

國立交通大學

理學院應用科技學程

碩士論文

利用緊貼組合 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 晶體
實現高效率雙波長 946 nm 及 1064 nm 雷射

Development of highly efficient dual-wavelength laser at 946 nm
and 1064 nm with compactly combined Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals

研究生：張專慶

指導教授：陳永富 教授

中華民國 一百零一 年 十二月

利用緊貼組合 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 晶體
實現高效率雙波長 946 nm 及 1064 nm 雷射

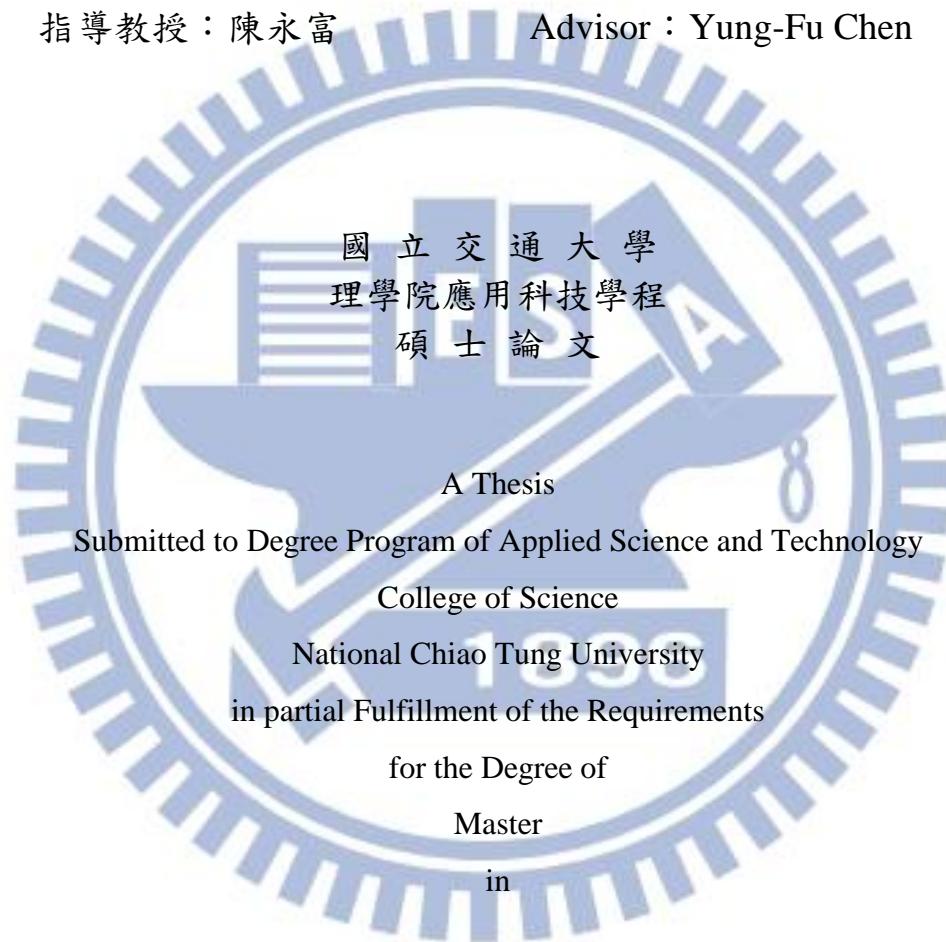
Development of highly efficient dual-wavelength laser at 946 nm
and 1064 nm with compactly combined Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals

研究生：張專慶

Student : Chuan-Ching Chang

指導教授：陳永富

Advisor : Yung-Fu Chen



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

December 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年十二月

利用緊貼組合 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 晶體
實現高效率雙波長 946 nm 及 1064 nm 雷射

Development of highly efficient dual-wavelength laser at 946 nm
and 1064 nm with compactly combined Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals

