

國立交通大學

電子物理研究所

碩士論文

瓦級腔內三倍頻紫外光雷射之優化

**Optimization of 1-Watt Intracavity
Frequency-tripled 355nm Laser**

研究生:王偉立

指導教授:陳永富教授

中華民國九十五年六月

瓦級腔內三倍頻紫外光雷射之優化

**Optimization of 1-Watt Intracavity
Frequency-tripled 355nm Laser**

研究生:王偉立

Student: Wei-Li Wang

指導教授:陳永富

Advisor: Yu-Fung Chen

國立交通大學

電子物研究所



Submitted to Institute of Electrophysics
College of science

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

In

Electrophysics

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

瓦級腔內三倍頻紫外光雷射之優化

研究生:王偉立

指導教授:陳永富教授

國立交通大學電子物理研究所碩士班



摘 要

利用非線性晶體以及 Q 開關的機制，在腔內架構之下，做雷射光的頻率轉換。從紅外光 1064nm 到綠光 532nm，到 355nm 的紫外光；我們在 12.5W 的激發光源，可以得到最高有 1.05W 的輸出，轉換效率大約 8.4%。實驗之中，我們改變非線性晶體的 e-axis 或 o-axis 和基頻光偏振方向的夾角；藉由探討夾角間的關係以及偏振的特性，使我們可以達到更好的相位匹配，使得輸出功率和穩定性可以更上一層樓。

Optimization of 1-Watt Intracavity Frequency-tripled 355nm Laser

Student: Wei-Li Wang

Advisor: Yu-Fung Chen

**Institute of Electrophysics
National Chiao Tung University**



Abstract

Efficient intracavity frequency conservation of a Q-switched, diode pumped Nd:YVO₄ laser uses nonlinear crystal to frequency-tripled 1.05W output power 355nm violet laser. We demonstrated the angle between the e-axis、o-axis of nonlinear and polarization of fundamental to raise the stability and output power.

誌 謝

兩年的時間，說長不長，說短不短，一下子就過去了。雖然是一下子就過去了，但是要感謝的人卻是不計數。

首先，當然是老爸和老媽，感謝他們把我養這麼大，雖然沒有做到啥大事，平安長大是我唯一可以報答他們的。還要很感謝的就是老師了，感謝他對我的指導和耐心，雖然我是那麼的驕純，但老師還是有教無類，感謝之心無法言喻。再來就是實驗室那些同伴們，感謝歐大戶、老大、凱撒、01、Miss 廖、陸鳥、黃仕璋、黃哲彥、梁興弛、陳建誠、黃依萍、張恩毓、張雅婷，感謝他們在實驗上的幫助及指導和生活娛樂上的陪伴及分享，讓我在實驗上更順利，生活又過得快樂自在。當然也不可以忘記實驗室以外的人，要感謝我的大學死黨們，感謝你們陪我玩樂；還有阿 Jo 桑，謝謝妳。

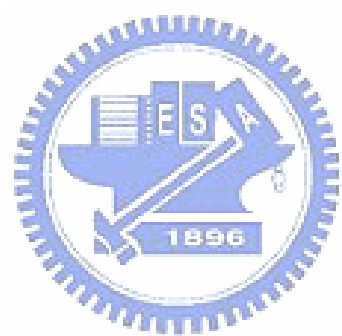
感謝大家！



目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖表目錄.....	vi
第一章 簡介	
1.1 研究動機.....	1
1.2 本論文組織.....	1
第二章 非線頻率轉換	
2.1 導論.....	2
2.2 非線性光學簡介.....	2
2.3 二倍頻轉換.....	3
第三章 腔內三倍頻雷射之優化	
3.1 導論.....	10
3.2 倍頻雷射之優化.....	10
3.2.1 腔內倍頻和腔外倍頻.....	10
3.2.2 Q-開關.....	10
3.2.3 非線性晶體的偏振匹配.....	12
3.3 影響頻率轉換效率的因子.....	13
3.3.1 基頻光功率.....	13
3.3.2 晶體長度.....	14
3.3.3 晶體溫度.....	14
3.3.4 非線性係數.....	14
第四章 實驗架構與結果討論	
4.1 導論.....	18
4.2 532nm 腔內基頻光之偏振方向測量.....	18

4.3 355nm 紫外光雷射之優化.....	21
第五章 結論與未來展望.....	31
參考文獻.....	32



圖表目錄

圖 2.1 Δk 對轉換效率的影響關係圖.....	7
圖 2.2 在相位未匹配的情況下,轉換效率和晶體長度的關係.....	7
圖 2.3 o-ray 與 e-ray 相對應之折射率.....	8
圖 2.4 相位匹配示意圖.....	8
圖 2.5 I類相位匹配示意圖.....	9
圖 2.6 II類相位匹配示意圖.....	9
圖 3.1 Q-開關的作用機制示意圖.....	15
圖 3.2 架構簡圖。基頻為線偏振光,搭配其後的非線性晶體。.....	15
圖 3.3 晶體內溫差和基頻光偏振方向的關係圖.....	16
圖 3.4 KTP e-axis 的角度為 15 度結果圖.....	16
圖 3.5 KTP e-axis 的角度為 45 度結果圖.....	17
圖 4.1 532nm 綠光雷射架構下,晶體擺放的簡圖.....	25
圖 4.2 532nm 綠光雷射的架構圖.....	25
圖 4.3 KTP 在 e-axis 不同角度放置時,532nm 綠光功率的平均輸出功率.....	26
圖 4.4 在不同 KTP 的角度下,腔外量測的 1064nm 基頻光的偏振方向.....	26
圖 4.5 在不同 KTP 的角度下,腔外量測的 1064nm 基頻光的偏振方向.....	27
圖 4.6 在不同 KTP 的角度下,腔外量測的 1064nm 基頻光的偏振方向.....	27
圖 4.7 355nm 紫外光雷射的架構圖.....	28
圖 4.8 KTP 20° 和 BBO20° 時,355nm 雷射輸出功率和輸入電流的關係.....	28
圖 4.9 KTP 20° 和 BBO20° 時,AO 晶體重複率和輸出功率及脈衝寬度的關係.....	29
圖 4.10 KTP 0° 和 BBO 0° 時,355nm 雷射輸出功率和輸入電流的關係.....	29
圖 4.11 KTP 0° 和 BBO 0° 時,AO 晶體重複率和輸出功率及脈衝寬度的關係.....	30
表 3.1 CW 雷射和 Q-switch 雷射的簡單比較.....	17
表 4.1 II類非線性晶體 KTP 和 I類非線性晶體 BBO 配對關係與結果.....	30

第一章 簡介

1.1 研究動機

雷射光的特性，高方向性、單色光、高同調性、高強度。不同波長的雷射和雷射以上的特性，使得雷射在醫學、軍事、娛樂、工業、研究方面有相當廣泛的應用。而固態雷射由於其具有體積小、高效率、壽命長、維護容易、品質佳的輸出模態[1]等優點，所以十分具有競爭優勢。爲了更加提昇固態雷射的應用層面，利用非線性晶體來做頻率轉換進而達到更好應用的目的，不失爲一種好方法。

紫外光雷射在軟管切割、微鑽孔、醫學應用、科學研究等方面，又有相當的應用。所以爲了得到更好的應用目的，功率的增加和穩定性的提升，便是值得研究的方向。

1.2 本論文組織

本論文針對腔內三倍頻雷射之優化的目的，探討一些優化條件，也做了一些數值上的分析。主要是在了解偏振方向和晶體之間的關係，從第二章的非線性轉換、第三章腔內三倍頻雷射之優化，第四章爲實驗的架構與結果。第五章爲總結、討論及未來展望。



第二章 非線性頻率轉換

2.1 導論

在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，因此爲了增加雷射的使用領域，頻率轉換是延展高功率雷射用途的重要技術。頻率轉換乃是利用了非線性晶體在強光輻射場下，所產生的非線性光學響應來製造出新頻率的光。當在引入非線性晶體時，我們可以在一給定的單一頻率雷射光源之下，產生二倍頻、三倍頻甚至四倍頻的諧波轉換。若可以給定兩個不同頻率的雷射光時，我們還可以利用和頻及差頻的轉換方式，產生新頻率的雷射。不同頻率波段的雷射，在不同的領率有著不同的應用，從紫外光、可見光波段到紅外範圍的高能雷射，涵蓋的領域也是相當的大，這使得雷射在加工、量測、醫學、生物等應用和研究方面，都是相當的廣泛。

本章是對非線性光學在頻率轉換的部分及相關論理做一個簡介。

2.2 非線性光學簡介

在電磁學中，我們將光波視爲一種電磁波。當電磁波入射到介質裡面時，介質中的帶電粒子會受到振動，偶極矩振盪形成對應的極化向量 **P**(Polarization vector)，振動之位移與極化向量 **P** 成正比[2]，

$$\bar{P} = \epsilon_0(\chi^1 \bar{E} + \chi^2 \bar{E}^2 + \chi^3 \bar{E}^3) \quad (2.1)$$

ϵ_0 : 真空介電常數

χ^1 : 一階線性電極率

χ^2 : 二階非線性電極率

χ^3 : 三階非線性電極率

其中 χ^2 的數量級約爲 10^{-12} mV，也就是說在強電場的作用下時，介質對光的非線性現象因而顯著。

當兩頻率不同的光照射到物質時，此時電場爲 $\bar{E} = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + c.c.$ ，將此電場代入下式(2.2)

$$\bar{P}^2 = \epsilon_0 \chi^2 \bar{E}^2$$

$$= \varepsilon_0 \chi^2 (E_1^2 e^{-2i\omega_1 t} + E_2^2 e^{-2i\omega_2 t} + 2E_1 E_2 e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} + 2E_1 E_1^* e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} + c.c) + 2\varepsilon_0 \chi^2 (E_1 E_1^* + E_2 E_2^*) \quad (2.2)$$

我們可以由上式(2.2)看出，當入射光是兩種頻率不同的光波時，進入介質之中，介質的帶電粒子會受到振動，此時二階的電極化向量可能會產生下列的輻射光。

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

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

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

2.3 二倍頻轉換

我們在上節的描述之中可以發現，倍頻是一種頻率為基頻光的兩倍、波長減半的技術，所以我們以兩個頻率相同為 ω 的基頻光，經由非線性晶體轉換成 2ω 的倍頻光，我們可以將 \mathbf{P} 表達為

$$P(2\omega) = \varepsilon_0 \chi^2 E^2(\omega) \quad (2.3)$$

將式(2.3)代入 Maxwell's equations 中，藉由基頻光與二倍頻光在非線性晶體中的耦合，可推導出二次諧波與入射光的比值，也就是轉換效率[3]:

$$\text{轉換效率} = \frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \tanh^2 \left[lK^{1/2} \left(\frac{P_\omega}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin \Delta k l / 2}{\Delta k l / 2} \right] \quad (2.4)$$

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

P_ω 、 $P_{2\omega}$: 基頻光功率、倍率光功率

ω : 基頻光的頻率

l : 非線性晶體的長度

A : 基頻光束的截面積

d_{eff} : 有效非線性係數

$\Delta k = k_{2\omega}^{(k)} - k_\omega^{(i)} - k_\omega^{(j)}$: 相位差， i 、 j 、 k 代表不同偏振方向。

而兩頻率不同的光在晶體中傳播，對應的光學折射也不盡相同，所以 Δk 可以另寫成

$$\Delta k = k^{(2\omega)} - 2k^{(\omega)} = \frac{2\omega}{c} (n^{2\omega} - n^\omega) \quad (2.5)$$

當基頻光為高斯光束且在低轉換效率的情況下，(2.4)可以近似為：

$$\text{轉換效率} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = l^2 K \frac{P_{2\omega}}{A} \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta kl}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kl}{2}\right)^2} \quad (2.6)$$

2.4 相位匹配

如圖(3.1)所示，我們在固定其它外在條件之下，在式(2.6)中，當 $\Delta k = 0$ 時，有最高的轉換效率。而 $\Delta k = k_{2\omega}^{(k)} - k_{\omega}^{(i)} - k_{\omega}^{(j)} = 0$ ，此即是所謂的相位匹配(Phase Matching)的條件，而相位匹配在非線性光學的頻率轉換技術中，是一個很相當重要的觀念，可以有效的提升轉換效率。為了使在晶體中相互作用的光束的相速度一致：由 $k^{\omega} = \omega\sqrt{\mu\epsilon_0 n^{\omega}}$ 、 $k^{2\omega} = 2\omega\sqrt{\mu\epsilon_0 n^{2\omega}}$ 可以推得

$$n^{2\omega} = n^{\omega} \quad (2.7)$$

上式(2.7)即為相位匹配的定義。所以要達到最大的光轉換效率就必須要求相位匹配 $\Delta k = 0$ 或 $n^{2\omega} = n^{\omega}$ 。

