

國立交通大學

電子物理研究所

碩士論文

摻釹釩酸鹽類晶體之自轉換受激拉曼雷射

Nd-doped Vanadate Crystal Lasers with Self Stimulated  
Raman Scattering Conversion

研究生：古美玲

指導教授：陳永富教授

中華民國九十四年六月

**摻釹釩酸鹽類晶體之自轉換受激拉曼雷射**

**Nd-doped Vanadate Crystal Lasers with Self Stimulated  
Raman Scattering Conversion**

**研究生：古美玲**

**Student：Mei-Ling Ku**

**指導教授：陳永富**

**Advisor：Yu-Fung Chen**

**國立交通大學**

**電子物理研究所**

**碩士論文**

**A Thesis**

**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 2005**

**Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

**中華民國九十四年六月**

# 摻釹釩酸鹽類晶體之自轉換受激拉曼雷射

學生：古美玲

指導教授：陳永富

國立交通大學電子物理研究所碩士班



一般脈衝式雷射對於量測、雷達、醫療等方面的應用都相當廣泛，但其輸出波長有諸多限制，相對在應用上也就被侷限住。因此本文的研究重點就是利用摻釹釩酸鹽類晶體，在雷射共振腔內同時當增益介質以及拉曼晶體，產生自轉換受激拉曼，讓輸出波段可以有更多的選擇，並針對不同的摻釹釩酸鹽類晶體作拉曼散射的研究及討論；其中又以  $\text{Nd}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  ( $x = 0.8, 0.6$ ) 晶體有較小的有效激發面積的特點，可以成功地產生 1175nm 拉曼雷射。另外，我們針對  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  晶體當增益介質，研究連續性 1083nm 的雷射和 1186nm、1197nm 的拉曼雷射。

# Nd-doped Vanadate Crystal Lasers with Self Stimulated Raman Scattering Conversion

Student : Mei Ling Ku

Adviser: Dr. Yung-Fu Chen

Institute of Electrophysics  
Nation Chiao Tung University

## ABSTRACT

Solid-state lasers are playing an important role in many applications such as range finders, medical systems, and radar. But the output of solid-state laser is generally confined to some specific wavelengths. So applications of solid-state lasers are also restricted. Therefore we think about the influence of using Nd-doped Vanadate crystals as a gain median and Raman crystal simultaneously in the cavity. Solid-state lasers can produce the self stimulated Raman scattering (SRS) conversion, then we will get other wavelengths of laser by the method. We also discuss the self SRS conversion for different Nd-doped Vanadate crystals. In our experiments, a picoseconds diode-pumped passively Q-switched self-SRS laser has been efficiently demonstrated by use of  $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  crystals with  $x=0.6$  and  $x=0.8$ . In addition, we discuss the cw laser of 1083nm and self-SRS laser of 1186nm and 1197nm by using the  $\text{Nd:GdVO}_4$  as gain median and Raman crystal.

## 致 謝

光陰似箭，很快地又到了畢業的季節。在這兩年的研究所生活中，特別感謝我的指導老師-陳永富老師，老師總是非常有耐心地教導我許多雷射方面的相關知識以及實驗上的技巧，以及感激黃凱風老師平日對我們的關心；並感謝實驗室所有的成員 – 各位帥哥及美女們，因為有你們的熱情幫助以及溫馨的陪伴下，讓我能夠順利畢業。

另外，我還要感謝我的好友佩君、佩姘、大頭在我心情跌到谷底時，給予我當鼓勵與安慰。此外，我還要感謝我的家人，總是在背後默默地支持我，讓我沒有後顧之憂，能專心做研究。

最後，我再一次要感謝所有曾經幫助過我的人，因為有你們的幫助與照顧，讓我有一段充實且愉快的研究生生活。



# 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   |
| 1.1   | 研究動機                                 | 1   |
| 1.2   | 本論文組                                 | 2   |
| 第二章   | 拉曼理論                                 | 3   |
| 2.1   | 導論                                   | 3   |
| 2.2   | 自發性和受激性拉曼應                           | 3   |
| 2.3   | 受激拉曼散射的應用                            | 6   |
| 第三章   | 被動式 Q - 開關雷射原理                       | 11  |
| 3.1   | 導論                                   | 11  |
| 3.2   | Q-開關雷射的動作機制                          | 11  |
| 3.3   | Cr <sup>4+</sup> :YAG 晶體作為被動式開關的動作機制 | 14  |
| 3.4   | 提升脈衝能量的方法                            | 15  |
| 3.4-1 | 理論                                   | 15  |
| 3.4-2 | 實驗架構                                 | 15  |
| 3.4-3 | 實驗結果與討論                              | 16  |
| 第四章   | 1175 nm 拉曼雷射                         | 22  |
| 4.1   | 導論                                   | 22  |
| 4.2   | 1175 nm 拉曼雷射                         | 23  |
| 4.2-1 | 實驗架構                                 | 23  |
| 4.2-2 | 實驗結果                                 | 23  |

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| 4.2-3 | 結論                              | 25 |
| 第五章   | 1083 nm 雷射之相關研究                 | 30 |
| 5.1   | 導論                              | 30 |
| 5.2   | 高功率的 1083 nm 雷射                 | 30 |
| 5.2-1 | 實驗架構                            | 30 |
| 5.2-2 | 實驗結果與討論                         | 31 |
| 5.2-3 | 結論                              | 33 |
| 5.3   | 1187nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射         | 33 |
| 5.3-1 | 實驗架構                            | 33 |
| 5.3-2 | 脈衝式 1083 nm 雷射的實驗結果與討論          | 34 |
| 5.3-3 | 1186nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射的實驗結果與討論 | 35 |
| 5.3-4 | 結論                              | 37 |
| 第六章   | 結論與未來展望                         | 52 |
| 6.1   | 結論與未來工作展望                       | 52 |
| 參考文獻  |                                 | 53 |



## 圖表目錄

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 圖 2.1 | 自發性拉曼散射之史托斯轉換 .....                                       | 8  |
| 圖 2.2 | 自發性拉曼散射之反史托斯轉換 .....                                      | 8  |
| 圖 2.3 | Rayleigh 散色 .....   | 8  |
| 圖 2.4 | 受激拉曼散射 .....  | 9  |
| 圖 2.5 | 利用 SRS 原理的高分辨率瞬時紅外光譜示意圖 .....                             | 9  |
| 圖 2.6 | 測量物質的拉曼光譜示意圖 .....  | 10 |
| 圖 3.1 | 為增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的快軸平行的圖 .....                         | 18 |
| 圖 3.2 | (a) 為增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的快軸夾 45° 的圖 .....                 | 18 |
| 圖 3.2 | (b) 為增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的快軸夾 45° 的圖 .....                 | 19 |
| 圖 3.3 | 為平凹腔的單端激發式被動 Q 雷射實驗裝置圖 .....                              | 19 |
| 圖 3.4 | 為連續輸出光雷射的輸出功率對增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 1.08W ..... | 20 |
| 圖 3.5 | 為瞬間脈衝能量對增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 2.47W .....       | 20 |
| 圖 3.6 | 為瞬間脈衝功率對增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 2.47W .....       | 21 |
| 圖 4.1 | 激發輻射有效面積比( / $\gamma_{VO4}$ )對 Gd 摻雜濃度(x) , Ref [9] ..... | 26 |
| 圖 4.2 | 為平凹腔的單端激發式被動 Q 開關自發性拉曼雷射實驗裝置圖 .....                       | 26 |
| 圖 4.3 | 被動式自發性拉曼的光譜圖 .....  | 27 |
| 圖 4.4 | 為 1175nm Stoke 波長的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖.....                 | 27 |



|        |   |    |
|--------|---|----|
| 圖 4.5  | 重複率對入射激發功率所作的關係圖 .....  | 28 |
| 圖 4.6  | 瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖 .....   | 28 |
| 圖 4.7  | 為波長 1064nm 對 1175nm 的脈衝圖(對 Nd:Gd <sub>0.8</sub> Y <sub>0.2</sub> VO <sub>4</sub> 晶體)..... | 29 |
| 圖 5.1  | 為室溫時對摻釹釷酸釷晶體(Nd : GdVO <sub>4</sub> )時所量測的吸收螢光光譜.....                                     | 38 |
| 圖 5.2  | 平凹腔的單端激發式雷射實驗裝置圖 .....  | 38 |
| 圖 5.3  | 為 1083nm 波長的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖 .....  | 39 |
| 圖 5.4  | 使用光譜(Advantest Q8381A)量測雷射光譜資訊 .....  | 40 |
| 圖 5.5  | 為 4 個輸出鏡的輸入功率對輸出功率的作圖.....  | 40 |
| 圖 5.5  | 為利用轉 etalon 的角度來改變輸出波長對輸出功率的作圖 .....  | 41 |
| 圖 5.7  | 為在共振腔內加上 etalon 時，4 個輸出鏡的輸入功率對輸出功率的作<br>圖.....  | 41 |
| 圖 5.8  | 為用 A 鏡子當輸出鏡時，輸入功率對輸出功率的作圖.....  | 42 |
| 圖 5.9  | 為用 B 鏡子當輸出鏡時，輸入功率對輸出功率的作圖 .....   | 42 |
| 圖 5.10 | 為高功率的 1186nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射的實驗架構 .....  | 43 |
| 圖 5.11 | 為脈衝式 1083 nm 雷射的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖，其<br>用 B 平面鏡作為輸出鏡 .....                                | 43 |
| 圖 5.12 | 為脈衝式 1083nm 雷射的重複率對入射激發功率所作的關係圖，其用 B 平<br>面鏡作為輸出鏡 .....                                   | 44 |
| 圖 5.13 | 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖，其<br>用 B 平面鏡作為輸出鏡 .....                                | 44 |
| 圖 5.14 | 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間脈衝寬度對入射激發功率所作的關係圖，其<br>用 B 平面鏡為輸出鏡 .....                                 | 45 |
| 圖 5.15 | 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間峰值功率對入射激發功率所作的關係圖，其  |    |

|   |    |
|---|----|
| 用 B 平面鏡作為輸出鏡 .....  | 45 |
| 圖 5.16 為 1083 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖 .....                      | 46 |
| 圖 5.17 為 1186 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖 .....                      | 46 |
| 圖 5.18 為 1186 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖 .....                      | 47 |
| 圖 5.19 為 1186nm Stoke 波長及 1083nm 的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖 .....  | 47 |
| 圖 5.20 為 1186nm Stoke 波長的重複率對入射激發功率所作的關係圖 .....             | 48 |
| 圖 5.21 為 1186nm Stoke 波長及 1083nm 的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖 ..... | 48 |
| 圖 5.22 為波長 1083nm 對 1186nm 的脈衝圖 .....                       | 49 |
| 圖 5.23 為 1197nm Stoke 波長及 1083nm 的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖 .....  | 49 |
| 圖 5.24 為 1197nm Stoke 波長的重複率對入射激發功率所作的關係圖 .....             | 50 |
| 圖 5.25 為 1186nm Stoke 波長及 1083nm 的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖 ..... | 50 |
| 圖 5.26 為波長 1083nm 對 1197nm 的脈衝圖 .....                       | 51 |
| 表一 為幾種以經觀察到受激拉曼散射現象的參數 .....                                | 10 |
| 表二 為 4 平面鏡(A, B, C, D)分別對 1064nm、1083nm、1086nm 的穿透率 ...     | 39 |

# 第一章 簡介

## 1.1 研究動機

利用半導體雷射來激發固態晶體所產生的固態雷射，因其有體積小、高效率、可靠性高等特性，已成為重要的雷射光源之一。不過，若只利用晶體本身可輸出的波段，可應用地範圍就小了許多；因此，我們在固態雷射的共振腔內加入拉曼散射機制，讓輸出的雷射光有其它波段的選擇，相對來講其應用範圍也就增加了。

雖然拉曼散射晶體已被應用超過 40 年。近來，由於有新的拉曼晶體的發現與發展，使有關固態拉曼雷射的研究有新的發展空間。一般來說，受激拉曼散射 (SRS)所使用的晶體為 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ [1]、 $\text{LiIO}_3$ [2]、 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ [3]、 $\text{PbWO}_4$ [4]。近來，Kaminiskii建議使用 $\text{YVO}_4$ 、 $\text{GdVO}_4$ 兩種晶體來做高效率的受激拉曼散射。由於自發放射和受激拉曼散射的特性使得Nd摻雜釩酸鹽形成的晶體非常適合拿來當作受激拉曼散射雷射的增益介質。由其他研究報告顯示，使用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作飽和吸收體並且以c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>或c-cut的Nd:GdVO<sub>4</sub>為增益介質，可以成功的產生單端激發式被動Q開關受激拉曼雷射。但常見的a-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體和a-cut的Nd:GdVO<sub>4</sub>晶體較不容易產生受激拉曼散射過程，因為它們的激發輻射有效面積限定了被動式Q開關能量儲存的能力；且又因c-cut Nd摻雜釩酸鹽形成的晶體的熱透鏡功率約是a-cut晶體的 3 倍，使得c-cut 釩酸鹽晶體並不適合於高功率激發的使用。為了解決這個問題，Liu發明了新的Nd摻雜釩酸鹽形成的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>晶體；此種晶體有較小的激發輻射有效面積，能有較好的能量儲存能力。

因此，本論文主要的研究方向就是利用摻雜釩酸鹽的晶體作增益介質，來實現自轉換受激拉曼雷射。

## 1.2 本文組織

本文以第二章的拉曼理論介紹開始，接著第三章介紹被動式 Q-開關雷射原理。第四章介紹利用摻雜釩酸鹽形成的晶體作 1175nm 的拉曼雷射以及第五章為介紹利用摻雜摻釷釩酸釷晶體作的 1083nm 雷射之相關研究。最後在第六章裡檢討目前的成果，並且概述未來可進行之研究。




## 第二章 拉曼理論

### 2.1 導論

當以頻率  $\nu$  的光子入射塊材時，光子會與塊材內的聲子產生散射現象。此時，產生的散射光大部分會保有原入射光的頻率，而少量散射光的頻率會改變為  $\omega \pm \omega'$ ， $\omega'$  為分子振動之特性頻率(characteristic frequency)；這些激態輻射生所成各種不同的頻率稱為拉曼頻率。1923 年，由德國人 Adolf Smekal 首先發表此效應的理論；並在 1928 年由 C.V. Raman 提出實驗證明此理論。因此，我們都把這種特殊散射稱之為拉曼散射。

### 2.2 自發性和受激性拉曼效應<sup>[5][6]</sup>

#### 自發性拉曼效應



當放射出一光子時，一個處於激發態的原子有可能沒有回到初始態。當原子沒掉回到初始態時，過程中會釋放出比入射光子能量低的光子，而此種效應稱之為史托斯轉換。這些激發出來的光子也就是所謂的螢光，且整個過程的時間相當的短(約  $10^{-7}$ s)。在我們日常生活中，常可看見利用紫外光去誘發可見光的螢光的現象。對於一般普通的材料如洗衣粉、有機染料、牙齒的琺瑯質來說，用紫外光去照射這些材料都可以誘發出特定的可見光。因此，我們常會把這種現象的應用於工業顯示方面和夜光衣服等。

當物質散色一單色光時，此一散色光主要的頻率與入射光相同。但此散色光也會有較入射光頻率高或低的頻率光存在，不過這些頻率光相對就顯得弱。我們就稱這些較主頻率高或低的頻率亦稱為旁頻帶(side bands)，一般可以利用每種物質的旁頻帶(side bands)的不同和入射光子的不同來找出材料的特性。因此，這也就為什麼會把這種效應用到光譜學中去分析材料的原因。這種效應是 1923 年由 Adolf Smekal 提出理論，且在五年後由 Sir Chandrasekhara Vankata Raman 在

University of Calcutta 提出實驗證明之。因此，我們現在都把這種現象稱為自發性拉曼效應。不過，這種效應並不容易實現，因為它需要相當強的光源和足夠大的樣品；且當用紫外光當入射光源時，常會造成樣品的損壞。不過，現今對於發展拉曼效應的應用還是目前很熱門的一個領域，並且現在又因為有雷射光的發明，讓原來只能用紫外光當入射光源之外又多了一種選擇；以雷射當入射光源可以成功解決樣品損壞的問題。因此，自發性拉曼對於分析材料方面來說是一個非常好的工具。

如果要瞭解拉曼效應的機制與過程，就必須要先知道一般分子光譜的特徵。分子通常會吸收遠紅外光及微波範圍的能量，並且把這些吸收的能量轉為轉動動能。因此，它可以吸收波長在  $10^{-2}\text{mm}\sim 700\text{nm}$  的光子，並能把能量轉換為分子的振動。總結來說，很多的分子都可藉由電子變遷的物理過程來吸收可見光或是紫外光波段的光子。圖 2.1 為量子物理的標記法，其中  $|b\rangle$  表示為分子振動的狀態；且這狀態不需要一定是被激發態。當電子吸收能量為  $h\nu_i$  的光子時，電子會遷至暫存態。但當原子發生史托斯轉換時，能量為  $h\nu_s$  的光子將會被釋放出來，原子釋放的光子能量會低於原子吸收光子的能量。就能量守恆的觀點來看，兩光子的能量差為  $h\nu_i - h\nu_s = h\nu_{cb}$ 。 $h\nu_{cb}$  表示為電子由激發態提升到能量更高的振動狀態  $|c\rangle$ 。

相反來說，當電子躍遷至比初始狀態還低的能階時 ( $h\nu_i < h\nu_s$ )，就稱此效應為反史托斯轉換(圖 2.2)。就能量的觀點來看  $h\nu_i - h\nu_s = h\nu_{ba}$ ，這表示分子的振動能量已經包含熱能。在這兩例子中的任何一個，可以很容易發現對於不同材料將會對應於不同的  $\nu_i$ 、 $\nu_s$ ，且所對應的能階就不一樣。因此，我們就利用各種材料其能階的特性去研究材料間的結構。圖 2.3 為 Rayleigh 散色，此時的  $\nu_i = \nu_s$ 。

### 受激拉曼效應

當光通過一介質時，其散射光譜中存有相對於原入射光有特定頻移的光。頻移應於其內部介質某些特定能階躍遷的頻率，例如晶體中光學聲子的頻率，這種



散射也就是所謂的自發性拉曼散射，此散射的效率非常低。但是，當入射光的能量足夠強時，拉曼散射的史托斯譜線的強度會開始變強，這就是受激拉曼效的特點。

在 1962 年，Eric J. Woodbury 和 Won K. Ng 在偶然間發現了受激拉曼效應。他們在使用硝基苯作 Q 開關紅寶石雷射的 Kerr cell 實驗時，發現 Kerr cell 其輸出波長會由 694.3nm 位移到 766.0nm 的強紅外輻射信號。研究紅寶石的能階及其與共振腔的耦合來看，該裝置因該只能輸出 694.3nm 的波長。他們發現若在實驗不加硝基苯而直接用 Kerr cell，並用分光儀去量測所發射出來的雷射光，發現只有 694.3nm 的波長存在；若把硝基苯 Kerr cell 加入實驗中，則可以發現除了有 694.3nm 的波長外，另有 766.0nm 的波長的存在。經過反覆的實驗，發現紅寶石材料並沒有 766nm 譜線存在。於是，他們就證明 766.0nm 波長的出現是由於硝基苯分子的特定振盪模態所產生的，當然現在硝基苯分子又有更多的拉曼散色光被發現。

在高能量脈衝式雷射的影響下，受激拉曼效應能夠發生在固態、液態以及鈍氣中；且由圖 2.4 中可以清楚描述這個效應，當兩光束的光同時入射到一分子，其一光子的頻率為  $\nu_i$ ；而另一光束為一散射頻率  $\nu_s$ 。在原來的實驗架構中，散色光因該會前後來回穿過樣品；但是，受激拉曼效應中並沒有共振效應的發生。當散色光吸收一能量為  $h\nu_s$  的光子，雷射光束會失去一能量為  $h\nu_i$  的光子；剩下的能量 ( $h\nu_{ba} = h\nu_i - h\nu_s$ ) 就轉移到樣品中，在這樣的機制使得產生拉曼散射樣品溫度升高。若要把入射光束轉換到受激拉曼散射就必須讓某些特定激發光束的通量密度到達一定量時，才可以產生激發性拉曼效應。換句話說，也就是入射光要強到一定的程度，才能成功地讓受激拉曼光散色出來。

總結來說，由於 Eric J. Woodbury 和 Won K. Ng 發現了激發性拉曼效應，也引起一陣研究熱潮。在很多的材料中都可以觀察這種受激拉曼散射現象。表一為列出幾種以經觀察到受激拉曼散射現象的參數。

## 2.3 受激拉曼散射的應用<sup>[5]</sup>

就研究來說，用受激拉曼散射原理所作成的散射光譜已經被廣泛使用於鑑定分子結構，以及高分子化學、生物化學等各方面的領域。在物理方面，可以用來量測各種材料的結構相變、測量分子分佈情形以及用來發展雷射光，所產生的雷射，其可產生超短脈衝；以下是列幾個簡單應用的領域。

### (一) 時間分辨率很高的光譜測量

如圖 2.5，用較寬脈衝的雷射光經過一鹼金屬蒸汽室產生受激拉曼散射並成功地產生拉曼雷射，所產生的拉曼雷射經樣品吸收，就得到樣品的紅外吸收光譜。再讓樣品產生的紅外吸收光譜在經過一個轉換器，就可由紅外吸收光譜轉到可見光波段。這樣，就可以很容易的推出樣品的紅外能階的躍遷。再來，使用可以調變的脈衝雷射光源，在時間上就可以探測瞬間紅外吸收光譜；如果探測器的反應時間夠快的話，就可以辨別樣品分子在不同時間所產生的瞬時產物的吸收光譜，同時可以研究樣品對時間的瞬間變化。

### (二) 可調階紅外波段的雷射

一般來說，可利用受激拉曼散射的拉曼頻移能成功地產生新的頻率相干輻射及可調階的相干輻射。但是，所有介質的拉曼頻移都是固定的，因此若要獲得可以可調階的雷射就必需利用另一台可調階雷射作光源，才能達到目的。通常會用原子蒸汽系統或分子汽體系統的拉曼散射來達到此一目的地。

