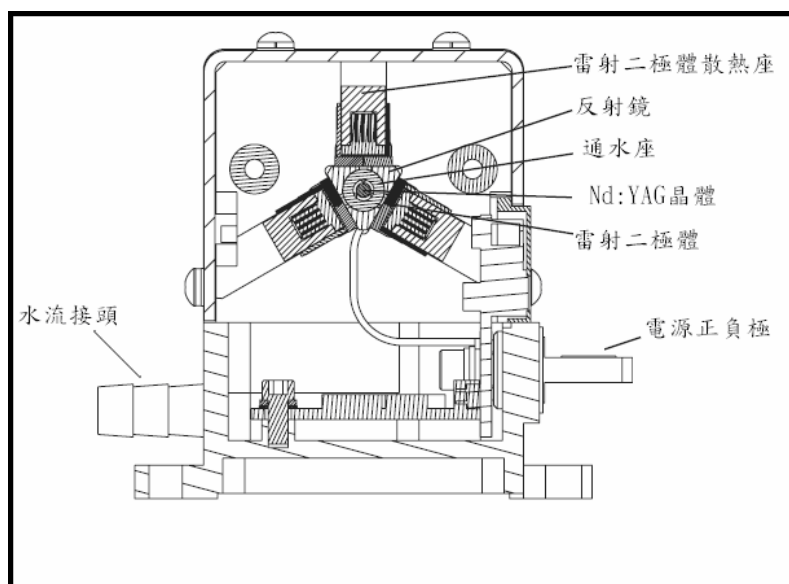


圖 3.2 Cutting Edge Optonics RB 系列 DPSS Nd : YAG Rod Laser module

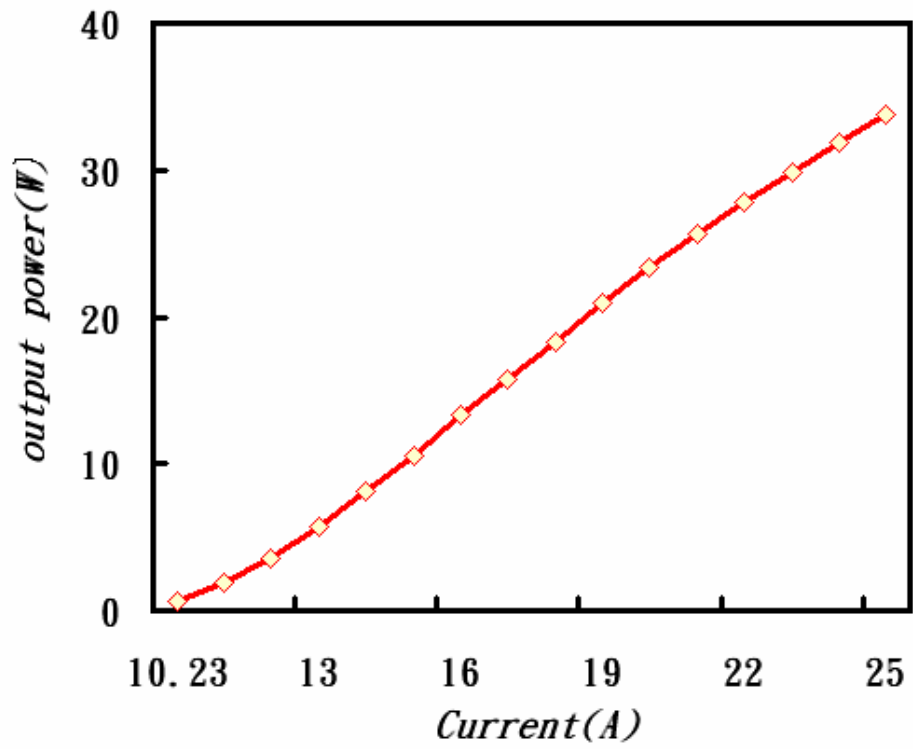


圖 3.3 波長 1064nm 連續波輸出之電流與功率關係圖



圖 3.4 CEO pumping module 雷射輸出模態

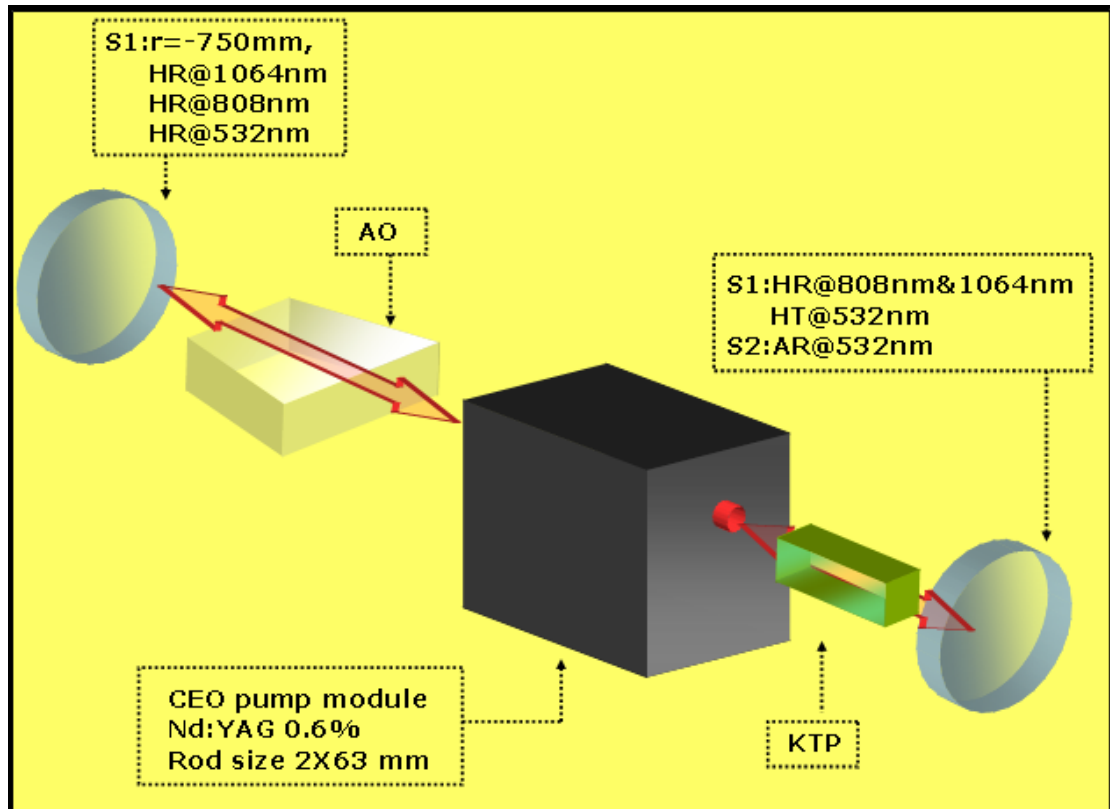


圖 3.5 KTP 倍頻實驗架構

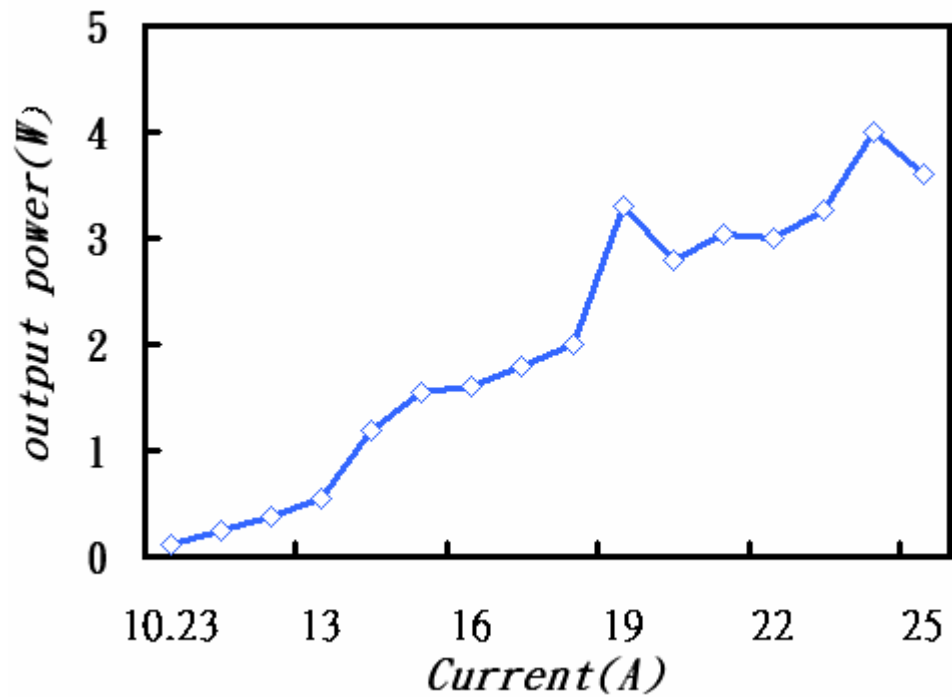
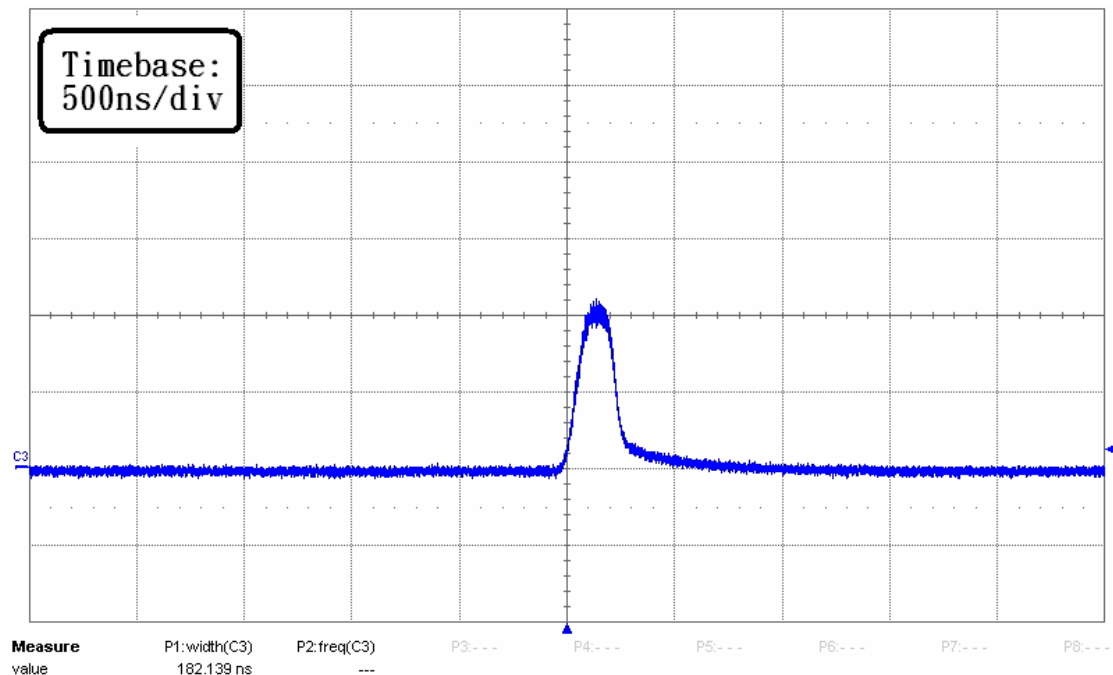
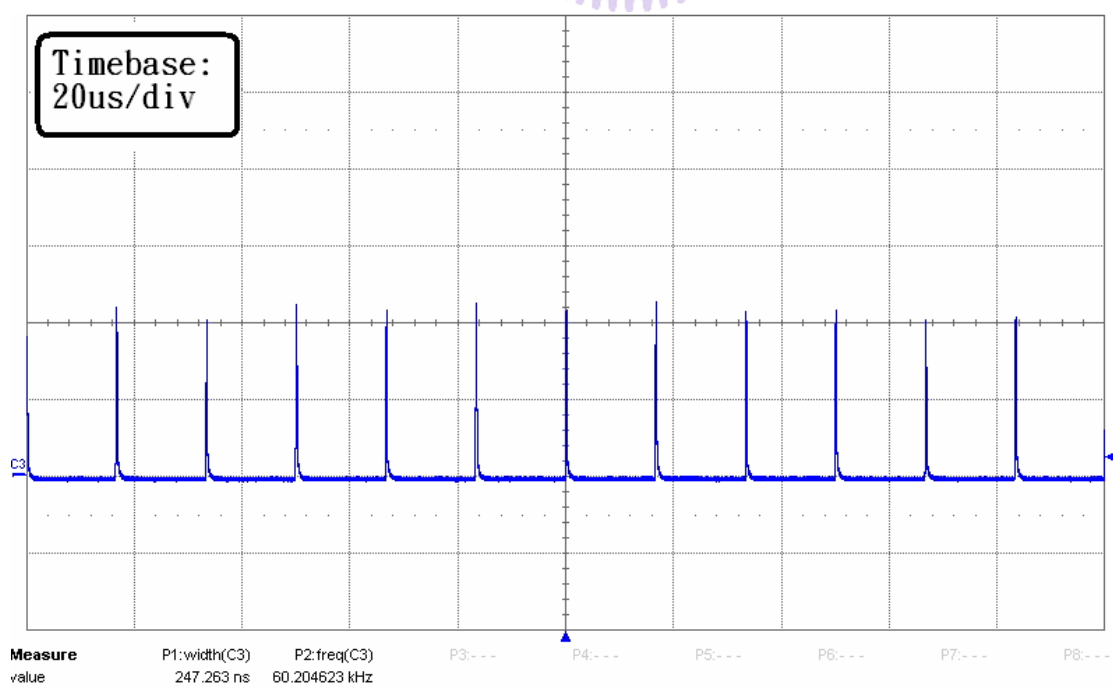


圖 3.6 波長 532nm 連續波輸出之電流與功率關係圖



(a)



(b)