但當相位不匹配時，即 $\Delta k \neq 0$ ，則倍頻光功率將會隨著基頻光在非線性晶體內行走的距離增加，做 $\frac{\Delta kl}{2} = \pi$ 的週期性變化。定義同調長 L_c (coherent length) 為

此周期一半時之長度

$$L_c = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\pi}{(k^{2\omega} - k^{\omega})} = \frac{\pi}{4(n^{2\omega} - n^{\omega})} \quad (2.8)$$

同調長度 L_c 代表產生最大倍頻光功率時，基頻光在非線性晶體中行經的距離長度。如圖(3.2)所示，光轉換效率的趨勢隨著同調長度的增加而提升，尤其是在 $L_c = 0$ 時，倍頻光的轉換效率隨著非線性晶體的長度增加而不斷往上提升。一般而言，介質中的光學折射率與波長有關，會隨其波長而有所不同，這種現象稱之為色散(dispersion)。由此可知，對於各向同性(isotropic)物質來說是無法達到相位匹配的要求；但在各向相異性(anisotropic)的介質中，除了具有色散關係外，介質的光學特性亦與光的偏振方向及傳播方向有關。因此可以藉由調整晶體的角度，達到補償色散效果與相位匹配。例如在非線性晶體(考慮負單晶軸)而言，雙折射

與色散的特性可使一入射波長之光束有 e-ray (extra-ordinary ray) 和 o-ray (ordinary ray) 之分，此兩道光具有不同的折射率，分別為 n_e 、 n_o ，但在晶體上的某一切角可以使得 n_e 、 n_o 折射率相同，即 $n_e^{2\omega}(\theta) = n_o^{2\omega}(\theta)$ ，如圖(3.3)所示。由於晶體的折射率可以一橢圓球來表示，因此在 θ 方向上可解得 e-ray 折射率

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} \quad (2.9)$$

一般達成相位匹配的方法可分為兩類，分別為 CPM(Critical Phase Matching) 與 NCPM(Non-Critical Phase Matching)。如圖(3.4)所示，CPM 是指以一特定入射角 θ_m 利用非線性晶體的雙折射效應去達到相位匹配的一種方法，其相位匹配角不為 90 度。而利 CPM 去達成相位匹配有分兩種方式，分別是 I 類型和 II 類型的相位匹配。以倍頻來說，I 類相位匹配和 II 類相位匹配最大不同的地方，在於兩者所需要的基頻光偏振方向是不相同的。I 類相位匹配的情況之下，兩作用的基頻光的偏振方向是同向的；而在 II 類相位匹配的情況之下，兩作用的基頻光的偏振方向是相互垂直的。I 類相位匹配和 II 類相位匹配大致可分為下：

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

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

若在單一個基頻光光源之下的話，I 類相位匹配時，基頻光的偏振方向只要對著非線晶體的 e-axis 或 o-axis 即可，因為所需要的電場僅為單一方向；而 II 類相位匹配時，所需要的電場不只有單一方向，而是晶體的 e-axis 和 o-axis 都必需具備才行，故基頻光的偏振方向就要和 e-axis 或 o-axis 夾 45 度的角度，才會達到最好的轉換效率。可由式(2.10) (2.11)來說明，

$$\text{Type I } o + o \rightarrow e \quad P(2\omega) = \varepsilon_0 \chi^2 E_{o-axis} E_{o-axis} \quad (2.10)$$

基頻光的偏振方向對準 e-axis，可達最好的轉換效率。如圖(3.5)所示。

$$\text{Type II } e + o \rightarrow e \quad P(2\omega) = \varepsilon_0 \chi^2 E_{o-axis} E_{e-axis} \quad (2.11)$$

基頻光的偏振方向和 o-axis、e-axis 各角 45 度，電場在兩方向分量的乘積最大，可以達可達最好的轉換效率，如圖(3.6)所示。

相位匹配角為 90 度時，此類型的非線性晶體是 NCPM。此類型的相位匹配，

由於入射光角度是 90 度，所以是不會發生走離效應(即光因為雙折射性產生的 e-ray 和 o-ray 的兩道光，此兩道光會隨著在晶體裡行走的距離而漸行漸遠，最後分成兩道分，影響轉換效率)，但是需要利用溫度去控制晶體的折射率，來達到最佳的轉換效率。