一般常用鹼金屬蒸汽或鹼金屬氧化物蒸汽來作原子蒸汽系統的工作物質，所利用的拉曼躍遷過程為  $S \rightarrow P \rightarrow S$  或為  $S \rightarrow P \rightarrow D$ 。所採用的可調階光源的波長在  $S \rightarrow P$  躍遷的共振範圍內，這過程可有效提高拉曼散射截面積。因此，原子蒸汽密度雖然很小，但是拉曼增益仍然非常可觀；這就會讓所發射波長在近紅外區域的受激拉曼散射很容易被觀察到。利用幾萬瓦的可調階雷射去激發鹼金屬蒸汽產生受激拉曼散射效應，輸出的可調階紅外光達到幾百個  $\text{cm}^{-1}$  範圍內連續調階，且其峰值光子轉換效率高於 50%。



### (三)高分辨率的光譜

簡單來說，只要在介質的特定能階上產生拉曼散射過程，就可以清楚了解這材料某些特定能階。就利用其它機制的光譜儀來說，其分辨率能達到  $0.1\text{cm}^{-1}$  就算是非常好的，但若直接利用受激拉曼散射可量測的非常準確。如圖 2.6，對待測樣品輸入兩束光，分別為  $\omega_1$  及  $\omega_s$ ，當光強度夠強產生受激拉曼散射時， $\omega_1$  被衰減而  $\omega_s$  會增強，可以直接測量  $\omega_1$  及  $\omega_s$  的輸出。由受激拉曼散射原理可以知到，當  $\omega_1$ 、 $\omega_s$  及  $\omega_0$  滿足共振條件(當  $\omega_1 - \omega_s = \omega_0$ )，也就表示是此效應最強；所對應的，也就是  $\omega_1$  與  $\omega_s$  輸出變化最多。總結來說，我們可以利用改變  $\omega_1$  及  $\omega_s$  滿使其滿足共振條件，就可量測出材料的拉曼光譜。譜線寬度決定了  $\omega_1$  和  $\omega_s$  的線寬；因此，當使用線寬很窄的雷射光源，我們就可以得到分辨率很高的拉曼光譜，並可很精準測量出其能階。



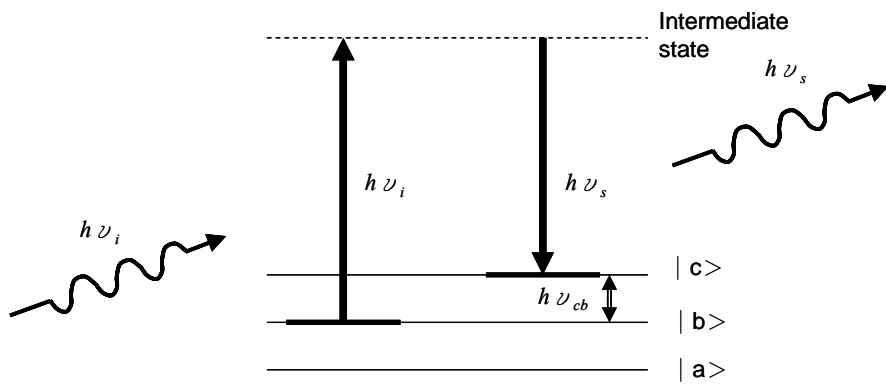


圖 2.1 自發性拉曼散射之史托斯轉換

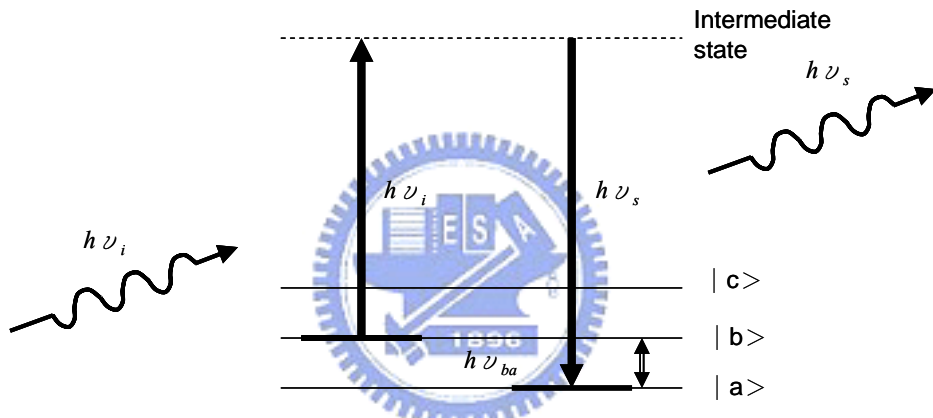


圖 2.2 自發性拉曼散射之反史托斯轉換

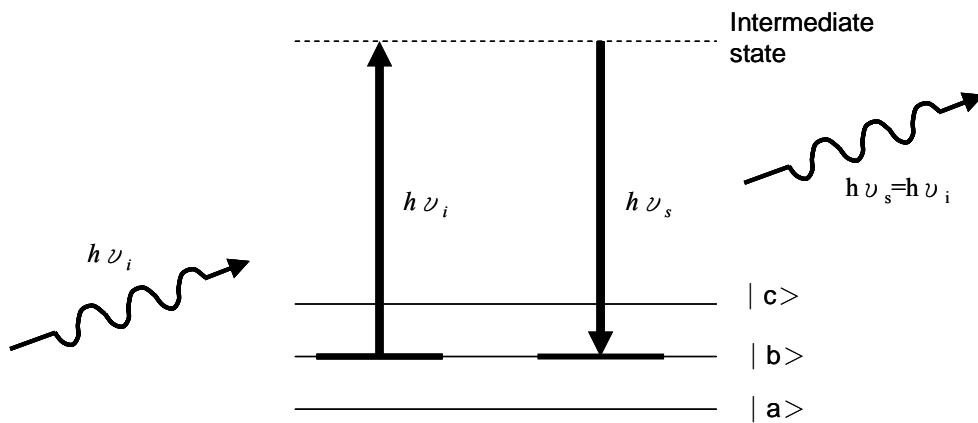


圖 2.3 Rayleigh 散色

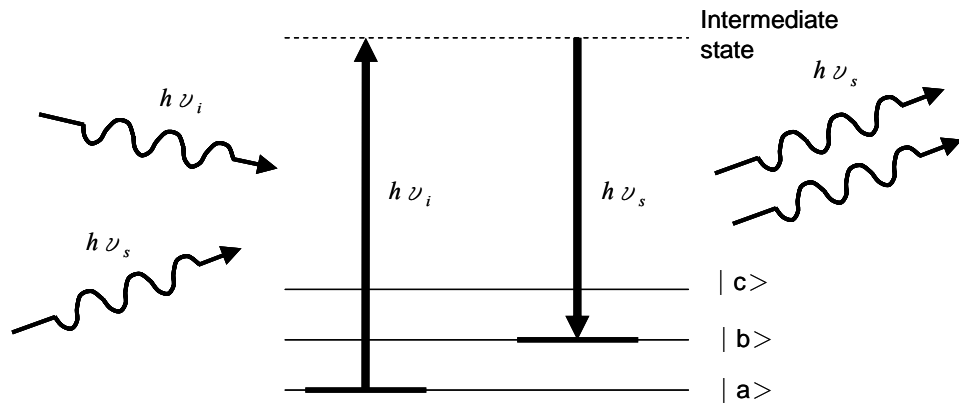


圖 2.4 受激拉曼散射

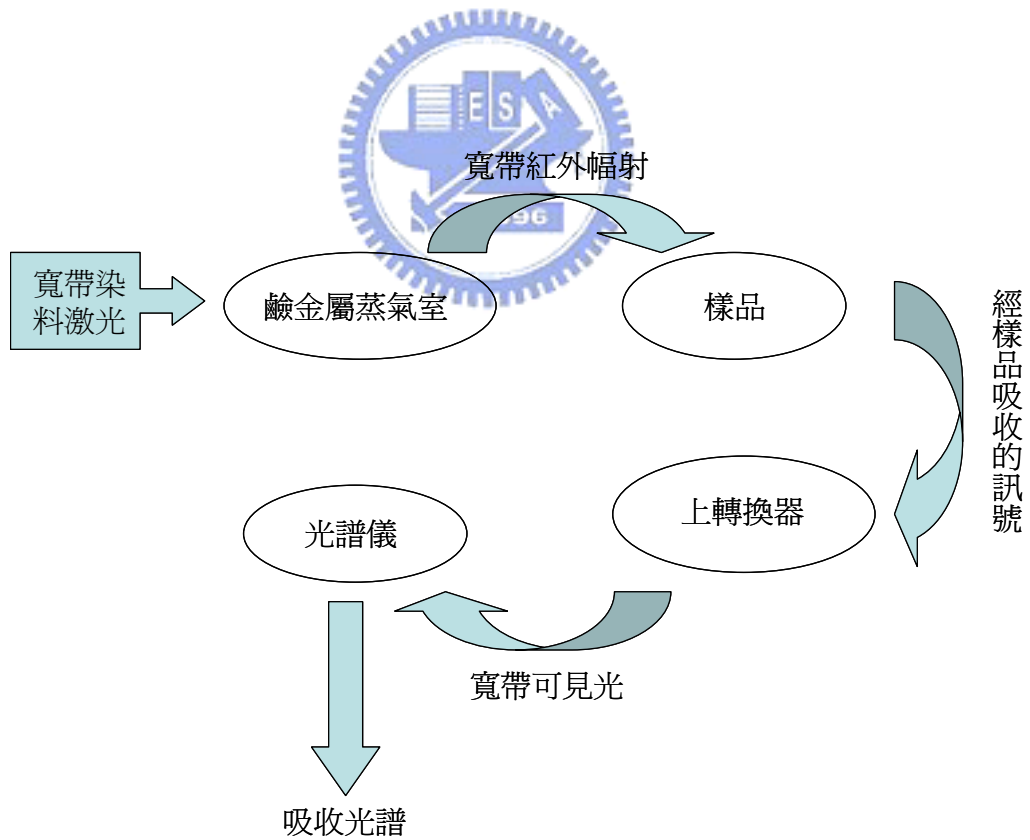


圖 2.5 利用 SRS 原理的高分辨率瞬時紅外光譜示意圖

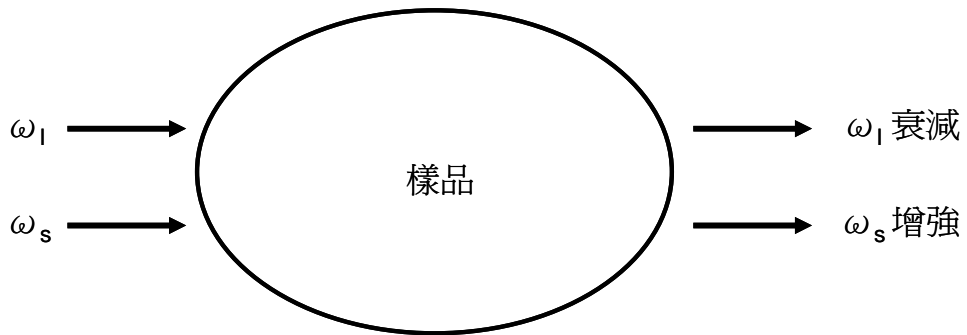


圖 2.6 測量物質的拉曼光譜示意圖

| 材料                 | 拉曼頻移<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | 線寬<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | 散射截面<br>( $d\sigma/d\Omega$ ) $\times 10^8$ ( $\text{cm}^{-1}\text{Sr}^{-1}$ ) | 拉曼增益<br>$G_N \times 10^3$ ( $\text{cmMW}^{-1}$ ) |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|--|--|
| 氫氣                 | 4155                         | 0.2                        |  | 1.5(300K, 1013250Pa)                             |
| 苯                  | 992                          | 2.15                       | 3.06   | 2.8  |
| LiNbO <sub>3</sub> | 258                          | 7                          | 262  | 28.7   |
| CS <sub>2</sub>    | 655.6                        | 0.50                       | 7.55   | 24   |
| 液態氮                | 2326.5                       | 0.067                      | 0.29 $\pm$ 0.09  | 17 $\pm$ 5                                       |

表一

## 第三章 被動式 Q-開關雷射原理

### 3.1 導論

近年來，由於雷射這種新形式的光源被創造以後，就被廣泛地應用於量測、醫療行為及加工方面。但是，大部分在應用方面都需要能量高的雷射光源，而一般形式的連續輸出光雷射(CW laser)的輸出功率都是定值，若想要有更高的輸出功率就必須要提供更高的激發光源。這種連續輸出的雷射不僅不符合經濟效應，且製作上也較困難。因此，我們所採用的是在共振腔內加入 Q-開關裝置，輸出的雷射具有短脈衝及高能量的特色。Q-開關裝置的功能就如同水庫的閘門一樣，可控制雷射的輸出。一般來說，這類脈衝式雷射擁有極高的脈衝峰值功率可高達幾千甚至萬瓦以上的等級，使得 Q-開關雷射在各類應用上已佔了極重要的地位。

### 3.2 Q-開關雷射的動作機制

根據J.J. DEGNAN<sub>[7]</sub>的推導，在high-Q的情況時，Q-開關雷射的光子密度以及居量反轉粒子密度的速率方程式可寫成

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\sigma n l \phi}{t_r} - \frac{\phi}{t_c} \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -c\sigma n \phi \quad (2)$$

其中參數為

- $\phi$  : 光子密度
- $\sigma$  : 晶體上受激輻射的截面積
- $l$  : 增益介質長度
- $c$  : 光速
- $t_r = 2l/c$  : 光子在長度為 $l$ 的共振腔內跑一趟所需的時間。

$t_c = \tau / [\ln(1/R) + L]$  : 光子生命期，其中  $R$  是輸出耦合鏡的反射率，而  $L$  為光子在腔內跑一趟的損耗

將(1)式與(2)式相除可得

$$\frac{d\phi}{dn} = -\frac{l}{l'} \left(1 - \frac{n_t}{n}\right) \quad (3)$$

其中  $n_t$  定義為雷射閾值的居量反轉粒子密度，並令(1)式等於零時，可得

$$n_t = \frac{1}{2\sigma l} \left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \quad (4)$$

由(3)式可解得



$$\phi(t) = \frac{l}{l'} \left\{ n_i - n(t) - n_t \ln \left[ \frac{n_i}{n(t)} \right] \right\} \quad (5)$$

由(5)式，當居量反轉粒子密度達到其閾值時 ( $n(t) = n_t$ )，腔內光子密度達到最大值

$$\phi_{\max} = \frac{l}{l'} \left\{ n_i - n_t \left[ 1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \right] \right\} \quad (6)$$

當脈衝結束時，光子密度為零。可由(5)式中， $\varphi(t) = 0$ 時，得到起始與結束時的居量反轉粒子密度 $n_i$ 與 $n_f$ 其關係式為

$$n_i - n_f = n_t \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (7)$$

由(1)式，經由輸出耦合鏡輸出的瞬間功率與時間的關係式可表示為

$$P(t) = -h\nu Al' \left. \frac{d\phi}{dt} \right|_R \quad (8)$$

其中

$Al'$  是光子佔有的有效共振腔體積  
 $h\nu$  為光子能量



因此，輸出脈衝的瞬間最大功率(Peak power)為

$$P_i = \frac{Alh\nu}{t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left\{ n_i - n_t \left[ 1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

$$n_i = R_p \tau - (R_p \tau - n_f) \exp\left(-\frac{1}{f\tau}\right) \quad (10)$$

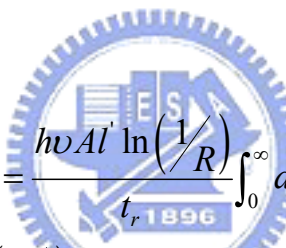
$n_i$  為初始居量反轉粒子密度，由low-Q 時(  $\phi=0$ )，解速率方程式

$$\frac{dn}{dt} = R_p - \frac{n}{\tau}$$

其中

- $R_p$  : 平均激發的光子密度
- $\tau$  : 上能階粒子的生命週期
- $f$  : Q-開關的重複率(Hz)

將(8)式對時間積分(從零到無限大)，並且利用(3)式做變換，可得雷射的平均輸出能量



$$E = \int_0^{\infty} dtP(t) = \frac{h\nu A l' \ln(1/R)}{t_r} \int_0^{\infty} dt\phi(t) \quad (11)$$

$$= \frac{h\nu A l' \ln(1/R)}{\sigma c t_r} \int_{n_f}^{n_i} \frac{dn}{n} = \frac{h\nu A}{2\sigma} \ln(1/R) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right)$$

### 3.3 Cr:YAG 晶體作為被動式開關的動作機制

一般來說，被動式 Q-開關雷射是個具有高穿透性質的光學元件，其材料通常會選擇有機染料或者是摻雜離子的晶體。在本實驗中，我們選擇的材料為摻四價鉻的鈹鋁石榴石晶體  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  作為被動式 Q-開關雷射的飽和吸收體，因  $\text{Cr}^{4+}$  離子對於雷射波長的吸收截面積大，且 YAG 提供了良好的化學、熱傳導以及機械性質，使得此材料的使用生命期長。且其具有寬範圍的可調變雷射輸出性能，即也可作為共振腔內的增益介質，放出的雷射波長範圍在(1.34~1.58  $\mu\text{m}$ )。



當把光束入射到飽和吸收體時，腔內光子流的能量增加且其材料的穿透率開始變高；在光子流能量達到一定的等級時，材料就會開始飽和(saturates)或稱透明(bleaches)。飽和吸收體會有飽和的現象產生是因為材料內部於原子的躍遷；對於一放置於雷射共振腔內的飽和吸收體，其會對於雷射某些定波長有較強吸收時，將會阻止雷射的振盪過程。當腔內的損耗(loss)小於增益(gain)增加時，光子流會急速增加而造成被動式晶體飽和，使會使得此飽和吸收體變透明。在此情況下，損耗急速降低且光子能在腔內來回共振，能成功地輸出脈衝光。所以，被動式 Q-開關之動作是由共振腔的飽和吸收體本身所控制，其不需要高電壓、快速的電光晶體驅動器或是射頻(rf)調制器等，且與主動式 Q-開關相比，被動式 Q-開關提供了一個設計簡單、體積小、緊湊且便宜的系統。

### 3.4 提升脈衝能量的方法

應用於工業上或是醫療方面的雷射，其對於脈衝能量的輸出都有一定的要求。若能有效的提高雷射的脈衝輸出能量，能讓固態雷射在應用上有更好的效果。一般來說，若想提升脈衝能量可以把輸入功率增加，或是把輸出鏡的反射率降低等的方法；但我們是利用改變增益介質的受激輻射的截面積( $\sigma$ )的大小，來增加其瞬間脈衝能量的輸出。

#### 3.4.1 理論

由(11)式可知，當增益介質的受激輻射的截面積變小時，瞬間脈衝能量就會增加。因此，我們利用在共振腔的增益介質與飽和吸收體間放一 1/4 波板，控制增益介質的晶軸與 1/4 波板的夾角來討論其受激輻射的截面積改變。首先，我們知道當線性偏極光通過 1/4 波板時，其會由線偏振轉為圓偏振，再利用此方法來改變雷射光束的偏振方向。一般來說，用a-cut的晶體增益介質其會產生c軸方向的偏極光；圖 3.1 為增益介質晶體的c軸與 1/4 波板的快軸平行，此狀況就如同沒有放 1/4 波板，因此其增益介質的有效吸收截面積也就沒有改變。圖 3.2a為增益

介質晶體的c軸與 1/4 波板的快軸夾  $45^\circ$ ，線偏振的光經由 1/4 波板後變圓偏振。圖 3.2b 為圓偏振光束再碰到輸出耦合鏡其會又有  $180^\circ$  的轉向(順時針  $\rightarrow$  逆時針，或逆時針  $\rightarrow$  瞬時針)。之後，再經過一次 1/4 波板，光會由原本的c軸偏極化方向轉為a軸，所以相對來說增益介質的有效吸收截面積就變小了。因此，我們可以成功的利用控制增益介質的晶軸與 1/4 波板的夾角，來改變增益介質的有效吸收截面積的大小。

### 3.4.2 實驗架構

圖 3.3 為平凹腔的單端激發式被動 Q 雷射實驗裝置圖。激發光源為 2.5W，其波長為 808nm 的光纖耦合半導體雷射，光纖的數值孔徑為 0.16，核心孔徑為  $200\mu\text{m}$ 。激發光源的焦距為 16.5mm，耦合效率為 90%，輸出光源經耦合鏡聚焦組聚焦至增益介質晶體上，可得到大小約為  $100\mu\text{m}$  的激發光點。輸入耦合鏡 M1 是一個焦距為 50mm 的凹面鏡，其對輸出波長有高反射( $R > 99.8\%$ )，且對激發光源波長有高穿透( $T > 90\%$ )的鍍膜。

我們以 Nd 離子摻雜濃度為 0.5%，長度為 7mm，a-cut 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶體作為增益介質，且在晶體的兩端面都有針對 1064nm 做抗反射的鍍膜( $R < 0.2\%$ )；並以 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶體當飽和吸收體，其長度為 2mm 並有對 1064nm 的穿透( $T = 70\%$ )，在此晶體的兩面皆有對 1064nm 抗反射鍍膜；我們並在增益介質以及飽和吸收體的中間插入 1/4 波板( $\lambda/4$  plate)。在輸出耦合鏡 M2 方面，為一平面鏡，鍍有對波長 1064nm ( $R = 85\%$ )的反射膜；此實驗的雷射共振腔平均長度約為 40mm 左右。

### 3.4.3 實驗結果與討論

首先，研究當沒有在共振腔內放飽和吸收體時，雷射的輸出功率對 1/4 波板角度的變化。圖 3.4 為連續輸出光雷射的輸出功率對增益介質晶體的c軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 1.08W。由實驗結果發現，當 1/4 波板的快軸與增益介質的c軸平行時，此時的輸出功率會最大；相反來說，當 1/4 波板的快軸與增益介質的c軸夾  $45^\circ$  時，此時的輸出功率會達到最小值。這是因為 a 軸的增益

介質其所釋放雷射光的偏極化方向在c軸，此時增益介質的受激輻射的截面積為會有大值，所以當 1/4 波板的快軸與增益介質的c軸夾平行時，會有最大輸出功率的產生。再來，把飽和吸收體放入共振腔內，讓輸出雷射光變為脈衝的形式。圖 3.5 為瞬間脈衝能量對增益介質晶體的c軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 2.47W。由圖中發現，當 1/4 波板的快軸與增益介質的c軸平行時，此時的脈衝能量輸出會是最小值；當 1/4 波板的快軸與增益介質的c軸夾 45°時，此時的脈衝能量輸出會達到最大值。其瞬間脈衝能量可以由 3μJ變為 15μJ，其轉變可達 5 倍。圖 3.6 為瞬間脈衝功率對增益介質晶體的c軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 2.47W。由圖中可知瞬間脈衝功率為最大值時，其增益介質的c軸與 1/4 波板的快軸夾 45°；若其增益介質的c軸與 1/4 波板的快軸夾平行，則瞬間脈衝功率則會是最小。其瞬間脈衝功率可以由 0.3kW變為 1.4kW，其轉變接近 5 倍左右。