圖 3.7 (a)重複率為 60KHz 之 KTP 倍頻，綠光雷射輸出脈衝波型圖

(b) 強度對時間分佈圖

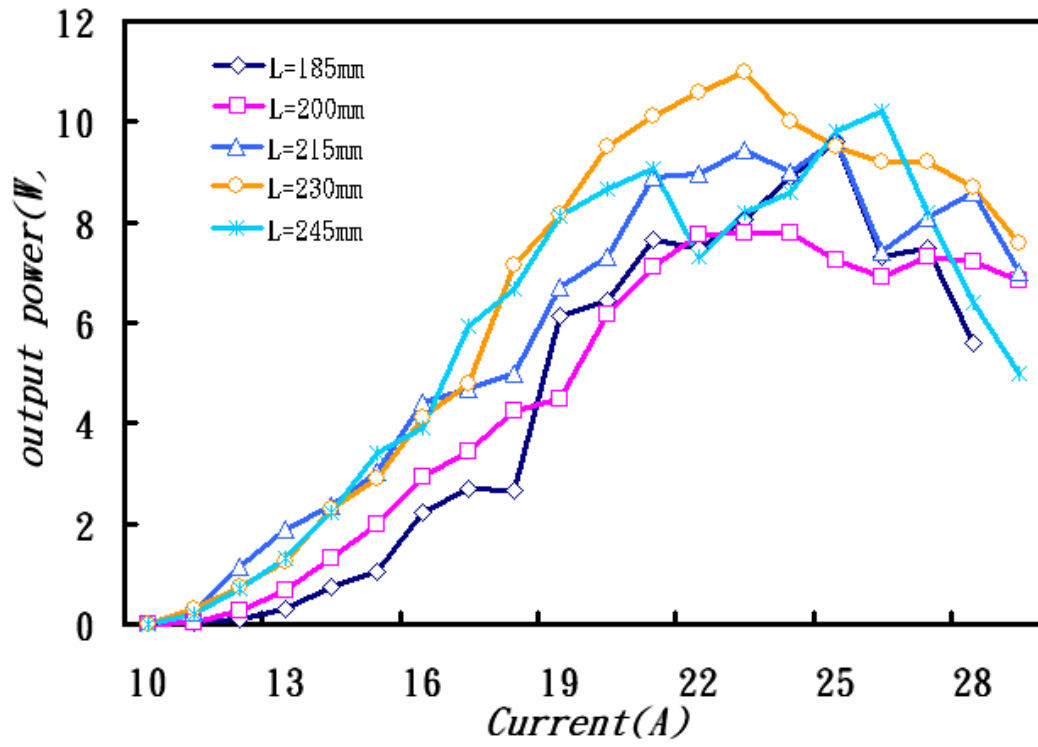


圖 3.8 KTP 倍頻之改變腔長之電流與功率關係圖

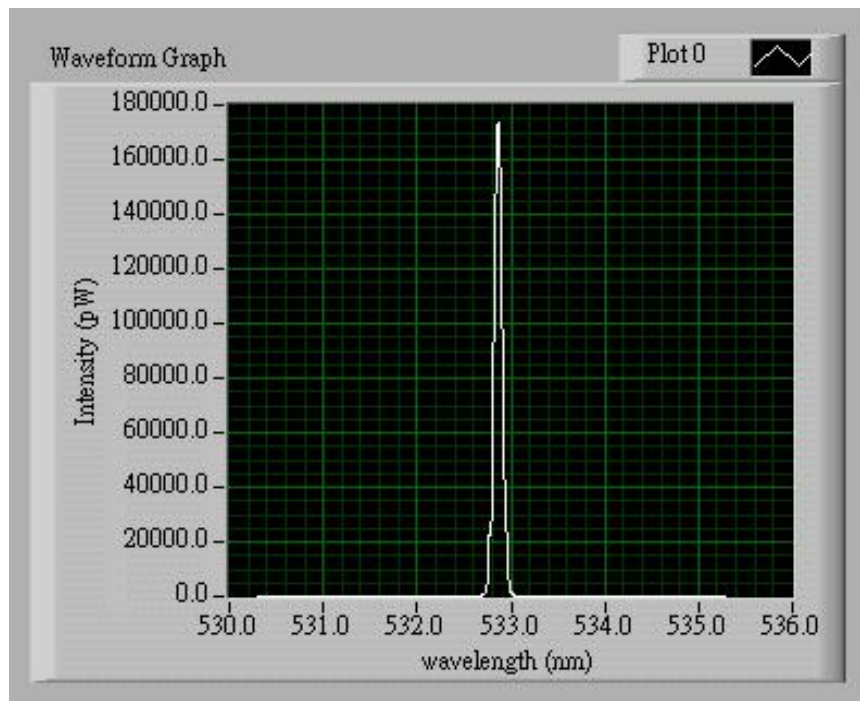
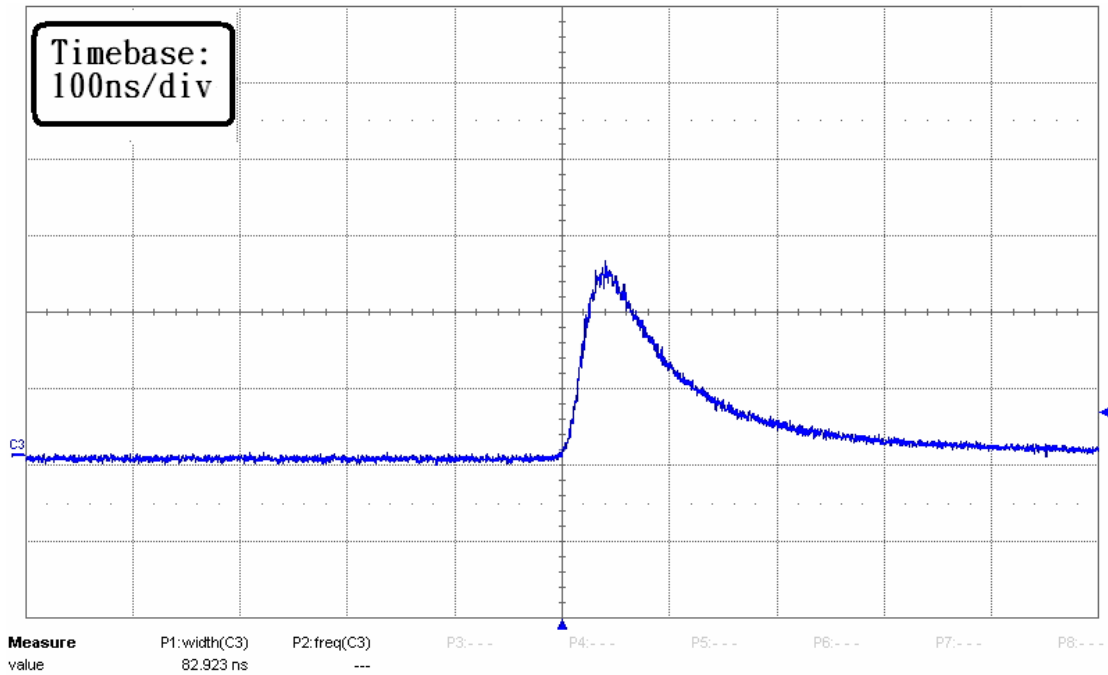
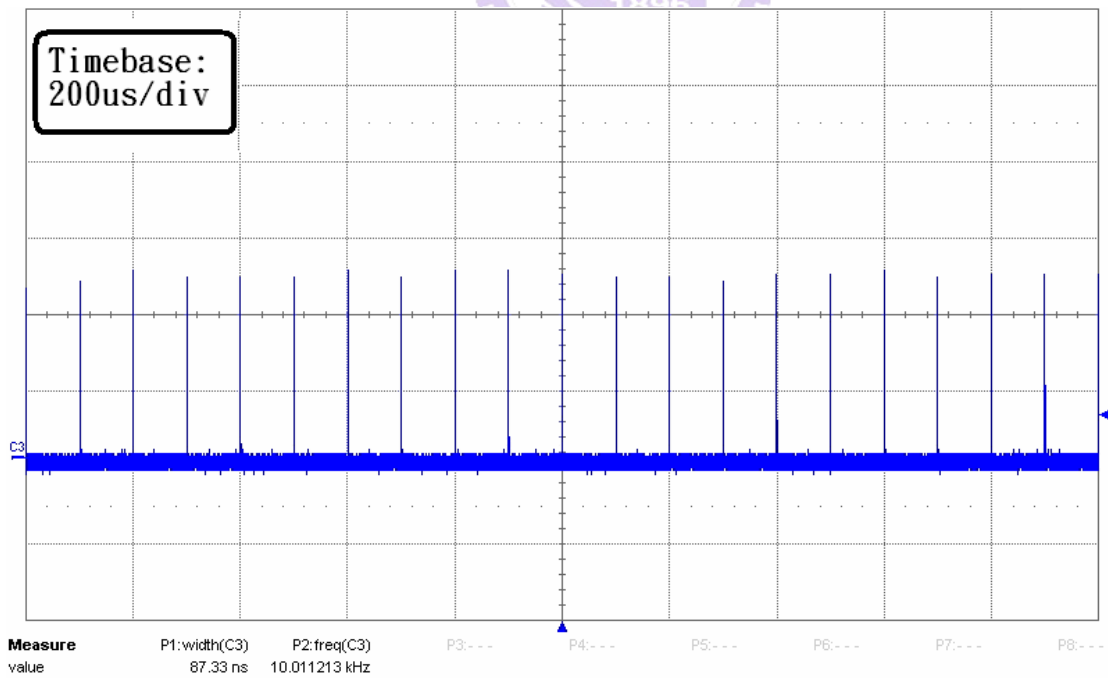


圖 3.9 KTP 倍頻之頻譜



(a)



(b)

圖 3.10(a)重複率為 10KHz 之 KTP 倍頻，綠光雷射輸出脈衝波型圖

(b) 強度對時間分佈圖

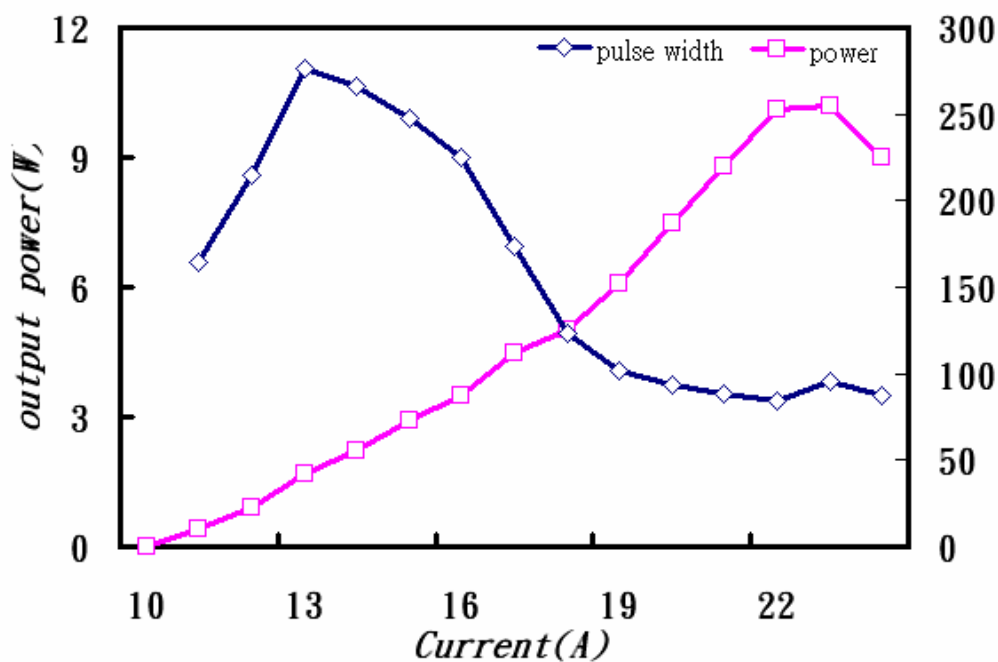


圖 3.11 KTP 倍頻之電流與功率、脈衝寬度關係圖

3.4 波長 1064nm 使用 BBO 倍頻為波長 532nm 之實驗架構

由於 BBO 有較高的破壞閾值且對溫度的容忍範圍寬雖然其非線性係數不比 KTP 來的高，所以藉由實驗來與 KTP 倍頻做個比較。實驗架構與上一小節一樣，我們只是將 KTP 變更爲 BBO 其餘條件均相同，唯一的不同爲 BBO 長度爲 3x3x10mm 長度爲 KTP 的一半。

3.4.1 波長 1064nm 使用 BBO 倍頻為波長 532nm 之實驗結果與討論

由實驗結果得到重複率爲 60KHz 時在 22 安培可得到最高轉換效率輸出 2.13 瓦，其轉換效率爲 8%，不過當重複率改爲 10KHz 時，其轉換效率約提高了 2 倍(如圖 3.12)，在 60KHz 因爲基頻光輸出峰值功率過低造成轉換效率不佳，在綠光輸出的脈衝部份也隨著會有忽高忽低的情形如圖 3.13，當重複率爲 10KHz 時，因提高了基頻光的峰值功率，所以綠光脈衝的穩定性也比 60KHz 時來的好，在 18 安培重複率 10KHz 時，輸出脈衝爲 26n sec 也比 KTP 的 80n sec 來的小了許多，使用頻譜儀觀察其輸出波長，其結果與 KTP 差不多，皆正確的落在 532 波段，其頻寬也約爲 0.3nm。