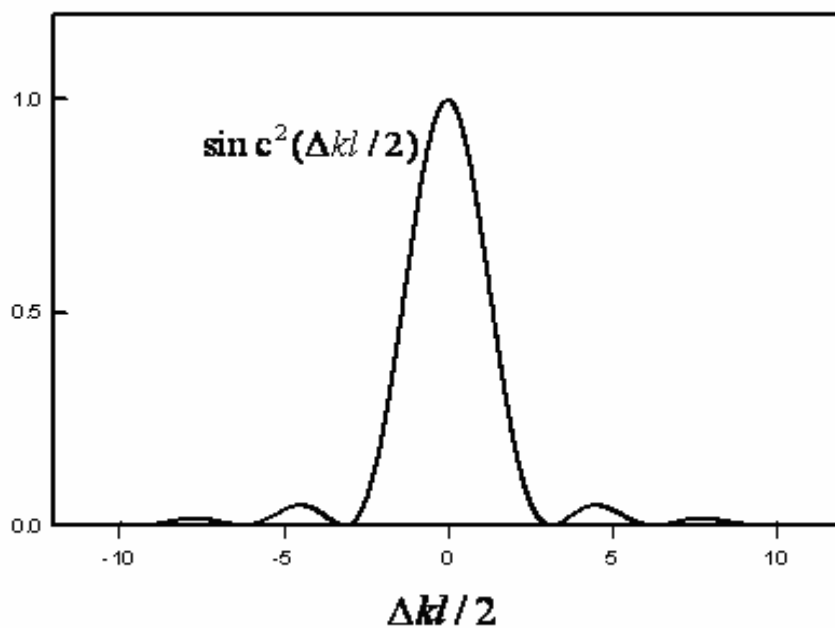


圖 2.1 Δk 對轉換效率的影響關係圖。

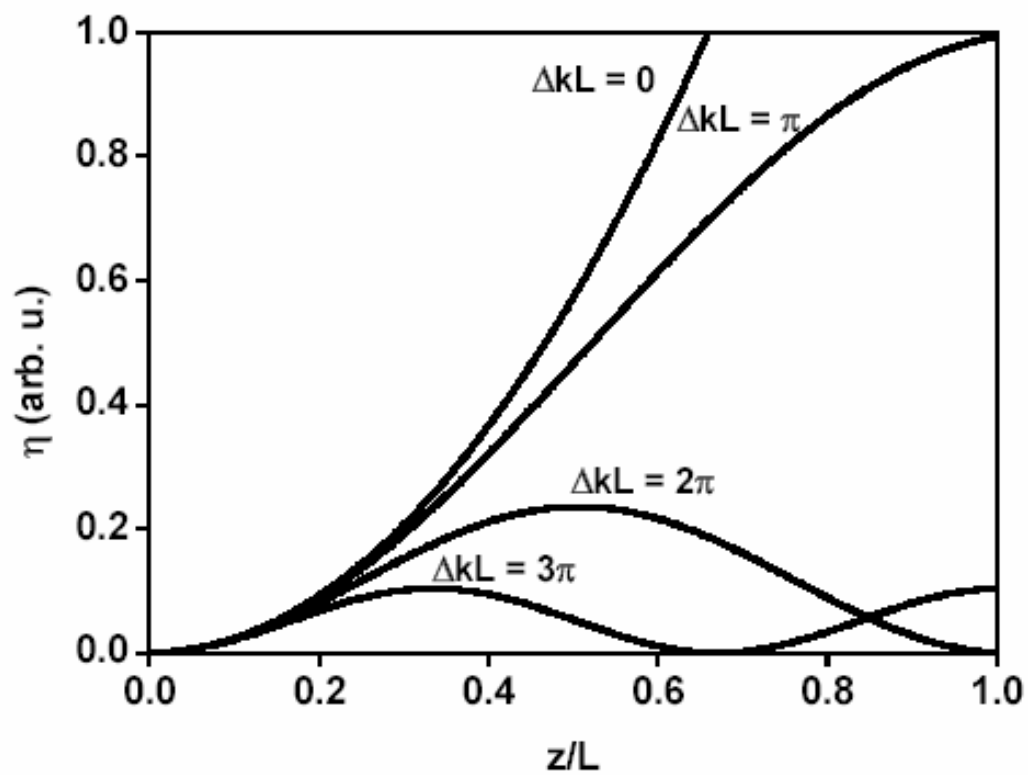


圖 2.2 在相位未匹配的情況下，轉換效率和晶體長度的關係。

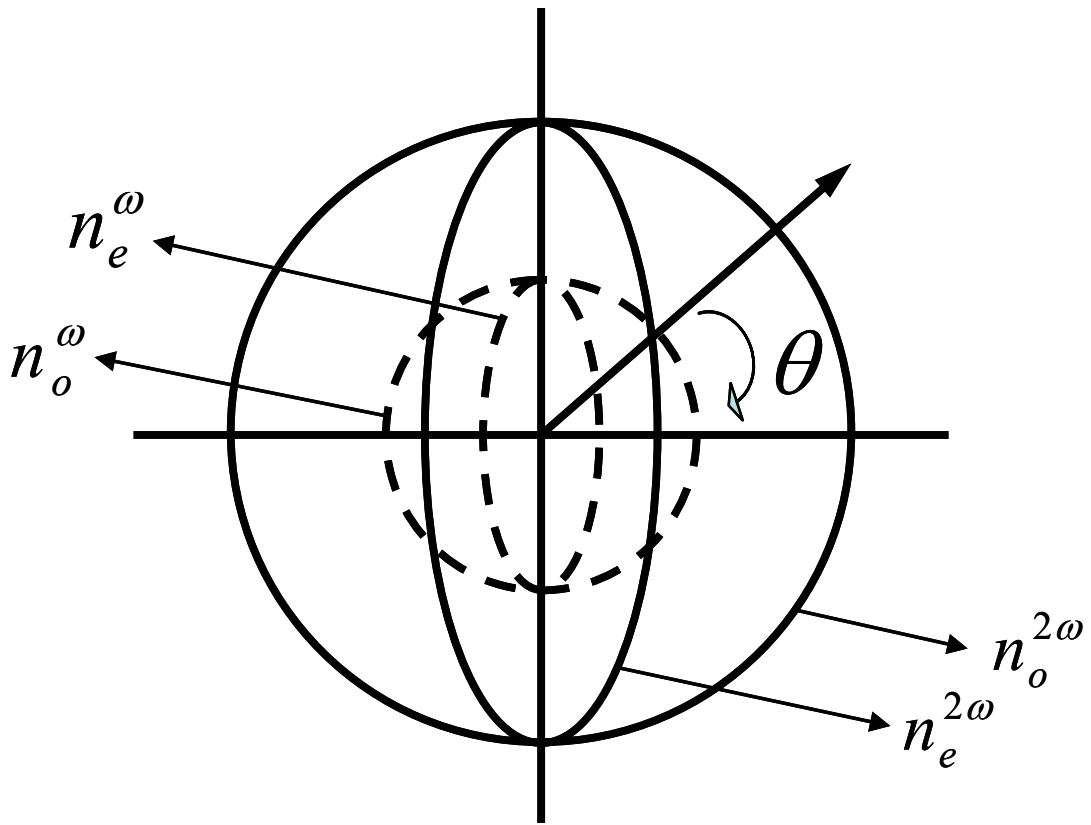


圖 2.3 o-ray 與 e-ray 相對應之折射率。

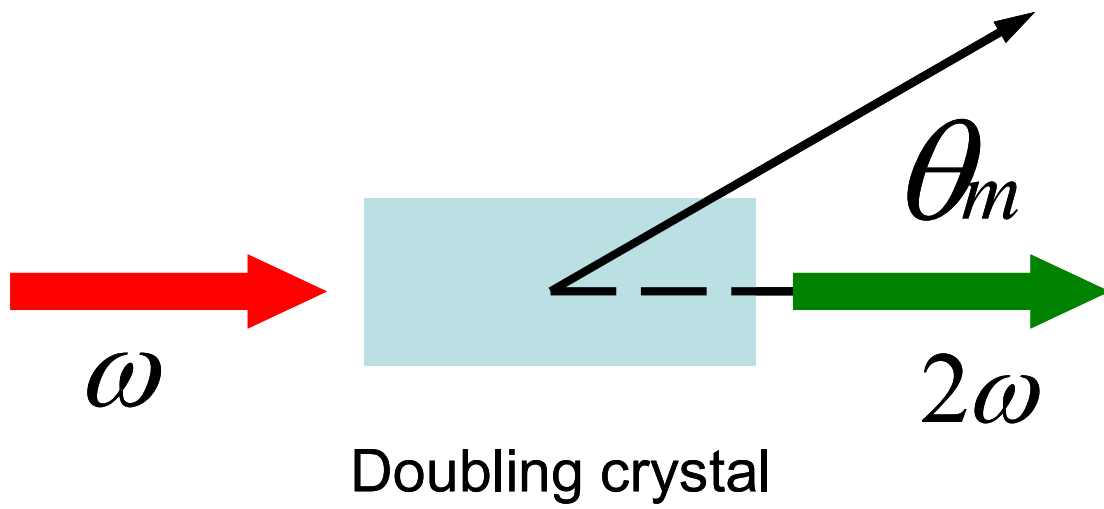
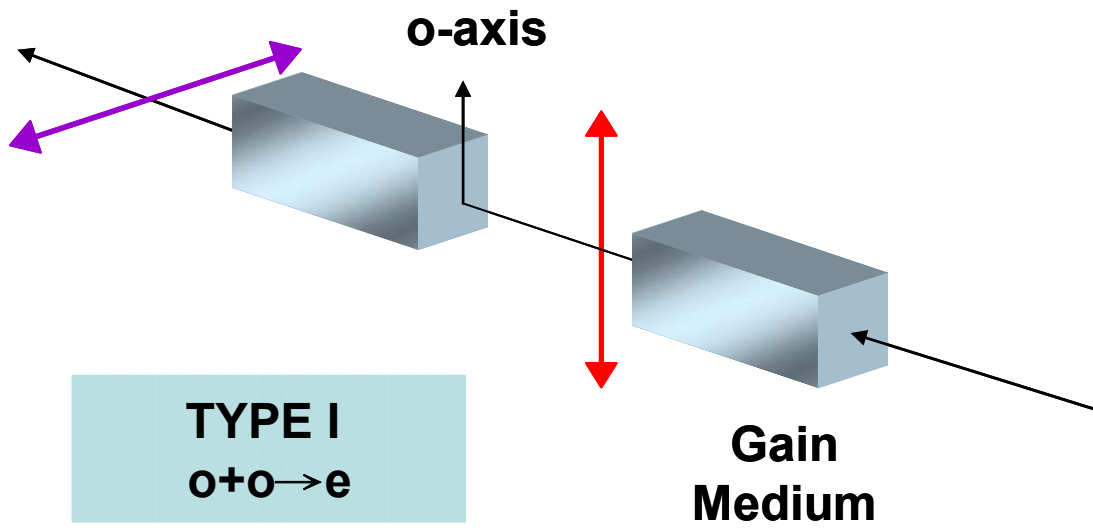
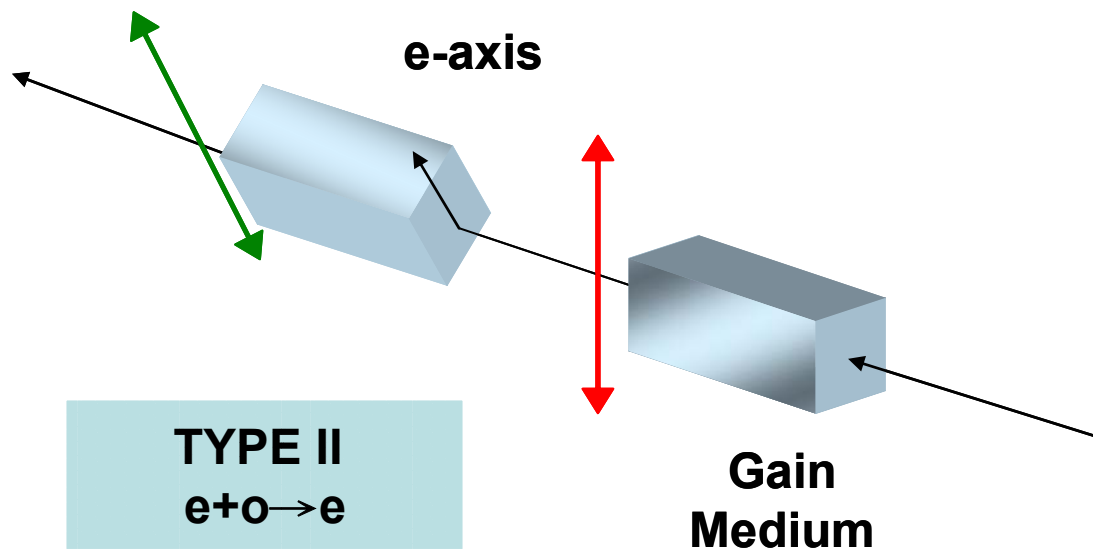


圖 2.4 相位匹配示意圖。



$$P_{2\omega} \propto E_{o\text{-axis}} E_{o\text{-axis}}$$

圖 2.5 I 類相位匹配示意圖。



$$P_{2\omega} \propto E_{e\text{-axis}} E_{o\text{-axis}}$$

圖 2.6 II 類相位匹配示意圖。

第三章 腔內三倍頻雷射之優化

3.1 導論

在雷射增益介質上要能直接產生可見光能階的躍遷是不容易的，要達到可以利用的高率強度更是被限制住的，因此在固態雷射的範疇中，利用非線性晶體來達成頻率的轉換是一個重要的應用。而要如何達到良好且可以應用的程度，又是另一件很重要的課題。所以本章是對優化方面的條件進行一些討論。

3.2 倍頻雷射之優化

此小節我們對一些可以優化倍頻雷射的條件進行討論。

3.2.1 腔內倍頻和腔外倍頻

早期在做非線性頻率轉換時，大都是利用腔外倍頻的架構，就是將基頻直接入射進非線性晶體之中，之後倍頻輸出。此方法架構相對簡單，但整體損耗也相對大，轉換效率也不佳。如果利用腔內的架構就較不一樣了，在共振腔的架構下，利用鏡子上的鍍膜，我們可以將能量鎖在腔內。在倍頻時，就算沒有轉換而剩餘的基頻光，也在鏡子之間來回，將能量鎖在腔內，還是可以利用。相對於腔外來說，腔內倍頻有體積小、效率高、光模態佳等優點。但缺點也來自於優點，當我們將能量儲存在共振腔之內時，共振腔內的能量極高，可能會造成鍍膜的損壞，也有可能達晶體破壞閾值，晶體溫度也因高能量而上升。但隨著鍍膜技術的進步，晶體破壞閾值增大且有良好的熱傳導性，有助於腔內頻率轉換技術往高功率的方向發展。我們於是採用腔內架構來對倍頻研究。

3.2.2 Q-開關[3]

由式子(2.4)可以知道，轉換效率受到基頻光的功率很大的影響，雖然採取腔內率轉換技術的方式可以提升光轉換效率，但如果我們再利用腔內的情況之下，相信可以獲得更高的效率。一般雷射輸出的形式都是以連續輸出的，也就是我們所謂的 CW 雷射，其輸出功率為一定值，不會隨著時間而有大的變化，若要提高其功率，相對的我們就要提供更高的激發光源，但是有時這會被外在的條件所囿。所以引入高能量的短脈衝雷射，也就因應而生；而在雷射的共振腔內放入 Q-開關裝置元件也是產生高能量的脈衝雷射方法之一。

在脈衝式雷射中，擔任腔內品質因子調制工作的元件稱之為 Q-開關。Q-開關的原理，就是利用某些技巧讓腔內的品質因子 Q 值隨時間變化的技術。由圖(3.1)來說明 Q-開關工作原理，當 Q-開關打開時，光源開始激發，Q-開關是開的狀態。所以腔內的損耗是很大的，此時的雷射共振腔是無共振出光的。此時增益介質上的居量反轉濃度，沒有因為共振出光而下降，反而在激發光源不斷的激發之下，呈現上升的趨勢。在居量反轉濃度持續大量累積之下，這時我們將 Q-開關關掉，則會使得腔內的損耗減小。當增益遠大於損耗時，光子在瞬間大量產生，產生一個高能量的脈衝雷射輸出，此時增益就會很快地往下降，當增益等於損耗的時候，光子積到最大值，然後增益會掉到比損耗還低，光子就很快地消失。所有累積的能量在短短幾十奈秒的時間內被全部釋放出來，可以達到一個高能量的短脈衝的雷射。

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之中。以 1064nm 倍頻 532nm 綠光雷射來說，如果我們以連續輸出(CW)的雷射架構來倍頻，效果明顯小於引入 Q-開關的架構。為了要得到較強的倍頻光，我們需要較強的基頻光，才会有強的倍頻光，雖然連續輸出(CW)的雷射架構下的 1064nm 平均輸出功率較 Q-開關的架構下來得高，但倍頻時我們可以由式(2.3)看出，如果倍頻時有較高的峰值功率時，輸出的倍頻光將會有較好的轉換效率，而 Q-開關的架構就有這項好處。由表(3.1)看出，CW 和 Q-開關架構的差異，所以我們引入 Q-開關到我們的架構之中。

大略來說 Q-開關雷射的分類頁有兩種，一種是主動式 Q-開關，開關的重複率可以用外在訊號所調變，例如：聲光晶體(Acousto-Optic 簡稱 AO)、電光晶體(Electro-Optic 簡稱 EO)、機械式元件(如旋轉鏡面)……等。另一種是被動式 Q-開關，開關的重複率只有由材料(我們稱之為飽和吸收體)本身的性質決定，而不能由外在的條件所決定，所使用的材料有摻四價鎢的鈮鋁石榴石晶體($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$)、有機染料片、……等。但又由於被動式 Q-開關的飽和吸收體材料本身對可見光波段會有不錯的吸收，所以不利我們將飽和吸收體當為 Q-開關的動作元件，而如果利用主動式 Q-開關的方式的話，重複率可由我們自行決定，可以讓我們可以

達到最佳的頻率轉換效率。

3.2.3 非線性晶體的偏振匹配

在上一章節，我們討論過了非線性晶體依其相位匹配的不同而有所分類，分成 I 類相位匹配和 II 類相位匹配。I 類相位匹配和 II 類相位匹配在單一基頻光源之下，晶體的 o-axis 和 e-axis 所放置的傾角我們都已經討論過了。在這一章節我們討論由兩個非線性晶體所構成的實驗架構，兩個非線性晶體各為不同的相位匹配，這個也是我們的實驗架構的情形。而這種架構是要做三倍頻的架構。

如圖(3.2)所示，我們選用增益介質(Nd:YVO₄)所產生的基頻光是線偏振的，也就是單光軸的晶體。而在增益介質之後我們放置 II 類相位匹配的非線性晶體 KTP(e+o→e)，接來才是 I 類相位匹配的非線性晶體 BBO(o+o→e)。當增益介質所產生的基頻光入射 II 類相位匹配的非線性晶體，產生了二倍頻光，剩餘的基頻光和產生的二倍頻光再入射 I 類相匹配的非線性晶體，因此而產生了三倍頻光了，這即是我們架構的作用機制。而 II 類相位匹配時，由於 KTP 是具有雙折射性的晶體，所以基頻光在通過 KTP 之後會有相位延遲的現象，原本的基頻光的偏振方向會旋轉；而二倍頻光的偏振方向，則端視 KTPe-axis 放置的角度。但為了得到較好的三倍頻光，我們往往會將二倍頻光提升到最高，以利之後的三倍頻。所以我們體將 KTP 晶體的 e-axis 放在和基頻光的偏振方向夾 45 度的位置，希望有最高的二倍頻光。但還需考慮另一方面，非線性晶體 KTP 的折射率和晶體長度的熱膨脹會隨著腔內的熱，而有所改變；夾 45 度時，雖然 $n_e - n_o$ 搭配上比例最好的電場分量，可以得到最好的綠光輸出；但夾 45 度時，相位延遲也是最大的時候，可由式(3.1)看出，故當 KTP 的晶體溫度一改變， n_e 、 n_o 也改變，晶體長度也改變，基頻光的偏振方向便有相當大的轉動。

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_o - n_e) \quad (3.1)$$

我們也參考一些文獻[4]，針對溫度和基頻光偏在腔內的偏振方向，來做一些數值上的定性分析。如圖(3.3)~圖(3.5)所示，我們可以看出當 KTP 的 e-axis 和 c-axis 的夾角越小時，基頻光的偏振方向的變化幅度，也隨之變小；而在夾角越接近

45 度時，基頻光的偏振方向的變化幅度，更為劇烈。這個結果相當具有利用價值，往後我們在第四章實驗部分，我們先驗證了數值分析的可靠性；也把這個結果，利用在之後腔內三倍頻的架構上。

因為上面的結果，所以在 I 類相位匹配的非線性晶體 BBO 的偏振匹配，便比較有難處。因此我們必須將基頻光的相位延遲程度強弱差異給抑制住，當偏振方向比較好掌握時，便可以將 I 類相位匹配的非線性晶體 BBO 取最有利的偏振方向，達到好的轉換效率，也利於三倍頻光輸出的穩定性。我們在第四章實驗部分會有較明顯體認。