研究生：張專慶

Student：Chuan-Ching Chang

指導教授：陳永富

Advisor：Yung-Fu Chen



摘要

本論文在闡述 946 nm 與 1064 nm 雙波長雷射之相關研究。我們藉由 Nd:YAG 與 Nd:YVO₄ 兩晶體特性、準三能階與四能階、倍頻轉換技術的探討為基礎，設計出雙晶體同軸雙共振腔的雙波長雷射架構。有效的再利用激發光源波長 808 nm 雷射的殘餘能量。並以改變共振腔長度與輸出耦合鏡的方式研究其光學轉換效率及兩波長雷射的穩定性與出光比率。成功建立了穩定且光學轉換效率高(激發光功率 20 W 時，可以得到總輸出功率 6.6 W，換算光學轉換效率為 33%)的雙波長雷射架構，並期待能提供雙波長雷射在醫療、民生、工業或科學上的應用。

Development of highly efficient dual-wavelength laser at 946 nm
and 1064 nm with compactly combined Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals

Student : Chuan-Ching Chang

Advisor : Yung-Fu Chen

Degree Program of Applied Science and Technology
National Chiao Tung University

Abstract

The thesis elaborates the development of highly efficient simultaneous dual-wavelength laser at 946 nm and 1064 nm. The research is based on the knowledge of Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals' characteristics, quasi-three level and four level transitions, and second harmonic generation technology. We successfully established a stable dual-wavelength laser with a collinear dual-cavity configuration. The combined-laser-crystal scheme re-uses the residual pump light and enhances the efficiency. The output power ratio between the 946-nm and 1064-nm emissions can be flexibly adjusted by varying the separate distance between the two output couplers. At an incident pump power of 20 W, the total output power is up to 6.6 W and the optical-to-optical conversion efficiency is 33%. We look forward to provide the laser in the application of medicine, living, industry and science.

誌謝

從來沒想過，在我人生已邁入不惑之年，可以踏入固態雷射這樣一個既有趣又迷人的領域。當初只抱著來交大在職專班學一點東西充實自己的想法，在陳永富老師的引領下，像一個新生的嬰兒，對實驗室裡的一切感到好奇與些許的惶恐，隨著伸手的接觸，一點一滴的親身體驗，慢慢地發覺這是一個多麼有趣的世界。更想往前探索，似乎有著美好的事物正吸引著我。

非常感謝陳永富老師悉心的指導，他身上總是散發一股迷人的學者風範，即使在一句不經意的言談中，都隱含著值得省思與學習的人生道理。亦師亦友的感覺，讓我的學習少了那麼一點壓力卻多了一些樂趣。

當然也不能忘了我的指導小老師卓俊佑，還是習慣叫他小佑。由於有小佑的帶領，讓我漸漸熟悉那看似積木般排列組合的各種雷射架構，並解決我學習上的許多問題。他的細心與耐心，常常讓實驗中身體漸感疲憊的我一刻都不敢怠惰，覺得還是要打起精神來。沒有小佑的協助，這篇論文是不可能完成的，真的誠摯的感恩。

雖然來實驗室才短短不到半年，實驗室裡的學長學姊名字我大部分都還叫不出來，我還是要感謝它們。因為它們創造了實驗室快樂、充實又進步的氛圍，讓我喜歡來做實驗，每次都能在滿心歡喜開心的心情下，伴著月光回家。

最後，感謝家人一路的支持與鼓勵，你們是我前進的動力。如果完成這篇論文也算我那麼一點小小的成就，很想趕快擁抱你們，分享這份喜悅。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖表目錄.....	v
第一章 簡介.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 論文架構.....	2
第二章 Nd:YAG 及 Nd:YVO ₄ 兩晶體特性之比較.....	3
2.1 導論.....	3
2.2 Nd:YAG 及 Nd:YVO ₄ 兩晶體之吸收光譜分析.....	6
2.4 Nd:YAG 及 Nd:YVO ₄ 兩晶體之螢光光譜分析.....	15
第三章 Nd:YAG 之準三能階雷射.....	20
3.1 導論.....	20
3.2 波長 946nm 之 CW 雷射特性.....	22
3.3 波長 946nm 之脈衝雷射特性.....	27
3.4 倍頻藍光雷射之特性.....	31
第四章 Nd:YVO ₄ 之四能階雷射.....	34
4.1 導論.....	34
4.2 波長 1064nm 及倍頻轉換 532 nm 綠光雷射之特性.....	36
第五章 雙波長雷射.....	44
5.1 導論.....	44
5.2 實驗架構.....	44
5.3 實驗結果與討論.....	48
第六章 結論與展望.....	59
參考文獻.....	61