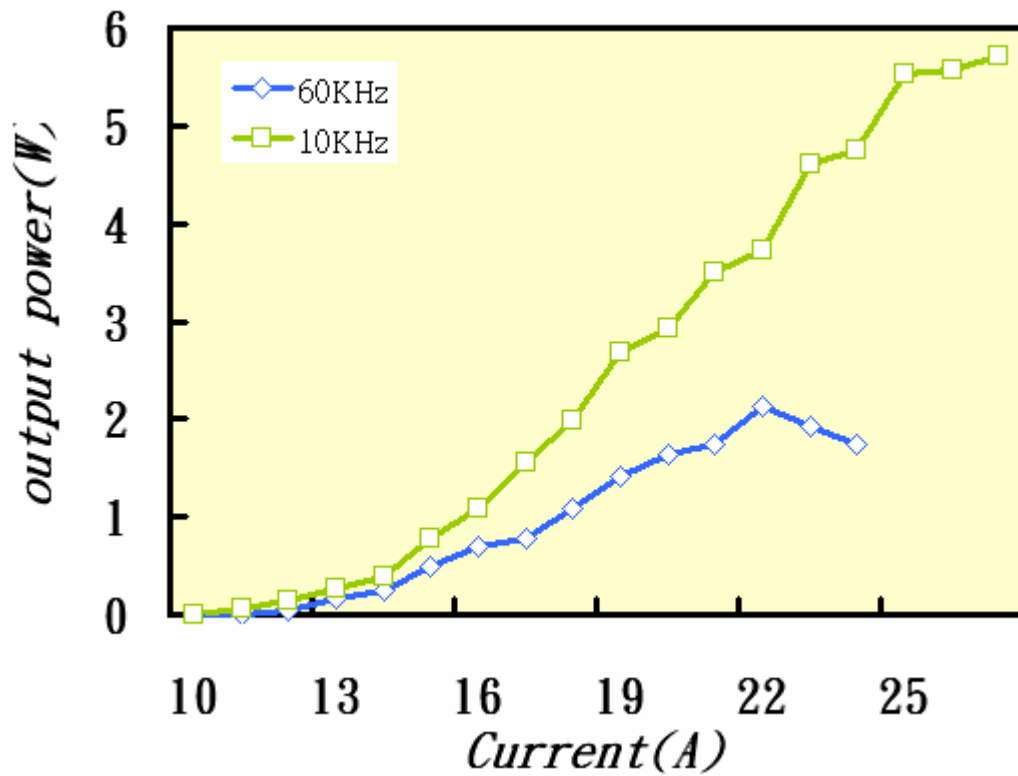


圖 3.12 BBO 倍頻之針對不同重複率的電流與功率關係圖

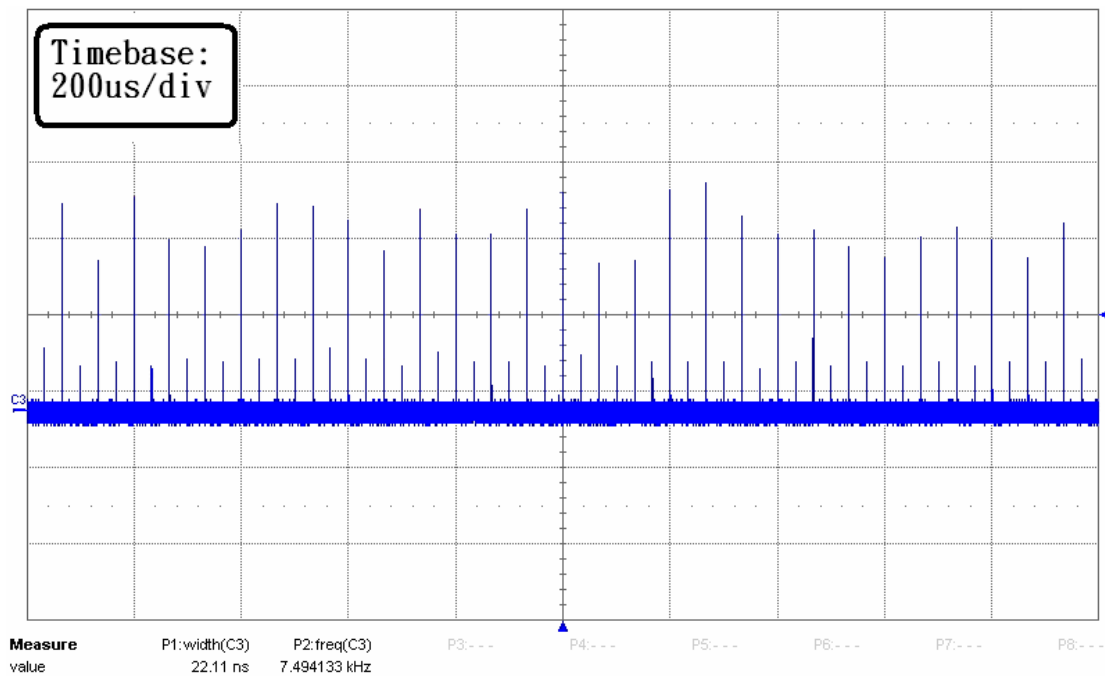
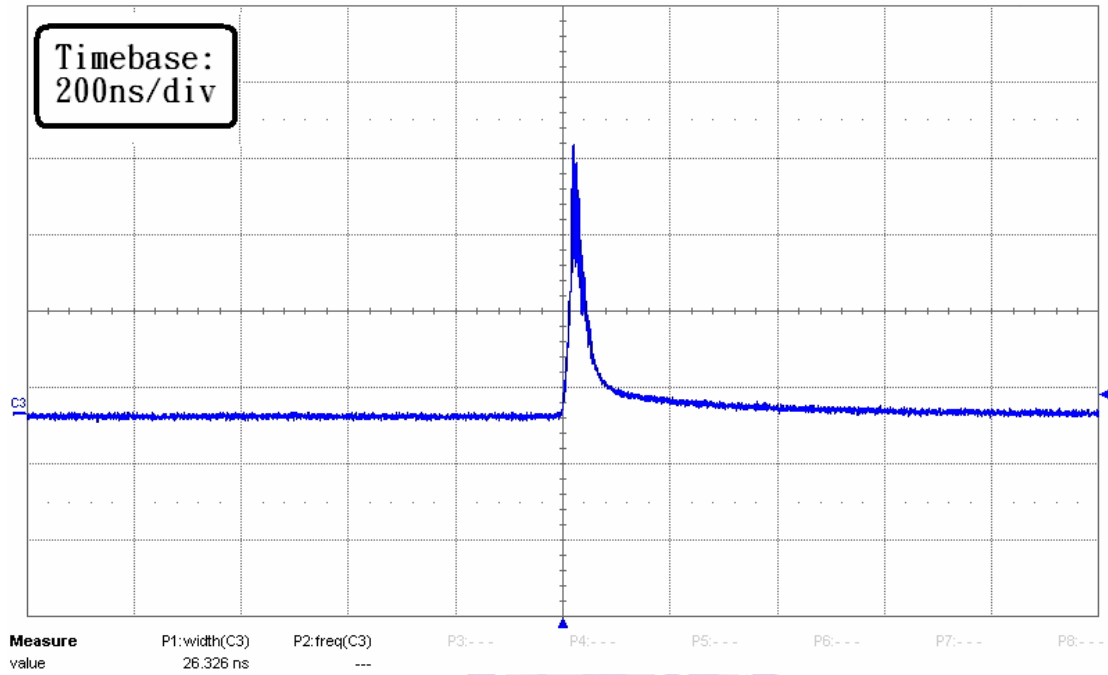
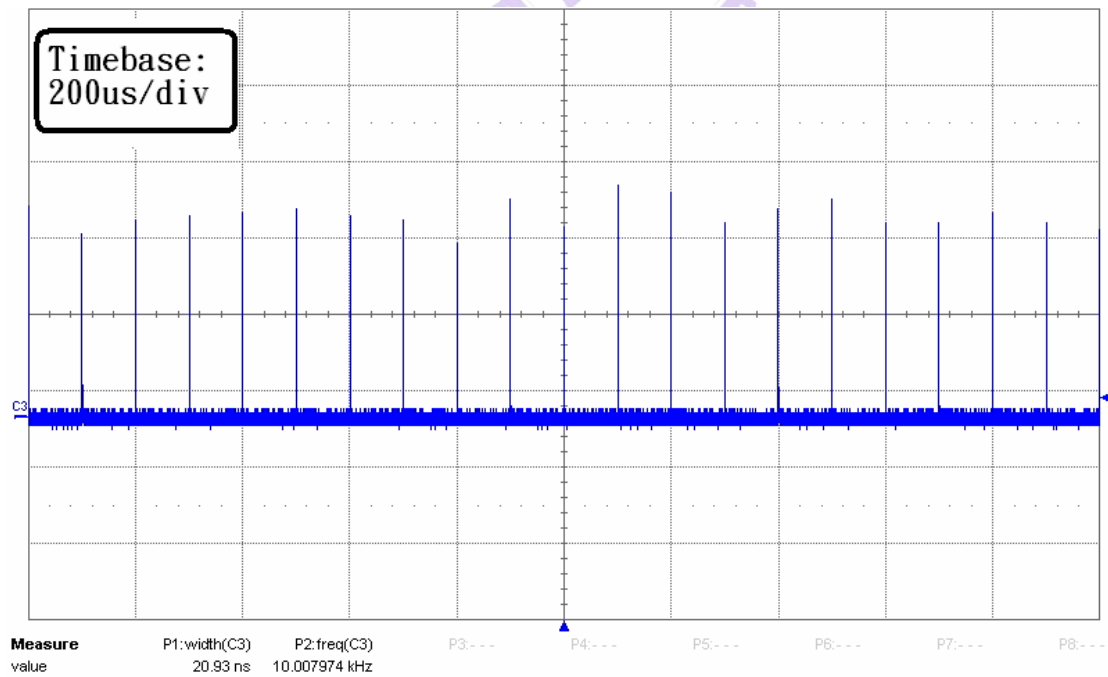


圖 3.13 重複率為 60KHz 之 BBO 倍頻，強度對時間分佈圖



(a)



(b)

圖 3.14(a)重複率為 10KHz 之 BBO 倍頻，綠光雷射輸出脈衝波型圖

(b) 強度對時間分佈圖

3.4 KTP 與 BBO 之長時間可靠度測試^[10-11]

雖然 KTP 的轉換效率比 BBO 來的高，可是在工業上的應用不單單只是功率高就可以了，穩定性與可靠度便是我們在意的一環，因此我們針對倍頻晶體 KTP 與 BBO 對於長時間轉換下的衰減量以及穩定性加以測試。

這裡我們使用 END PUMP 結構(如圖 3.15)，以 Nd:YVO₄ 為增益介質，整體腔長為 120mm 當作測試條件，在 25 安培，重覆率 30KHz 的條件下去做長時間的測試發現，在我們連續點亮 44 小時前，功率從剛開始最高的 4.2W 逐漸的慢慢往下衰減到 3.5W(圖 3.16)，不過在脈衝方面都穩定的保持在 25n sec 左右，之後我們持續觀察功率與脈衝的變化，在脈衝部份的穩定性漸漸已不如之前，快速跳動，此時我們先關閉雷射，讓雷射冷卻 10 分鐘後再以相同條件再度開啓，剛開始功率部份有達到 3.5W 可是脈衝部分卻是在一開始就呈現了不穩定狀態，漸漸的功率也從 3.5W 慢慢衰減到 1.7W 如圖 4.17。之後關閉雷射，我們檢查 KTP 是否有何異狀，發現晶體發生 Gray Tracking 的情形如圖 3.18，也就是晶體內部延著綠光輸出光路燒出了一條黑線，我們以顯微鏡仔細觀察 KTP 前後兩個端面，發現在鍍膜與端面未有任何的損害，可見 Gray Tracking 的發生並非因鍍膜的損壞而造成由表面逐漸往晶體內部逐漸破壞的情形，而是晶體本身再長時間操作下晶體本質產生變化而焦黑。

之後我們也使用相同條件將 KTP 換成 BBO 去做測試，連續點亮 72 小時後發現在功率上雖然有小幅度的跳動，不過這應該只是在控溫部分的不穩定所造成的功率上呈週期性的跳動，而在脈衝方面在 72 小時後都還是依然保持穩定(如圖 3.19)。

這樣的比較下來，雖然 KTP 有較高的轉換效率，可是卻不適合用在長時間點亮的場合，反觀 BBO 轉換效率雖然偏低，不過可靠度與晶體特性卻都表現的比 KTP 強壯，所以在工業上的應用還是比較適合選用 BBO 當倍頻晶體使用。