總結來說，利用在增益介質與飽和吸收體間放置 1/4 波板，可有效地改變增益介質晶體的有效吸收截面積。並由實驗結果發現，瞬間脈衝能量可由 3μJ 變為 15μJ，其可增加 5 倍左右；且其瞬間脈衝功率可以由 0.3kW 變為 1.4kW，其轉變亦增加到 5 倍左右。另外，我們期望利用這種在雷射共振腔內放一 1/4 波板的方法去實踐在有較大的有效吸收截面積的增益介質晶體上，讓其透過此種方法可以減小有效吸收截面積，使其腔內的瞬間脈衝能量能增加，然後能成功地產生自轉換受激拉曼雷射。

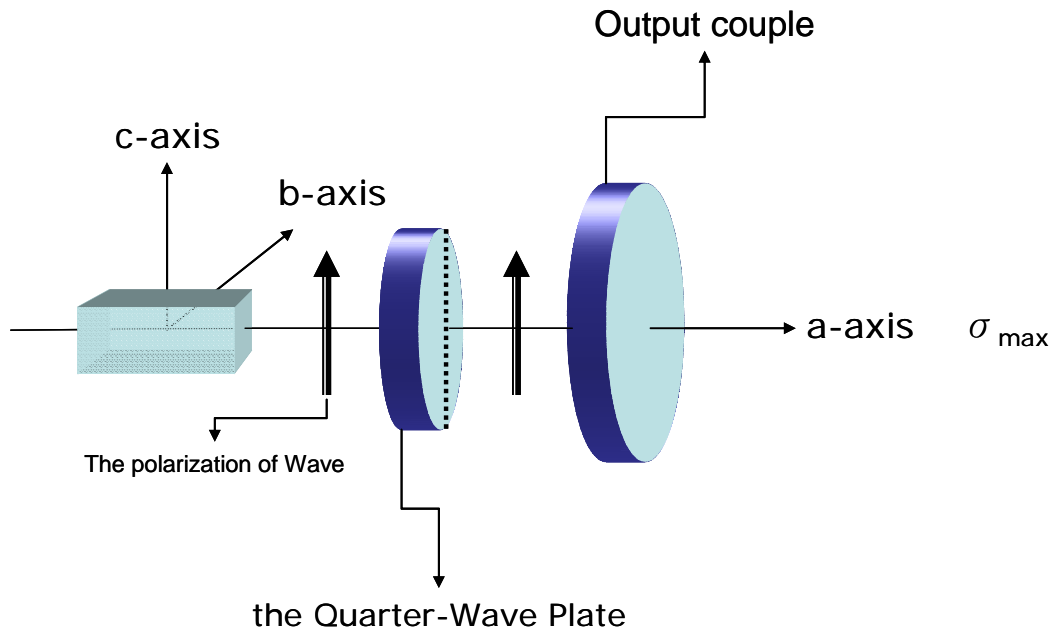


圖 3.1 為增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的快軸平行的圖

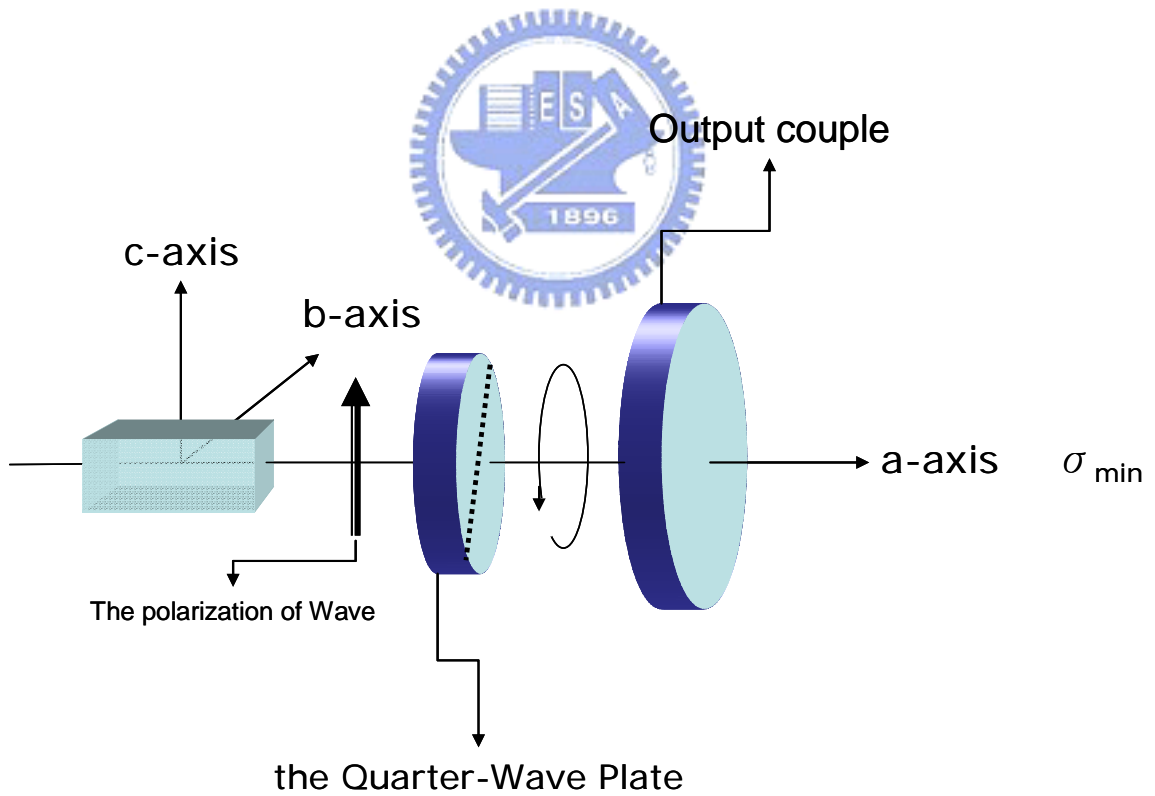


圖 3.2a 為增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的快軸夾 45° 的圖

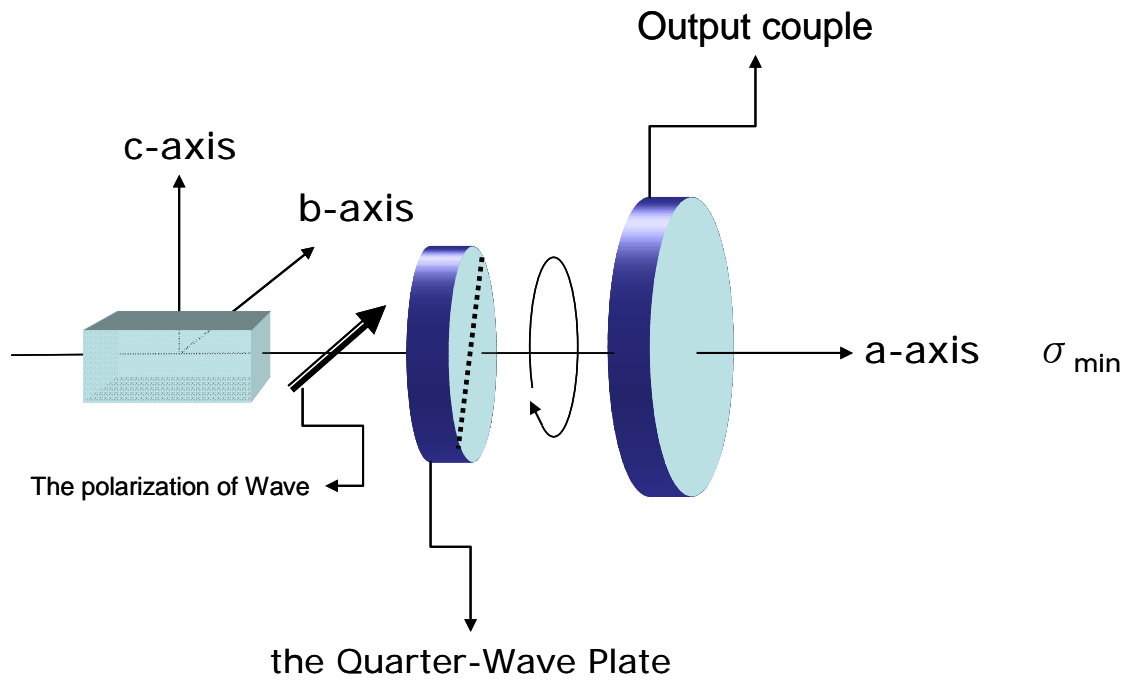


圖 3.2b 為增益介質晶體的c軸與 1/4 波板的快軸夾 45°的圖

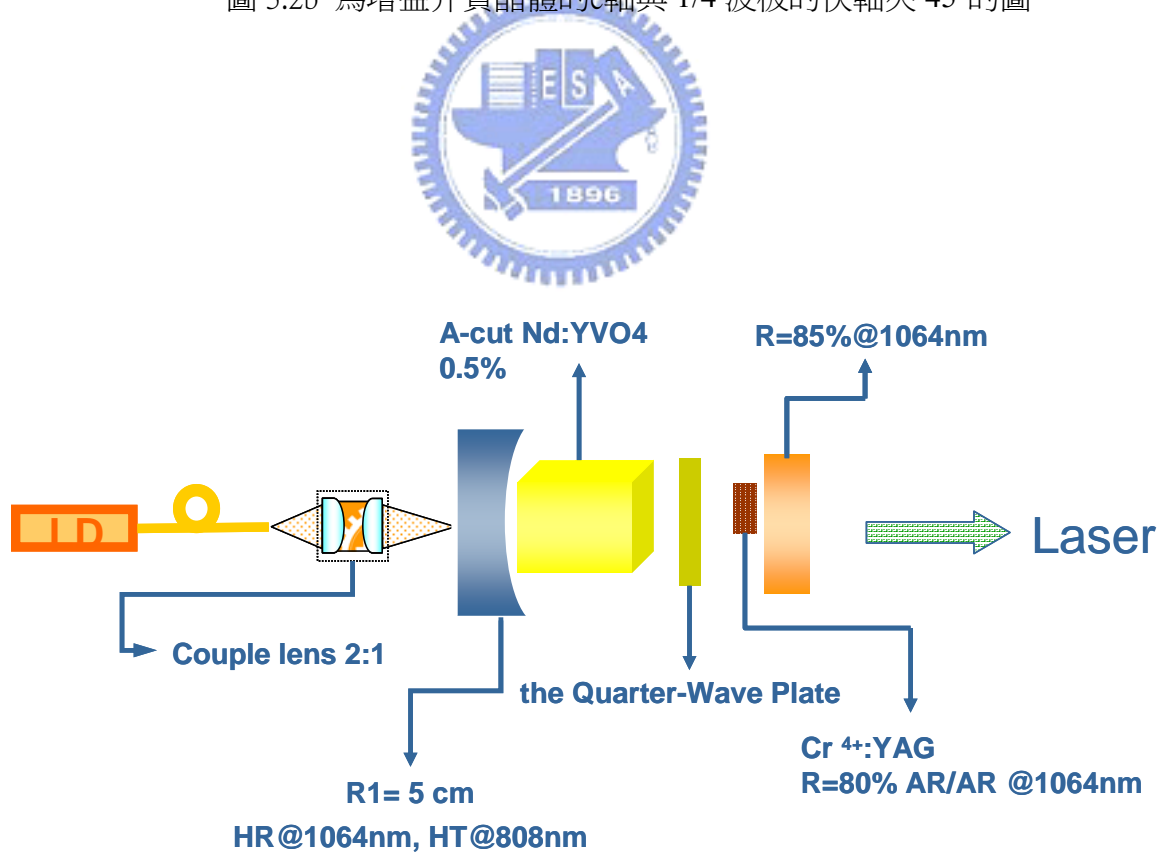


圖 3.3 為平凹腔的單端激發式被動 Q 雷射實驗裝置圖

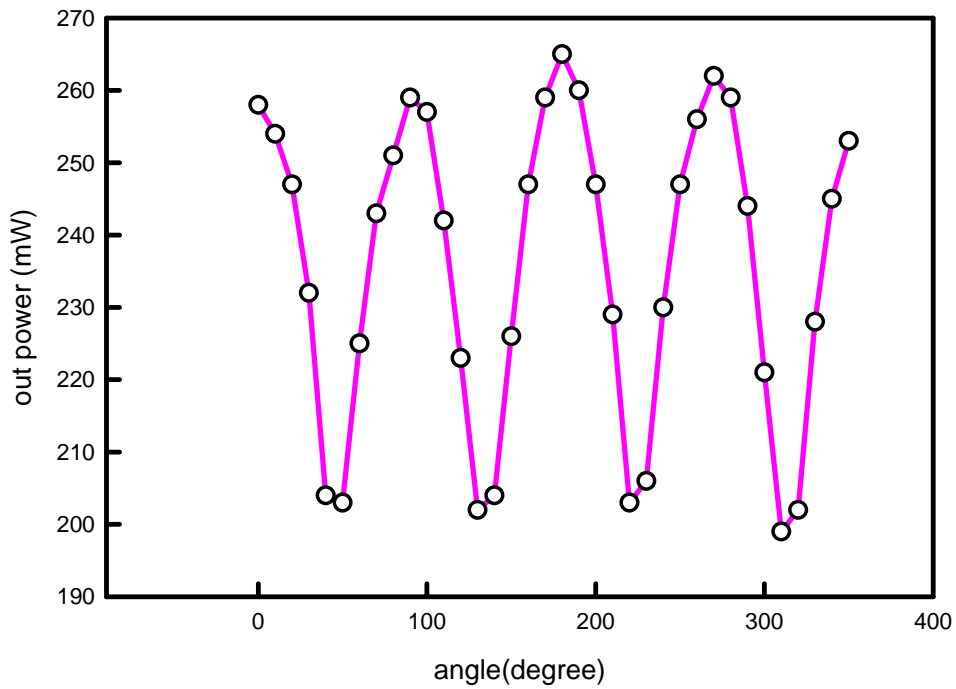


圖 3.4 為連續輸出光雷射的輸出功率對增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 1.08W。

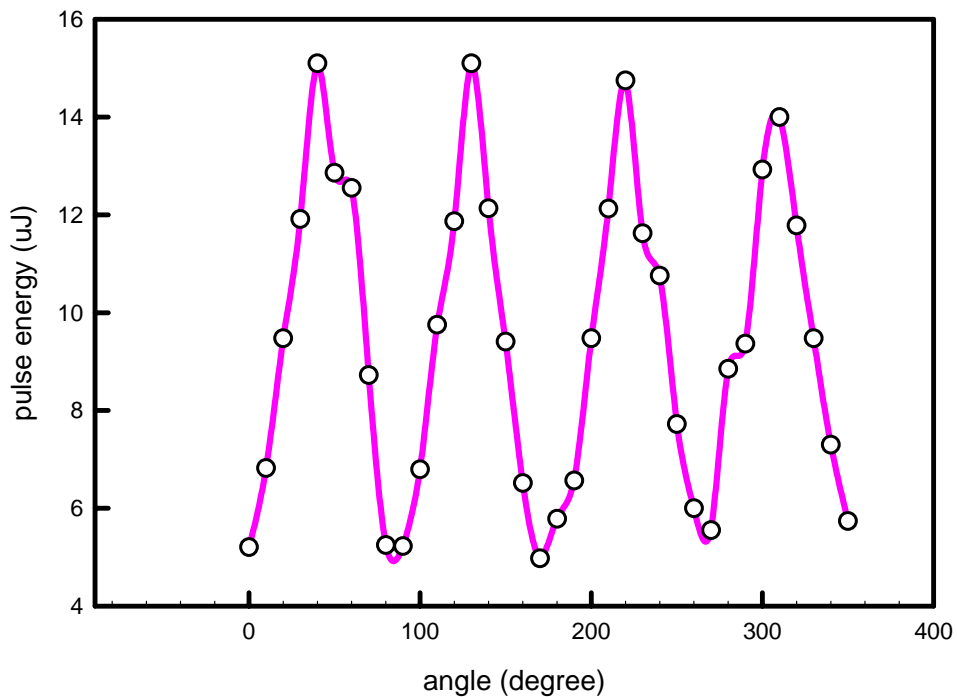


圖 3.5 為瞬間脈衝能量對增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 2.47W。

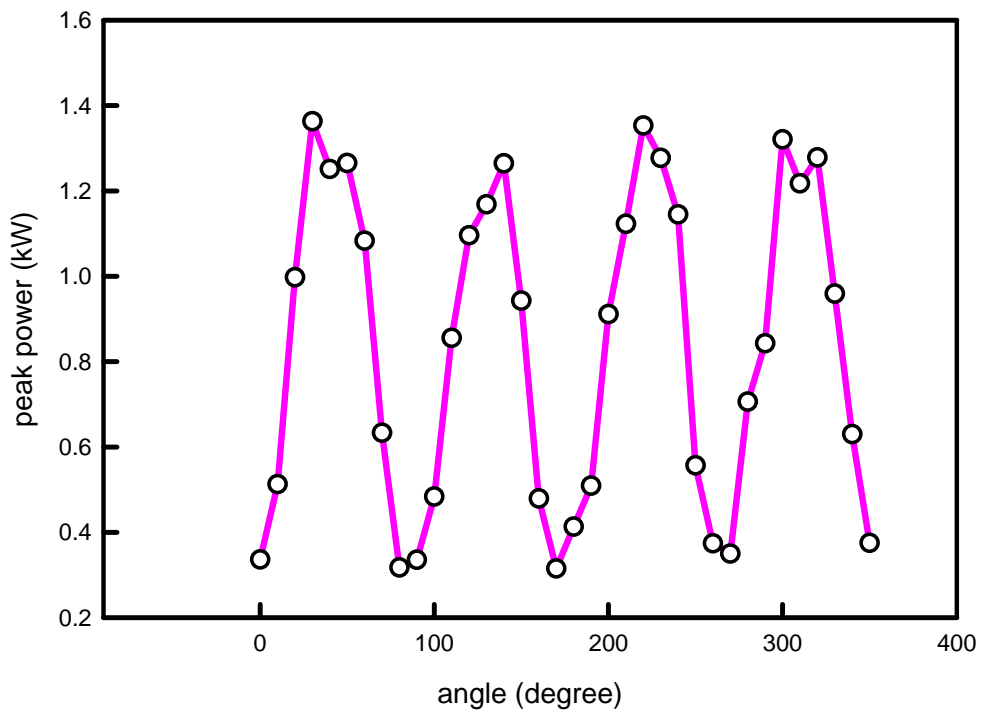


圖 3.6 為瞬間脈衝功率對增益介質晶體的 c 軸與 1/4 波板的夾角作圖，其輸入功率為 2.47W。



## 第四章 1175 nm 拉曼雷射

### 4.1 導論

由於自發放射和自轉換受激拉曼散射的特性使得以Nd摻雜釩酸鹽形成的晶體適合做自轉換受激曼散射雷射的增益介質。近來，使用Cr<sup>4+</sup>:YAG作飽和吸收體並且以c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>或c-cut的Nd:GdVO<sub>4</sub>為增益介質，可以成功的產生單端激發式被動Q開關自轉換受激拉曼雷射。但是，實驗結果顯示常見的a-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體和a-cut的Nd:GdVO<sub>4</sub>晶體不容易能產生自轉換受激拉曼散射過程，因為它們的激發輻射有效面積限定了被動式Q開關能量儲存的能力。然而，因為熱光學係數dn/dT和熱指數係數強度都和晶軸方向有關，所以c-cut Nd摻雜釩酸鹽形成的晶體的熱透鏡功率約是a-cut晶體的3倍。換句話說，也就是c-cut 釩酸鹽晶體並不適合於高功率激發的使用<sup>[8]</sup>。為了解決這個問題，西元2003年Liu發明新的Nd摻雜釩酸鹽形成的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>晶體<sup>[9][10]</sup>。

我們利用Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>有較小的激發輻射有效面積的特性，來做拉曼雷射。一般來說，a-cut 的Nd:YVO<sub>4</sub>和Nd:GdVO<sub>4</sub>晶體較不容易產生自轉換受激拉曼。因此，我們比較a-cut的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>與Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:GdVO<sub>4</sub>三類晶體的被動式Q開關能力，發現其中又以Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>晶體為最適合當作被動式Q開關的增益介質。圖4.1為激發輻射有效面積比( $\sigma/\sigma_{YVO_4}$ )對Gd摻雜濃度(x)。由圖4.1可知由於Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>晶體有較小的激發輻射有效面積。相對來說，Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>晶體也較容易產生自轉換受激拉曼。

因此，本實驗以研究a-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體、c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體及a-cut 的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>晶體(X=0.2, 0.4, 0.6, 0.8)為增益介質時，所產生波長為1175nm Stokes的拉曼雷射作比較。



## 4.2 1175nm 拉曼雷射

### 4.2-1 實驗架構

圖 4.2 為平凹腔的單端激發式被動 Q 開關自轉換受激拉曼雷射實驗裝置圖。激發光源為 2.5W，其波長為 808nm 的光纖耦合半導體雷射，光纖的數值孔徑為 0.16，核心孔徑為 200 $\mu$ m。激發光源的焦距為 16.5mm，耦合效率為 90%，輸出光源經耦合鏡聚焦組聚焦至增益介質晶體上，可得到大小約為 100 $\mu$ m 的激發光點。輸入耦合鏡 M1 是一個焦距為 15mm 的凹面鏡，其對輸出波長有高反射 ( $R > 99.8\%$ )，且對激發光源波長有高穿透 ( $T > 90\%$ ) 的鍍膜。