圖表目錄

表 2.1.1	Nd:YAG 及 Nd:YVO ₄ 兩晶體之相關特性比較.....	5
圖 2.2.1	不同長度 Nd:YAG 晶體在 808 nm 附近吸收率之比較圖.....	8
圖 2.2.2	摻雜釹離子濃度 0.2 at.% 的 Nd:YVO ₄ 晶體吸收光譜圖.....	9
圖 2.2.3	摻雜釹離子濃度 0.4 at.% 的 Nd:YVO ₄ 晶體吸收光譜圖.....	10
圖 2.2.4	摻雜釹離子濃度 0.6 at.% 的 Nd:YVO ₄ 晶體吸收光譜圖.....	11
圖 2.2.5	摻雜釹離子濃度 0.8% 的 Nd:YVO ₄ 晶體吸收光譜圖.....	12
圖 2.2.6	Nd:YVO ₄ 晶體濃度與晶體最佳長度的關係圖.....	13
圖 2.2.7	摻釹離子濃度 0.2 at. % 的 Nd:YVO ₄ 晶體之 π 偏振與 σ 偏振吸收光譜比較圖.....	14
圖 2.3.1	摻雜釹離子晶體的簡化能級結構圖.....	16
圖 2.3.2	Nd:YAG 螢光譜線圖.....	17
圖 2.3.3	Nd:YVO ₄ 晶體之螢光光譜圖.....	18
圖 2.3.4	Nd:YVO ₄ 晶體在主峰 1064 nm 附近之 π 偏振與 σ 偏振螢光譜線比較圖.....	19
圖 3.1.1	準三能階雷射的簡化示意圖.....	21
圖 3.2.1	波長 946 nm 雷射的架構圖.....	24
圖 3.2.2	CW 雷射輸出耦合鏡反射率大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖.....	25
圖 3.2.3	CW 雷射激發光束直徑大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖.....	26
圖 3.3.1	脈衝光激發雷射輸出耦合鏡反射率大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖.....	28
圖 3.3.2	脈衝激發光束直徑大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖.....	29
圖 3.3.3	脈衝激發光束直徑大小與輸出功率的關係圖.....	30

圖 3.4.1	倍頻藍光雷射之架構圖.....	32
圖 3.4.2	脈衝光與連續光波激發 Nd:YAG 晶體之藍光雷射輸出功率比較圖.....	33
圖 4.1.1	四能階雷射的簡化示意圖.....	35
圖 4.2.1	波長 1064 nm 雷射架構圖.....	38
圖 4.2.2	波長 1064 nm 雷射輸出功率圖.....	39
圖 4.2.3	倍頻綠光雷射之架構圖.....	40
圖 4.2.4	倍頻綠光雷射輸出功率圖.....	41
圖 4.2.5	激發光束直徑大小對波長 532 nm 綠光雷射輸出之影響圖..	42
圖 4.2.6	激發光束直徑大小 500 μm 與 100 μm 之綠光雷射脈衝波形比較圖.....	43
圖 5.2.1	雙波長實驗架構圖.....	47
圖 5.2.2	最簡化雙波長雷射架構圖.....	48
圖 5.3.1	平面耦合輸出鏡 OC2 第一面鍍膜為對波長 1064 nm 反射率 R=10% 之雷射輸出功率圖.....	51
圖 5.3.2	平面耦合輸出鏡 OC2 第一面鍍膜為對波長 1064 nm 反射率 R=20% 之雷射輸出功率圖.....	52
圖 5.3.3	平面耦合輸出鏡 OC2 第一面鍍膜為對波長 1064 nm 反射率 R=30% 之雷射輸出功率圖.....	53
圖 5.3.4	平面耦合輸出鏡 OC2 第一面鍍上對波長 1064 nm 不同反射率的鍍膜與雷射輸出功率關係圖.....	54
圖 5.3.5	平面輸出耦合鏡鍍上對波長 1064 nm 高穿透率鍍膜(T>99%)之雙波長雷射輸出功率圖.....	55
圖 5.3.6	平面輸出耦合鏡的鍍上對波長 1064 nm 部分反射率 R=10% 鍍膜之雙波長雷射輸出功率圖.....	56