3.3 影響頻率轉換效率的因子

除了上述優化因子之外，還有一些因素會影響頻率轉換效率的因子，我們在此簡述。

3.3.1 基頻光功率

由式(2.6)知，倍頻光的功率和基頻光的功率是呈平方正比的關係。故假如我們可以有效的提升基頻光的輸出功率時，倍頻光的輸出功率，將可以大大的提升。所以提升基頻光的輸出功率，也是提升轉換效率的重要方法之一。

基本上我們的想法有兩個方法，一是防止基頻光的損耗，二是提升基頻光功率的來源。方法一的話，我們可以利用選擇腔內的雷射架構來達成，我們將基頻光有效的留在腔內，讓增益介質產生的基頻光可以留在腔內，既使未轉換的基頻光還是可以在腔內來回之後，再次作用在倍頻晶體上。於是，我們在共振腔和晶體上的鍍膜便相對重要。隨著鍍膜的技術的進步，不管是破壞閾值的提升，還是鍍膜的品質，將對我們的實驗有所幫助。

方法二的话，便和增益介質有密切的相關。所以選擇一個適合的增益介質，就可以立即改善原有的效率了。在最近幾年裡，在做倍頻的固態雷射之中，以 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 較為常見。在我們的實驗之中，我們選擇後者當作我們的共振腔內的增益介質。Nd:YVO₄ 相對於 Nd:YAG，它擁有較大的受激輻射截面積 [5]、較低出光閾值、較寬的吸收頻寬、對 808nm 波段吸收係數較大。雖然 Nd:YAG 的導熱性質較 Nd:YVO₄ 佳，熱效應沒有 Nd:YVO₄ 來得大，所以可以忍受較高的

激發[6][7]，所以早期在高功率激發下常被拿來使用。但爲了滿足上面極化匹配的情況下，單光軸的 Nd:YVO₄ 卻具有較好的優點，a-cut 的 Nd:YVO₄ 可以輸出線偏振的基頻光，可以達到極化匹配，而且在 c-axis 的增益又比另外兩軸大，大約是四倍左右；而 Nd:YAG 輸出的基頻光無偏振方向，會產生熱效應的雙折射現象，造成極化退化，因而降低雷射功率。所以我們選擇 Nd:YVO₄ 爲我們的增益介質，以適合我們單一激發源的方式。

3.3.2 晶體長度

由式(2.6)可知，在相位不匹配的情況下，倍頻光的轉換效率，和晶體的長度 L 有振盪現象。若晶體太長，光束會隨著傳播距離而發散，使得轉換效率降低，光束品質也會下降。形成所謂的 Maker-fringes，如圖(2.2)所示。在相位不匹配的情況之下，光的轉換效率，會隨著晶體的作用長度變長而變高，且會振幅減弱的現象。

3.3.3 晶體溫度

當光入射至非線性晶體內部時，熱也隨之產生，晶體本身的溫度也會變化，晶體本身的折射率及晶體的長度也會受到影響而改變，而使得相位匹配的程度改變，使得轉換效率有所不確定。所以穩定而正確的晶體溫度，才可確保良好的轉換效率及較佳的輸出品質。

3.3.4 非線性係數

由式(2.6)我們可以直接看出來，有效非線性係數愈大，轉換效率越佳。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。但在一般情況之下，我們還需要考慮晶體的破壞閾值、光學品質、角度、以及溫度的可接受範圍。雖然可以利用增加晶體的長度來提升非線性係的功用，但考慮又是另一方面的問題了，所以選擇適當的非線性晶體便成一門很大的學問。

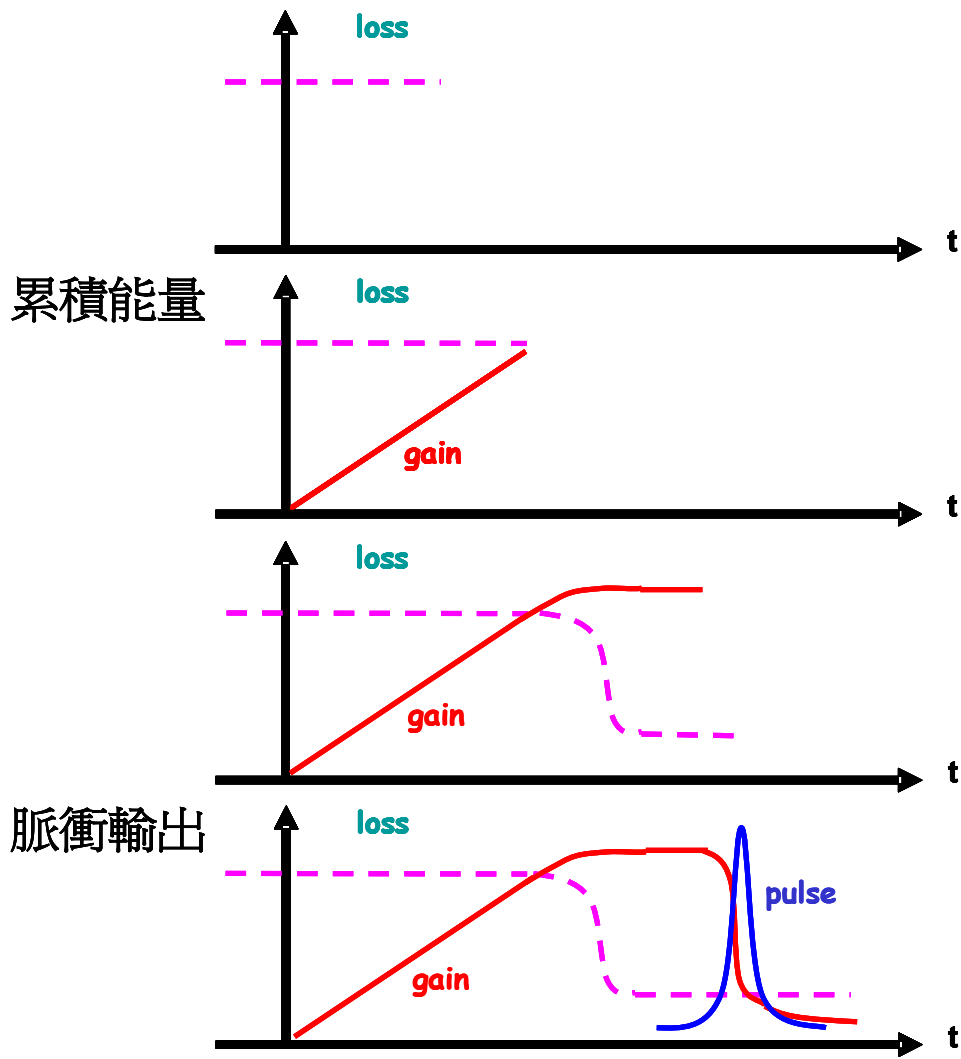


圖 3.1 Q-開關的作用機制示意圖。

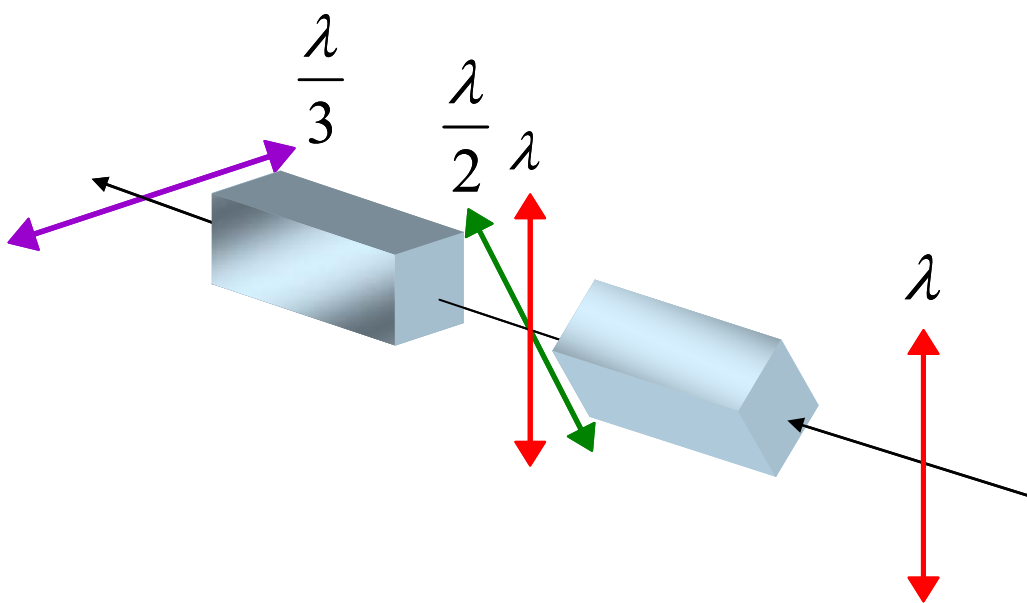


圖 3.2 架構簡圖。基頻為線偏振光，搭配其後的非線性晶體。

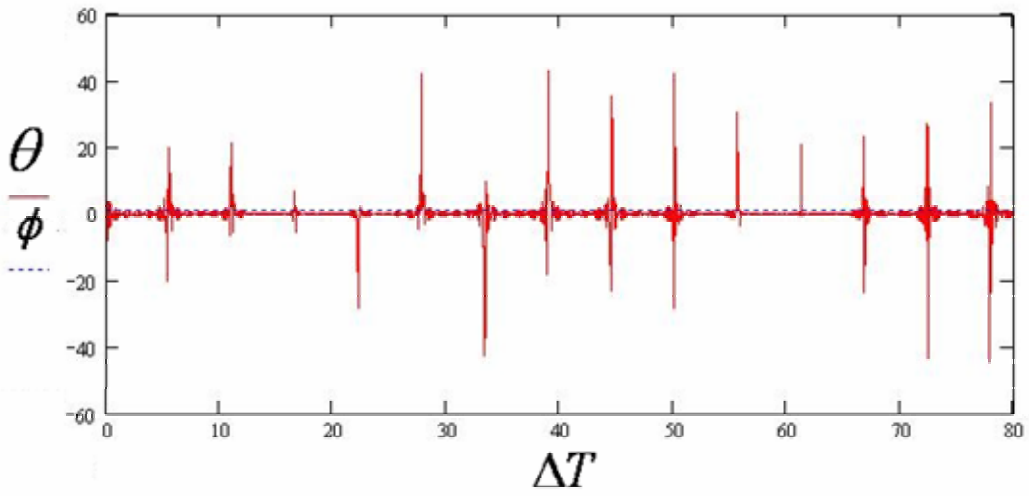


圖 3.3 晶體內溫差和基頻光偏振方向的關係圖。 θ :基頻光的偏振方向， ϕ :KTP e-axis 的角度，兩者以 c-axis 為基準 0 度。此圖為 KTP e-axis 的角度為 1 度時。