我們分別以(1) Nd離子摻雜濃度為 1%，長度為 6 mm，a-cut的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>晶體(X=0.2, 0.4, 0.6, 0.8) (2) Nd離子摻雜濃度為 1%，長度為 2.5 mm，c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體 (3) Nd離子摻雜濃度為 0.25%，長度為 9 mm，a-cut Nd:YVO<sub>4</sub>的晶體。我們以這六顆晶體作為增益介質，且在這些晶體的兩端面都有針對 1064nm 做抗反射的鍍膜( $R < 0.2\%$ )。以Cr<sup>4+</sup>:YAG晶體當飽和吸收體，其長度為 2mm並有對 1064nm的穿透膜( $T > 70\%$ )，且在此晶體的兩面皆有對Stoke波長抗反射鍍膜 ( $R < 0.2\%$ )。在輸出耦合鏡M2 方面，為一平面鏡，鍍有對波長 1064nm ( $R > 99.8\%$ ) 及 1175nm( $R = 55\%$ )的反射膜。此實驗的雷射共振腔平均長度約為 10mm左右。

圖 4.3 是使用光譜(Advantest Q8381A)量測雷射光譜資訊，光譜儀使用繞射晶體單光儀來量測高速脈衝，其解析度可到達 0.1nm。我們並使用 LeCroy 數位示波器(avepro7100,10Gs/sec, 1GHz 頻寬)和快速 PIN 光檢器來測量脈衝的時間行為。

### 4.2-2 實驗結果

以平凹腔的實驗架構，來研究以Nd摻雜釩酸鹽形成的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO(X= 0.2, 0.4, 0.6, 0.8)、c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>和a-cut Nd:YVO<sub>4</sub>等的六顆晶體作為增益介質時，所產生 1175nm Stoke波長的拉曼雷射。首先，研究以這六顆晶體作增益介質，選

擇鍍有反射膜的平面鏡為耦合輸出鏡的 1064nm雷射 (R=85%)。實驗結果發現，除了c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體的輸出功率較低外，其他晶體的輸出功率均相差在 5% 左右。但是，只有a-cut Nd:YVO<sub>4</sub>的晶體、c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>及Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>四種晶體能成功產生 1175nm的拉曼訊號。其中又以c-cut的 Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>及Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>三種晶體的輸出功率較佳。這是因為c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>及Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>三種晶體有較小的激發輻射有效面積，能夠有效提高被動式Q開關的效率，成功產生效率較好的拉曼雷射。因此，也可以說c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>以及Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>三種晶體在自發性拉曼散射雷射中，有較好儲存能量的能力。

圖 4.4 為 1175nm Stoke波長的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖。當入射功率為 2.2W時，以c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>為增益介質可得到最大功率約為 83 mW。當入射功率為 2.2W時，以Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>為增益介質可得到最大功率約為 180mW。當入射功率為 2.2W時，若以Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>為增益介質可得到最大功率約為 110 mW。在光轉換效率方面，則分別為 3.8% (c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>)、8% (Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>) 和 5% (Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>)；若拿本實驗中的光轉換效率 8% 與Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>的 0.7%相比，已高出許多。圖 4.5 為三種拉曼晶體的重複率對入射激發功率所作的關係圖。由圖 4.5 能得到當入射激發光功率增加時，重複率也會隨著減少；而c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>與Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>三顆晶體的最大重複率分別為 25kHz、66kHz和 38k Hz。圖 4.6 為三種拉曼晶體的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖。因c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>、Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>三晶體的激發輻射有效面積的大小不同；其中又以c-cut的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶體的最小，其次是Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>，Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>的最大。因此，Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>晶體所產生自轉換受激性拉曼雷射的瞬間脈衝能量為三晶體中最低的。但是，由圖 4.4 可得Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>晶體的轉換功率卻比Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>晶體及c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體好。

圖 4.7 為波長 1064nm對 1175nm的脈衝圖。拉曼雷射的脈衝寬度並沒有隨著

輸入功率的增加而改變。對Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>與Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>晶體來說，其大小約為 600~800ps，最大的瞬間脈衝功率分別約為 3.4kW及 3.3kW。對c-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>晶體，其大小約為 1.7~2.5 ns，最大的瞬間脈衝功率約為 1.95 kW；就瞬間脈衝功率來說，以Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>晶體的效能最好。

### 4.2-3 結論

用a-cut的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>x-1</sub>VO<sub>4</sub>有較小的激發輻射有效面積的優點，可以成功作出 1175nm Stoke波長的拉曼雷射。以Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>晶體與Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>晶體所構成的單端激發式被動Q開關自發性拉曼雷射能產生皮秒等級的脈衝寬度。在以a-cut的Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>晶體為增益介質時，能得到 8.2%的光轉換效率，其光轉換曲線斜率為 15%。總結來說，當入射激發功率為 2.2W時，可得到平均輸出功率為 180mW且重複率為 66kHz，最大的瞬間脈衝功率大於 3.4kW。以上的實驗結果，讓我們知道，對 1175 nm Stoke波長的拉曼雷射來說，a-cut 的Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>x-1</sub>VO<sub>4</sub>是一個很好的增益介質。



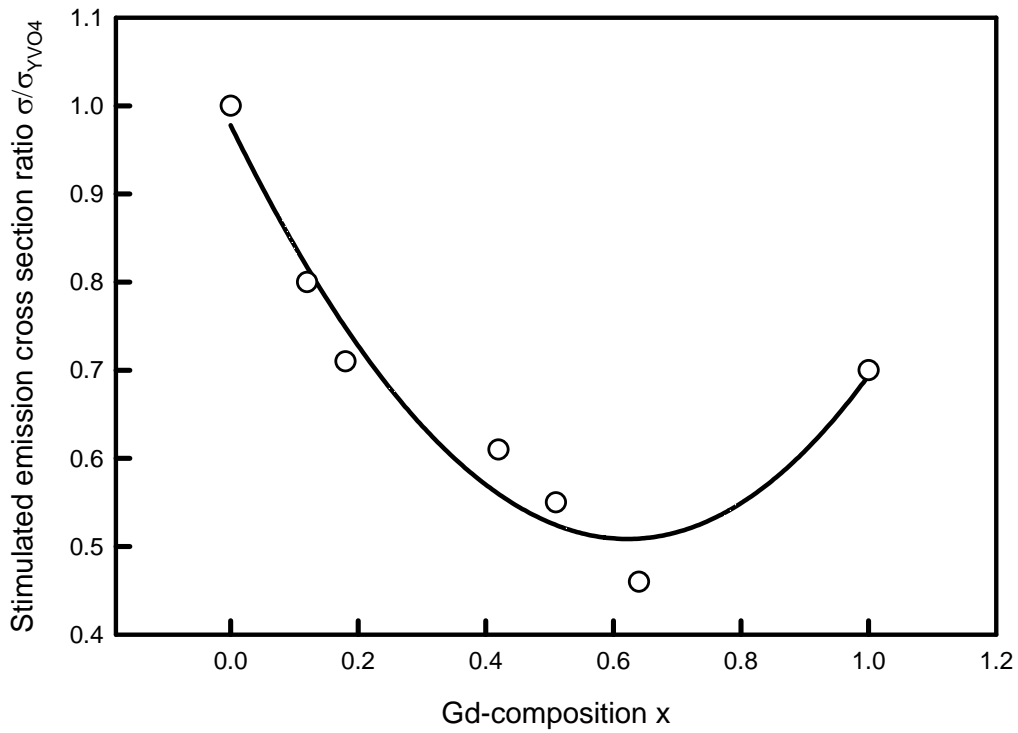


圖 4.1 激發輻射有效面積比( $\sigma/\sigma_{YVO4}$ )對Gd摻雜濃度(x) ，Ref [9]

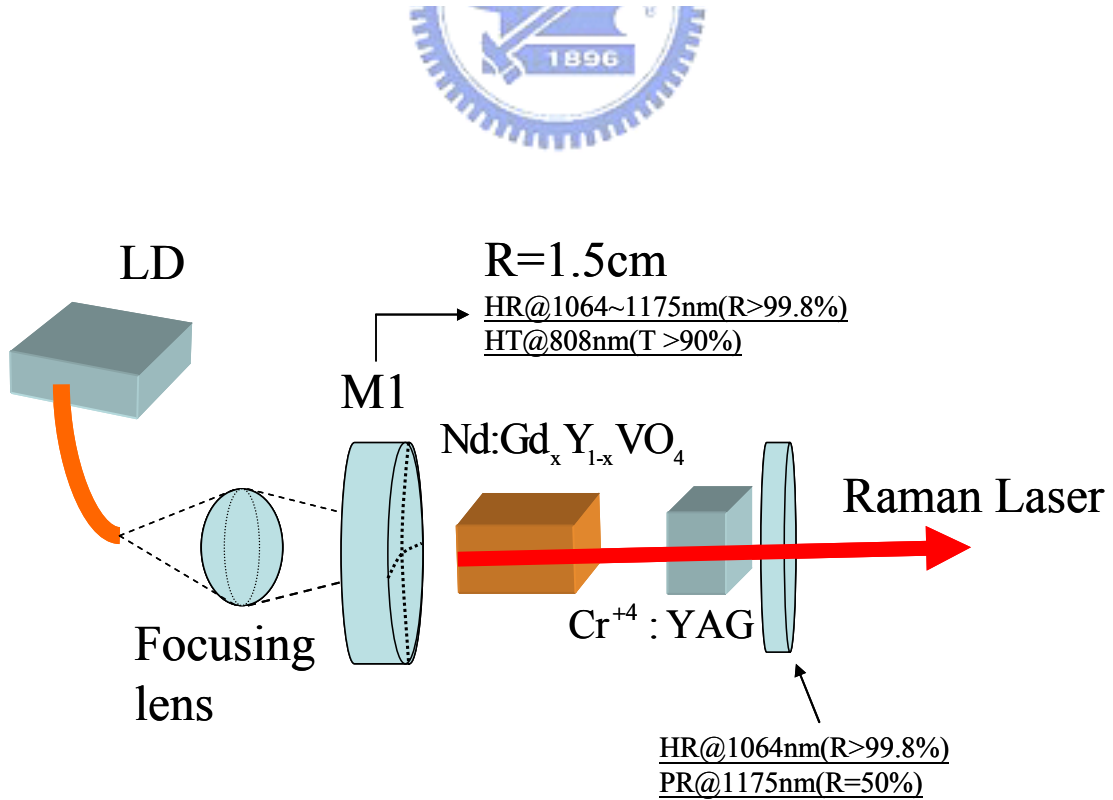


圖 4.2 為平凹腔的單端激發式被動 Q 開關自發性拉曼雷射實驗裝置圖

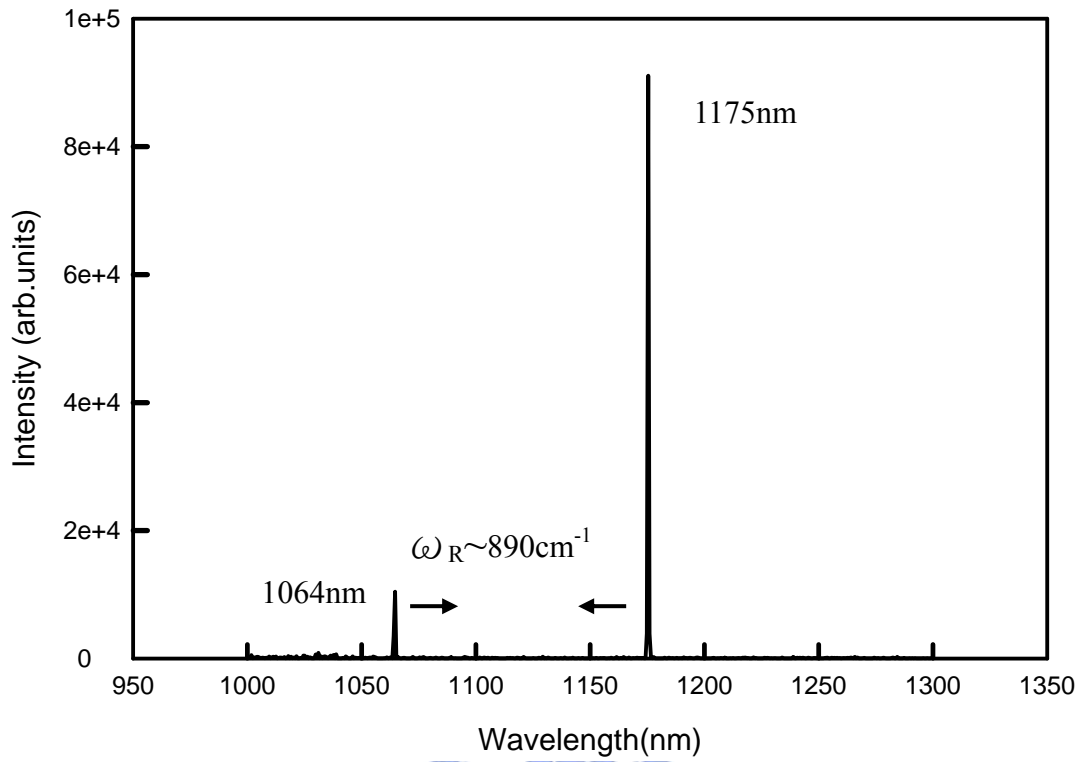


圖 4.3 被動式自發性拉曼的光譜圖

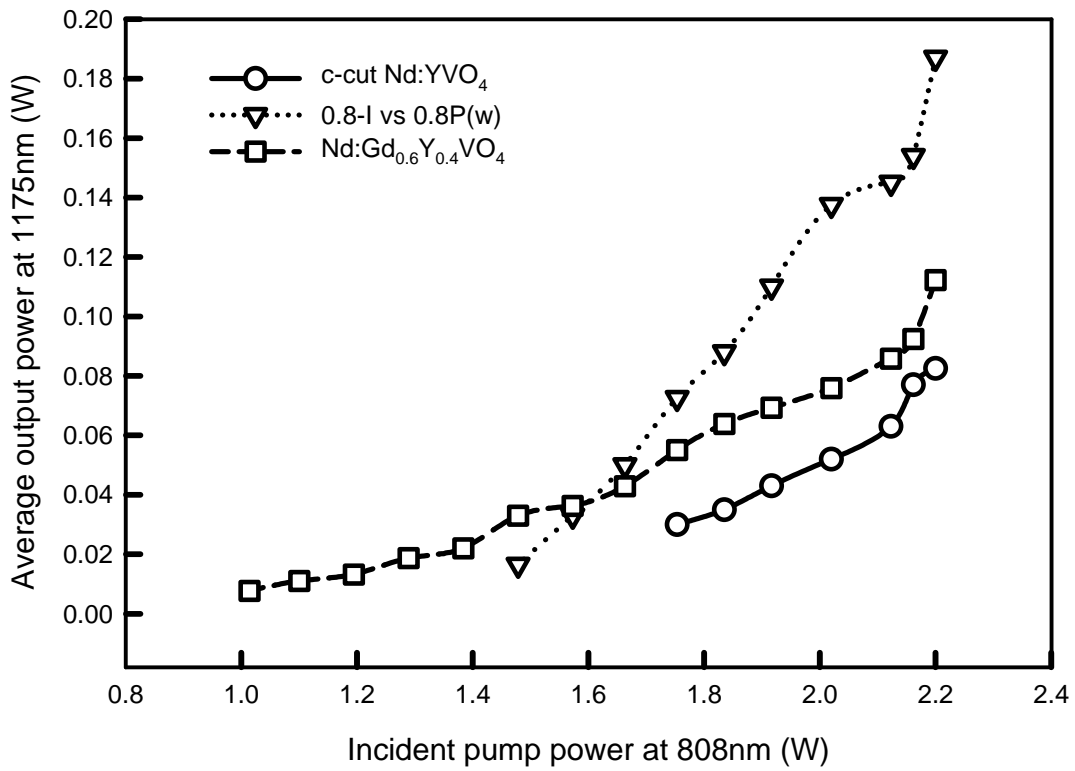


圖 4.4 為 1175nm Stoke 波長的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖

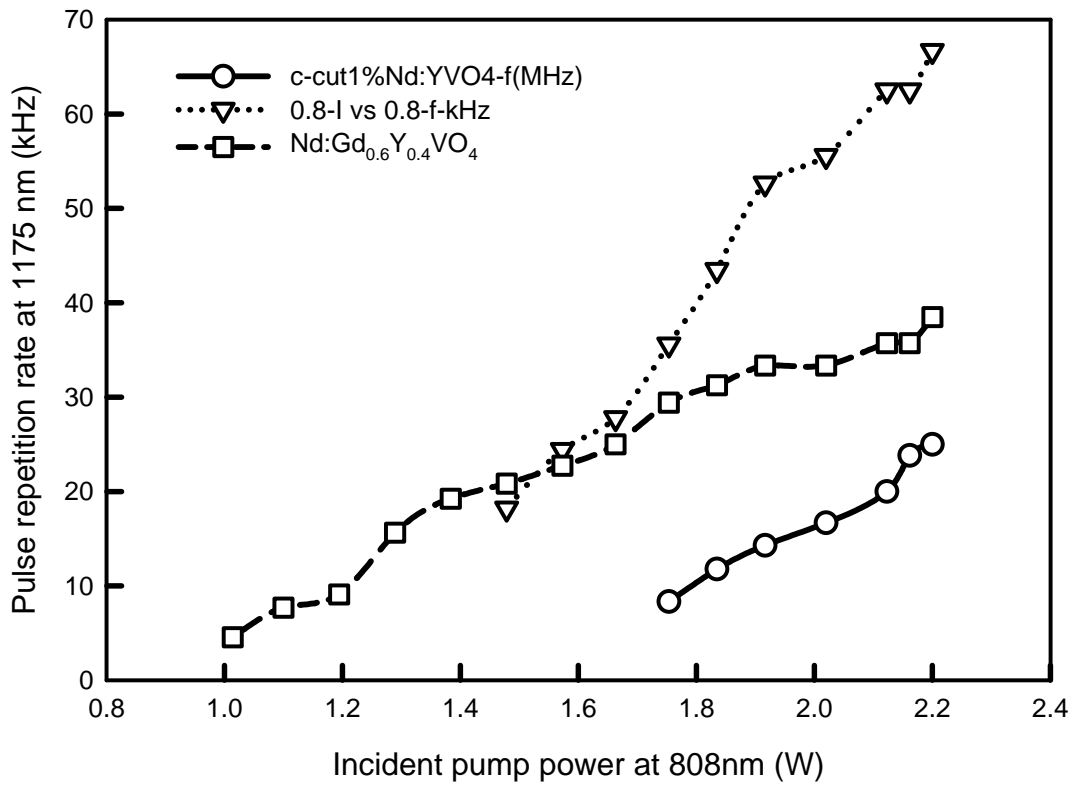


圖 4.5 重複率對入射激發功率所作的關係圖

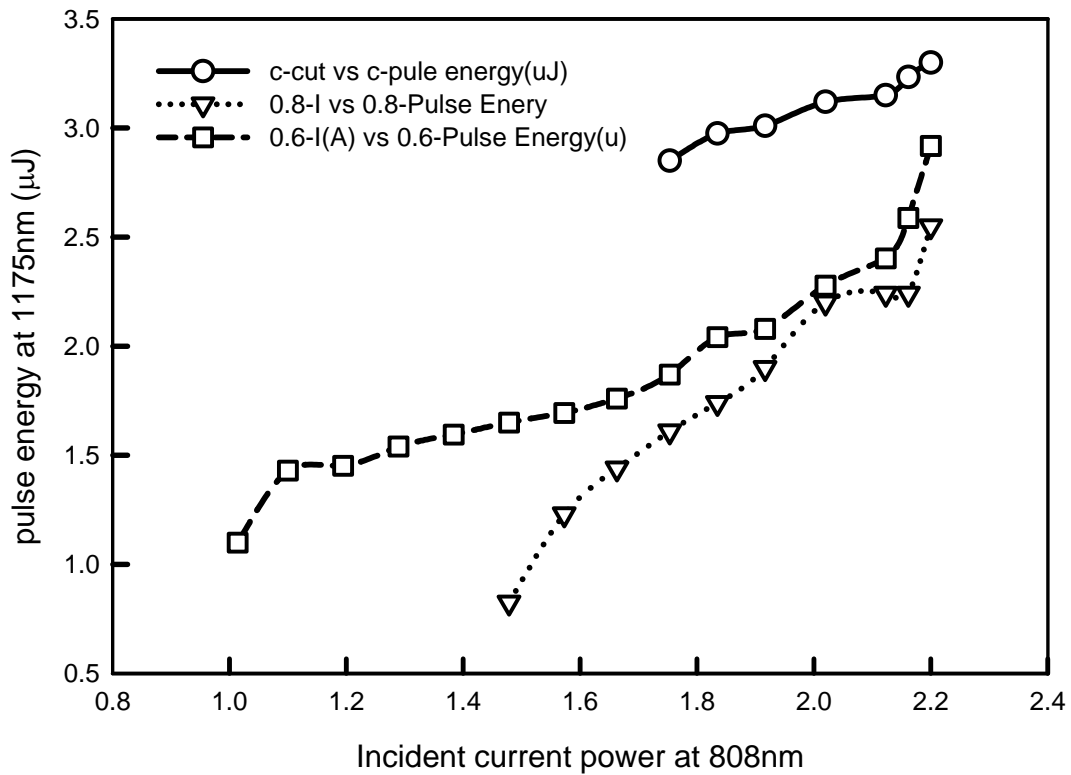


圖 4.6 瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖

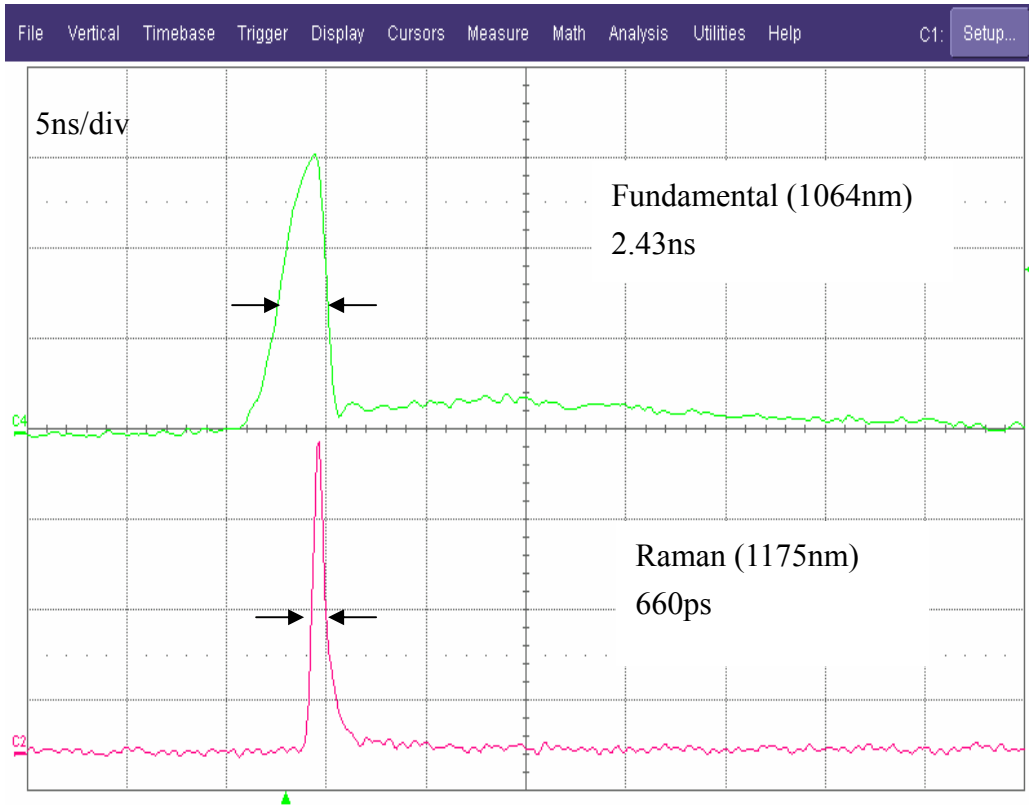


圖 4.7 為波長 1064nm 對 1175nm 的脈衝圖(對Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>晶體)