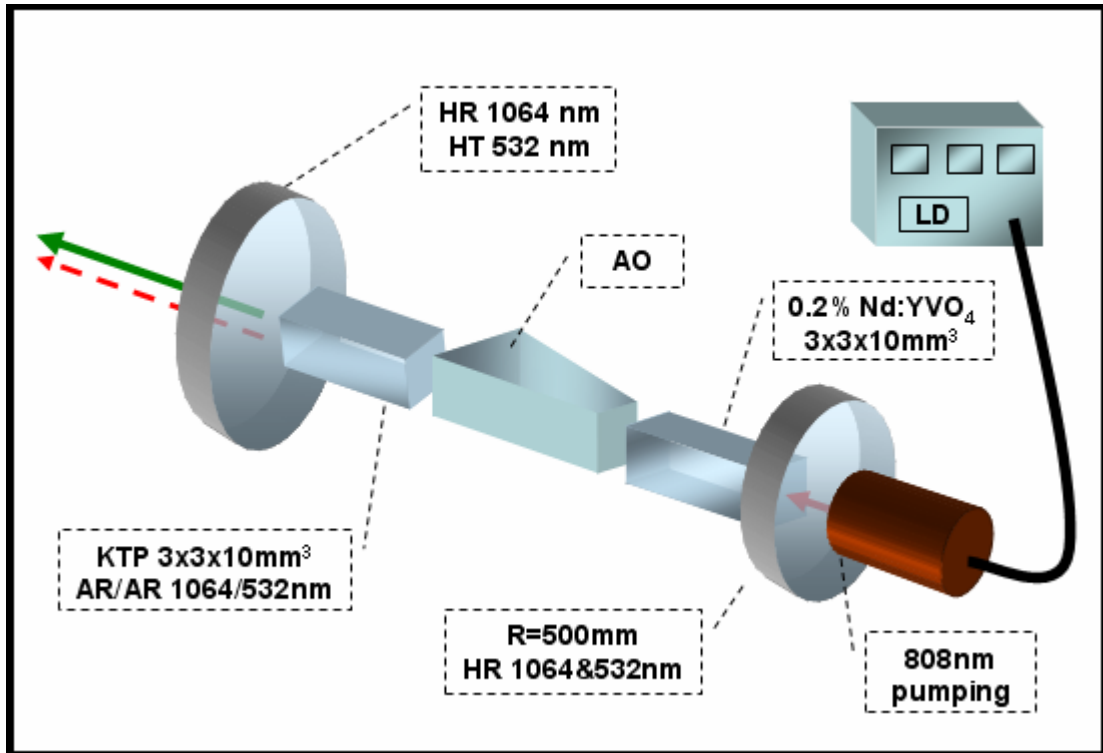


圖 3.15 非線性晶體 End-pump 測試架構

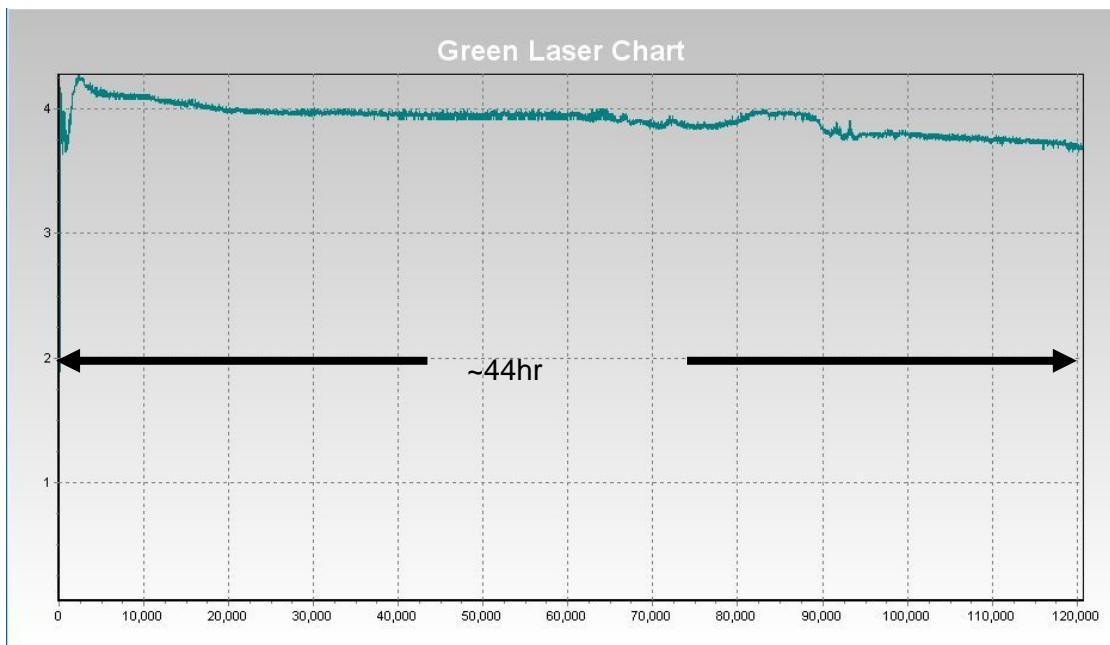


圖 3.16 KTP 之長時間測試之前 44 小時，功率與時間關係圖

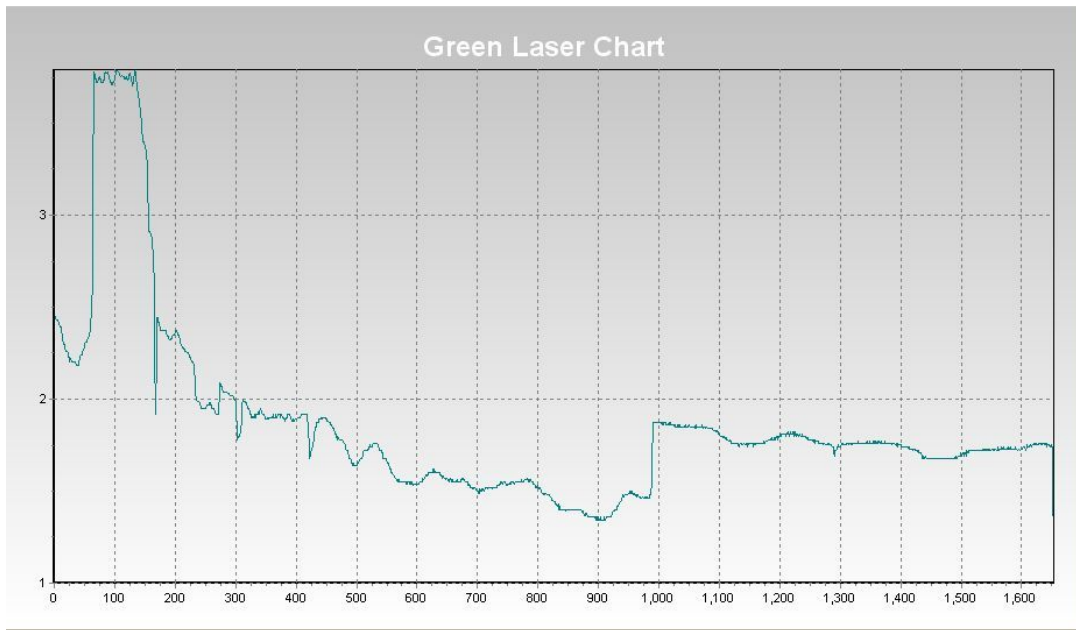


圖 3.17 KTP 之長時間測試發生問題後持續測試 1 小時，功率與時間關係圖

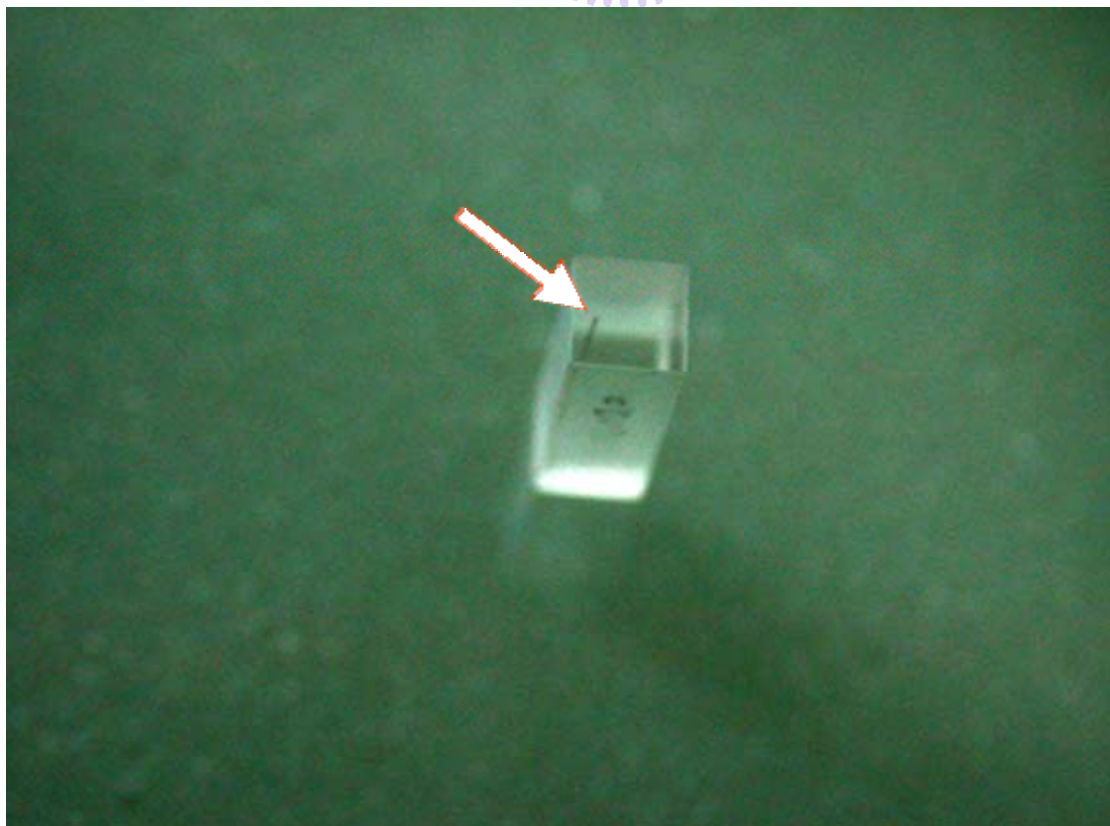


圖 3.18 KTP Gray Tracking

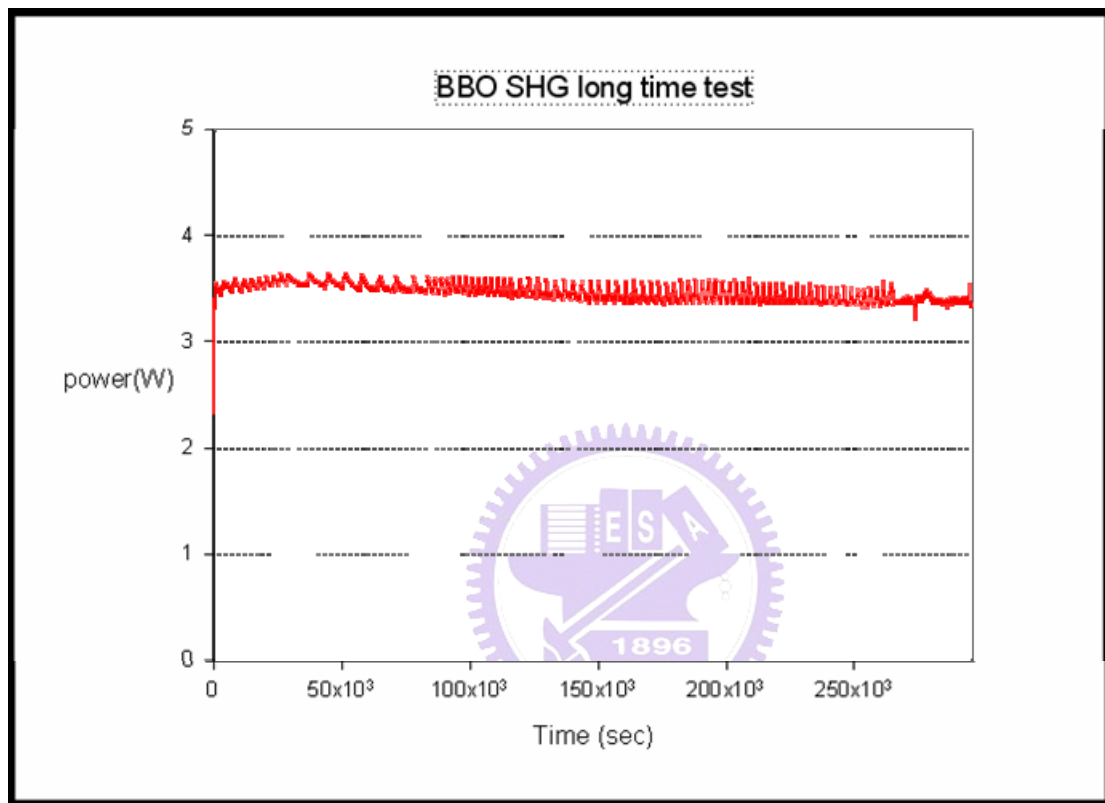


圖 3.19 BBO 之長時間測試 72 小時，功率與時間關係圖

3.5 波長 1123nm 倍頻為波長 561nm 之黃綠光雷射^[12-16]

我們以 808nm 波長的半導體雷射作為激發光源，用光譜儀測量 Nd:YAG 所發出的螢光光譜，可得到下圖 3.20，發現 Nd:YAG 的有效輻射面積在 1123nm 波段僅為 1064nm 的十五分之一^[13]，所以在共振腔設計部分需抑制 1064nm 與附近波段的共振，才能避免 1123nm 不會因與其他波段的競爭下造成的不出光

3.5.1 波長 1123nm 連續波雷射之實驗架構

在實驗架構上如圖 3.21 所示，我們採用側面泵浦式凹平腔的設計，在前鏡部分使用平凹鏡在曲率端曲率半徑為 500mm，在鍍膜部分平面端為 808nm+1064nm 高穿透膜(HT) $R < 0.2\%$ ，在曲面端也就是腔內一邊為高反射(HR)1123nm+561nm 與 808+1064nm 高穿透(HT)，輸出鏡部分使用平平鏡，在鍍

膜部分其腔內端為部份反射(PR)1123nm R=95%，在核心的模組則是使用美國雷射功率模組。

3.5.2 波長 1123nm 連續波雷射之實驗結果與討論

首先我們先針對不同腔長部分所做的量測可得到總腔長在 117mm 時可得到最高的 CW 輸出功率 21 安培時輸出 10.1 瓦如圖 3.22，由於此架構抑制了 1064nm 與其附近增益，而同條件下波長 1123nm 的出光效率約為波長 1064nm 的 46%，不過由其螢光光譜看來 1123nm 附近如 1113nm 與 1117nm 的輻射面積幾乎與 1123nm 差不多，而一般鍍膜較難將這差距不到 10nm 的增益抑制的很好，因此這幾個波段都有可能在實驗中出光。而在我們實際測量輸出的光譜發現，其實際的輸出中確實在 1123nm 左右的波段在，因電流的增加提高，波長 1123nm 的功率在相對競爭之下，而使 1113nm 波段被抑制的很好。如圖 3.23

3.5.3 波長 1123nm 使用 BBO 倍頻之連續波黃綠光雷射

由上一個實驗得到此架構最大輸出約為 30 安培 29 瓦的 1123nm 雷射，現在則在 CEO 模組與輸出鏡之間加入一倍頻晶體(BBO)，以得到波長 561nm 的輸出，其針對 1123nm 波段的 BBO 切角與特性如表 3.1 所示，然而倍頻晶體的選擇是非常重要的，包括強度、切角、TYPE、長度；此外在不同的倍頻考慮下，非線性係數理論上越高越好，但晶體本身的破化閥值與光學品質有關，如可接受角、及因光束的發散造成其並非以最佳角度入射，有向位不匹配產生，另一項光學參數為溫度寬帶，因光束在晶體內作用會產生熱能使得晶體溫度升高，而這溫度變化會造成晶體折射率及晶體長度膨脹與縮小，所以必須對晶體加以控溫，避免影響轉換效率與穩定性。