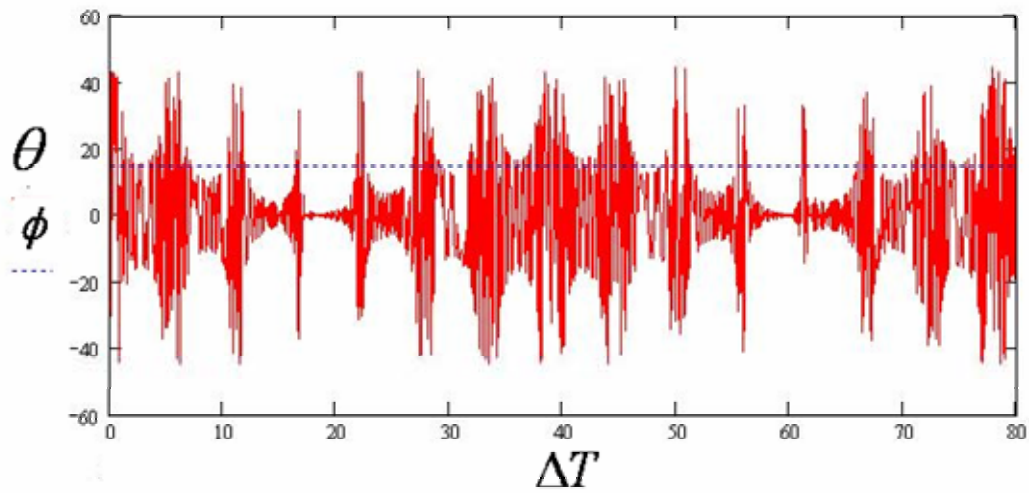


圖 3.4 KTP e-axis 的角度為 15 度結果圖。

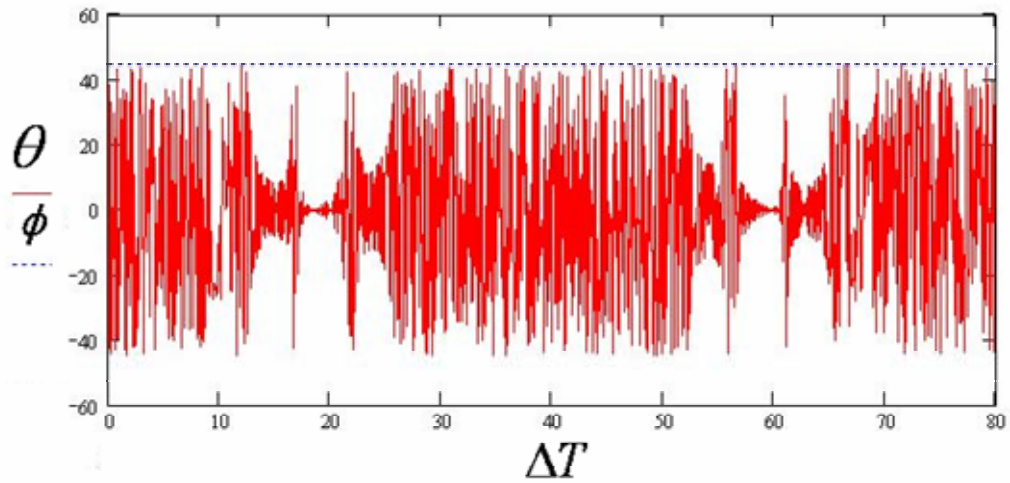


圖 3.5 KTP e-axis 的角度為 45 度結果圖。振盪較 1 度時大。

	基頻光功率	峰值功率	倍頻光功率
CW Laser	較強	無脈衝輸出	較弱
Q-switch Laser	較弱	極高	較強

表 3.1 CW 雷射和 Q-switch 雷射的簡單比較。

第四章 實驗架構與結果討論

4.1 導論

影響腔內頻率轉換效率的優化條件，可大概區分為兩個部份，一是晶體的選用，二是相位匹配的問題。在晶體選用的方面，又可以區分為增益介質和非線性晶體的選用。而在相位匹配方面，又包含基頻光與倍頻光極化匹配的關係。本實驗是在相同的晶體選用之下，我們藉由不同極化匹配的關係，來比較極化方向匹配的優劣，以達到倍頻優化的目的。

本章主要是介紹在腔內固態雷射的架構之下，我們三倍頻雷射實驗之成果，其中我們先測量出在腔內基頻光之偏振方向，之後利用其結果來針對非線性晶體放置之角度的匹配，以期達到優化之目的。我們更在共振腔內引入 A-O 晶體做為 Q-開關，帶來的高峰值功率對腔內倍頻光之輸出效率有著的影響。

4.2 532nm 腔內基頻光之偏振方向測量

以 1064nm 做為基頻光，經過非線性晶體做二倍頻諧波轉換，可獲得 532nm 的綠光雷射。以半導體雷射做為激發光源，A-O 晶體做為 Q 關的腔內倍頻雷射，有體積小、效率高、重複率高等優點。因為 Nd:YVO₄[8]其受激輻射面積大，且對 808nm 波段有強吸收，所以我們選用這個在半導體激發全固態高重複率腔內倍頻雷射的研究領域相當受青睞的增益介質，在腔內做為基頻光的來源。而在非線性晶體的選擇上，我們選擇 II 類相位匹配 KTP 晶體 A 做為倍頻之晶體，由於它具有廣大的透光波段(350nm~4000nm)、寬的光學允許角、大範圍的容忍溫度、良好的熱傳性質以及高破壞閾值等特性。在此綠光雷射的架構之下，我們改變 KTP 晶體 e-axis 放置角度，即改變 532nm 綠光雷射的偏振方向，如圖(4.1)所示，量測出在不同 KTP 晶體 e-axis 放置角度之下腔內基頻光偏振方向和 532nm 綠光雷射的強度，進而利用此結果在腔內三倍頻做為非線性晶體放置角度的參考，以達腔內三倍頻優化之目的。

實驗架構

實驗架構如圖(4.2)。激發光源方面，我們採用半導體雷射輸出的 808nm 雷射，經由光纖耦合至 2:1 的聚焦耦合鏡組，聚焦至增益介質上；而增益介質的選用，我們選擇 a-cut 的 0.5% Nd:YVO₄，晶體長度 7mm，以銅座包覆且通水溫控散熱。聚焦耦合鏡組輸出端面上鏡子鍍有對 1064nm 和 532nm 高反射的鍍膜，做為雷射共振腔的前鏡，曲率半徑為 500mm，亦為一凹面鏡。而腔內 Q-開關的 A-O 晶體長度為 30mm，材質為 Crystal Quartz，晶體兩端面皆對 1064nm 做抗反射的鍍膜，中心頻率操作在 27.12MHz，提供 15W 的 RF 訊號。在非線性晶體方面，我們選用 II 類相位匹配的 KTP 晶體($\theta=90^\circ$ ， $\Phi=23.5^\circ$ ， $e+o\rightarrow e$)，晶體長度為 10mm，同樣以銅座包覆且通水溫控散熱，晶體兩端鍍上 1064nm 及 532nm 抗反射膜。輸出耦合鏡有鍍膜對 1064nm 為高反射和 532nm 為高穿透。此實驗架構的腔長大約為 6cm。

如圖(4.1)所示。在實驗中，我們改變 KTP 的 e-axis 放置的角度，意即改變輸出綠光雷射偏振方向，分別在其它條件都相同的情況之下，在不同的偏振方向角度，量測漏出腔外極弱的 1064nm 基頻光之偏振方向及 532nm 綠光輸出功率。

實驗結果與討論

實驗中，我們選用 a-cut 的 0.5%Nd:YVO₄ 為增益介質，故其輸出之 1064nm 基頻光為線偏振光，因此我們將 KTP 的 e-axis(532nm 綠光的偏振方向)和水平面的法線夾角定為 θ ，以水平面的法線做為基準 0 度，如圖(4.1)所示。我們將增益介質的偏振方向控制在 0 度的地方。而在增益介質之後的 II 類相位匹配 KTP 非線性晶體，我們分別擺放不同的角度，改變 532nm 綠光輸出的偏振方向。從綠光偏振方向 45 度到 0 度，做在低功率激發到高功率激發下，測量 1064nm 基頻光偏振方向及綠光輸出功率的功率。測量結果分別如圖(4.3)~圖(4.6)所示。圖(4.3)為綠光輸出功率和角度 θ 的關係，圖(4.4)~圖(4.6)為 1064nm 基頻光偏振方向角度和激發功率的關係。

結果一:

從圖(4.3)可以看出，從 45 度到 0 度的 532nm 綠光偏振，其輸出功率的高低。

從 45 度到 0 度的 532nm 綠光偏振，其輸出功率的高低差異並不大；在輸入功率為 12.5W 及重覆率為 45KHz 之下，最高 2.79W 的平均輸出功率，其輸出 532nm 綠光偏振角度為 40 度；最低也有 1.81W 的平均輸出功率，其輸出 532nm 綠光偏振角度為 20 度。以整體而言，平均輸出功率大約在 2.24W 上下。轉換效率大約為 22.3%~14.4%之間。此為未改變重覆率的情況之下的結果，若依照以往的經驗，平均輸出功率會隨著重覆率增加而增加到一定的程度，而轉換效率會有所上升。

結果二:

從圖(4.4)~圖(4.6)可以看出，在各個不同的 KTP 角度之下，1064nm 基頻光偏振方向角度 θ 和激發功率的關係。輸出的 1064nm 倍頻光的偏振方向已由原本選定的 0 度，跳動到非 0 度的地方。當然跳動的曲線可能在每次的量測之下，而有所不同，但其跳的振幅是可以遇見的。單看在不同高低的激發之下，其偏振方向的角度也有程度不一的振盪。若以整體看下來，532nm 綠光的偏振角度 θ ，隨著 θ 越來越小，我們量測到的 1064nm 偏振角度的振盪也越來越小。這個結果和我們在上一章節所做的數值上的定性分析，有相當吻合的結果。

討論:

結果一的結果和一般我們所認知的有些許的差距，由式(2.3)中可以得知，在二倍頻率轉換之中，頻率的轉換效率最好時，為基頻光的偏振在 o-ray 和 e-ray 的電場都為最大時。而在我們的綠光雷射的架構之下，KTP 為 II 類相位匹配的非線性晶體，而我們的基頻光為線偏振光，理論上基頻光的偏振和倍頻光的光軸在夾角為 45 度時，即 o-ray 和 e-ray 有 1:1 的配比，倍頻光的輸出最強，而在基頻光和倍頻光的偏振夾角為 0 度或 90 度時，輸出最弱。但由實驗結果可以看出，當基頻光的偏振和倍頻光的夾角在 45 度到 0 度之間時，其實其差異並不大。夾角為 45 度時，532nm 的綠光雷射輸出並沒有遠遠大於夾角為 0 度時的 532nm 綠光雷射，且在 0 度時也有沒因為其中一方向電場幾乎為 0 時，而綠光雷射輸出極低。

結果二中，這是由於 KTP 為雙折射晶體，偏振光在經過它時，會有相位延遲的現象，所以偏振會旋轉；意即當 1064nm 線偏振的基頻光，經過了 II 類相位匹配的 KTP 非線性晶體時，因為其雙折射性，導致基頻光的偏振方向改變了。

故在線偏振的基頻光，在多次來回經過雙折射晶體之後，其偏振狀態不僅改變了，而且會呈現有點橢圓偏振。而熱也會影響晶體的光學折射率和晶體的長度，也會改變相位延遲的程度。在不同的激發功率之下，雖然晶體有銅座包覆且通水溫控散熱，但熱的推積還是出現；所以晶體的光學折射率在不同的激發功率之下，而有所不同，以致於相位延遲的現象也會呈現不同，故在圖上有時呈現跳動的樣子；我們也曾在相同的激發功率之，改變銅座的散熱水溫，也證實了偏振方向和晶體和熱是關聯的。而隨著 KTP 晶體的放置角度和基頻光偏振越來越靠近，意即基頻光的偏振和 KTP 雙折射晶體的 e-axis 夾角越來越小，相位延遲的影響越來越小，所以結果二中的 532nm 綠光的偏振角度 θ 的減小，連帶著 1064nm 偏振方向的振盪也隨之減小。而且我們觀察出，在高功率的激發時，其 1064nm 偏振方向也有往 0 度的方向靠近的趨勢。

綜合以上兩個結論，我們將延伸此綠光雷射的架構，利用 532nm 綠光和 1064nm 紅外光來做腔內三倍頻 355nm 紫外光雷射。利用結果一知道 532nm 綠光雷射不會因為過小的 θ ，而轉換效率極低，仍然可以利用其強度來做 355nm 紫外光雷射的頻率轉換。利用結果二知道，在較小的 θ ，1064nm 基頻光偏振方向的穩定性較佳，偏振方向和 532nm 綠光雷射的夾角也較小，利於下個實驗中的 I 類相位匹配的 BBO 非線性晶體。

4.3 355nm 紫外光雷射之優化

高功率的二極體激發式腔內三倍頻 355nm 紫外光雷射在微鑽孔、軟板切割、雷射回火、立體印刷、電路板加工及科學研究等方面都有著廣泛的應用。本小節主要是在相同的增益介質及非線晶體之下，利用上小節所得到之結論，搭配適當基頻光與倍頻光極化方向的角度，在腔內達到和頻，來獲得最有效率及穩定性最佳的 355nm 的紫外光雷射。

實驗架構

實驗架構如圖(4.7)。激發光源方面，我們採用半導體雷射輸出的 808nm 雷

射，經由光纖耦合至 2:1 的聚焦耦合鏡組，聚焦至增益介質上，其中增益介質的選用，我們選擇 a-cut 的 0.5% Nd:YVO₄，晶體長度 7mm，並以銅座包覆且通水溫控散熱。聚焦耦合鏡組輸出端面上鏡子鍍有對 1064nm、532nm 和 355nm 高反射的膜，做為雷射共振腔的前鏡，曲率半徑為 500mm，亦為一凹面鏡。而腔內 Q-開關的 A-O 晶體長度為 30mm，材質為 Crystal Quartz，晶體兩端面皆 1064nm 做抗反射的鍍膜，中心頻率操作在 27.12MHz，提供 15W 的 RF 訊號。在非線性晶體的選用上，我們選用 II 類相位匹配的 KTP 晶體($\theta=90^\circ$, $\Phi=23.5^\circ$, $e+o\rightarrow e$)，及 I 類相位匹配的 BBO 晶體。II 類相位匹配的 KTP 晶體，和先前 532nm 綠光雷射實驗中所使用的是相同一顆晶體，晶體長度為 10mm，同樣以銅座包覆且通水溫控散熱。在 KTP 晶體和 BBO 晶體之間，我們加入一片濾鏡，鏡面上鍍有對 355nm 高反射(R=93%)的膜，主要的目的是，為了防止經由 BBO 晶體三倍頻出來的 355nm 光，折回增益介質，造成增益介質的不良吸收，以及共振腔的損耗，更而降低轉換效率。I 類相位匹配的 BBO 晶體($\theta=31.3^\circ$, $\Phi=0^\circ$, $o+o\rightarrow e$)，晶體長度為 8mm，也是同樣以銅座包覆且通水溫控散熱。輸出耦合鏡上鍍有對 1064nm、532nm 波段有高反射(R>99%)的鍍膜，以及對 355nm 波段有高穿透(T>99%)的鍍膜。此實驗架構的腔長大約為 8.5cm。其中 KTP 晶體主要的作用是要對 1064nm 基頻光做二倍頻轉換成 532nm 綠光，而 BBO 晶體主要的作用是要對 1064nm 基頻光和二倍頻得到的 532nm 綠光，做兩個波段的和頻動作，即可獲得 355nm 紫外光。相對於 1064nm 基頻光，和頻之後的 355nm 紫外光可視三倍頻之後的結果。