## 第五章 1083nm 之相關雷射之研究

### 5.1 導論

現在有許多的實驗中都會有需要激發He原子的過程，如中子的研究，雷射鑷夾和原子冷卻等實驗。目前，被用於激發He原子光源的 1083nm雷射可分為DFB及DBR所形成的二極體雷射和使用Nd:LMA或Nd:LuAlO<sub>3</sub>兩種晶體當增益介質所形成的固態雷射。

雷射二極體所激發的固態雷射之發展常會對科技進步有顯著的幫助。摻釹鈮酸釷晶體(Nd : GdVO<sub>4</sub>)是一個非常好的增益介質，因為它有較高吸收係數以及較大的熱傳導係數。過去，對於摻釹鈮酸釷晶體的研究都以 1063nm的波段為主；但由摻釹鈮酸釷晶體(Nd : GdVO<sub>4</sub>)的吸收螢光光譜中，能發現晶體能階由<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>時大約會有 5-6 個吸收帶存在。圖 5.1 為室溫時對摻釹鈮酸釷晶體(Nd:GdVO<sub>4</sub>)時所量測的吸收螢光光譜，其晶體能階由<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>且光譜解析度約為 0.1nm 左右。在吸收螢光光譜圖中可以發現有 1083nm的峰值存在，因此可預期摻釹鈮酸釷晶體(Nd : GdVO<sub>4</sub>)能用來產生 1083nm的雷射。又因釹鈮酸釷(Nd : GdVO<sub>4</sub>)晶體其有效激發輻射面積小，所以很適合拿來作拉曼雷射的增益介質。所以我們可以很合理地預測在以釹鈮酸釷(Nd : GdVO<sub>4</sub>)晶體當增益介質所作的被動式脈衝雷射中，會有拉曼訊號的產生。

因此，本文研究以釹鈮酸釷(Nd : GdVO<sub>4</sub>)晶體當增益介質時，所產生連續性 1083nm之雷射(CW Laser)以及在被動式脈衝雷射中所產生 1186nm和 1197nm的拉曼雷射為主。

### 5.2 高功率的 1083nm 雷射

#### 5.2-1 實驗架構



我們採用平凹腔的單端激發式雷射實驗裝置圖 (如圖 5.2)。激發光源為 16W 的半導體雷射，其輸出波長為 808 nm 且有效耦合輸出效率為 85%，聚焦鏡組的焦距為 12.5mm 且聚焦至 a-cut 的 Nd : GdVO<sub>4</sub> 上時其激發光點直徑為 0.25mm。晶體中 Nd 離子的摻雜濃度為 0.27%，晶體長度為 10 mm 並以銅座包覆且通水溫控於 24 °C。輸入耦合鏡 M1 是個焦距為 504.7 mm 的凹面鏡，並在其上鍍有對 1123nm 波長高反射膜 (R>99%)，且對激發光源(808nm)及 1064nm 兩波長為高穿透 (T>90%, T>80%) 的鍍膜。在輸出耦合鏡 M2 方面，選用 4 個平面鏡子 (A, B, C, D) 作為比較。作為 M2 的 4 個鏡子分別為 (1) A 鏡子：為一平面鏡，並在鏡面上鍍有針對 1123 nm 波長高反射膜 (R > 99.8%)，及對激發光源(808 nm)及 1064nm 兩波長高穿透膜 (98%, 80%)；(2) B 鏡子：為一平面鏡，並在鏡面上鍍有針對 1085nm 波長反射膜 (R > 93%)，且對 1064 nm 波長高穿透膜 (85%)；(3) C 鏡子：為一平面鏡，並在鏡面上鍍有針對 1123nm 波長高反射膜 (R > 99.8%) 和 561nm 波長反射膜 (R > 93%)，且對激發光源(808nm)及 1064nm 兩波長為高穿透膜 (98%, 80%)；(4) D 鏡子：為一平面鏡，並在鏡面上鍍有針對 1085 nm 波長反射膜 (R > 87.8%) 和 1064nm 波長高穿透膜 (T > 74%)。並在共振腔內擺一個沒有鍍膜的蓋玻片當 etalon 來改變輸出雷射的波長及功率。實驗架構腔長約為 3.5 公分。

### 5.2-2 實驗結果與討論

以平凹腔的實驗架構，來研究以 Nd 摻雜釩酸鹽形成的 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶體為增益介質，與 4 平面鏡 (A, B, C, D) 所產生的 1083nm 雷射作比較。表二為 4 平面鏡 (A, B, C, D) 分別對 1064nm、1083nm、1086nm 的穿透率。首先，研究共振腔內沒放 etalon 時，用 A (T=2.7%) 和 C (T= 2.2%) 兩個鏡子當輸出鏡，討論其輸出功率。圖 5.2 為 1083nm 波長的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖。當最大輸入功率為 12.5 W，對 A 輸出鏡 (T=2.7%) 可得到 3.4W 的輸出功率且其斜率為 30.1%。當最大輸入功率為 12.5W，對 C 輸出鏡 (T=2.2%) 可得到 2.7W 的輸出功率且其斜率為 23.5%。圖 5.3 是使用光譜 (Advantest Q8381A) 量測雷射光譜資訊，光譜儀使

用繞射晶體單光儀來量測高速脈衝，其解析度可到達  $0.1\text{nm}$ 。由圖 5.3 可以得知 Nd:GdVO<sub>4</sub>雷射所產生的半高寬為  $0.4\text{nm}$ ，且其峰值在  $1082.7\text{nm}$ 左右。本實驗中，對於所有輸出功率的光束品質( $M^2$ )均小於 1.5 且由實驗的斜效率可以知道光子在共振腔來回一次會損失約 0.45%的能量。一般來說， $1063\text{nm}$ 雷射的斜效率大約為 50%~60%，這比起實驗中  $1083\text{nm}$ 雷射的斜效率要好。但是， $1083\text{nm}$ 的Nd:GdVO<sub>4</sub>雷射的斜效率比起目前用其它材料來產生的  $1083\text{nm}$ 雷射要來的好。

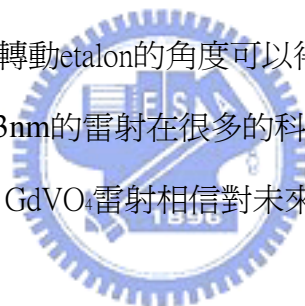
圖 5.4 為 4 個輸出鏡的輸入功率對輸出功率的作圖。由實驗數據發現，由 B、C、D 三個輸出鏡的輸出波長都有兩個波長的產生。於是，我們在共振腔內加上一個沒有鍍膜的蓋玻片當 etalon，來討論輸出波長的變化。圖 5.5 就是我們利用轉 etalon 的角度來改變輸出波長對輸出功率的作圖。由圖 5.5 可以知道波長可以從  $1082.34\text{nm}$  調到  $1083.64\text{nm}$  且當輸出波長為  $1082.56\text{nm}$  時有相對最大輸出功率。當輸入功率為  $5.2\text{W}$  並轉動 etalon 的角度，可以得到  $1.1\text{W}$  的相對最大輸出功率且其波長為  $1082.56\text{nm}$ 。圖 5.7 仍為 4 個輸出鏡的輸入功率對輸出功率的作圖，但此時在共振腔內加上 etalon。由圖 5.7 的實驗結果發現，在共振腔內放 etalon 能讓我們很順利的把輸出波長由雙波長變為只有  $1083\text{nm}$  波長。

在這個實驗中，在輸出雷射的波長常可以看到  $1083\text{nm}$ 、 $1086\text{nm}$ 、 $1064\text{nm}$  三個波長的出現。圖 5.8 是輸入功率對輸出功率的作圖，此時使用的輸出鏡為 A 鏡子( $T=2.7\%$ 對  $1083\text{nm}$ ,  $T=1.6\%$ 對  $1086\text{nm}$ ,  $T=74.3\%$ 對  $1064\text{nm}$ )。  $1083\text{nm}$ 、 $1086\text{nm}$ 、 $1064\text{nm}$  三個波長的出現與輸出鏡的鍍膜有關係，由圖 5.8 我們可以發現當輸出波長為  $1064\text{nm}$  出現時，此時的輸出功率會比只有  $1083\text{nm}$  或  $1086\text{nm}$  出現時的輸出功率來的高。不過，在實驗中我們可以利用輸出鏡鍍膜的不均勻，可以把輸出波長由  $1064\text{nm}$  轉到只剩  $1083\text{nm}$  和  $1086\text{nm}$ 。由圖 5.4 可以知道  $1086\text{nm}$  及  $1083\text{nm}$  的自發放射強度比為 2:3。因此，實驗常會產生  $1083\text{nm}$  及  $1086\text{nm}$  雙波長雷射產生。圖 5.9 是輸入功率對輸出功率的作圖，此以 B 鏡子( $T=8\%$ 對  $1083\text{nm}$ ,  $T=5\%$ 對  $1086\text{nm}$ )作為輸出鏡。由圖 5.8 可以知道當輸入功率小於  $6\text{W}$  時，其輸出波長為  $1086\text{nm}$ ；但是，當輸入功率大於  $6\text{W}$  時， $1083\text{nm}$  的波長就開

始出現了。當輸入功率為 6~10W 時，此時會產生 1083nm 及 1086nm 雙波長的雷射。另一方面，對輸出功率來說 1083nm 波長的輸出功率隨著輸入輸功率增加而增加，但對 1086nm 波長的輸出功率卻隨著輸入輸功率增加而減少。但是，對於總輸出功率仍是率隨著輸入輸功率增加而增加，在最大輸入功率為 12.5 W 時，可以得到約 3.7W 的輸出功率。

### 5.2-3 結論

綜合以上實驗結果，1083nm的Nd：GdVO<sub>4</sub>雷射是一個效率不錯的雷射。當最大輸入功率為 12.5 W，對A輸出鏡(T=2.7%)可得到 3.4W的輸出功率且其斜率為 30.1 %。並可以利用在共振腔內放etalon來改變輸出波長。輸出波長可以從 1082.34nm調到 1083.64nm，且當輸出波長為 1082.56nm時有相對最大輸出功率。當出入功率為 5.2W時，我們轉動etalon的角度可以得到 1.1W的相對最大輸出功率且其波長為 1082.56nm。1083nm的雷射在很多的科學研究當中都會使用到，現在有效能更佳的 1083nm的Nd：GdVO<sub>4</sub>雷射相信對未來的科學研究有非常大的幫助。



## 5.3 1186nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射

### 5.3-1 實驗架構

圖 5.10 為高功率的 1187nm和 1197nm雙波長拉曼雷射的實驗架構。高功率的 1187nm和 1197nm雙波長拉曼雷射的實驗架構與 5.2 的實驗架構相當類似，只是在共振腔內加入Cr<sup>4+</sup>:YAG晶體當飽合吸收體。Cr<sup>4+</sup>:YAG晶體分別為長度為 0.3mm(穿透率為 97%)、0.5mm(穿透率為 95 %)、0.2mm(穿透率為 90%)，並在晶體的兩面皆有對 1064nm波長抗反射鍍膜。

### 5.3-2 脈衝式 1083 nm 雷射的實驗結果與討論

首先，來研究Nd摻雜釩酸鹽形成的Nd：GdVO<sub>4</sub>晶體為增益介質，比較穿透

率為 97%和 95%的 2 個飽合吸收體及 4 平面鏡(A, B, C, D)作為耦合輸出鏡時，所產生脈衝式 1083 nm雷射作比較。利用 4 平面鏡(A, B, C, D)當輸出鏡時，4 個鏡子都可以產生雷射。但是，除了D平面鏡不能產生脈衝式的雷射外，其餘三個鏡子(A、B、C)均能產生脈衝式的雷射。其中又以B輸出鏡的效率最好，A、C兩輸出鏡在輸入功率較低時輸出波長會只有 1083 nm單波長出現，若隨著輸入功率增加輸出波長會由 1083 nm單波長變成 1083 nm和 1064 nm雙波長出現。

圖 5.11 為脈衝式 1083 nm雷射的平均輸出功率對入射激發光源功率的關係圖，其用B平面鏡作為輸出鏡。當入射功率為 11.1W時，以穿透率為 97%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG晶體當飽合吸收體，可得到最大的輸出功率約為 2.1W。當入射功率為 9.5W時，以穿透率為 95%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG晶體當飽合吸收體，可得到最大的輸出功率約為 1.2W。在光轉換效率方面，則分別為 19%（穿透率為 97%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG晶體）和 12.6%（穿透率為 95%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG晶體）。圖 5.12 為脈衝式 1083nm雷射的重複率對入射激發功率所作的關係圖，其用B平面鏡作為輸出鏡。由圖 5.12 得到當入射激發光功率增加時，重複率也會隨著增加。當以穿透率為 97%和 95%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG晶體當飽合吸收體晶可得到最大重複率為 110kHz和 50kHz。圖 5.13 為脈衝式 1083nm雷射的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖，其用B平面鏡作為輸出鏡。在實驗中發現穿透率為 95%的飽和吸收體的瞬間脈衝能量會大於穿透率為 97%。由圖 5.13 得到當入射激發光功率增加時，瞬間脈衝能量也會隨著增加，分別以穿透率為 97%和穿透率為 95%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG當飽合吸收體晶體得到最大脈衝能量分別為 19 μJ和 23.6 μJ。

圖 5.14 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間脈衝寬度對入射激發功率所作的關係圖，其用B平面鏡為輸出鏡。由圖 5.14 可知當飽合吸收體以穿透率為 97%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG時，1083nm的脈衝寬度隨著輸入功率增加而減小，其最大脈寬約為 60 及最小約為 40ns左右；當飽合吸收體以穿透率為 95%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG時，1083nm的脈衝寬度不會隨著輸入功率改變，其大小約為 25ns。圖 5.15 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間峰值功率對入射激發功率所作的關係圖，其用B平面鏡作為輸出鏡。當入

射功率為 9.5W 時，以穿透率為 95% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶體當飽合吸收體，可得到最大的瞬間峰值功率約為 0.94W。當入射功率為 11.1W 時，以穿透率為 97% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶體當飽合吸收體，可得到最大的輸出功率約為 0.5W。

由實驗數據可知瞬間脈衝功率及瞬間脈衝能量，以穿透率為 95% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶體的效能會比穿透率為 97% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶體較好。但是，在光轉換效率方面來說，以穿透率為 97% 的飽和吸收體的效果會比穿透率為 95% 來的好，其約為 19% 左右。

### 5.3-3 1186nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射的實驗結果與討論

研究 Nd 摻雜釩酸鹽形成的  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  晶體為增益介質，比較穿透率為 97% 和穿透率為 95% 及穿透率為 90% 的 3 個飽合吸收體及 4 平面鏡(A, B, C, D)作為輸出鏡，所產生的拉曼雷射作比較。利用 4 平面鏡(A, B, C, D)當輸出鏡時，4 個鏡子均可以產生雷射。但是，除了 D 平面鏡不能產生脈衝式的雷射外，其餘三個鏡子(A、B、C)都能產生。但對 1186nm 和 1197nm 的拉曼雷射來說，A、B 及 C 三輸出鏡都能產生，其中又以 B 輸出鏡的拉曼訊號最強。

我們討論用 3 種不同穿透率的飽合吸收體，看是否都能成功的產生 1186nm 和 1197nm 的拉曼雷射。由實驗結果發現，3 種不同穿透率的飽合吸收體都會產生拉曼雷射，但是，又以穿透率為 95% 最容易產生拉曼訊號。我們在實驗中可看到 1197nm 的拉曼雷射、1186nm 的拉曼雷射或是 1186nm 和 1197nm 雙波長的拉曼雷射三種拉曼雷射。圖 5.16、5.17 和 5.18 都是使用光譜(Advantest Q8381A)量測雷射光譜資訊，光譜儀使用繞射晶體單光儀來量測高速脈衝，其解析度可到達 0.1nm。圖 5.16 為 1083 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖，圖 5.17 為 1186 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖及圖 5.18 為 1083nm 和 1186nm 的雷射光譜圖。一般來說，由於我實驗中的拉曼訊號太弱，所以我們無法看到 1083nm、1186nm 及 1197nm 三波長的雷射光譜圖。除此之外，當輸出波長為 1186nm 和 1197nm 雙波長的拉曼雷射時，除了 1083nm 的波長會出現外 1064nm 波長也常會伴隨著出現。不過，



我們也可以微調鏡子或是晶體讓輸出波長只有 1083nm、1186nm 及 1197nm。

另外，我們用C平面鏡子當輸出鏡及穿透率為 95%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG晶體當飽合吸收體，來量測 1186nm的拉曼訊號。圖 5.19 為 1186nm Stoke波長及 1083nm的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖。由圖 5.19 知道當輸入功率增加時，1083nm的輸出功率也會隨著增加，但是 1186nm的輸出功率卻沒有隨著增加。當入射功率為 5.6W時，1083nm的輸出功率為 460mW，而 1186nm的輸出功率約為 150μW。在光轉換效率方面，對 1083nm來說為 8.2%而對 1186 nm來說 0.003%。圖 5.20 為 1186nm Stoke波長的重複率對入射激發功率所作的關係圖，由圖得到當入射激發光功率增加時，重複率也會隨著減少。圖 5.21 為 1186nm Stoke波長及 1083nm的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖，由圖可以知道當輸入功率增加時，1186nm和 1083nm的瞬間脈衝能量也都隨著增加。當入射功率為 5.6 W時，1083nm的瞬間脈衝能量為 84μJ，而 1186nm的輸出功率約為 26.4 nW。圖 5.22 為波長 1083nm對 1186nm的脈衝圖，1186nm拉曼雷射及 1083nm的脈衝寬度並沒隨著輸入功率改變，其大小分別約為 7ns及 17nm左右，1186nm和 1083nm的最大的瞬間脈衝功率分別約為 3.7W和 4.8kW。

再來，我們研究用B平面鏡子當輸出鏡及穿透率為 95%的Cr<sup>4+</sup>:Y AG晶體當飽合吸收體，來量測 1197nm的拉曼訊號。圖 5.23 為 1197nm Stoke波長及 1083nm的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖。由圖 5.23 知道當輸入功率增加時，1083nm的輸出功率也會隨著增加，但是 1197nm的輸出功率並沒有隨著增加。當入射功率為 8W時，1083nm的輸出功率為 1W左右，而 1197nm的輸出功率約為 6.2mW左右。在光轉換效率方面，對 1083nm及 1186 nm分別為 12.5%及 0.08%。圖 5.24 為 1197nm Stoke波長的重複率對入射激發功率所作的關係圖，由圖得到當入射激發光功率增加時，重複率會隨著減少。圖 5.25 為 1186nm Stoke波長及 1083nm的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖。由圖可以知道當輸入功率增加時，1197nm和 1083nm的瞬間脈衝能量也都隨著增加。當入射功率為 8W時，1083nm的瞬間脈衝能量為 60μJ，而 1186nm的瞬間脈衝能量約為 0.4 μW。

圖 5.26 為波長 1083nm 對 1197nm 的脈衝圖。1197nm 拉曼雷射及 1083nm 的脈衝寬度並沒隨著輸入功率改變，其大小分別約為 8ns 及 11.5nm~15nm 左右，1186nm 和 1083nm 的最大的瞬間脈衝功率分別約為 50W 和 4kW。

#### 5.3-4 結論

總而言之，我們可以利用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 成功地實現 1083nm 脈衝式雷射、1186nm 拉曼雷射、1197nm 拉曼雷射及 1186nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射。在 1083nm 脈衝式雷射方面以穿透率為 97% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 當飽合吸收體晶體時，我們能得到當入射功率為 11.1W 時，最大的輸出功率約為 2.1W，且光轉換效率為 19%。以穿透率為 95% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 當飽合吸收體晶體時，1083nm 脈衝式雷射的瞬間脈衝能量得到的最大脈衝能量為 23.6 μJ。在拉曼雷射方面，飽和吸收體以穿透率為 95% 最容易產生拉曼訊號。本實驗中 1186nm 拉曼雷射、1197nm 拉曼雷射及 1186nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射的訊號都非常的弱，光轉換效率在 0.08~0.003 左右。不過，這是我們可以遇期到的，因為在耦合輸入鏡 M1 與輸出鏡 M2 的鍍膜上，我們並沒有針對 1186nm 或是 1197nm 兩個波長有特別的設計。也因此，1186nm 和 1197nm 兩波長在共振腔內損失的能量也就相當的多，而在輸出功率也就接近於零。如果我們要讓 1186nm 和 1197nm 兩波長的拉曼訊號變強，那麼我們就必須在偶合輸入鏡及輸出鏡上鍍針對這兩個波長的高反射膜。這樣才能讓 1186nm 和 1197nm 兩波長有較強的輸出功率。