3.5.4 波長 1123nm 使用 BBO 倍頻之連續波黃綠光雷射實驗結果

因激發能量太小的關係造成轉換效率不佳約只有 4% 左右，也因轉換效率不佳的原因使晶體產生嚴重的熱透鏡效應，在 22 安培時功率開始飽和下降，也造

成了功率不穩定有閃爍的現象，我們試著去增加或減少腔長，發現當腔長越長，飽和的速度也越快。

3.5.5 波長 1123nm 脈衝雷射之實驗結果

我們之前已使用了連續波出光方式只得到效率不到 4% 的光轉換，成果不佳，因此現在則將 1123nm 加上一主動式 Q 開關元件改為脈衝的形式，提高其脈衝功率，希望藉此能增加轉換的效率。這裡我們使用頻率 27MHz 50 瓦的 Q 開關，在這我們先針對脈衝式波長 1123nm 作量測，發現若是重複頻率太低且閘控時間開的太低，會造成輸出鏡因承受不了強大的脈衝而打斑，所以我們先針對不同閘控時間與不同重複頻率為變因去作量測，首先先以閘控時間為變因，固定電流值 25 安培與固定頻率在 100KHz，調變閘控時間來觀察閘控時間與雷射輸出特性間的關係，實驗結果得到 1123 閘控時間需要開到 4μ 與波長為 1064nm 之 1μ 不同，由表 3.2 可知閘控時間約在 $4\mu \sim 5\mu$ 時較適合 1123nm 這波長，因此我們將閘控時間固定在 5μ ，去觀察脈衝波形如圖 3.24，發現在低安培數的時候並不是很穩定，雷射並沒有完全出來，而加大電流後情況則有改善，由此可知當在低電流時雷射尚未達到完全的居量反轉，所以當加大電流，提高激起的原子數，雷射現象就恢復了穩定脈衝輸出，實驗發現當電流提高到 20A 以上，脈衝就會漸漸趨於穩定~到 24 安培可到達穩定的脈衝輸出如圖 3.25。而在重複率 5KHz、閘控時間 5μ sec，可得 30 安培時有最高輸出 12.8 瓦如圖 3.26。

3.5.6 波長 1123nm 脈衝雷射使用 BBO 倍頻之實驗結果

由上一個實驗得知波長 1123nm 的腔長與基本特性後，我們加入倍頻晶體 BBO 使波長 1123nm 的基頻光二倍頻轉換成波長 561nm。由數據(圖 3.27)看出轉換效率大約在 14% 左右，轉換效率較連續波輸出提高了 3.5 倍，在 28 安培時可得最高功率 2.02 瓦的黃綠光輸出。然而此架構因為對 Nd:Yag 其他波長的抑制已無之前的好所以當倍頻晶體加入腔內後，會有其他波長的輸出如圖 3.28，而在此架構之下發現由於我們採用直線腔出光，所以在電流大於 20 安培之後黃綠光輸

出因為黃綠光在腔內的互相來回震盪的干擾，產生穩定性不佳約 0.3 瓦的跳動，為了改善此情形而不去改動腔體設計我們在 輸出鏡與倍頻晶體間加上一濾鏡(紅外光通過，可見光反射)，來避免黃綠光在 腔體來回震盪增加穩定性，實驗得到加上濾鏡後穩定性不但提升連轉換輸出的效率也由未加濾鏡時的 14% 提升到 22%，在重複率 5KHz、開控時間 $5\mu\text{ sec}$ ，電流 30 安培時有 3.34 瓦輸出如圖 3.29。而因為倍頻晶體加入腔內後，會有其他波長的輸出，所以等於是有數個基頻光在腔內產生倍頻轉換導致在經由非線性晶體轉換後也得到了不止 561nm 單一波長的輸出如圖 3.30。