第一章 簡介

1.1 研究動機

雷射二極體激發固態雷射(Diode Pump Solid-state Laser)簡稱 DPSSL，可說是固態雷射技術中的一大突破，因為它具有轉換效率高、光束品質好、器件結構緊湊、體積小、壽命長、可靠性高、結構牢固、輸出能量大、峰值功率高、增益介質覆蓋的波段廣等特性[1]，與非線性光學頻率轉換技術相結合，可實現多種波段的雷射光產生，已成為當前雷射激光技術研究發展的主要方向，也進一步推動了各領域雷射的發展。而緊實又有效率的雙波長雷射已吸引在軍事、民生工業、醫學及科學應用上的注意，例如：雷射光譜學(Laser Spectroscopy)、全像技術(Holography)、雷射雷達光學定向和測距(Lidar)、非線性光學混頻器(Nonlinear Optical Mixers)及醫療儀器(Medical Instrumentation).....等[2-9]，都應用到雙波長雷射。因此，希望藉由我們對雙波長雷射的研究，能創造雷射領域的新里程碑。

雙波長雷射不乏國內外的研究論文，其最主要有兩個方向：即同一能階[5]或不同能階的雙波長雷射[6-11]。而以摻釹離子之晶體作為增益介質的雙波長雷射中，又以輸出波長為 $1.06\ \mu\text{m}$ 與 $1.3\ \mu\text{m}$ (兩個四能階轉換)，或輸出波長為 $0.9\ \mu\text{m}$ 與 $1.06\ \mu\text{m}$ (同時具有準三能階與四能階轉換)的雙波長雷射為主。在接下來的文章中，我們要研究的是後者，即不同能階類型的雙波長雷射，因為它們倍頻轉換之綠光及藍光是目前應用最廣的雷射。然而，欲使此兩波長雷射同時出光，其困難點在於準三能階系統存在激發閾值較高，且有再吸收耗損與嚴重熱效應問題，使得 $0.9\ \mu\text{m}$ 雷射的出光效率遠低於 $1.06\ \mu\text{m}$ 雷射，且有兩個波長互相競爭的情

形，造成此雙波長雷射同時出光的不穩定性。另外，受限於準三能階雷射特性，雷射晶體長度無法太長，導致以往的雙波長雷射光學轉換效率不高(低於 20%)，且實驗架構多半很複雜。

在我們的實驗架構中，我們以雙晶體做為增益介質搭配同軸雙共振腔的架構，成功地克服了以上的問題。以 Nd:YAG 晶體做為波長 946 nm 雷射的增益介質，晶體長度受限於準三能階熱效應與再吸收耗損的影響，而有最佳長度僅 2 mm。搭配 Nd:YVO₄ 晶體做為波長 1064 nm 雷射的增益介質，因為其準三能階系統對應到不同的波長(914 nm)，可以有效避免再吸收的現象，並有激發能量可再利用、節省能源的極佳優勢。另外，此組合晶體總長度僅 8 mm，達到體積小，效率高、相對架構簡單的目的，且雙波長雷射出光比率及穩定度可以藉由共振腔調整。