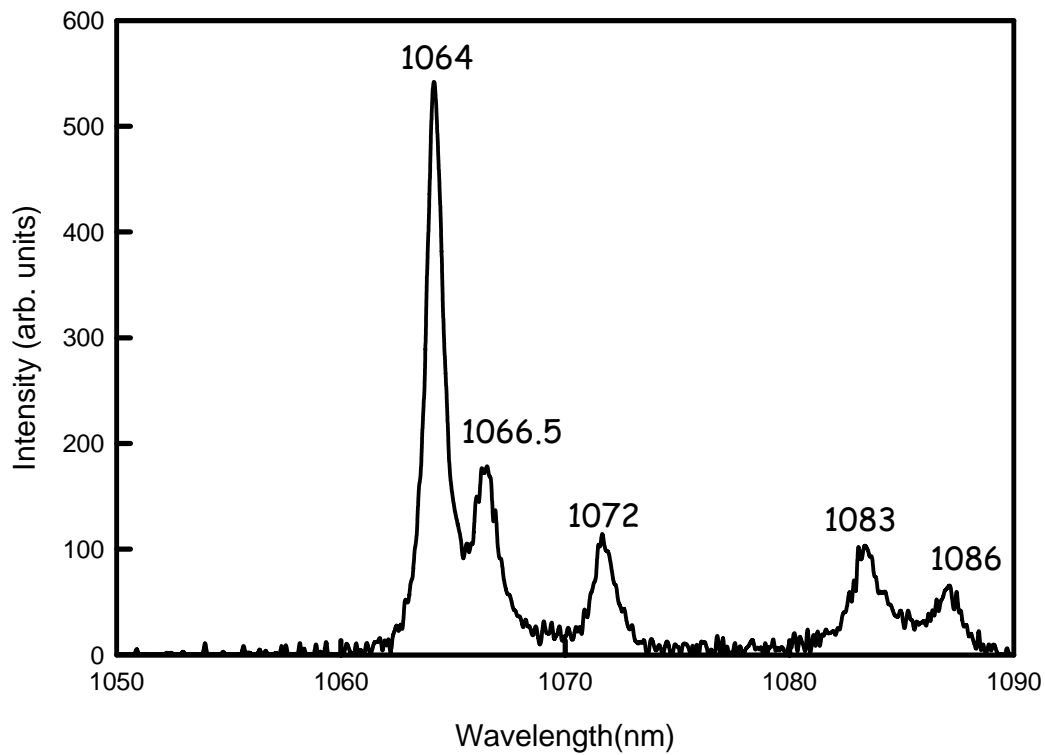


圖 5.1 為室溫時對摻釹釷酸釷晶體(Nd : GdVO<sub>4</sub>)時所量測的吸收螢光光譜

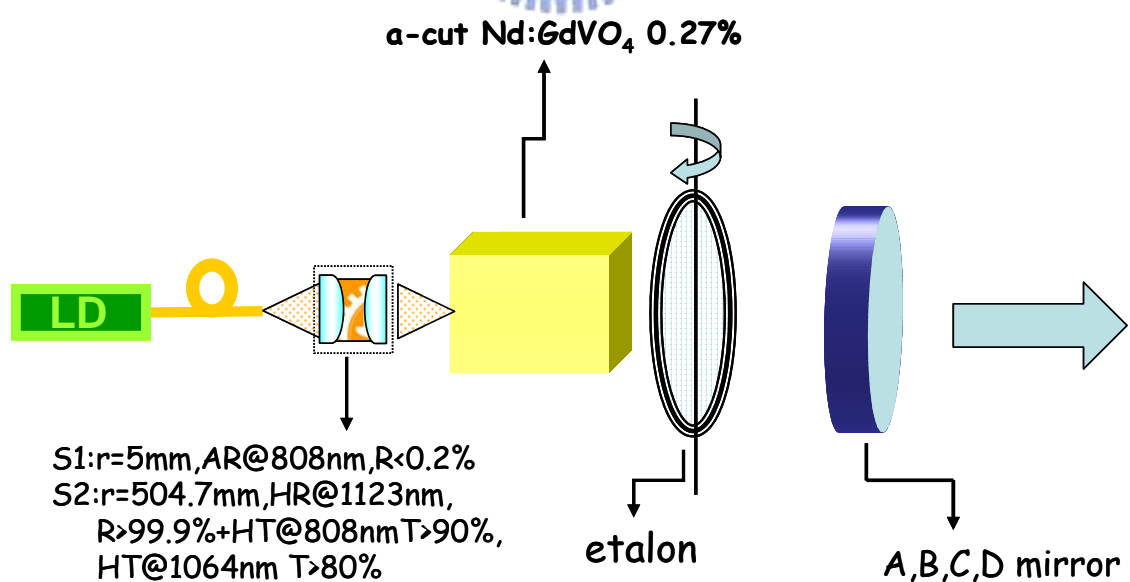


圖 5.2 平凹腔的單端激發式雷射實驗裝置圖



| Mirror / T (%) | 1083nm | 1087nm  | 1064nm |
|----------------|--------|---------|--------|
| A              | 2.6981 | 1.5778  | 74.343 |
| B              | 8.0015 | 5.0158  | 76.116 |
| C              | 2.1795 | 0.98792 | 73.434 |
| D              | 8.5    | 6.4     | 43.6   |