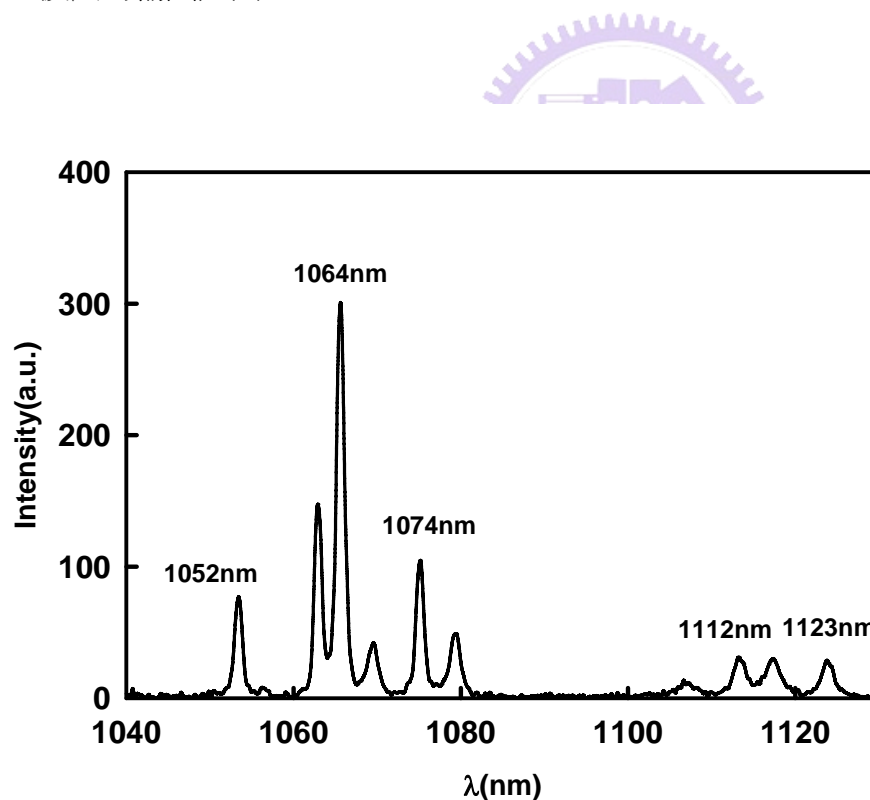


圖 3.20 Nd : YAG 螢光光譜

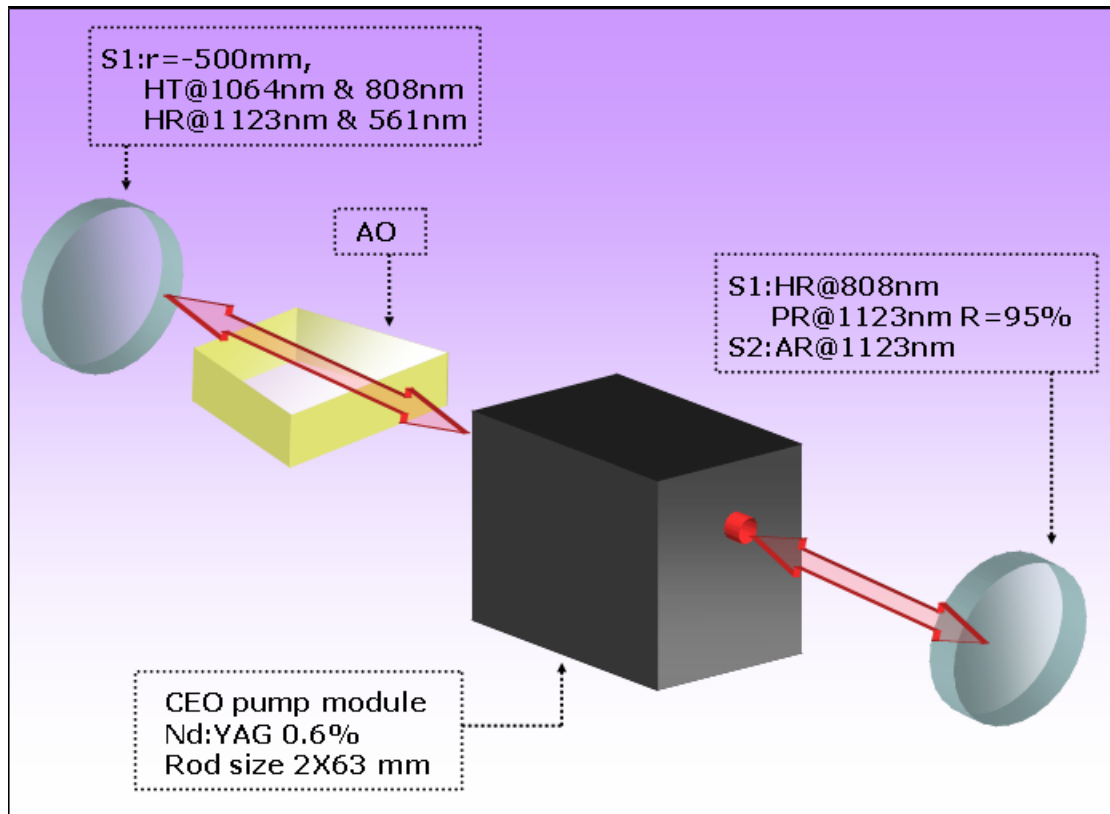


圖 3.21 波長 1123nm 實驗架構

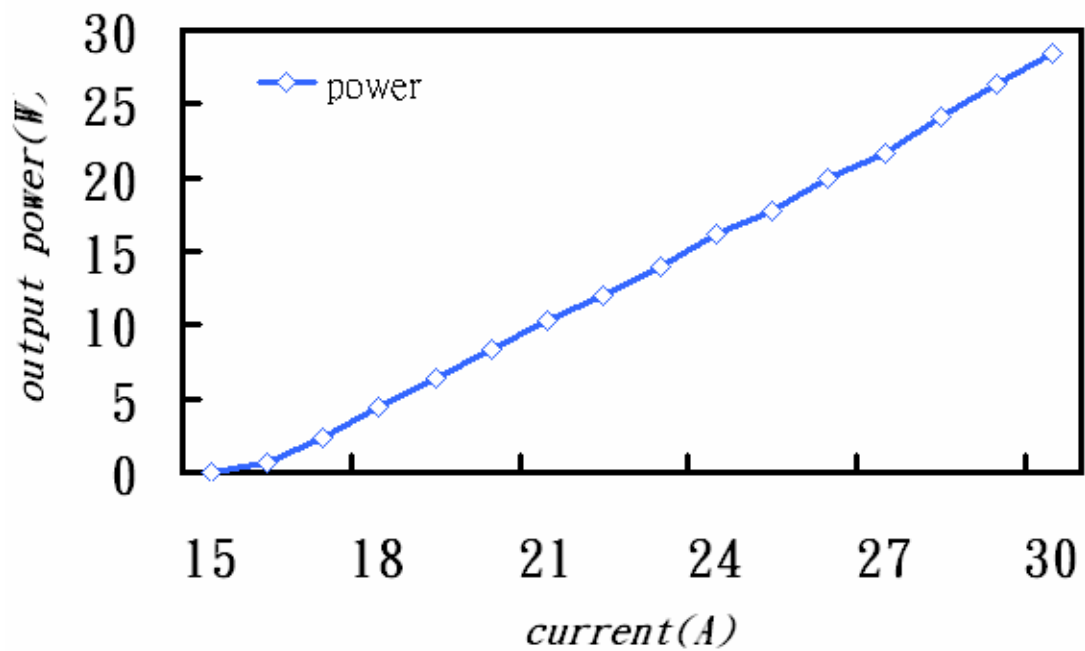


圖 3.22 連續波 1123nm 輸出，電流與功率關係圖

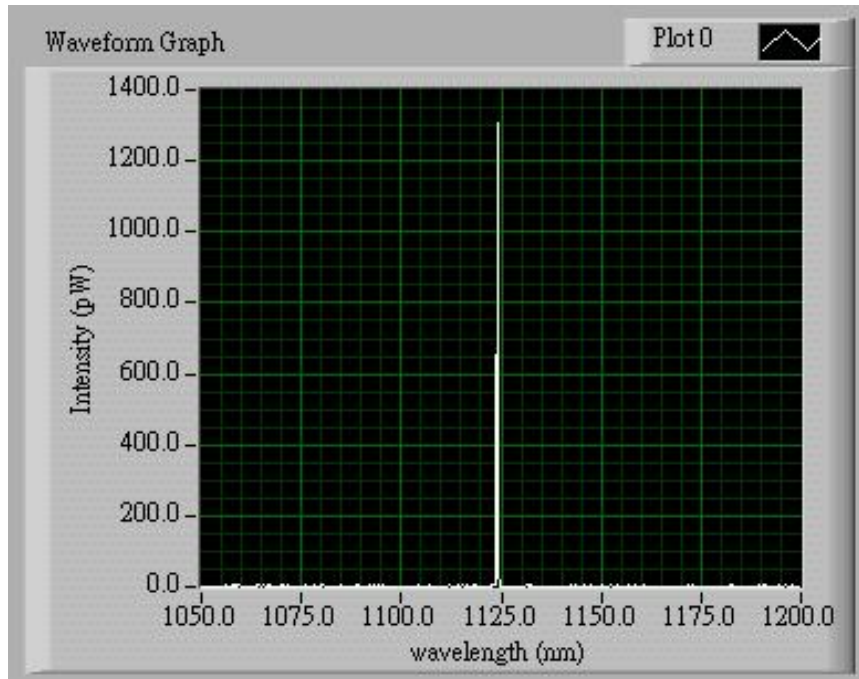


圖 3.23 波長 1123nm 輸出光譜

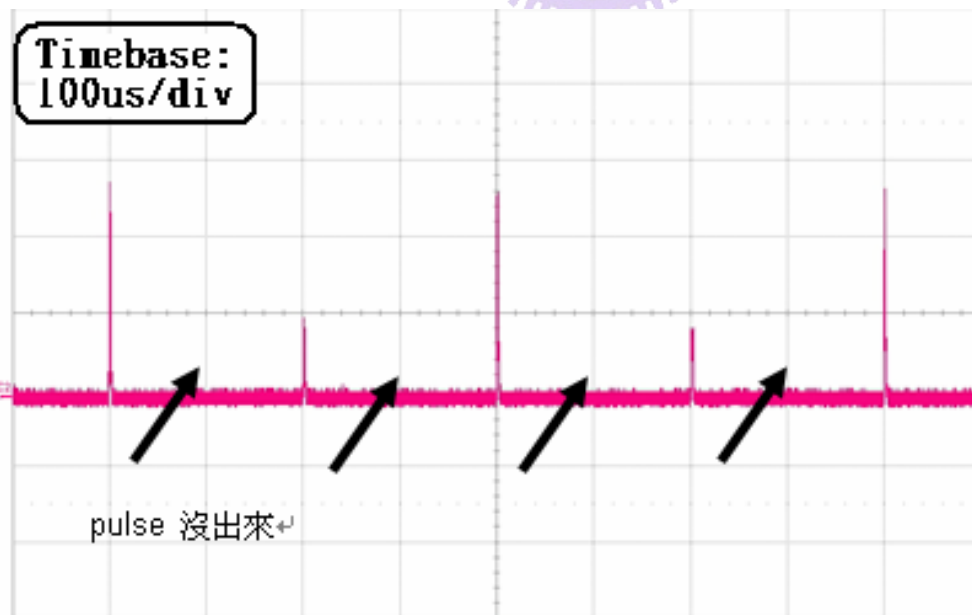


圖 3.24 波長 1123nm 在重複率 10KHz，低安培數之脈衝輸出

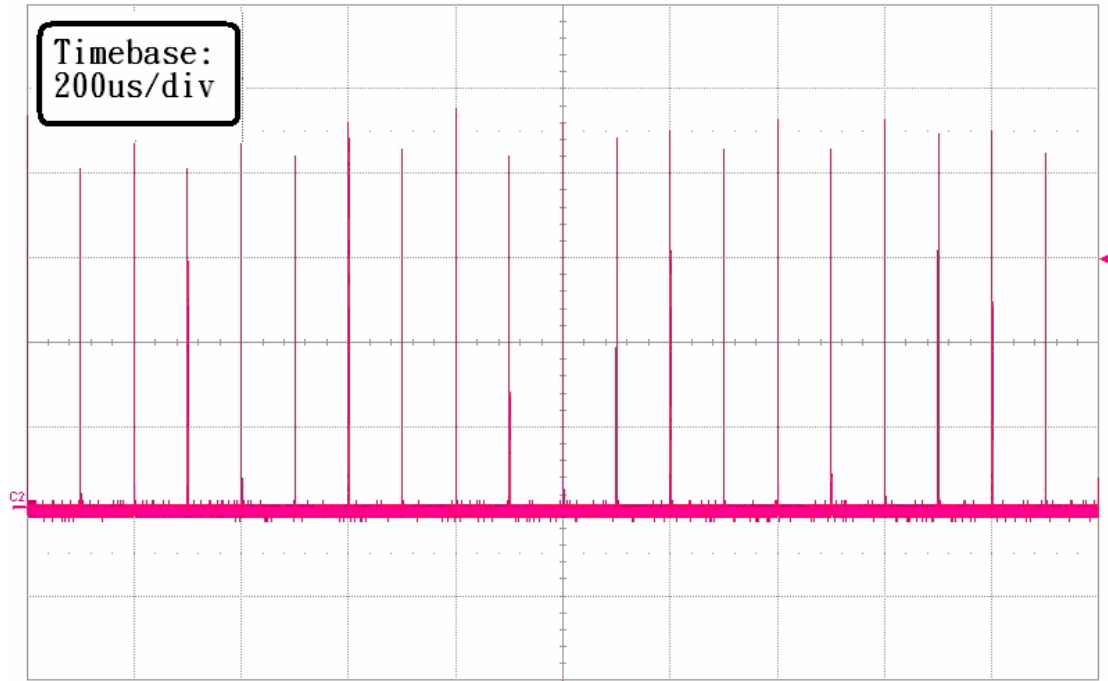


圖 3.25 波長 1123nm 在重複率 10KHz，24 安培之脈衝輸出

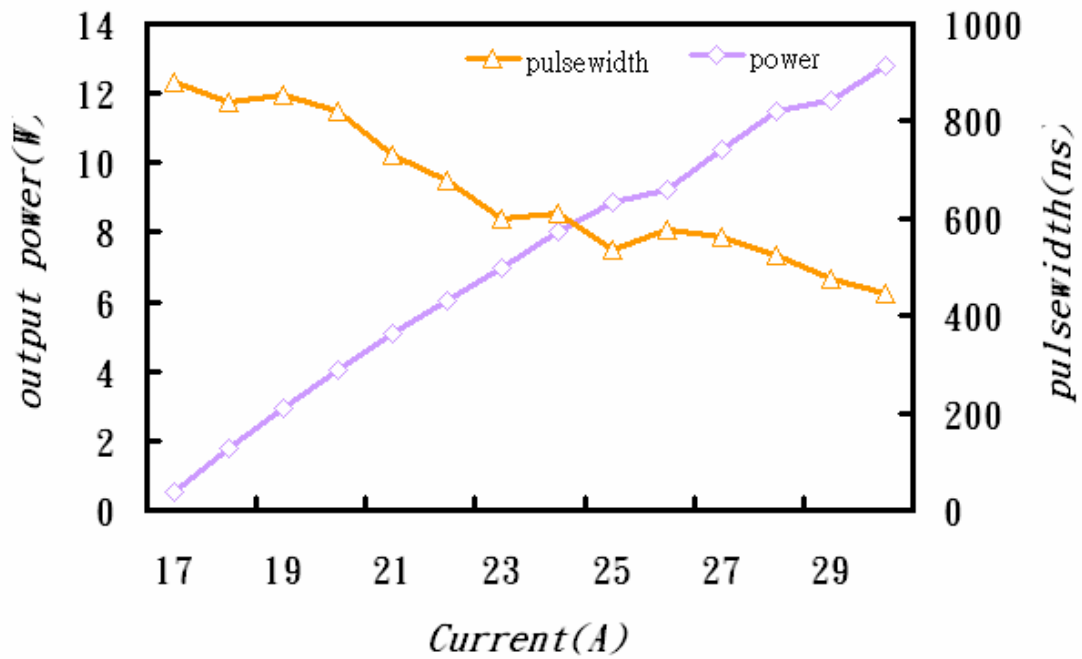


圖 3.26 重複率 5KHz、佔閘控時間 5u sec 波長 1123nm 輸出之電流與功率與脈衝寬度關係圖

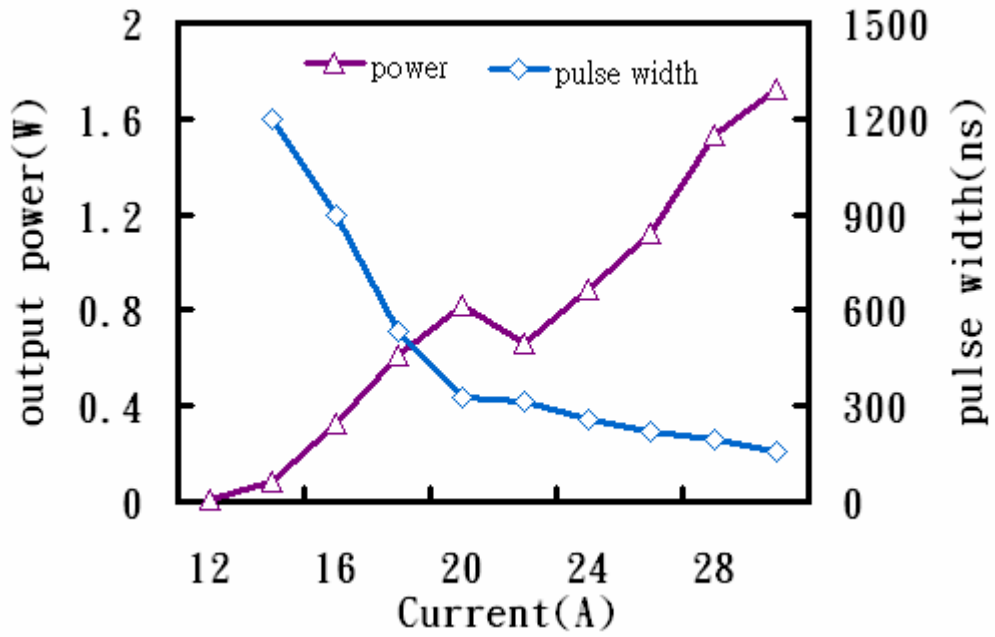


圖 3.27 重復率 5KHz、佔開控時間 5u sec 波長 561nm 輸出之電流與功率與脈衝寬度關係圖

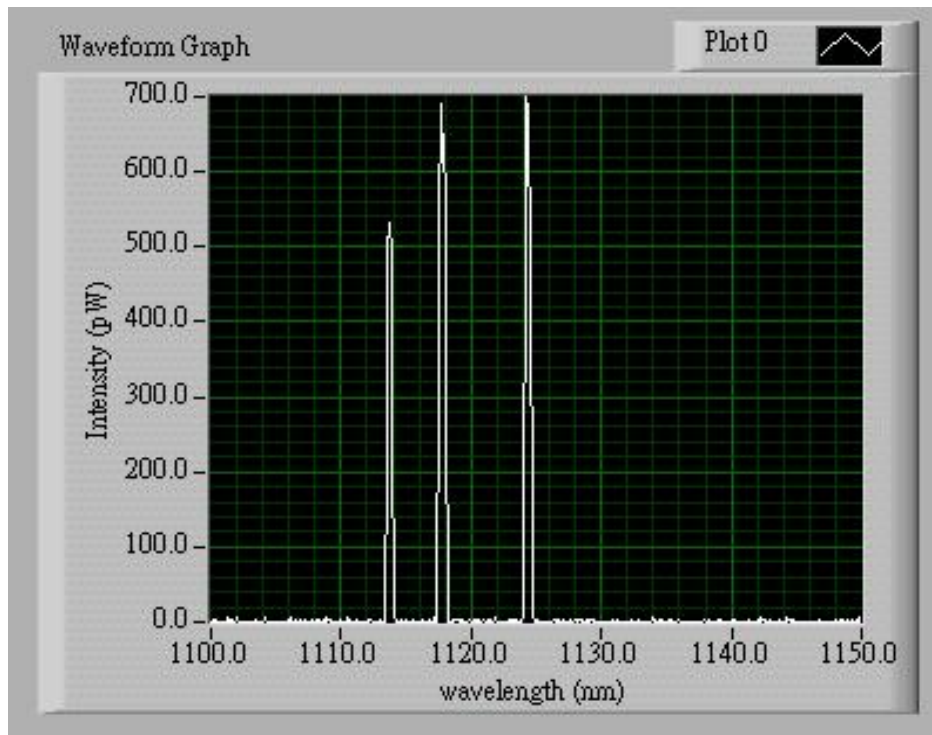


圖 3.28 561nm 波段輸出之紅外波段光譜測量

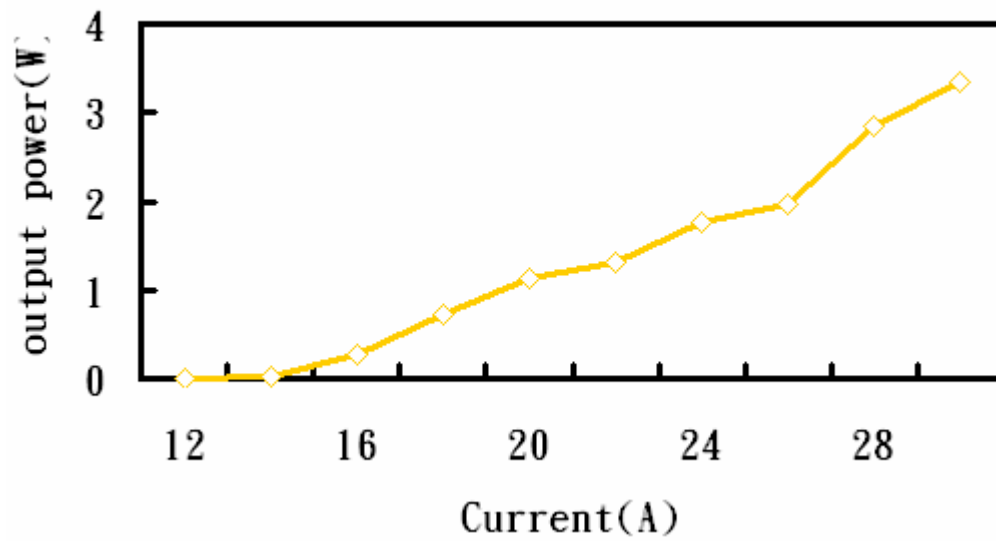


圖 3.29 加一紅外光高穿透，可見光波段高反射的濾鏡後，561nm 波段輸出之電流與功率關係圖

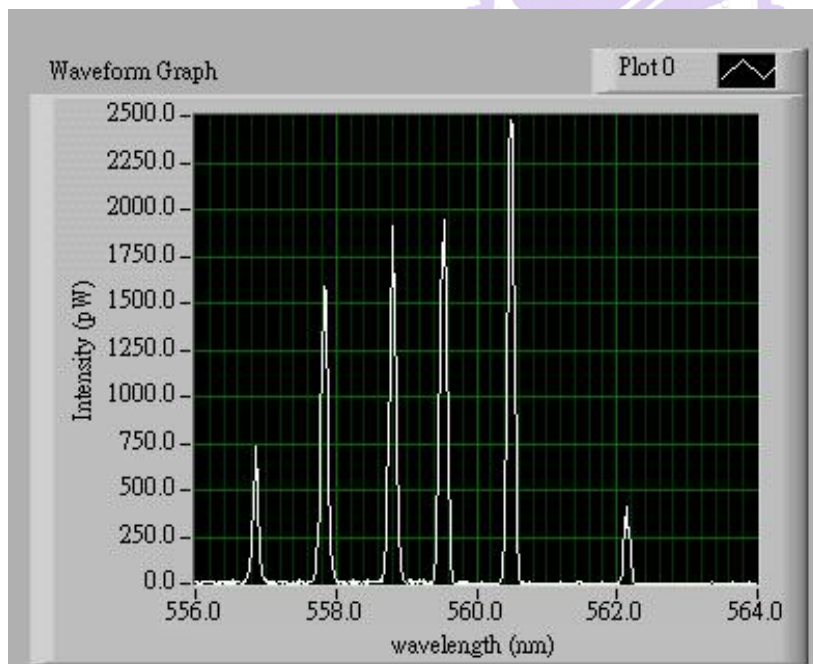


圖 3.30 1123nm 波段經 BBO 倍頻後輸出功率頻譜

Crystal name	BBO
phase-matching Type	Type1
phase-matching angle(deg)	$\theta = 22, \varphi = 0$
acceptance angle(mrad-cm)	$\Delta \theta = 0.474, \Delta \varphi = \text{large}$
Nonlinear coefficient(pm/V)	0.122
Temperature bandwidth($^{\circ}\text{C-cm}$)	55
Walk-off angle(deg)	3.2

表 3.1 非線性晶體 BBO 特性針對 1123nm 波段

duty	unit	power	unit	pulseWidth	unit
9	us	11.2	W	1000	ns
8	us	10.8	W	1000	ns
7	us	11.2	W	905	ns
6	us	11.2	W	811	ns
5	us	11	W	651	ns
4	us	10.5	W	472	ns
3	us	9.26	W	284	ns
2	us	7.34	W	147	ns
1	us	3.24	W	91	ns