因此在本文章中，我們從晶體的特性開始，有系統地分析 946 nm、1064 nm 及非線性倍頻轉換 473 nm 藍光與 532 nm 綠光雷射技術，希望藉由一系列的研究，增加雙波長雷射同時出光的穩定性，以期建立一套完整而最佳化的系統來表現雙波長雷射。

1.2 論文架構

本論文第二章：從為何我們選擇 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 兩晶體做為增益介質開始談起，分析摻雜 Nd³⁺ 兩晶體的特性。第三章：討論準三能階雷射，及連續波與脈衝波激發波長 946 nm 雷射之比較，以及倍頻藍光雷射的特性。第四章：討論四能階雷射，波長 1064 nm 與倍頻綠光的特性。第五章：研究雙波長雷射，包含實驗架構，實驗的結果與討論。第六章：結論與未來展望。

第二章 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 兩晶體特性之比較

2.1 導論

我們選擇 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 兩晶體分別做為 946 nm 與 1064 nm 雙波長雷射的增益介質。此兩晶體為常見以釹離子摻雜之增益介質，由於具有良好的熱、物理極光學性質，因而被廣泛地應用於各種固態雷射系統中。雖然兩者具有相同的活性離子，但因位於不同的主材中，活性離子所承受之晶格場不同，使得晶體的特性有所差異。

表 2.1.1 是文獻中 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 兩晶體之相關特性比較 [1][12-13][18-22]。表中顯示 YAG 屬於立方晶系，較高的摻雜濃度雖可提高增益，卻容易造成晶格變形。因此，釹離子一般摻雜濃度在 0.9 at. % 至 1.1 at. %。而 YVO₄ 屬於四方晶系，則較無此方面的問題，其釹離子摻雜濃度可達 3 at. %，固具有較高的雷射增益。然而，並非離子濃度愈高愈好。當釹離子濃度愈高時，吸收率愈高，吸收深度愈短，激發光源大部分再增益介質很淺的地方被吸收，後半段重複吸收耗損會大於增益，使得雷射輸出功率降低。

此兩晶體均可工作於四能階與準三能階的模式。在四能階的模式中，皆具有良好的波長 1064 nm 的雷射輸出。在準三能階的模式中，Nd:YAG 與 Nd:YVO₄ 分別輸出波長 946 nm 與 914 nm 的雷射。若經倍頻轉換技術，Nd:YAG 可產生 473 nm、Nd:YVO₄ 可產生 457 nm 的藍光輸出。由於 Nd:YVO₄ 的準三能階雷射其下能階與基態能階差只有 0.05 eV，再加上導熱性較差，一旦溫度升高，將使在基態能階的電子躍遷到下能階的機率大增，造成重複吸收損耗，使得雷射出光困難。而 Nd:YAG 的準三能階雷射之下能階與基態能階差為 Nd:YVO₄ 的二倍，導熱性為

三倍，所以比較之下，Nd:YAG 受溫度的影響稍為較小。

我們的雙波長雷射，是以 Nd:YAG 晶體做為波長 946 nm 雷射的增益介質，以 Nd:YVO₄ 晶體做為波長 1064 nm 的增益介質。並將波長 946 nm 雷射的共振腔置於內，而波長 1064 nm 的共振腔包於其外的同軸共振腔架構。因為此兩晶體在 808 nm 附近皆有很好的吸收率，其中 Nd:YVO₄ 的吸收光譜比 Nd:YAG 為寬，並且存在著很強的寬吸收帶，較不尖銳，且吸收係數高，為 Nd:YAG 晶體的三倍，受激發射截面積大（比 Nd:YAG 大 5 倍）[1]。因此，可利用 Nd:YAG 未吸收的波長 808 nm 做為 Nd:YVO₄ 的激發光源，達到能量再利用的目的。