如表 4.1 及圖所示。在實驗中，我們對 II 類相位匹配的非線性晶體 KTP 的 e-axis 及 I 類相位匹配的非線性晶體 BBO 的 o-axis 做不同放置角度的配對；而所選擇的配對角度依據，為先前綠光雷射實驗中的結果。利用這些結果，我們針對腔內三倍頻紫外光雷射做了一些實驗以求得優化的條件。

實驗結果與討論

實驗中，我們選用 a-cut 的 0.5%Nd:YVO₄ 為增益介質，故其輸出之 1064nm[5]

基頻光為線偏振光，因此我們將其偏振角度和水平面的法線夾角定為 θ ，以水平面的法線做為基準 0 度，如圖所示。我們將增益介質的偏振方向控制在 0 度的地方。增益介質之後的晶體為兩非線性晶體，我們依照上個實驗的結果來做一些非線性晶體角度的放置。

首先，我們從上個實驗的圖(4.4)中可以看到，在綠光偏振(e-axis)為 40 度時，其 1064nm 基頻光的偏振方向，一度使偏振方向改變到 0 度和 40 度之外，大部份都在六十度之外。為了驗證這個結果，我們分別針對這個情況做兩個不同的比較。在 355nm 紫外光雷射的架構之下，我們先決定增益介質和 KTP 非線性晶體的偏振方向，改變在 KTP 後面的 I 類相位匹配的非線性晶體 BBO。我們定基頻光的偏振方向在 0 度，綠光偏振方向(KTP 的 e-axis)在 40 度，而 BBO 的 o-axis 則分別放在 20 度和 60 度。從式中可以看出，預計在 BBO 的 o-axis 在 20 度時，獲得 355nm 紫外光雷射不錯的輸出；而 BBO 的 o-axis 在 60 度時，355nm 紫外光雷射應該較差。但實則不然，在上一個實驗的結果中，我們知道基頻光的偏振已呈現跳動的狀態，故當我們把 BBO 放在 θ 為 20 度(偏振方向在 1064nm 的偏振方向和 532nm 的偏振方向的夾角外)時，可由公式中知道其轉換效率並不好，在激發功率在 12.5W 時，只有 238mW 的紫外光雷射平均輸出功率，轉換效率大約為 1.9%；相反地，我們將 BBO 放在 θ 為 60 度地方，獲得比 BBO 放在 θ 為 20 度還要好的平均功率輸出，在激發功率在 12.5W 時，有 463mW 的紫外光雷射平均輸出功率，轉換效率大約為 3.7%。而且在此 BBO 的 o-axis 兩個角度下，兩者的穩定性其實有相當大的差異，BBO 的 o-axis 在 60 度時比在 20 度時具有相當的穩定性。而我們也在 KTP 的 e-axis 在 45 度時，以類似上面的想法做一次的嘗試，把 BBO 放置 65 度，大概在激發功率在 12.5W 時，有 435mW 的平均輸出功率，轉換效率大約為 3.4%。和我們一般的想法有著相當大的不一樣，一般我們會認為要把最強的 532nm 綠光雷射來和 1064nm 基頻光來做三倍頻率的頻率轉換，於是我們在放置 KTP 時會採用 45 度的偏振角度(即 o-ray 和 e-ray 有 1:1 的配比)，而 BBO 的 o-axis 會放在 532nm 綠光雷射來和 1064nm 基頻光偏振的中間(兩和頻光夾角最小時)，達到良好的配比。

以上之實驗可以確定上個實驗其參考的價值，接下來我們就利用上個實驗的結果，來做為之後實驗的方向。表 4.1 為我們配對的一些 KTP 和 BBO 的角度及 355nm 紫外光雷射的平均輸出功率。在 KTP 為 20 度，BBO 為 20 度時，在激發功率在 12.5W 時，有最高的 1.05W 的平均輸出功率，轉換效率大約為 8.4%。在 KTP 為 0 度，BBO 為 10 度時，在激發功率在 12.5W 時，有最高的 903mW 的平均輸出功率，轉換效率大約為 7.2%，而且此時的輸出的功率最穩。如圖(4.8)~(4.9) 所示。