表二 為 4 平面鏡(A, B, C, D)分別對 1064nm、1083nm、1086nm 的穿透率

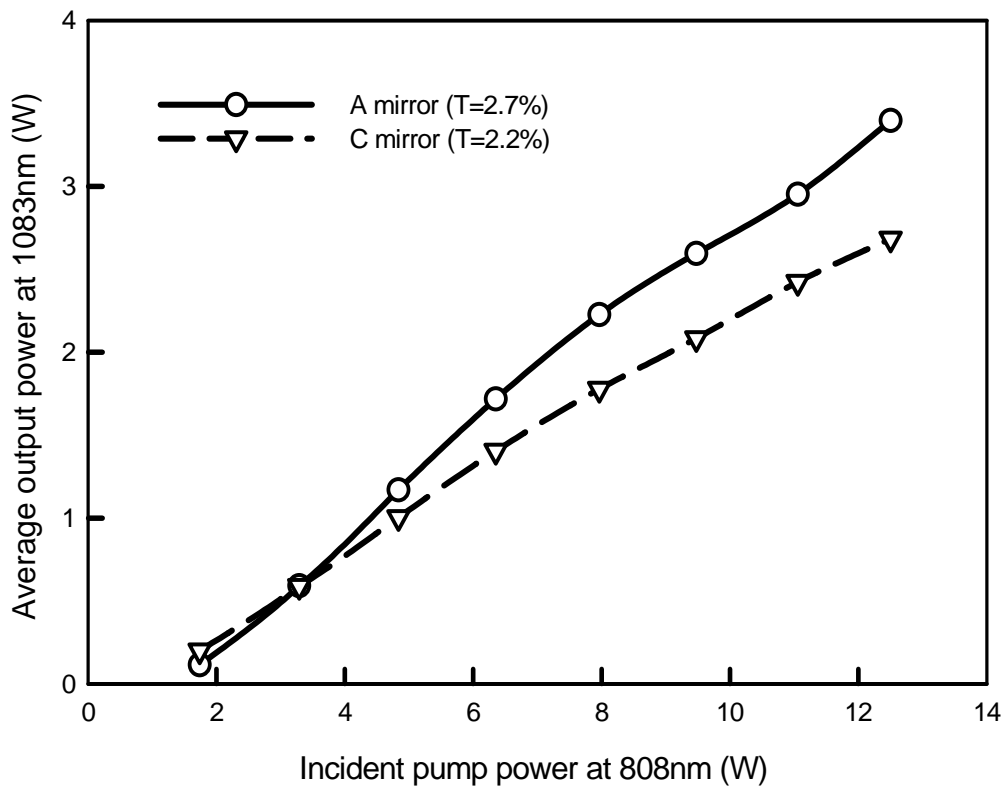


圖 5.3 為 1083nm 波長的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖

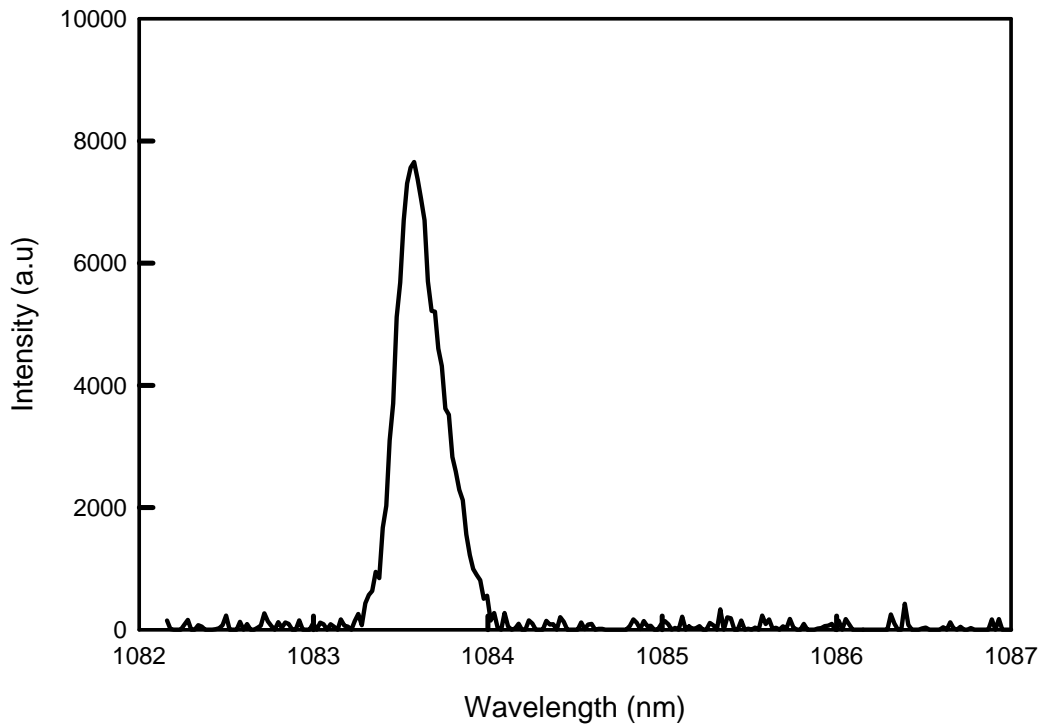


圖 5.4 是使用光譜(Advantest Q8381A)量測雷射光譜資訊

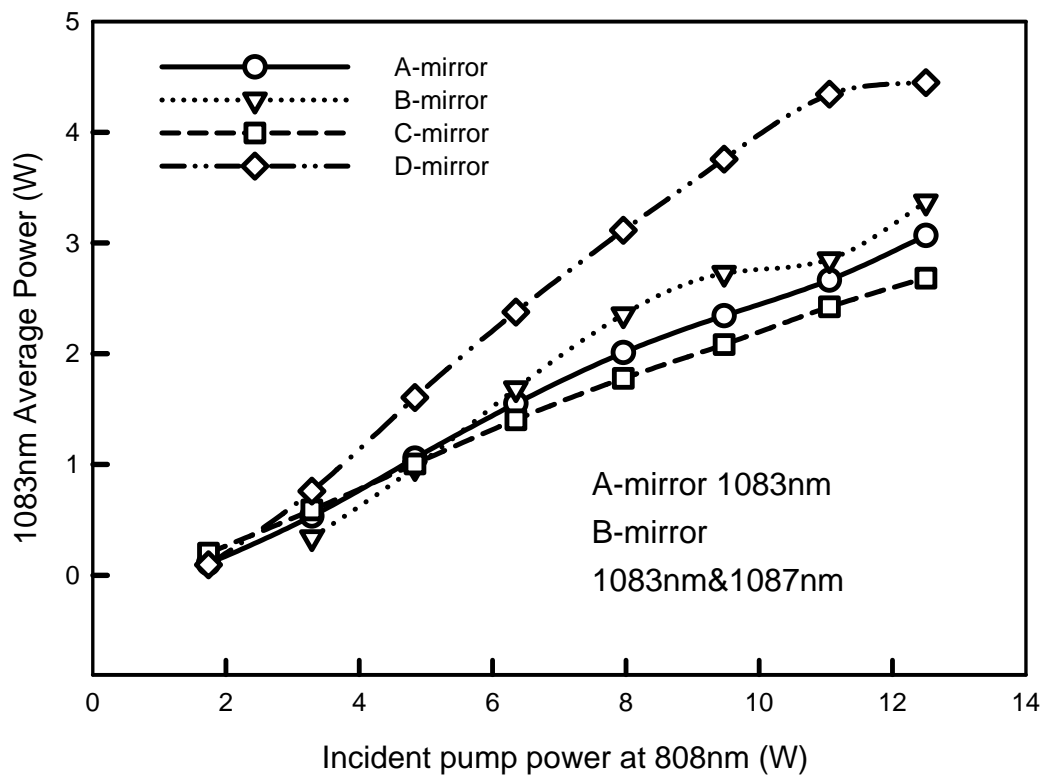


圖 5.5 為 4 個輸出鏡的輸入功率對輸出功率的作圖

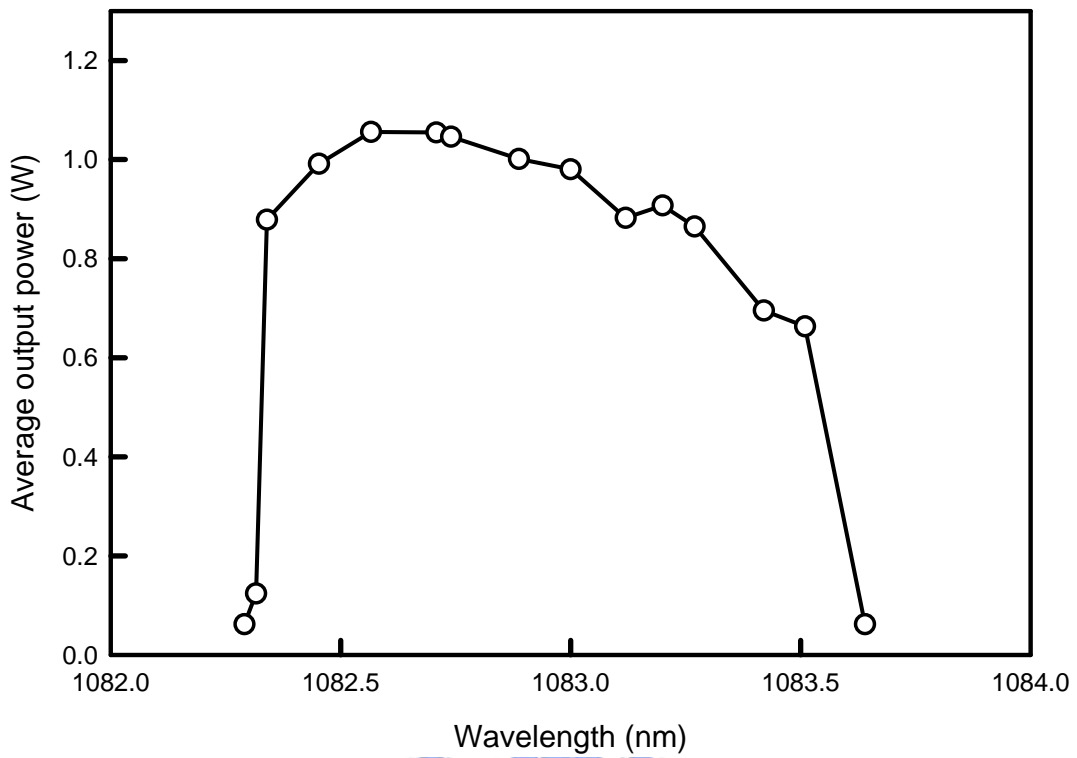


圖 5.5 為利用轉 etalon 的角度來改變輸出波長對輸出功率的作圖

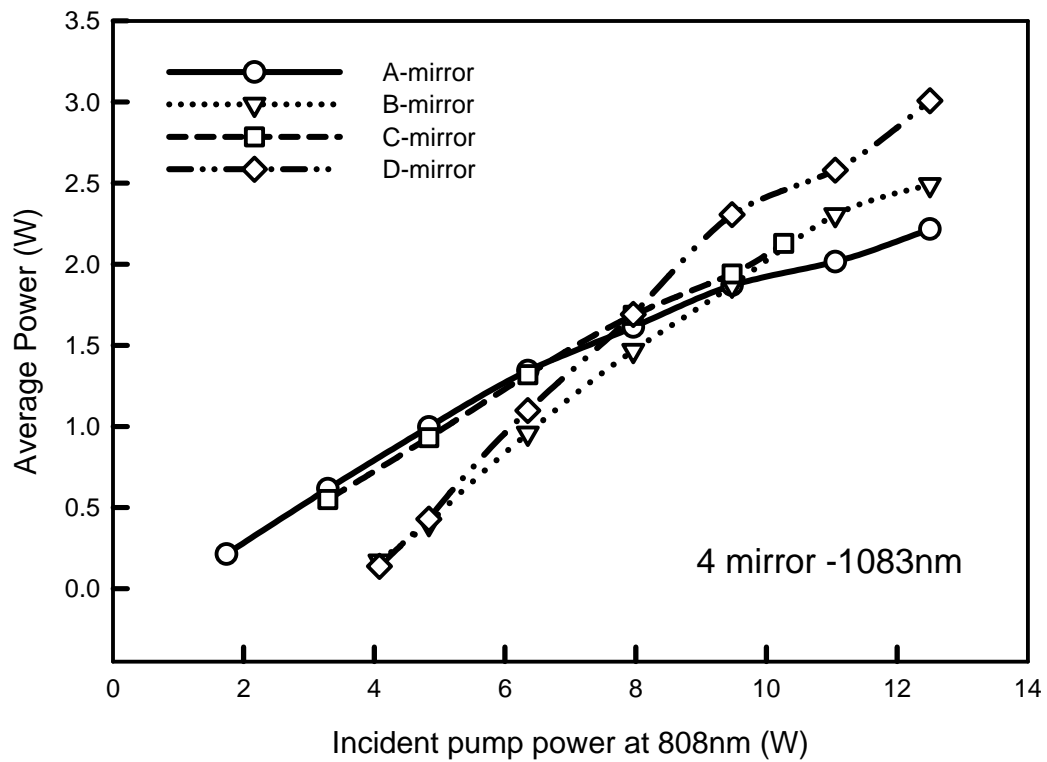


圖 5.7 為在共振腔內加上 etalon 時，4 個輸出鏡的輸入功率對輸出功率的作圖

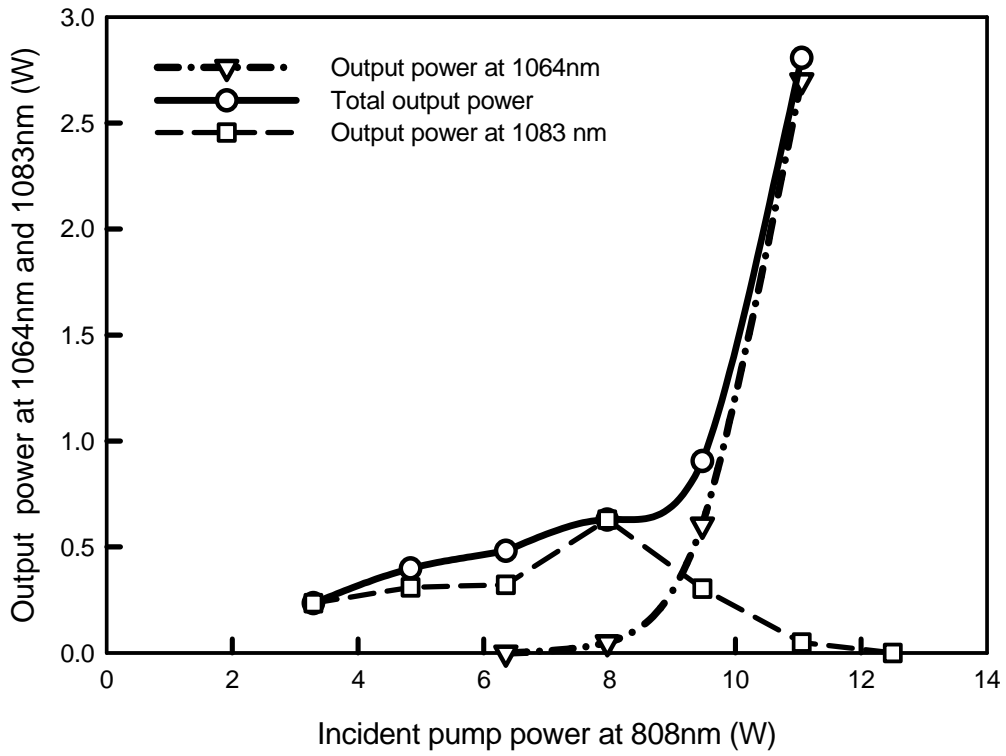


圖 5.8 為用 A 鏡子當輸出鏡時，輸入功率對輸出功率的作圖

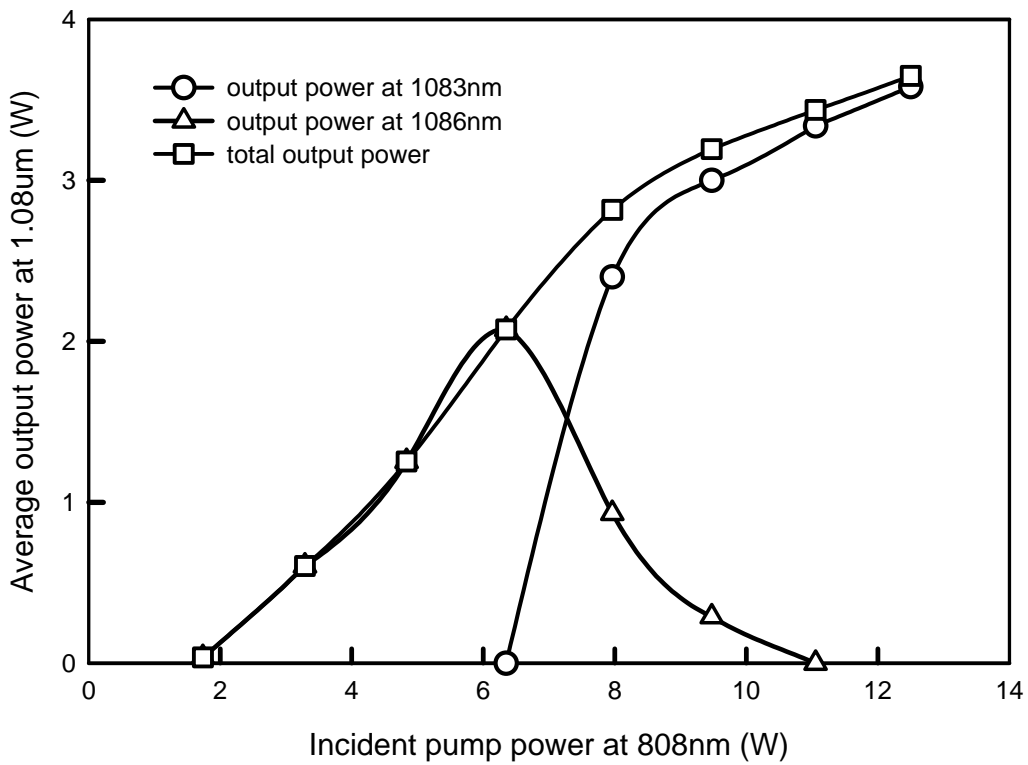


圖 5.9 為用 B 鏡子當輸出鏡時，輸入功率對輸出功率的作圖

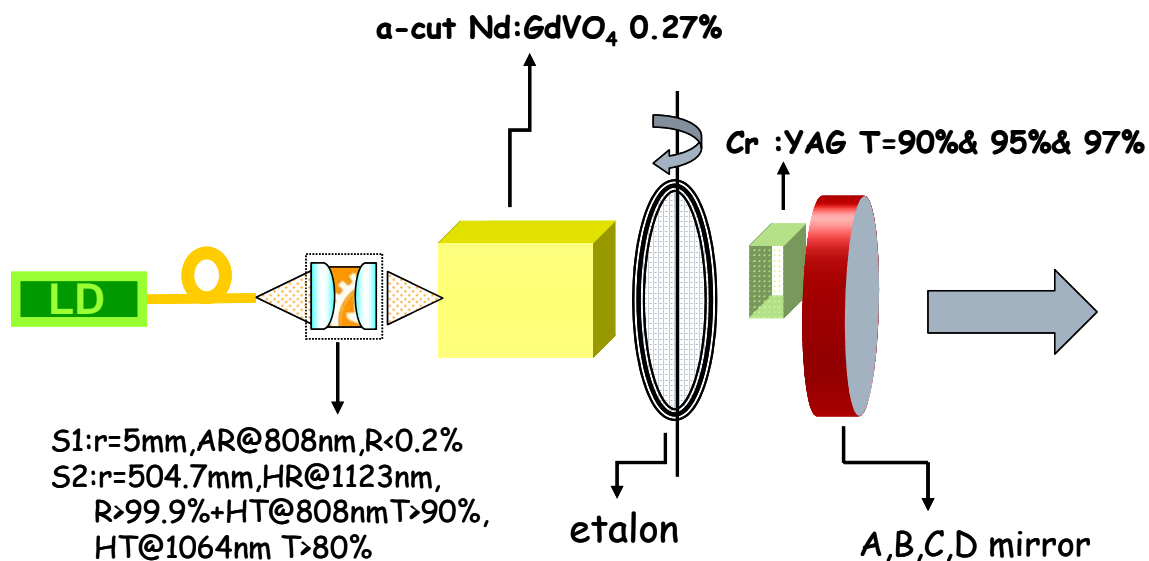


圖 5.10 為高功率的 1187nm 和 1197nm 雙波長拉曼雷射的實驗架構

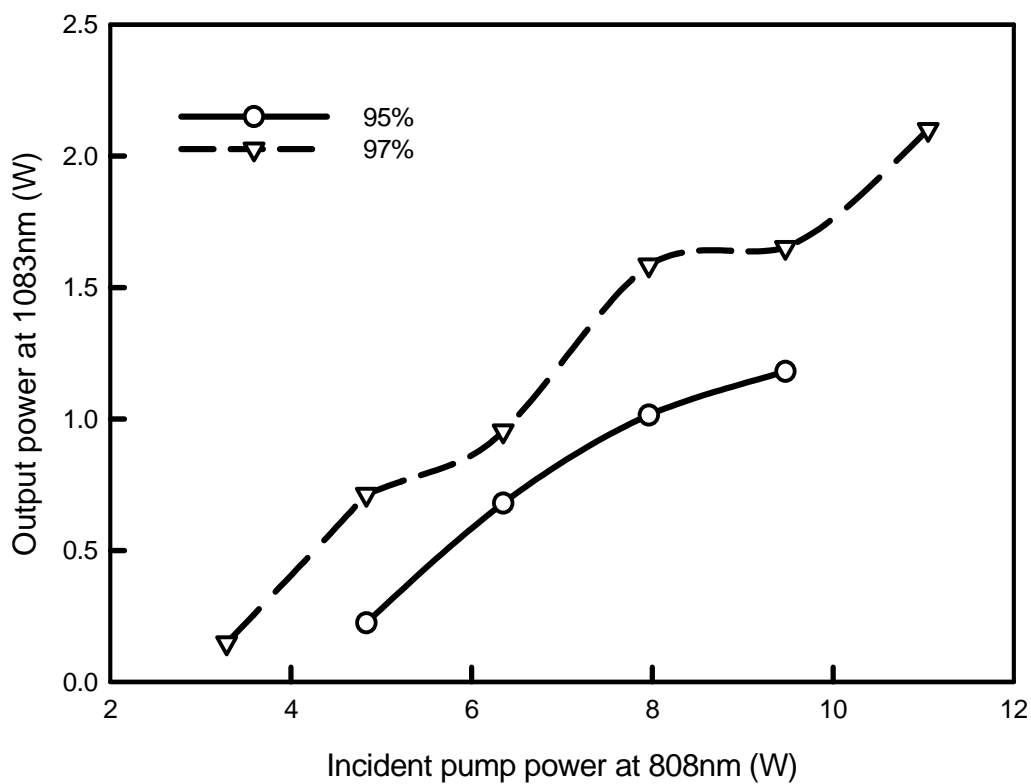


圖 5.11 為脈衝式 1083 nm 雷射的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖，其用 B 平面鏡作為輸出鏡

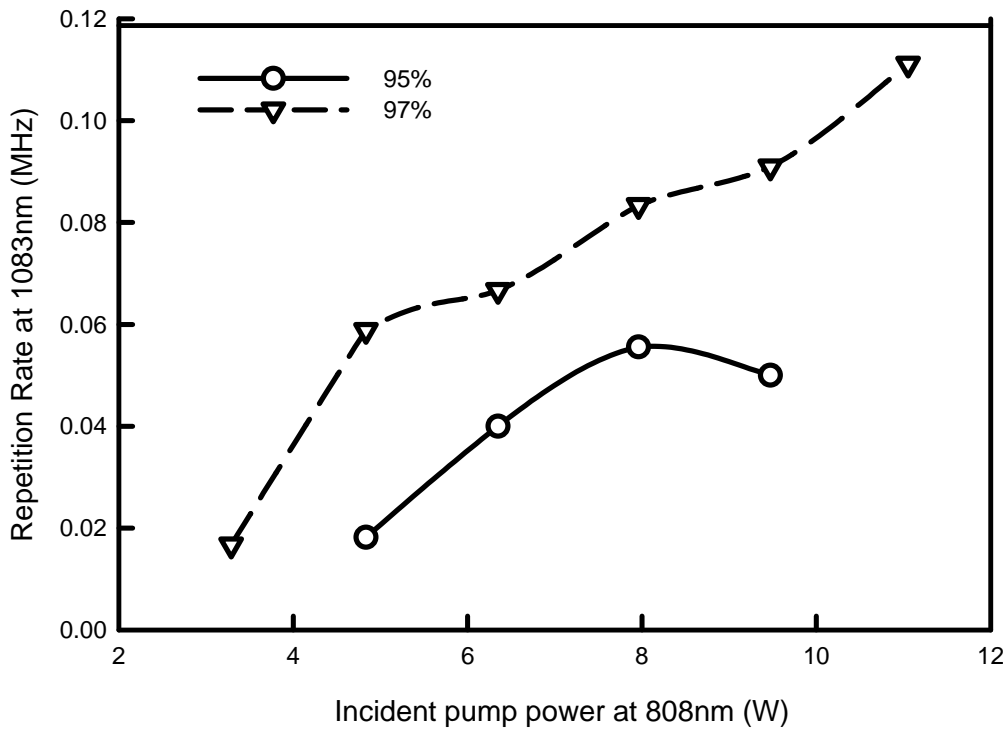


圖 5.12 為脈衝式 1083nm 雷射的重複率對入射激發功率所作的關係圖，其用 B 平面鏡作為輸出鏡

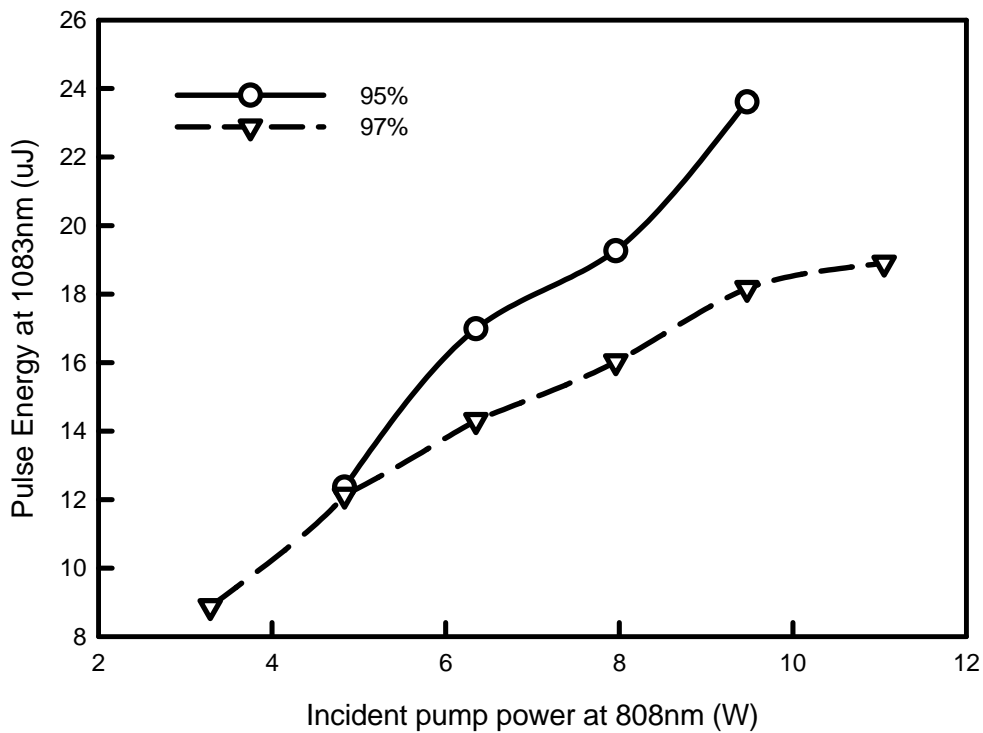


圖 5.13 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖，其用 B 平面鏡作為輸出鏡

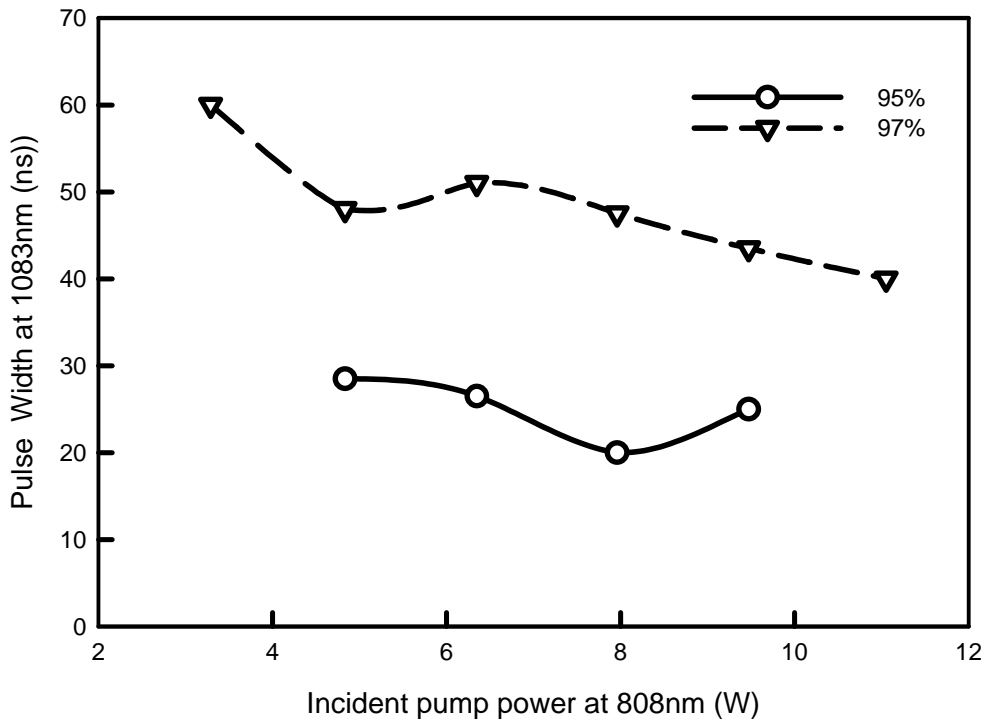


圖 5.14 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間脈衝寬度對入射激發功率所作的關係圖，其用 B 平面鏡為輸出鏡

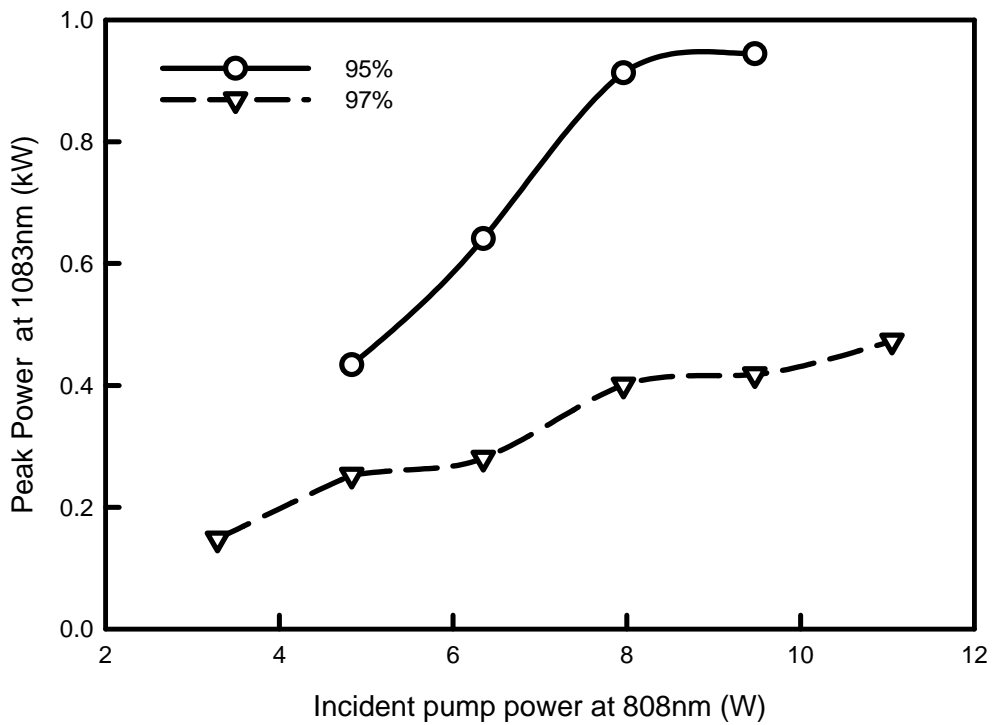


圖 5.15 為脈衝式 1083nm 雷射的瞬間峰值功率對入射激發功率所作的關係圖，其用 B 平面鏡作為輸出鏡

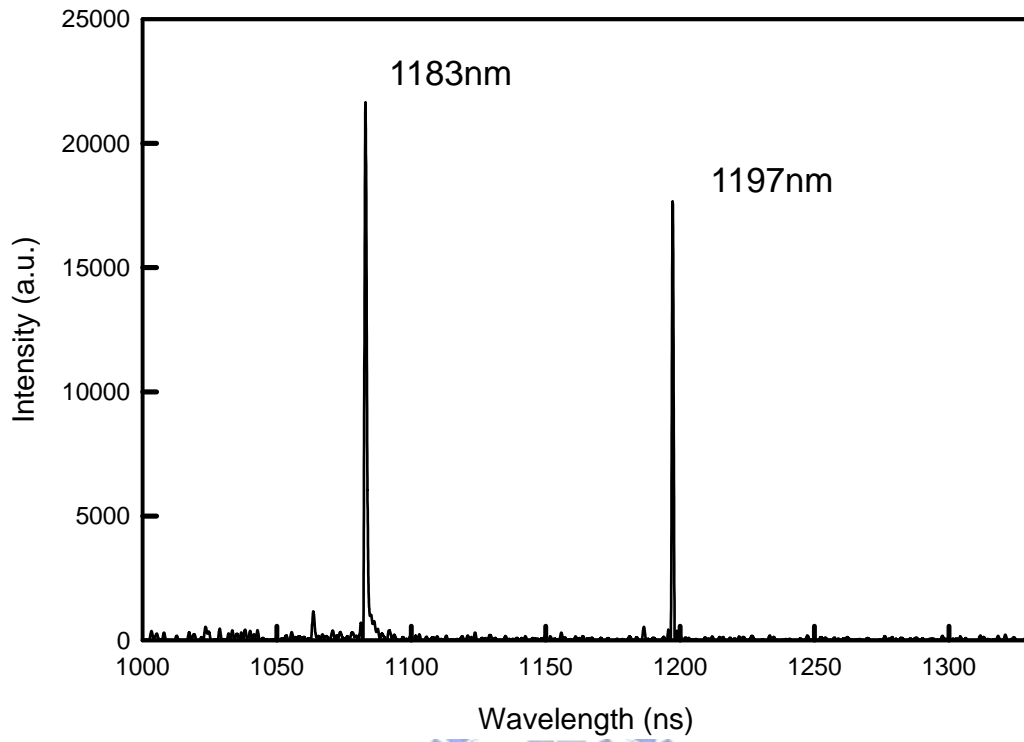


圖 5.16 為 1083 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖

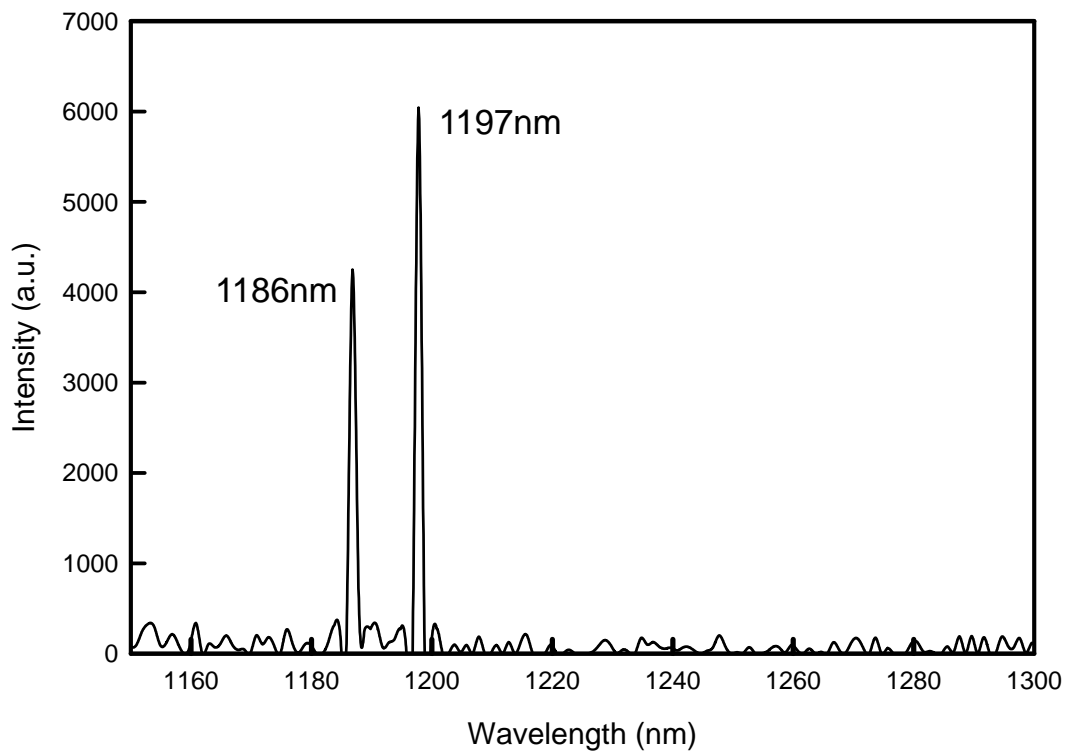


圖 5.17 為 1186 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖



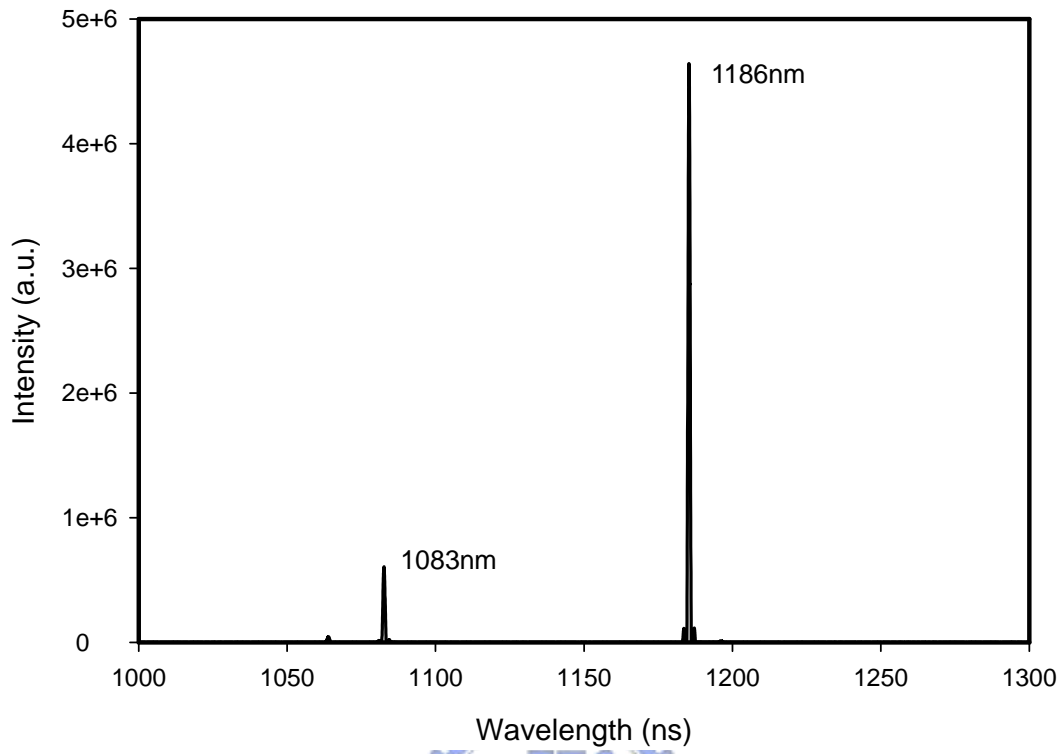


圖 5.18 為 1186 nm 和 1197nm 的雷射光譜圖

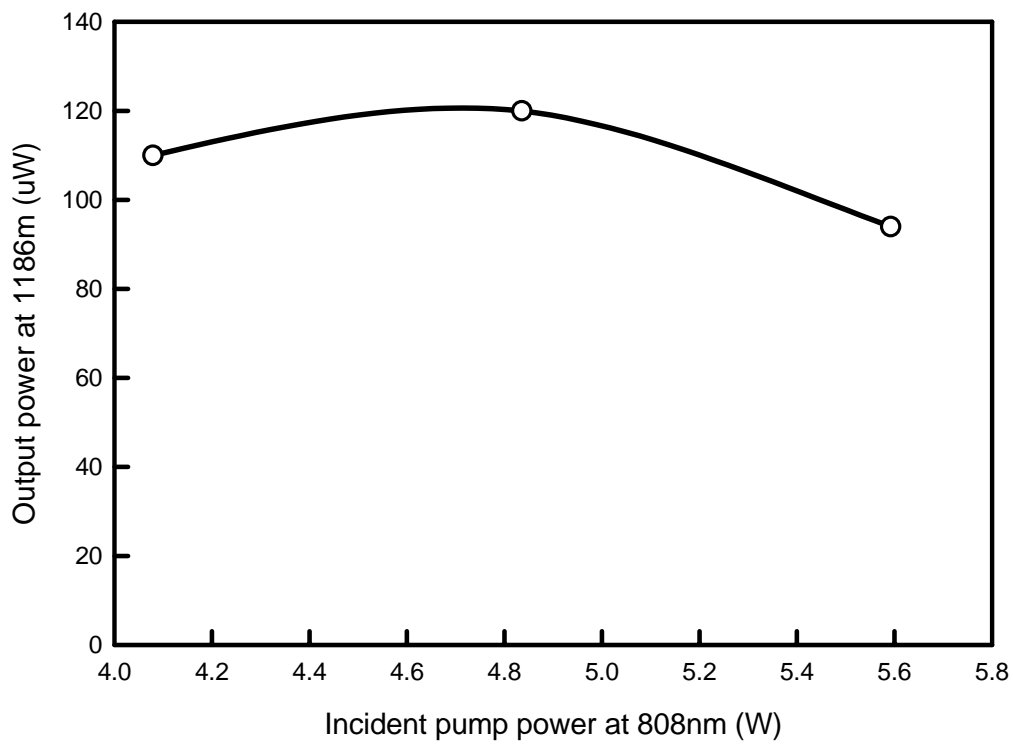


圖 5.19 為 1186nm Stoke 波長及 1083nm 的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖

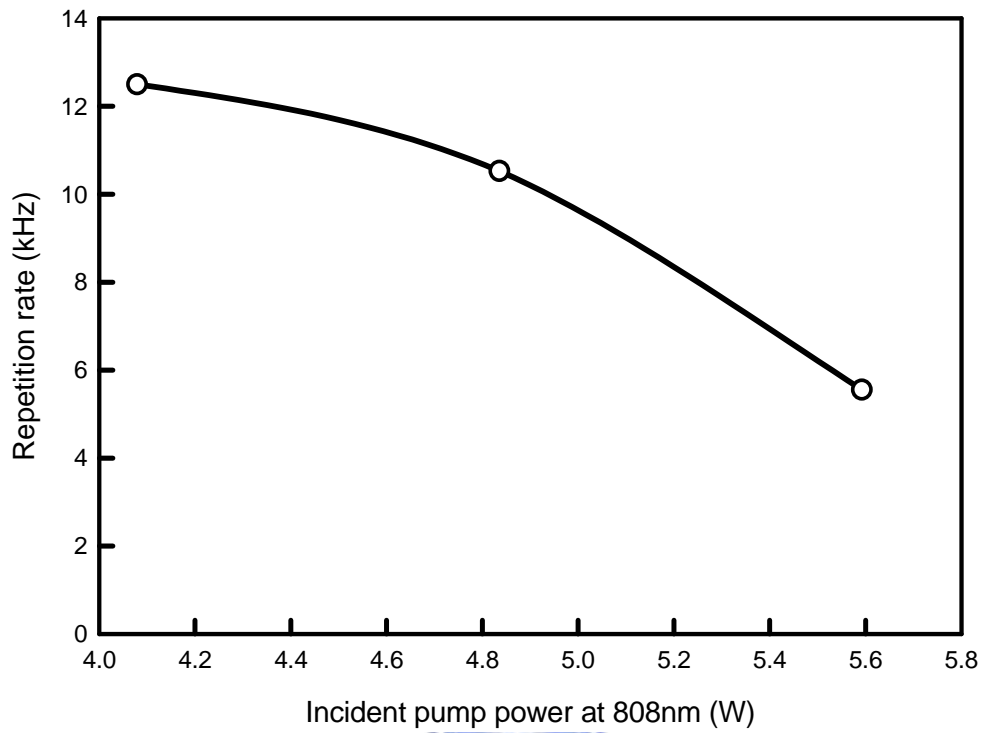


圖 5.20 為 1187nm Stoke 波長的重複率對入射激發功率所作的關係圖

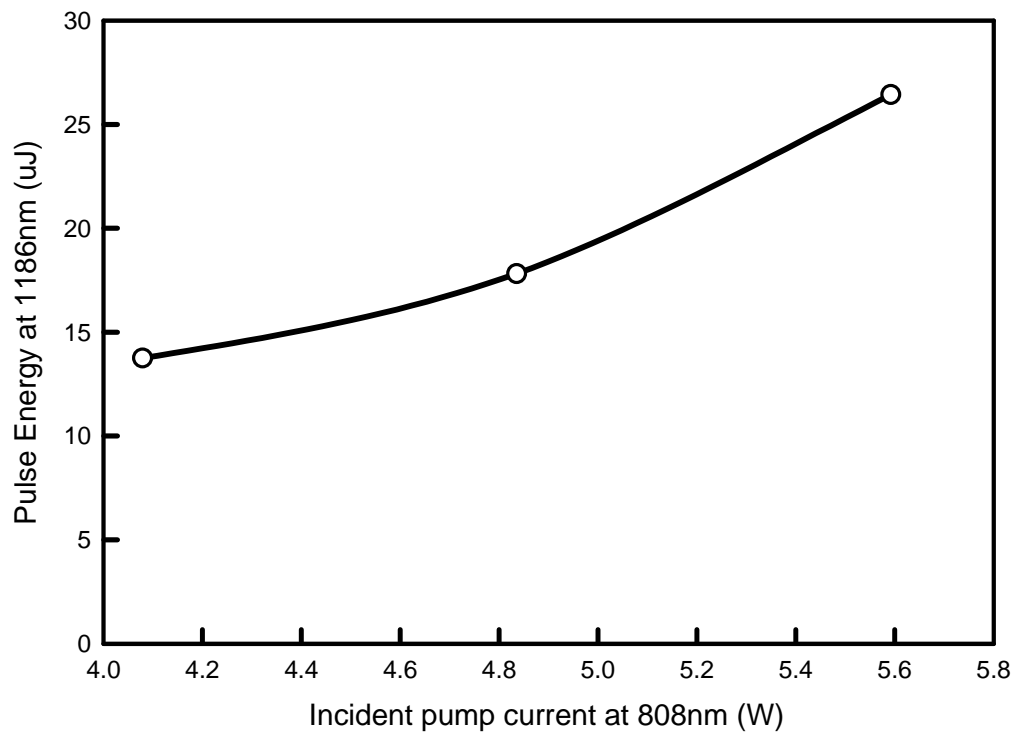


圖 5.21 為 1187nm Stoke 波長及 1083nm 的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖

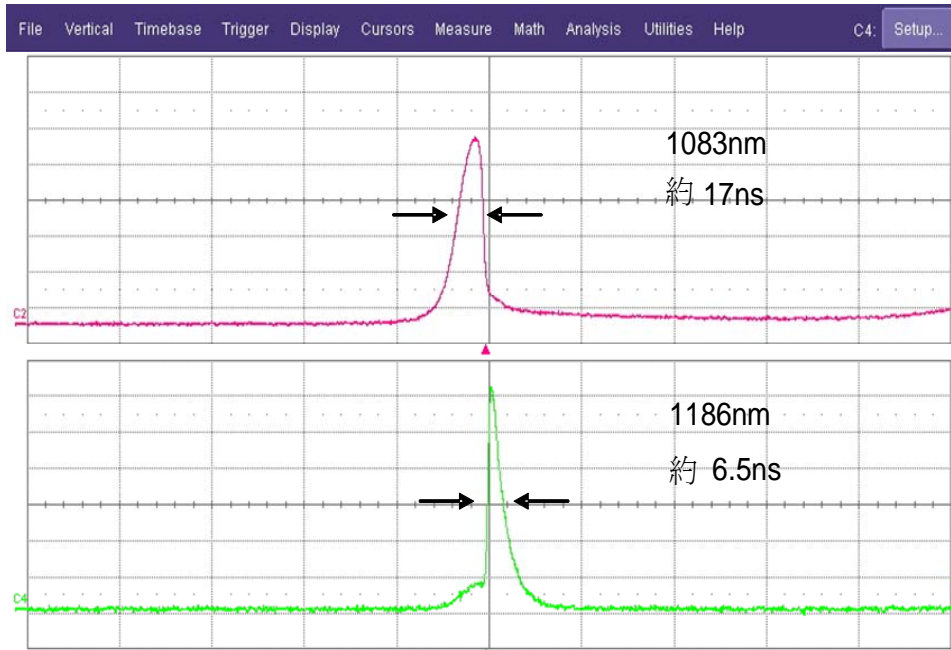


圖 5.22 為波長 1083nm 對 1186nm 的脈衝圖

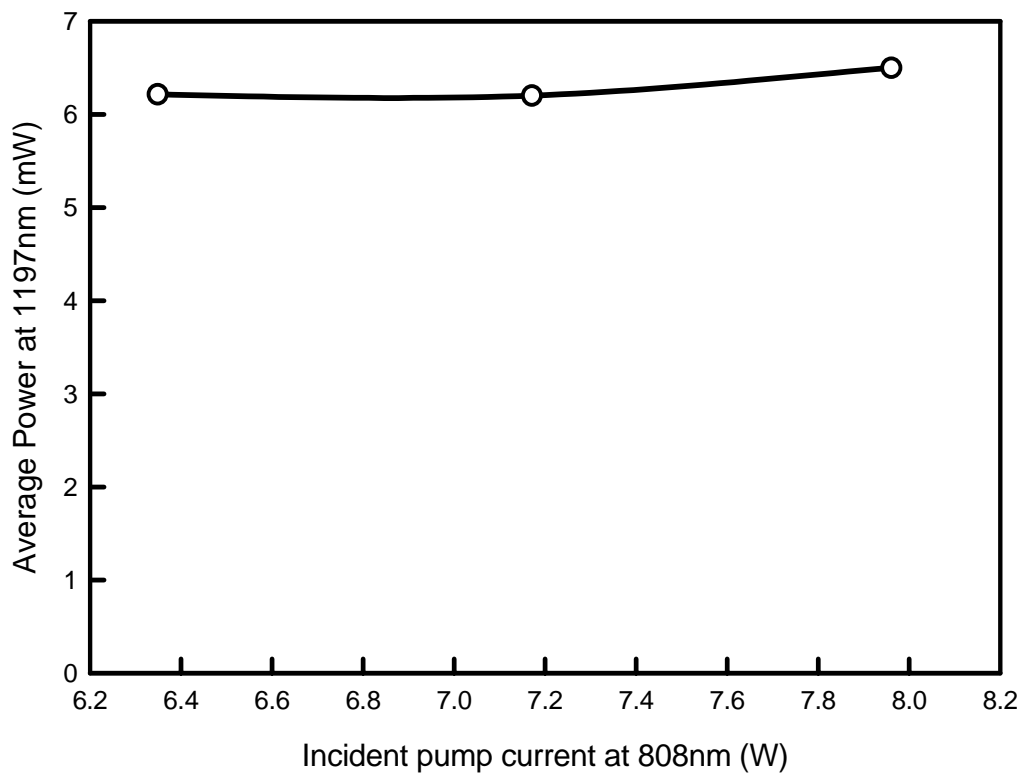


圖 5.23 為 1197nm Stoke 波長及 1083nm 的平均輸出功率對入射激發光源功率的作圖

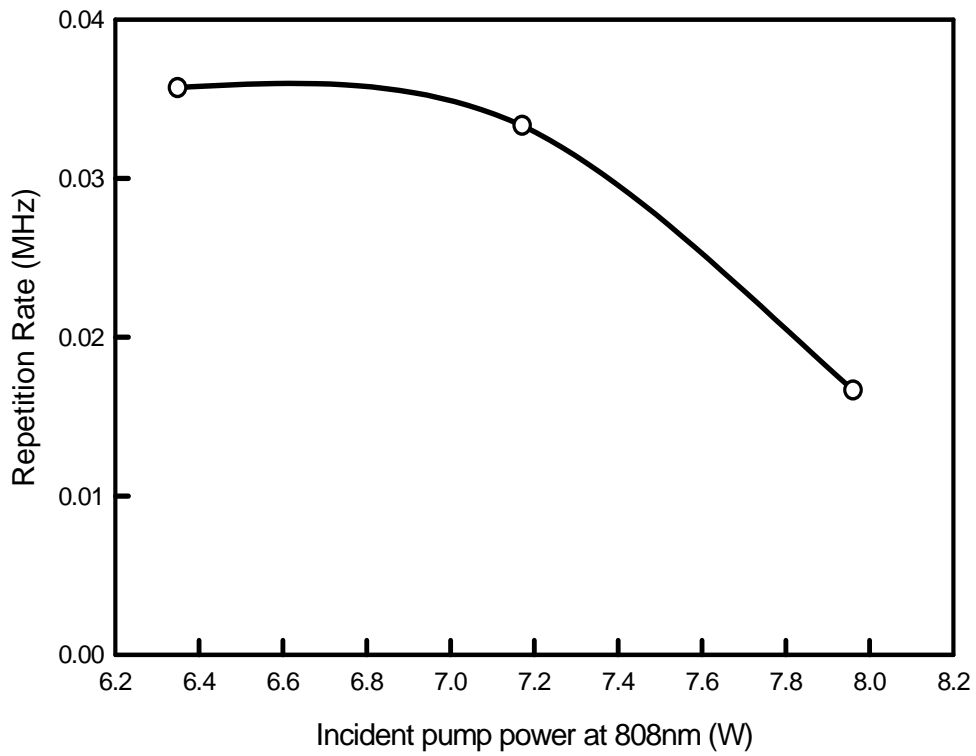


圖 5.24 為 1197nm Stoke 波長的重複率對入射激發功率所作的關係圖

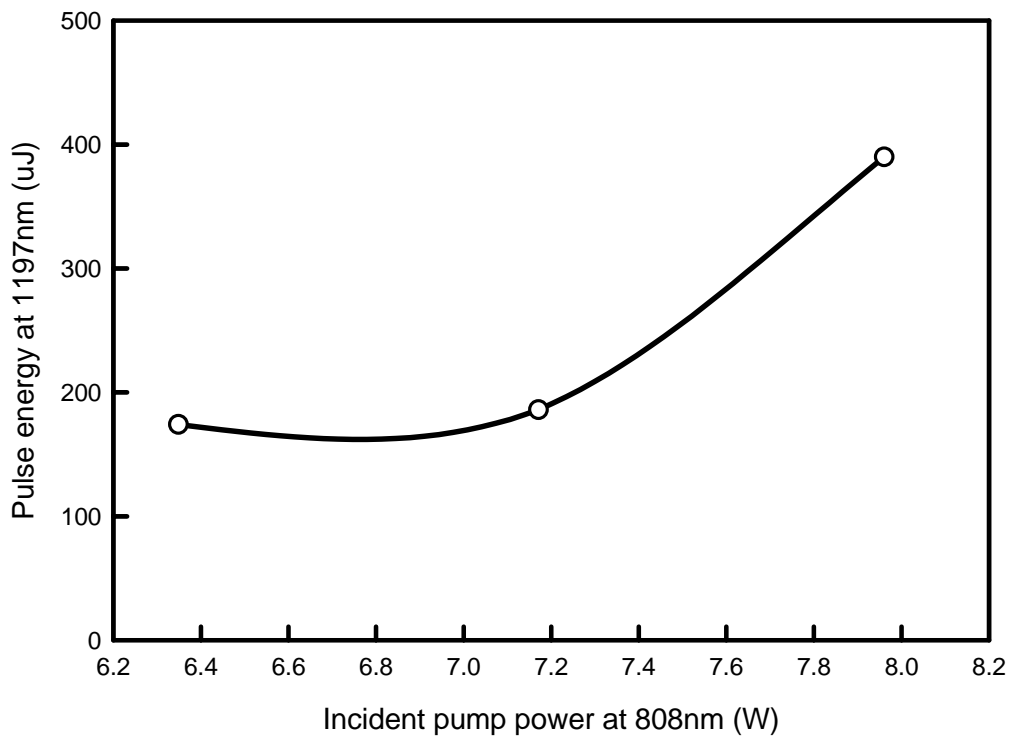
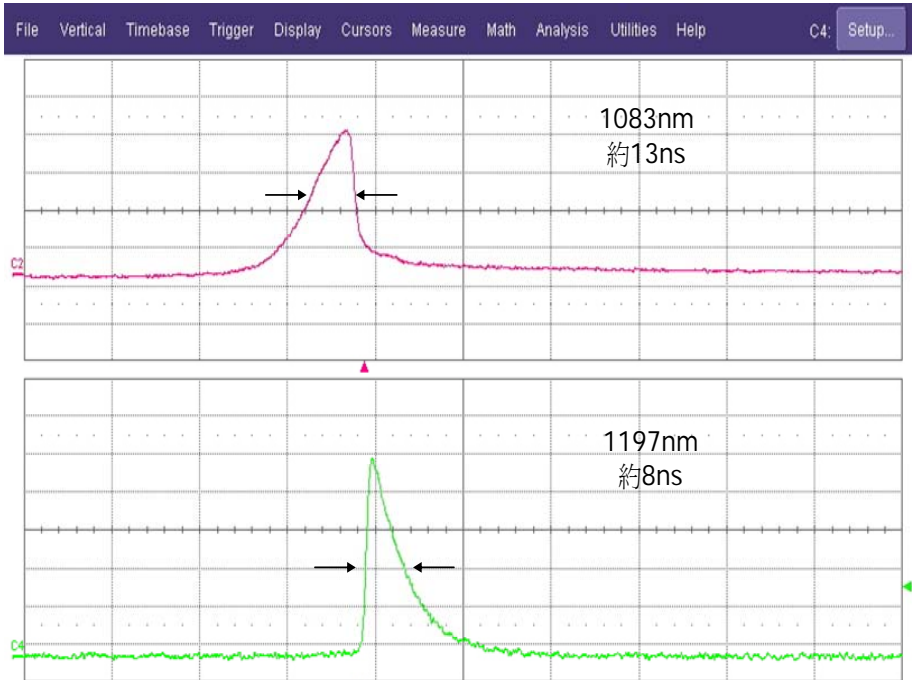


圖 5.25 為 1187nm Stoke 波長及 1083nm 的瞬間脈衝能量對入射激發功率所作的關係圖



## 第六章 結論與未來展望

總結來說，利用摻雜釩酸鹽的晶體作增益介質，可以成功地實踐自轉換受激拉曼雷射。首先，研究以Nd:Gd<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub>晶體與Nd:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>0.4</sub>VO<sub>4</sub>晶體所構成的單端激發式被動Q開關自發性拉曼雷射能產生皮秒等級的脈衝寬度，且當入射激發功率為 2.2W時，可得到平均輸出功率為 180mW且重複率為 66kHz，最大的瞬間脈衝功率大於 3.4kW。再來，討論以Nd:GdVO<sub>4</sub>所構成的可調變性 1083nm雷射，當最大輸入功率為 12.5 W，對A輸出鏡(T=2.7%)可得到 3.4W的輸出功率且其斜率為 30.1 %，並可以利用在共振腔內放etalon來改變其輸出波長。並可成功地利用Nd:GdVO<sub>4</sub>所構成的脈衝式雷射產生 1186nm及 1197nm的自轉換受激拉曼雷射。此外，我們利用在共振腔內加入 1/4 波板，可以有效改變增益介質的有效激發面積，讓輸出脈衝功率可增加 5 倍。

在未來，我們希望能利用在共振腔內加入 1/4 波板之方法，讓一些有較大激發幅射面積之增益介質也能成功地產生拉曼訊號或是讓其拉曼雷射的輸出變的更強。

## 參考文獻

1. A.S. Eremenko, S. N. Karpukhin, and A. I. Stepanov, Sov. J.Quantum Electron. 10, 113 (1980).
2. E. O.Ammann and C. D. Decker, J. Appl. Phys. 48, 1973(1977).
3. A. S. Grabtachikov, A. N. Kuzmin, V. A. Lisinetskii, V.A. Orlovich, G. I. Ryabtesv, and A. A. Demidovich, Appl. Phys. Lett. 75, 3742 (1999).
4. J. Findeisen, H. J. Eichler, and A. A. Kaminskii, IEEE J.Quantum Electron. 35, 173 (1999).
5. 王奎雄, 非線性光學(1988).
6. Hecht, Optics Third Edition
7. John J.Degnan. IEEE J.QuantumElectron. **25**,No2,214(1989).
8. Y.F. Chen, Opt. Lett. 29,1251,(2004).
9. J. Liu, X. Meng, Z. Shao, M. Jiang, B. Ozygus, A. Ding, and H. Weber, Appl. Phys. Lett. 83, 1289(2003).
10. J. Liu, Z. Wang, X. Meng, Z. Shao, M. Jiang, B. Ozygus, A. Ding, and H. Weber, Appl. Phys. Lett. 83, 1289(2003).