表 2.1.1 : Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 兩晶體之相關特性比較

晶體	Nd:YAG	Nd:YVO ₄
中文名稱	摻釹鈮鋁石榴石	摻釹釩酸鈮
英文名稱	Neodymium-doped yttrium aluminum garnet	Neodymium-doped yttrium vanadate
晶體結構	立方晶係	四方晶係
摻雜濃度	0.9~1.1 at. %	0.1~3 at. %
熔點	1970 °C	1810 °C
密度	4.56 g/cm ³	4.22 g/cm ³
莫氏硬度	8.5	~5
熱傳導率	14 W/m-K@20°C 10.5W/m-K@100°C	⊥ C : 5.10W/m-K C : 5.23W/m-K
折射率	1.82 @ 1.06 μm	n _o =1.96 , n _e =2.16@1.06 μm
雷射中心波長	946 nm , 1064 nm , 1319 nm	914 nm , 1064 nm , 1342 nm
吸收係數	10 cm ⁻¹ @807.5 nm , 1 at. % doping	31.4 cm ⁻¹ (π) , 10.5 cm ⁻¹ (σ) @808 nm , 1.1at. % doping
受激輻射 截面積	3.7×10 ⁻²⁰ cm ² @946 nm 2.8×10 ⁻¹⁹ cm ² @1064 nm	2.5×10 ⁻¹⁹ cm ² @914 nm 2.5×10 ⁻¹⁸ cm ² @1064 nm
自發輻射 螢光壽命	230 μs	90 μs

2.2 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 兩晶體之吸收光譜分析

我們選用摻雜釹離子濃度皆為 1.1 at. %，長度分別為 15 mm 與 5 mm 的兩種 Nd:YAG 晶體作吸收光譜的量測與分析比較。其兩表面鍍膜皆為對波長 946 nm 與 473 nm 的抗反射鍍膜(AR, R<0.25%)及對波長 808 nm 高穿透率鍍膜(HT, T>95%)。所得的結果如圖 2.2.1，很顯然地，長度 15mm 的 Nd:YAG 晶體在 808 nm 吸收率較好，吸收率達到 95%，其譜線寬度 (Absorption Bandwidth) 亦較寬。長度 5 mm 的晶體吸收率僅 58.4%。然而，在準三能階雷射中，晶體的長度將增加熱能的累積，並造成嚴重的再吸收耗損，反而不利於波長 946 nm 雷射的激發。而且，如前所述在雙波長的實驗中，未吸收的部分可做為 Nd:YVO₄ 的激發光源。因此，我們並不需要長度太長的晶體做為雙波長雷射中波長 946 nm 的增益介質。

接下來，我們選取四種不同摻雜釹離子濃度的 Nd:YVO₄ 晶體做吸收光譜的量測，晶體截面大小 3×3 mm²，長度 6 mm，兩表面鍍膜皆為對波長 1064 nm 的抗反射鍍膜(AR, R<0.25%)以及對波長 808 nm 的高穿透鍍膜(HT, T>97%)，其摻雜濃度分別為 0.2、0.4、0.6 及 0.8 at. %。所得數據如圖 2.2.2、圖 2.2.3、圖 2.2.4、圖 2.2.5，比較此四圖可以看出摻雜釹離子濃度較高的晶體，其相對在 808 nm 附近的吸收峰值較高，且吸收寬帶亦較寬。摻雜濃度 0.2 at.% 的晶體在 808 nm 的吸收率已達到 59.1%，峰值在 805 nm 更達到 81.67 %。

另外，晶體的吸收率 R 可表示為：

$$R = 1 - e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

其中， α 為晶體吸收係數， L 為晶體長度。我們由吸收率的量測，可以

反推出此四個晶體在峰值(805 nm)的吸收係數分別為： $\alpha_{0.2\%} = 2.83 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha_{0.4\%} = 4.26 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha_{0.6\%} = 5.66 \text{ cm}^{-1}$ 及 $\alpha_{0.8\%} = 6.11 \text{ cm}^{-1}$ 。若我們將雷射晶體最佳的吸收率訂在 90%，則由以上所得的吸收係數可以推導出各濃度晶體的最適合長度分別為： $L_{0.2\%} = 8.136 \text{ mm}$ 、 $L_{0.4\%} = 5.405 \text{ mm}$ 、 $L_{0.6\%} = 4.068 \text{ mm}$ 、 $L_{0.8\%} = 3.483 \text{ mm}$ ，由此我們可以得到 Nd:YVO₄ 晶體吸收率 90% 時，晶體濃度與晶體最佳長度的關係圖，如圖 2.2.6。