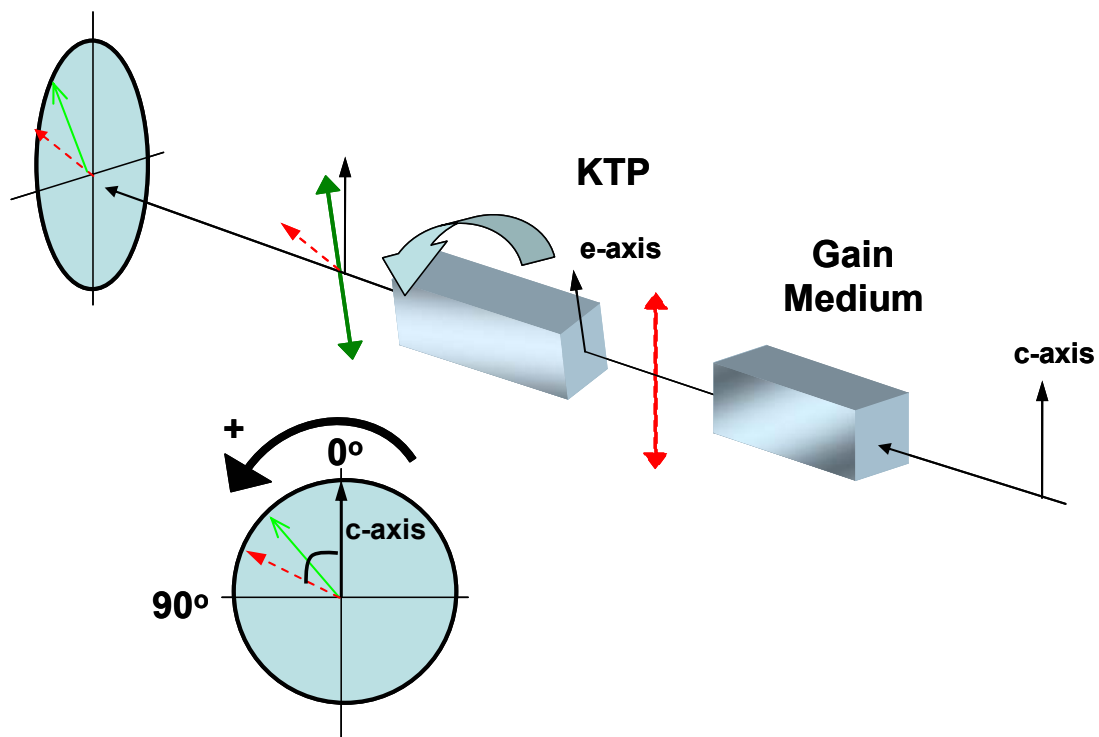


圖 4.1 532nm 綠光雷射架構下，晶體擺放的簡圖。虛線箭頭為基頻光的偏振方向，實線箭頭為倍頻光的偏振方向。左下的圓為角度參考圖。

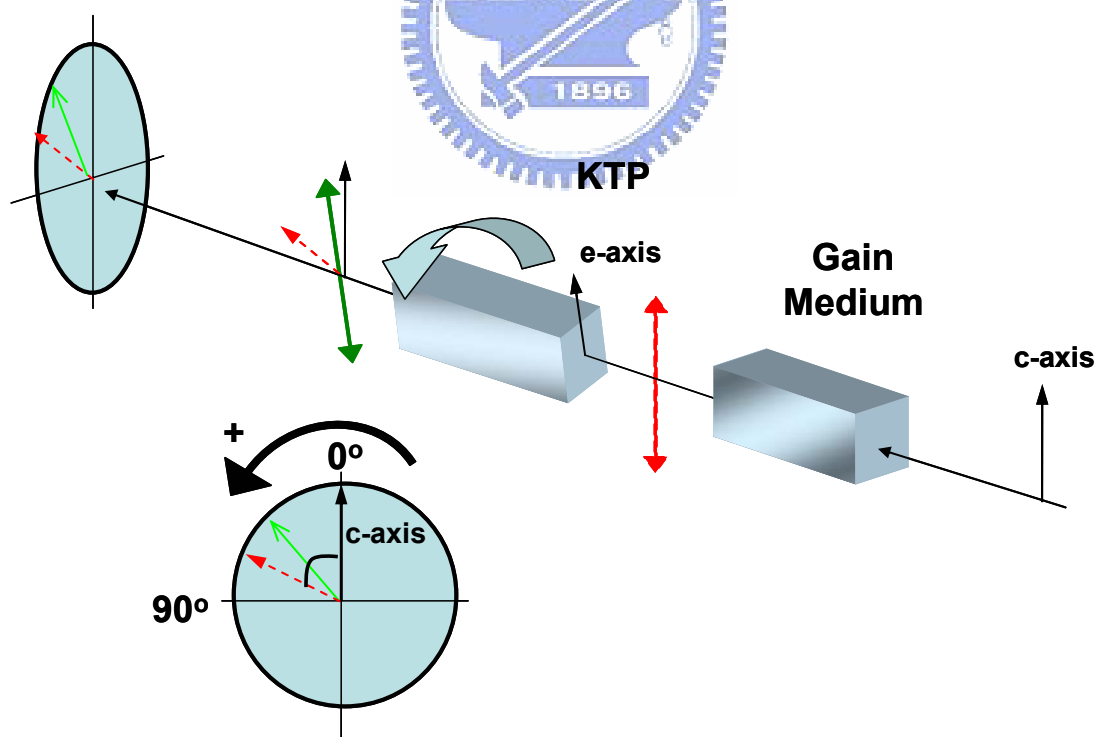


圖 4.2 532nm 綠光雷射的架構圖。我們旋轉 KTP 的角度，測量綠光的強度及基頻光的偏振方向。

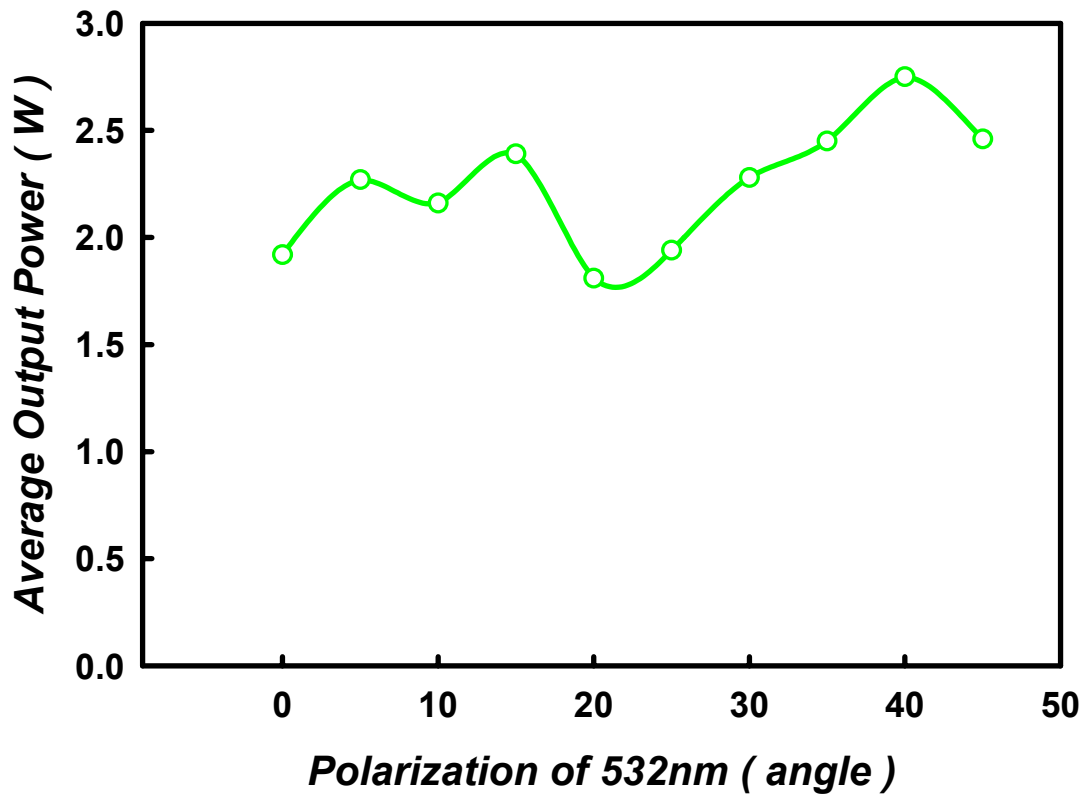


圖 4.3 KTP 在 e-axis 不同角度放置時，532nm 綠光功率的平均輸出功率。

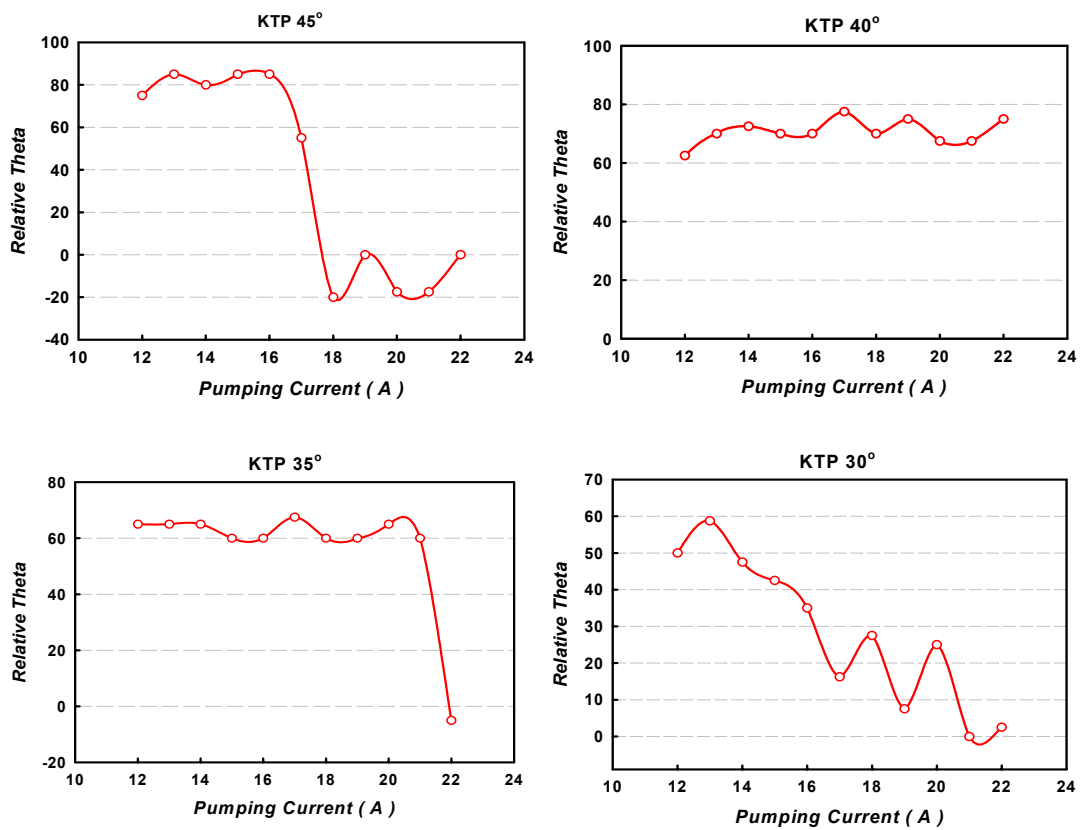


圖 4.4 在不同 KTP 的角度下，腔外量測的 1064nm 基頻光的偏振方向。

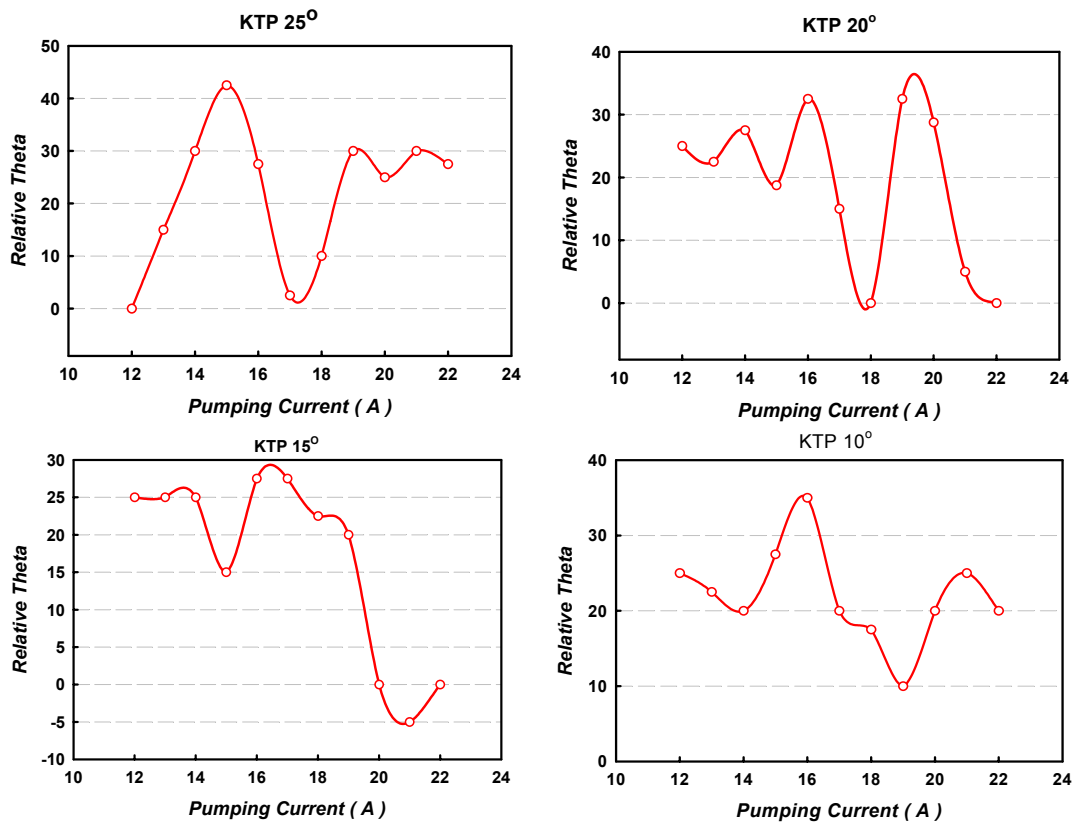


圖 4.5 在不同 KTP 的角度下，腔外量測的 1064nm 基頻光的偏振方向。

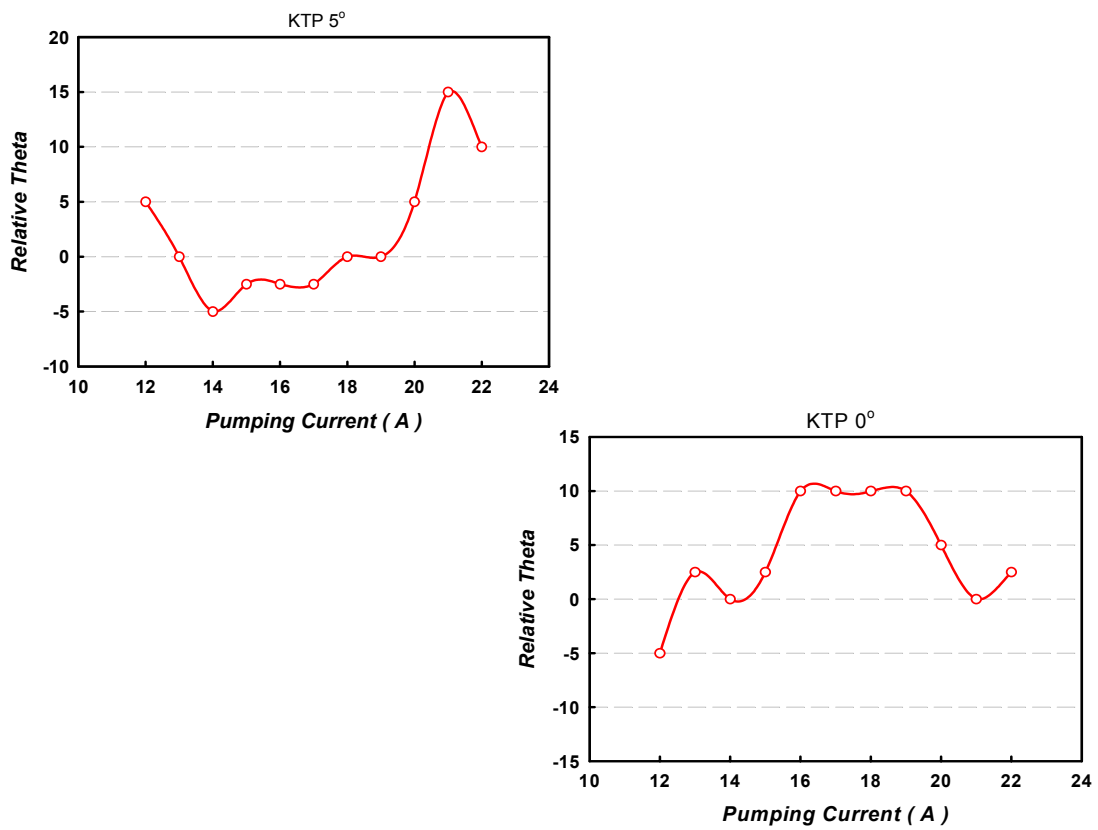


圖 4.6 在不同 KTP 的角度下，腔外量測的 1064nm 基頻光的偏振方向。

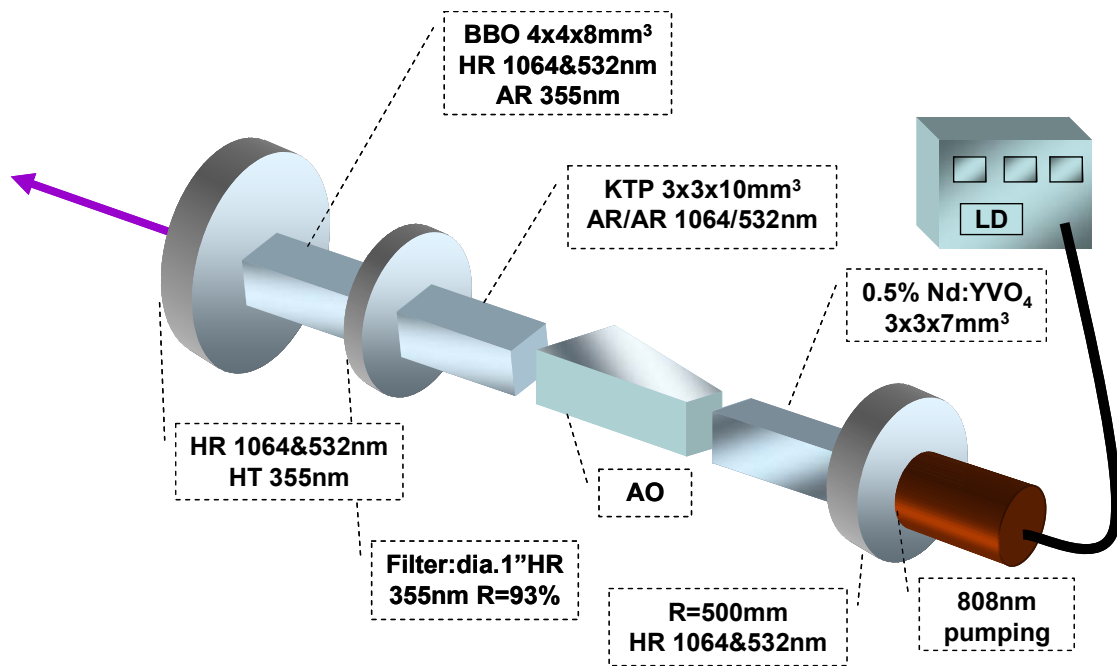


圖 4.7 355nm 紫外光雷射的架構圖。我們利用綠光雷射的結果，來配對 KTP 和 BBO 晶體的角度。

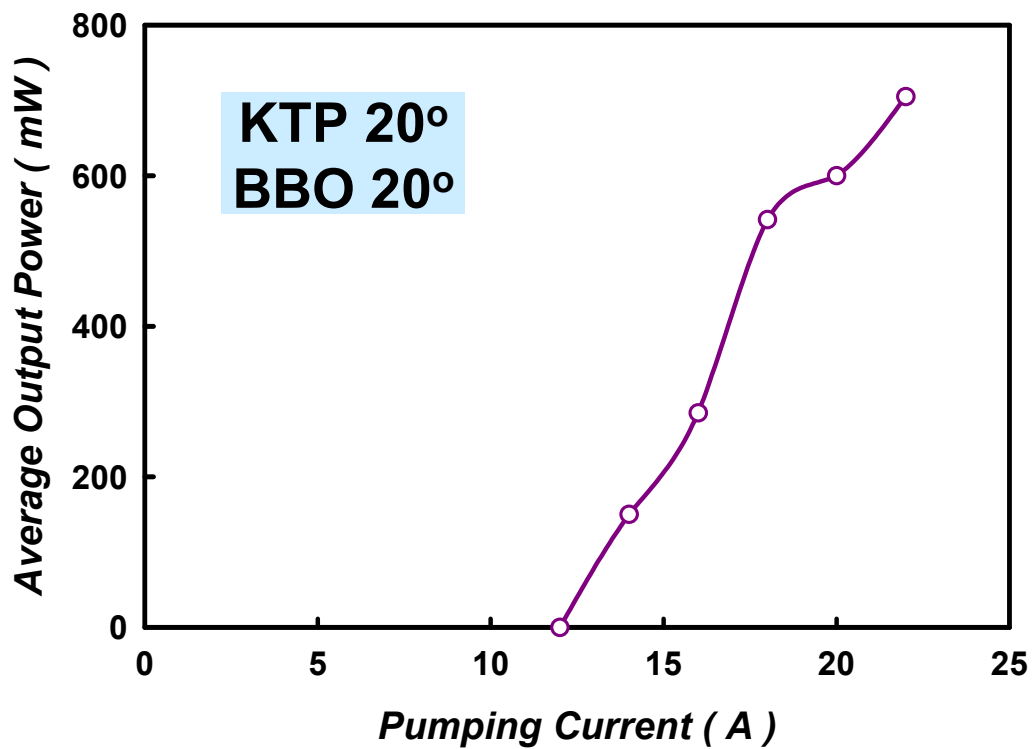


圖 4.8 KTP 20° 和 BBO20° 時，355nm 雷射輸出功率和輸入電流的關係。

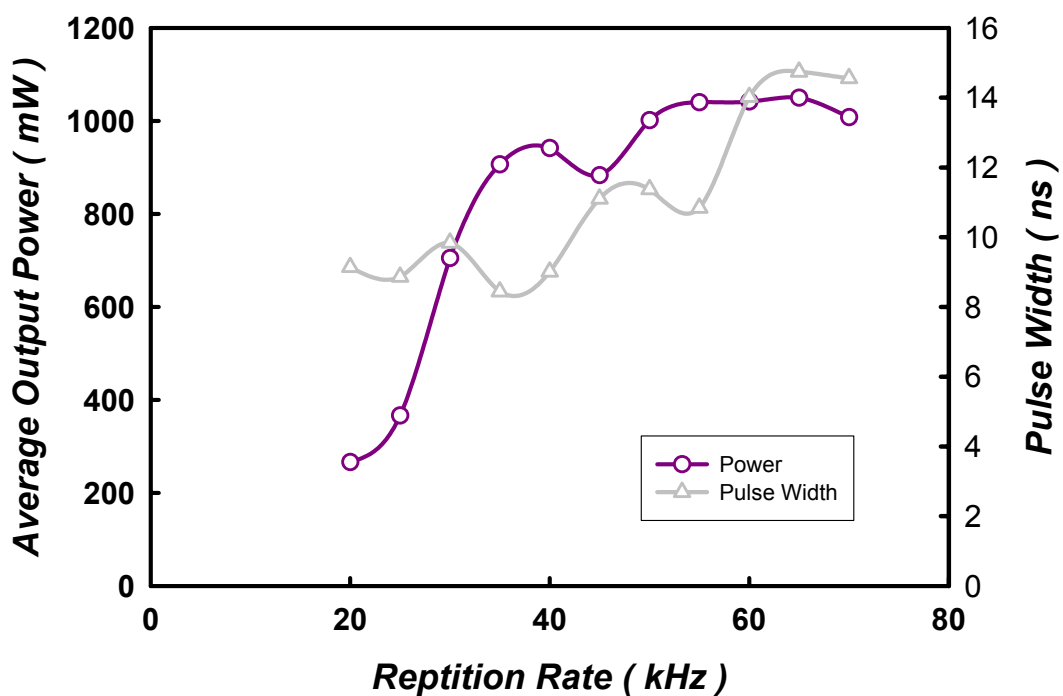


圖 4.9 KTP 20° 和 BBO 20° 時，AO 晶體重複率和輸出功率及脈衝寬度的關係。當重複率在 65kHz 時，有 903mW 的最高輸出。

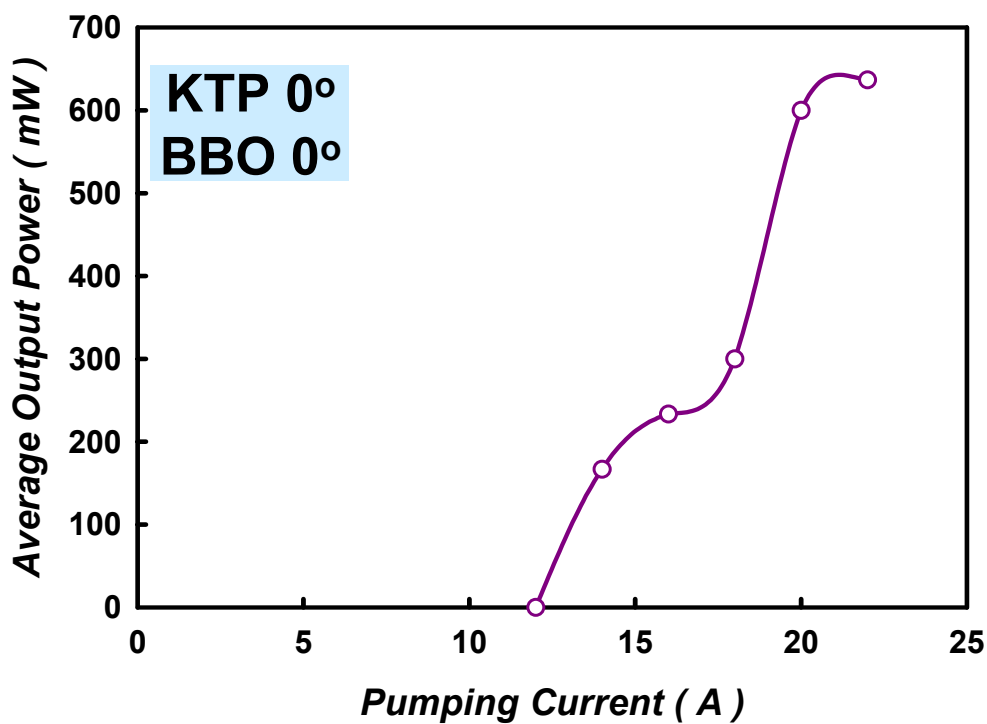


圖 4.10 KTP 0° 和 BBO 0° 時，355nm 雷射輸出功率和輸入電流的關係。

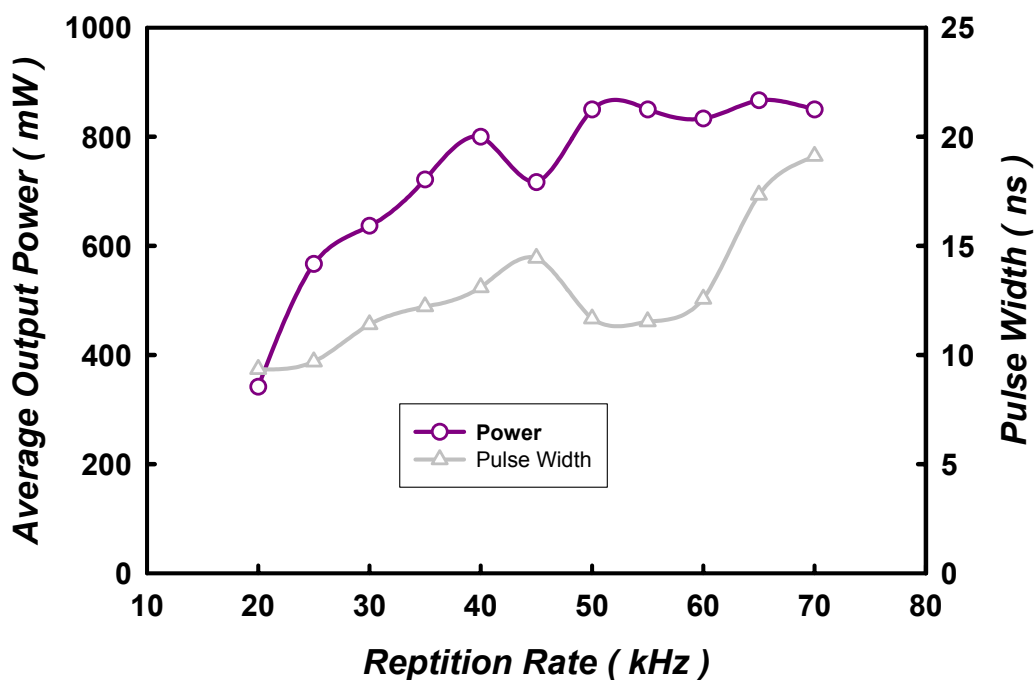


圖 4.11 KTP 0° 和 BBO 0° 時，AO 晶體重複率和輸出功率及脈衝寬度的關係。當重複率在 65kHz 時，有 903mW 的最高輸出。

	KTP 45°	KTP 40°	KTP 35°	KTP 30°	KTP 25°
The Highest Output Power of 532 nm	2.46 W	2.75W	2.45 W	2.28 W	1.94 W
The Highest Output Power of 355 nm	435 mW BBO @ 65°	463 mW BBO @ 55° 238 mW BBO @ 20°	737 mW BBO @ 20°	667 mW BBO @ 20°	727 mW BBO @ 25°

	KTP 20°	KTP 15°	KTP 10°	KTP 5°	KTP 0°
The Highest Output Power of 532 nm	1.81 W	2.39 W	2.16 W	2.27 W	1.92 W
The Highest Output Power of 355 nm	1.05 W BBO @ 20°				903 mW BBO @ 10°

表 4.1 II 類非線性晶體 KTP 和 I 類非線性晶體 BBO 配對關係與結果。

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

由我們的實驗可以得到，適當的搭配非線性晶體的角度，不僅可以獲得更佳的轉換效率，連帶著穩定可以有明顯的改善。轉換效率的情形如下所示：