表 3.2 重複率 100KHz、電流 25 安培，佔開控時間與功率關係表

第四章 單模雷射設計

一般我們設計側面泵浦 Nd:Yag 雷射，是以雷射激發模組、輸出鏡、前腔鏡、Q-開關為主要結構，為了方便輸出的穩定性與調整雷射的容易度，通常使用凹平腔或平平腔的設定，而在這樣的設計與架構下雷射是擁有較大的功率輸出，不過相對的因為這樣的設計使的雷射輸出的模態除了 TEM₀₀ Mode 外，也夾雜著其他許許多多的模態在腔內形成($M^2 > 1$)，造成輸出的脈寬約都落在 50n sec 至 120n sec 間，相對的在工業的應用上，聚焦後加工的光點(beam spot)變大，雷射單發焦耳值下降。而我們針對模態問題去改善，為了使模態更接近 TEM₀₀，我們用了以下兩種方式去改善。

4.1 傳統設計與新設計的比較

1. 增設孔徑光閘(Aperture)：

在大架構不變為前提下，在腔內加入一適合的孔徑光閘，其原理為將阻擋雷射其他模態的生成與共振，只讓 TEM₀₀ mode 通過在雷射腔體內震盪形成雷射輸出，這樣的設計的確有改善了模態輸出使模態近似於單模，在脈衝的輸出也有效的縮短在 30n s 以內，不過這樣的設計也因阻擋了大部份模態的生成，在雷射功率輸出的表現上大不如前，如圖 4.2，以相同電流來說在 23 安培時輸出功率僅剩下 5.9 瓦，為原來的 15% 而已，雖然是有達到近單模、脈寬有效縮短這樣無疑是扼殺了大部份的能量輸出，轉換效率太低對能量方面根本是個浪費。所以在我們又想縮短脈寬，又不想犧牲掉太大功率所以我們使用了下列的方式改善。

2. 改變共振腔結構：

我們根據簡單數學模型 ABCD LAW^[17]去設計共振腔前後 2 面鏡片曲率(radius of curvature)，目的要使 YAG 晶體充分利用到，也就是設計鏡片讓 cavity Size 更趨近 YAG Size 也就是 2mm，首先我們先固定前腔鏡曲率($R = -750\text{mm}$)與腔長 ($L = 300\text{mm}$)，考慮 YAG 晶體的熱透鏡效應^[18]；如圖 4.3，改變輸出耦合鏡之曲度去抵補 YAG 晶體的熱透鏡效應，讓 pumping size 約等於 cavity Size。

根據數學模型算出，當我們固定 $L=300\text{mm}$ 、前鏡曲率 $R=-750\text{mm}$ 、YAG 晶體熱透鏡焦距 $f=300\text{mm}$ 時，輸出耦合鏡的曲率為正 75mm 即為 $R=75\text{mm}$ 之凸透鏡，當針對這個結果去架設雷射，發現雷射出光的電流值與計算值相當的接近，電流出光預值約在 17.5 安培左右，也就是 YAG 晶體熱透鏡現象發生後，這個雷射腔體才有機會成為穩定共振腔而出光，而這樣的設計下在模態與功率上也大幅度得提升在 23 安培時有 25.7 瓦輸出(如圖 4.4)，為原始凹平腔的 69% ，而脈寬部份也縮短在 30n sec 內，結果與當初預期相差不遠，達到了不大量消耗功率，且脈寬有效縮短。不過這樣的共振腔的特性為輸出功率的斜率非常的陡，而在這個條件下雖然功率輸出雖然高，卻沒有非常的穩定，對於溫度的影響非常的敏感，所以我們針對這個問提去稍稍調整一下整體腔長，發現腔長 270mm 其實是比較適合這樣的設計，在 23 安培略比腔長 300mm 時高 4.9 瓦，如圖 4.4，在穩定度上也明顯改善了許多，峰對峰值的穩定度也在 4% 內，而這樣數學模型與實際數據算是相當的吻合。

4.2 實際加工

當我們實際針對這兩種不同設計的雷射腔去做加工實驗，在聚焦鏡 $F=160$ 的情況下，原來的凹平腔雷射加工的線寬約為 $120\ \mu\text{m}$ ，而新設計的凹凸腔雷射加工線寬約在 $80\ \mu\text{m}$ 左右，加工中對這兩者不同腔體的雷射比較，其中比較明顯的加工為切割陶瓷基板，以凹平腔雷射去加工，不管功率或頻率在怎麼調整，都還是因為能量密度太低與脈衝寬度太寬而對陶瓷基板切割深度起不了太大的變化，都只是薄薄的劃過的痕跡而已。

使用新設計的凹凸腔雷射在與凹平腔雷射相同條件下，卻可以有效切割深度到達 $48\ \mu\text{m}$ ，在參數調整下更可切到 $55\ \mu\text{m}$ 如圖 4.5。其它例如加工效果如圖 4.6 的硬烤漆的連桿，以這兩種雷射去測試加工，雖然在參數調整下都可以加工出相同的效果與深度，不過以這樣器具來說相同的重覆頻率下，凹平腔雷射的電流值要開到 22 安培左右，而凹凸腔雷射只需開到 19 安培，以這樣的比較下來凹凸腔雷

射的使用壽命就會比凹平腔雷射來的長些，加工的犀利度也出過凹平腔雷射許多，證明這樣的改善是確實需要的。而我們實際以電流 17 安培、重覆率 5KHz、點雕刻時間 1m sec、去對不銹鋼板蝕刻，其結果為寬度約 $88\mu\text{m}$ ，深度 8μ ，其加工出來的形狀相當的圓，且重現性也相當的不錯如圖 4.7。可以說是非常有效的改善。

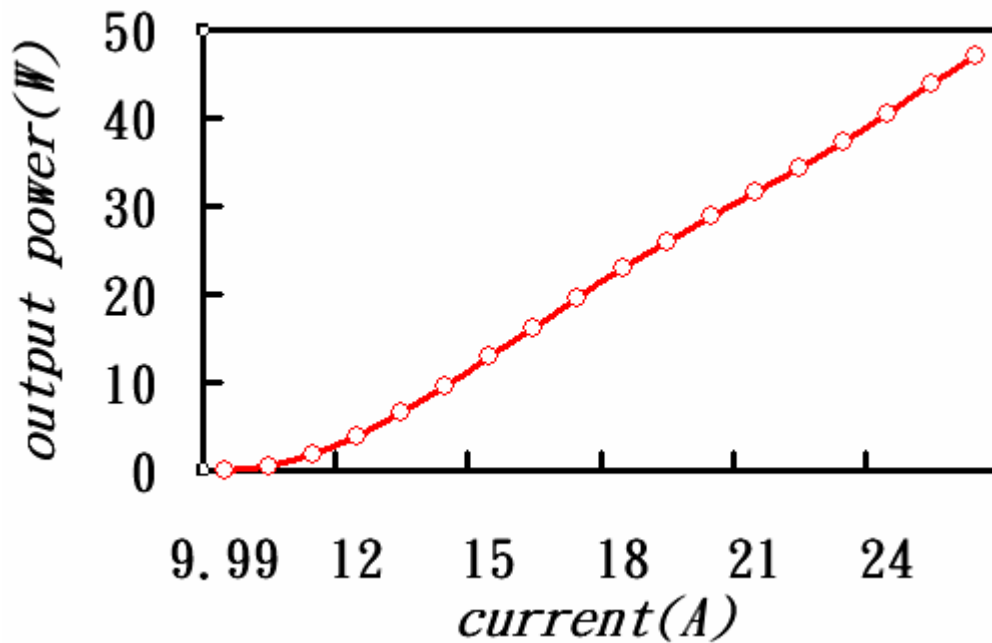


圖 4.1 凹平腔不加改變的原始數據

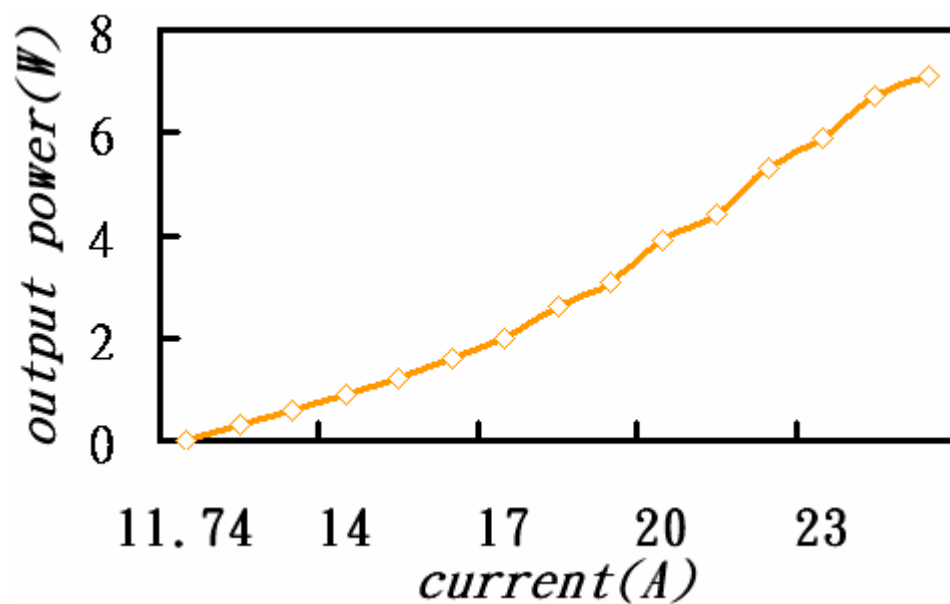


圖 4.2 加上孔徑光欄後，電流與出功率關係圖

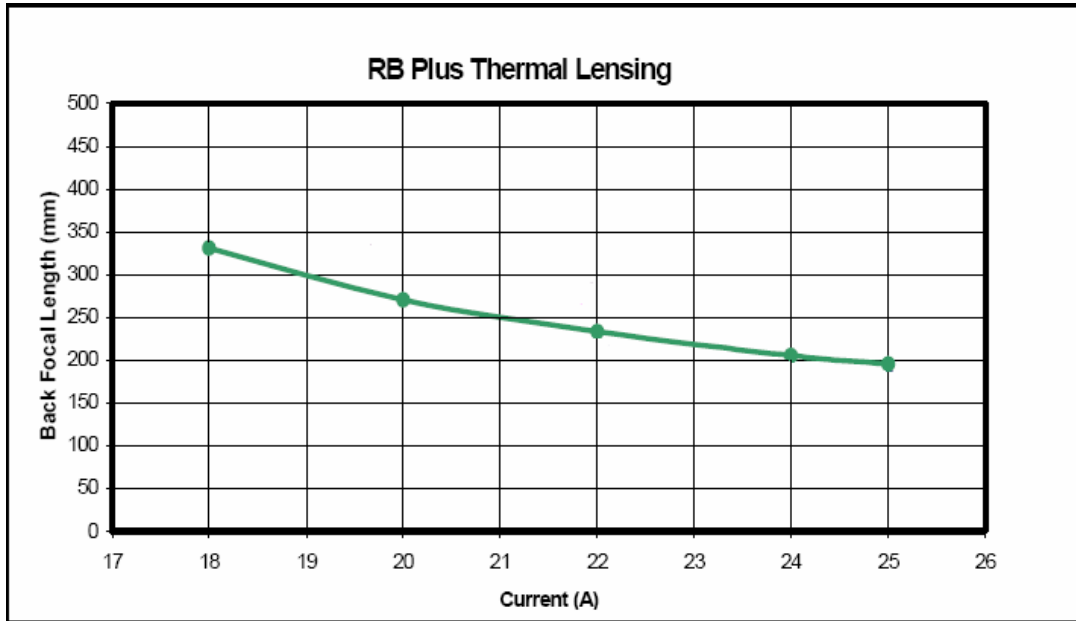


圖 4.3 CEO Laser module 電流與熱透鏡效應關係圖

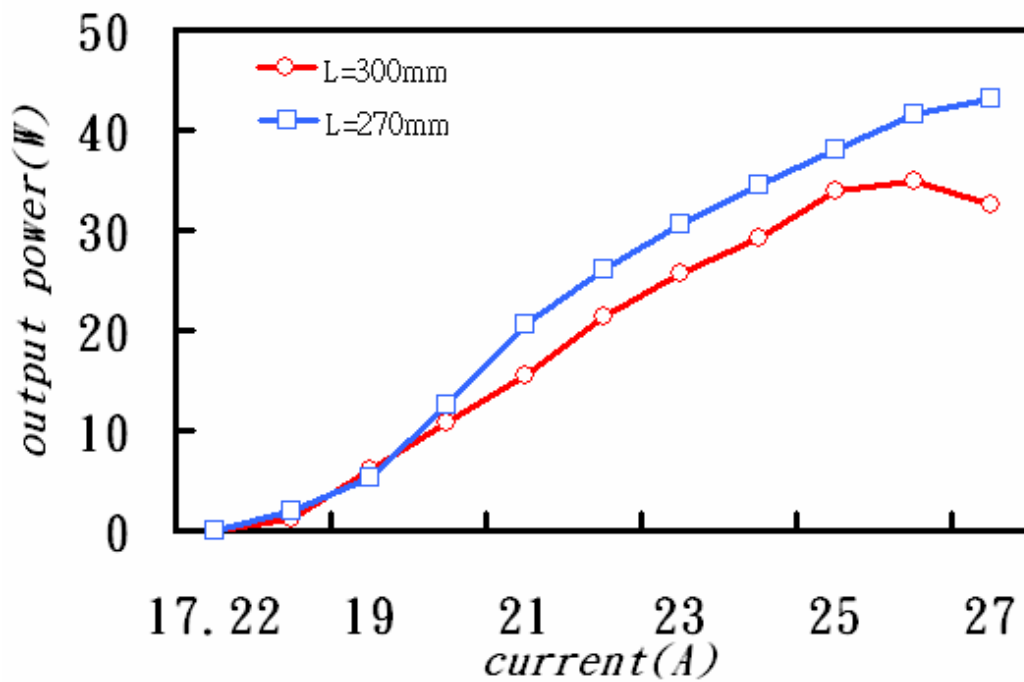


圖 4.4 不穩定凹凸腔，電流與出功率關係圖

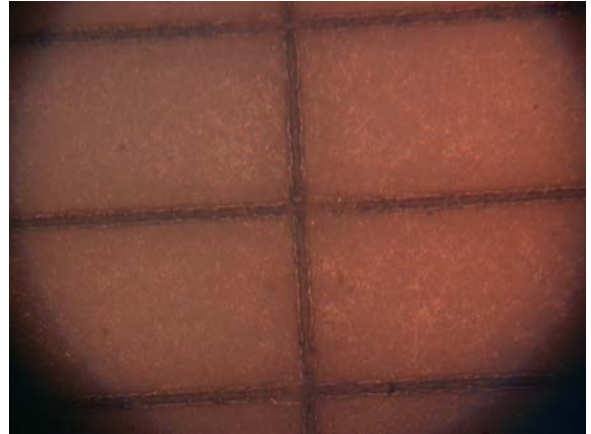
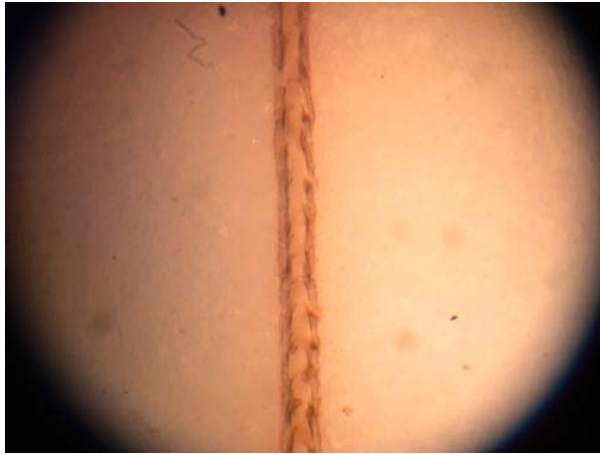