而 Nd:YVO₄ 晶體也有很強的偏振吸收特性，是不可以忽略的。我們以摻釹離子濃度 0.2 at. % 的 Nd:YVO₄ 晶體作不同偏振方向的吸收光譜的量測，所得的結果如圖 2.2.7。由圖中可以看出，Nd:YVO₄ 晶體在波長 808 nm 附近 π 偏振與 σ 偏振的比較。明顯的 π 偏振在波長 808 nm 附近有較高的吸收峰值與較寬的譜線帶。

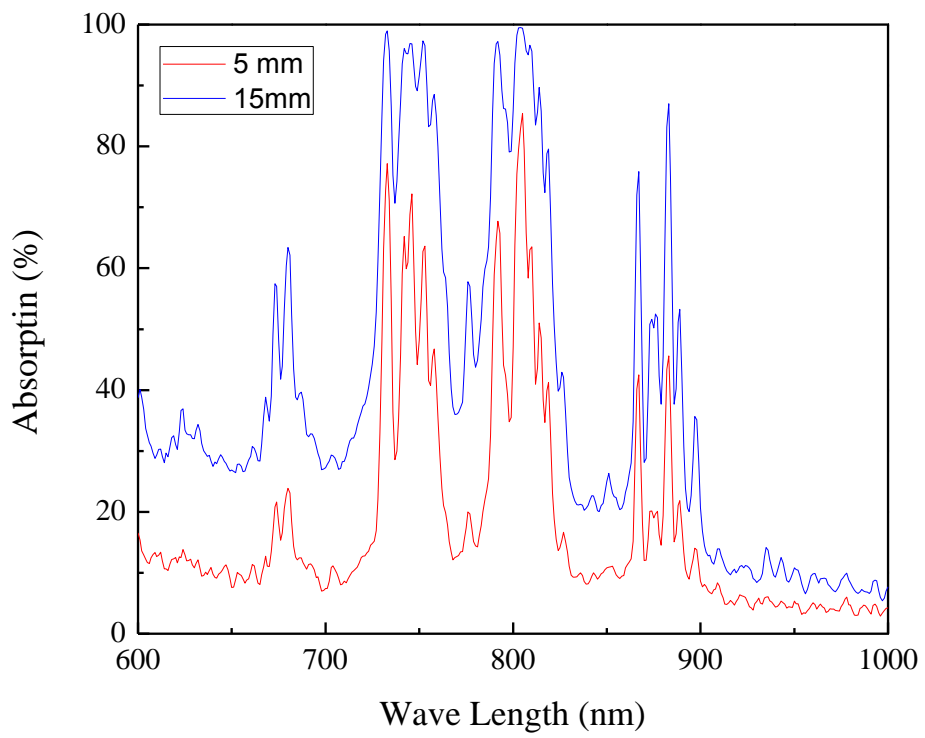