	KTP 45°	KTP 40°	KTP 35°	KTP 30°	KTP 25°
The Highest Output Power of 355 nm	435 mW BBO @ 65°	463 mW BBO @ 55° 238 mW BBO @ 20°	737 mW BBO @ 20°	667 mW BBO @ 20°	727 mW BBO @ 25°

	KTP 20°	KTP 15°	KTP 10°	KTP 5°	KTP 0°
The Highest Output Power of 355 nm	1.05 W BBO @ 20°				903 mW BBO @ 10°

5.2 未來展望

我們知道偏振匹配的關係，我們也了解我們實驗所驗證的結果。利用這個結果，我們可以應用在其它系列的腔內三倍頻雷射，如 1343nm 波段，倍頻出 671nm 紅光，三倍頻出 477nm 藍光[9]；或者搭配其它腔內架構[10]，得到其它波長或者更高的功率。我們也可以參考以上的倍頻實驗方式，先得到基頻光的偏振走勢，進而取得所要的結果。

參考文獻

1. R. L. Byer, “Diode laser-pumped solid-state lasers”, *Science*, vol. 239, No.4841, pp.742-747, 1988.
2. R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*.
3. W. Koehner, *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed.
4. L Friob, Paul Mandel, E A Viktorov, *Quantum Semiclass. Opt.* 10(1998) 1-17.
5. A. W. Tucker, M. Birnbaum, C.L. Fincher, and J. W. Erler, “Stimulate-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd:YVO₄” *J. Appl. Phys.* 48, 4907-4911 (1994).
6. M. Tsunekane, N. Taguchi, T. Kasamatsu, and H. Inaba, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, pp. 9–18, 1997.
7. S. C. Tidwell, J. F. Seamans, M. S. Bowers, and A. K. Cousins, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, pp. 997–1009, 1992.
8. Y.F. Chen, T.M. Huang, C.C. Liao, Y.P. Lan, and S.C. Wang, “Efficient high-power diode-end-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser” *IEEE Photonics Technol. Lett.* 11, 1241-1243 (1999).
9. Y.F. Chen, Y.S. Chen, T.H. Ou, K.W. Su, *Appl. Phys. B* 00,1-4(2005)
10. Susumu Konno, Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa, and Koji Yasui, *Opt. Express*, 25, 2 (2000)