圖 4.5 凹凸腔雷射實際切割陶瓷基板



(a)

(b)

圖 4.6 凹凸腔雷射加工(a)汽車連桿-厚烤漆 (b)鋼材之手工具

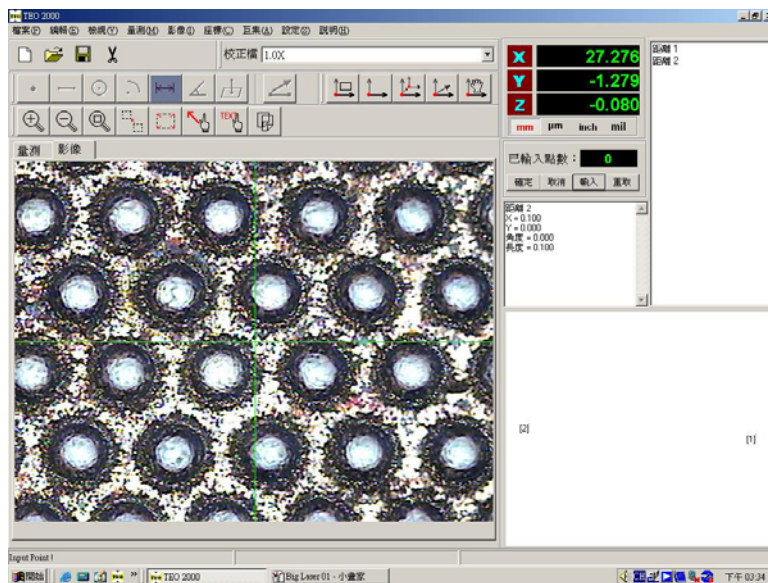


圖 4.7 凹凸腔雷射在不銹鋼板打點，蝕刻形狀與深度

凹凸腔雷射數學模型

因 YAG 因熱透鏡效應，所以經查圖 5.3，令其等效為一個焦距 f 等於 300mm 的透鏡，波長 λ 等於 1064nm，總腔長 L 為 300mm，輸出耦合鏡曲率 $R1$ 等於 75mm 的平凸透鏡、前腔鏡曲率 $R2$ 等於 750mm 的平凹透鏡、設腔內任意點為 $d1$ ，又 $d1$ 加 $d2$ 等於總腔長 L

$$f := 300 \quad \lambda := 1.064 \cdot 10^{-3} \quad L := 300$$

$$R1 := -75 \quad R2 := 750 \quad d1 := 200$$

$$L := d1 + d2$$



將透鏡相對位置與曲率代入 ABCD LAW 矩陣中， $M1$ 及 $M2$ 則代表在腔內由不同的位置出發的代表矩陣

$$M1(x) := \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d1 - x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M2(x) := \begin{pmatrix} 1 & x - d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d2 + d1 - x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M1(x) = \begin{bmatrix} \frac{-131}{135} - \frac{319}{10125} \cdot x & \left(\frac{-131}{135} - \frac{319}{10125} \cdot x \right) \cdot (200 - x) + \frac{1840}{9} + \frac{757}{135} \cdot x \\ \frac{-319}{10125} & \frac{-281}{405} + \frac{319}{10125} \cdot x \end{bmatrix}$$

$$M2(x) = \begin{bmatrix} \frac{-887}{405} - \frac{67}{20250} \cdot x & \left(\frac{-887}{405} - \frac{67}{20250} \cdot x \right) \cdot (300 - x) + \frac{35300}{27} + \frac{41}{27} \cdot x \\ \frac{-67}{20250} & \frac{71}{135} + \frac{67}{20250} \cdot x \end{bmatrix}$$

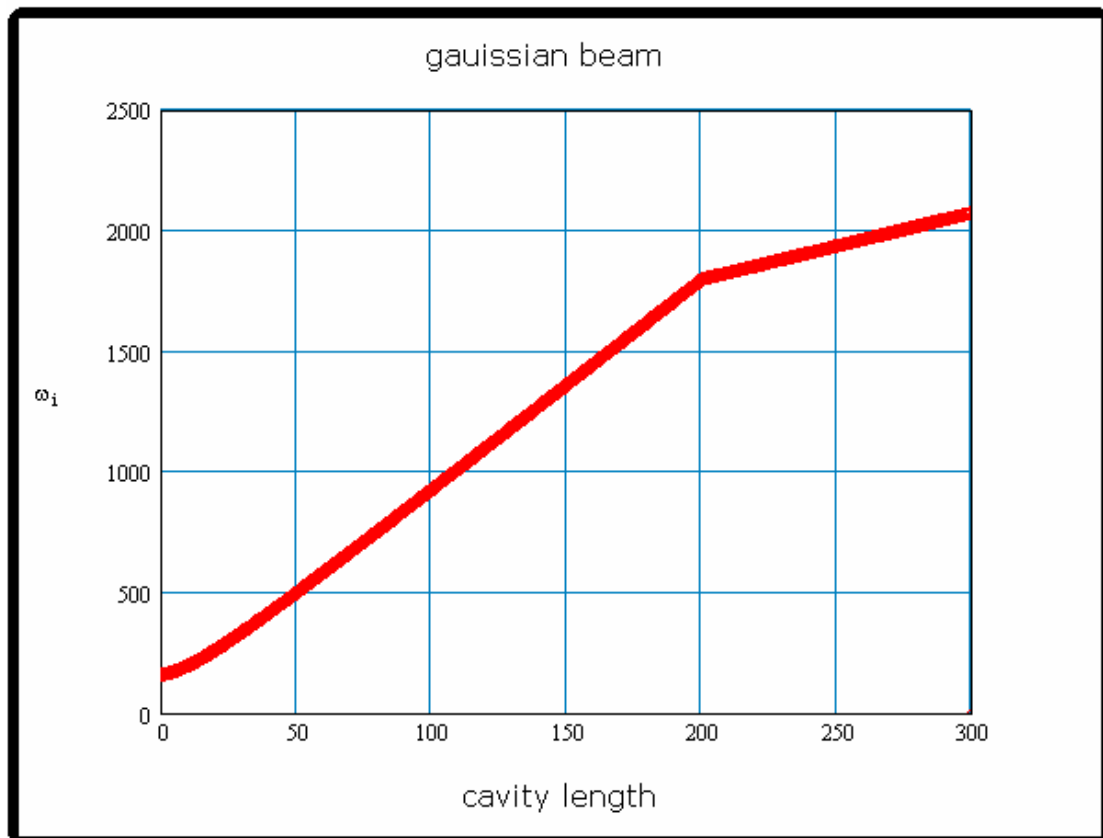
將 $M1$ 及 $M2$ 矩陣的 ABCD 值代入 1 式

$$\omega(z)^2 = \frac{2\lambda B}{n\pi\sqrt{4 - (A + D)^2}} \dots\dots\dots(1)$$

得到

$$\omega_1(z)^2 = \frac{2 \cdot 1064 \cdot 10^{-6} \cdot \left[\left(\frac{-131}{135} - \frac{319}{10125} \cdot x \right) \cdot (200 - x) + \frac{1840}{9} + \frac{757}{135} \cdot x \right]}{\pi \sqrt{4 - \left[\left(\frac{-131}{135} - \frac{319}{10125} \cdot x \right) + \left(\frac{-281}{405} + \frac{319}{10125} \cdot x \right) \right]}}$$

$$\omega_2(z)^2 = \frac{2 \cdot 1064 \cdot 10^{-6} \cdot \left[\left(\frac{-887}{405} - \frac{67}{20250} \cdot x \right) \cdot (300 - x) + \frac{35300}{27} + \frac{41}{27} \cdot x \right]}{\pi \sqrt{4 - \left[\left(\frac{-887}{405} - \frac{67}{20250} \cdot x \right) + \left(\frac{71}{135} + \frac{67}{20250} \cdot x \right) \right]}}$$



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

由這一連串實驗下來，Nd:YAG 雷射輸出雖然無特定方向的偏極化，可是爲了得到高效率頻率轉換，在基頻光與非線性晶體的夾角還是需要仔細的去尋找適合的夾角，而在頻率轉換後的雷射功率輸出的穩定度方面，穩定的對非線性晶體控溫室相當重要的，溫度的穩定性越差，相對的非線性晶體之特性也隨著溫度做改變，所以要得到高效率且穩定的頻率轉換，這兩個大重點可是絲毫馬虎不得的。



5.2 未來展望

在我們實驗中，我們只針對了波長 1064nm 與波長 1123nm 的光源，作二倍頻轉換，未來我們可針對同一款側面泵浦式雷射模組，針對其他增益的波長做二倍頻轉換甚至三倍頻轉換來得到，例如:波長 1342nm 二倍頻成波長 671nm 的紅光雷射，三倍頻爲 477nm 的藍光雷射，或將波長 1064nm 三倍頻成波長 355nm 的 UV 雷射，進而在使用其他非線性晶體作差頻、混頻、合頻等現象，利用側面泵浦式雷射模組的便利性與高瓦數去得到不同可見光波段的雷射，使未來的雷射的使用與應用的上，光源的選擇性更加豐富。當然除了不同雷射波段的倍頻轉換外，更可參考其他文獻，例如利用經增益介質 YVO4 來做拉曼雷射；利用 Cr:YAG 飽和吸收體作爲 Q 開關，使用調變技術來看是否能改變現在頻寬極寬的現象，而得到短脈衝的鎖模雷射；利用不同腔體結構設計來得到改善目前不穩定的現象…等應用，而這些都所有的改善或應用，都將是未來努力與研究的方向。

參考文獻

1. 蘇品書編著，“雷射原理與實用技術”復漢出版社
2. Walter Koechner, Solid-State Laser Engineering, sixth revised
3. P.Zeller and P. Peuser, “Efficient multiwatt, continuous-wave laser operation on $^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$ transition of Nd:YVO₄ and Nd:YAG” Optics Letters, Vol. 25, No.1, pp.34-36, (2000)
4. Yariv.Yeh, Optical Wave in crystal
5. R.W.Boyd, Nonlinear Optics (1992)
6. V.GDmitrier, G.G.Gurzadyan, D.N.Nikogosyan, Handbook of Nonlinear optical crystal, 3TH ed(1999)
7. Sun, ZP, Li, RN, Bi, Y, et al.” Experimental study of high-power pulse side-pumped Nd : YAG laser” OPT LASER TECHNOL 37 (2): 163-166 MAR 2005
8. Yu, DL, Tang, DY, “Experimental study of a high-power CW side-pumped Nd : YAG laser” OPT LASER TECHNOL 35 (1): 37-42 FEB 2003
9. WEN Wu-qi, LIU Huan, CAI Zhi-qiang, ZHANG Qiang, ZOU Lei, ZHOU Rui, LU Ying, DING Xin, NIU Yan-xiong, YAO Jian-quan “LD Side-pumped Nd:YAG/KTP CW Laser with 1.8W Output at 659.5nm” Journal of Optoelectronics Laser Vol.16 No.10 Oct 2005
10. Boulanger, B.; Rousseau, I.; Feve, J.P.; Maglione, M.; Menaert, B.; Marnier, G., “Optical studies of laser-induced gray-tracking in KTP”, Quantum Electronics, IEEE Journal of Volume 35, Issue 3, March 1999 Page(s):281 - 286 Digital Object Identifier 10.1109/3.748831
11. Motokoshi, S.; Jitsuno, T.; Izawa, Y.; Nakatsuka, M., “Effects of pre-annealing on gray-tracking formation for KTP and LBO crystals” Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO '01. Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on

12. J.Marling:IEEE J.Quantum Electron. QE-14,56 (1978)
13. N.Moore,W.A.Clarkson,D.C.Hanna, S.Lehmann,J.Bosenberg:Appl.Opt.38,5761(1999)
14. Y.F.Chen,Y.P.Lan,SW.Tsai” High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG Laser at 1123nm” Optics communications 234(2004) 309-313
15. Y.F.Chen,Y.P.Lan” Diode-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser at 1123nm” Appl.phys.B79,29-31(2004)
16. N.V.Kravtsov,V.V.Firsov,P.P.Pashinin:Quantum Electron.29,778,(1999)
17. KELIN J. KUHN , “LASER ENGINEERING”
18. ZHAO Cun-hua , FAN Zhong-wei , WANG Pei-feng , HE Tie-ying” NewThermal Lens Equation of LD Side-pumped Solid-state Laser Rod” Journal of Optoelectronics Laser Vol.16 No.8 Aug 2005