圖 2.2.1：不同長度 Nd:YAG 晶體在 808 nm 附近吸收率之比較圖

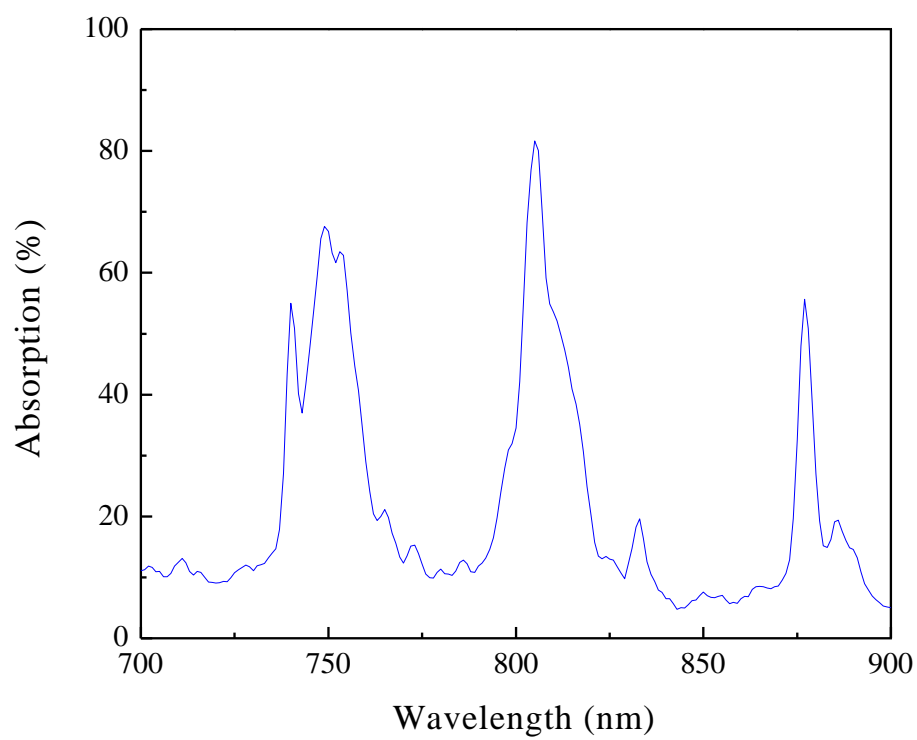


圖 2.2.2：摻雜釹離子濃度 0.2 at.% 的 Nd:YVO₄ 晶體吸收光譜圖

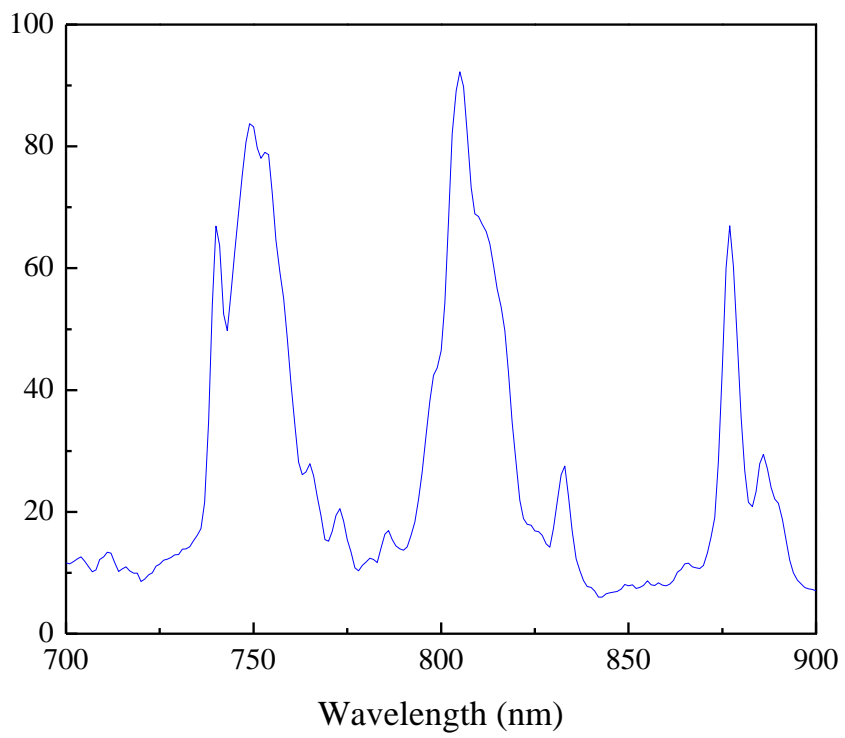


圖 2.2.3：摻雜釹離子濃度 0.4 at.% 的 Nd:YVO₄ 晶體吸收光譜圖

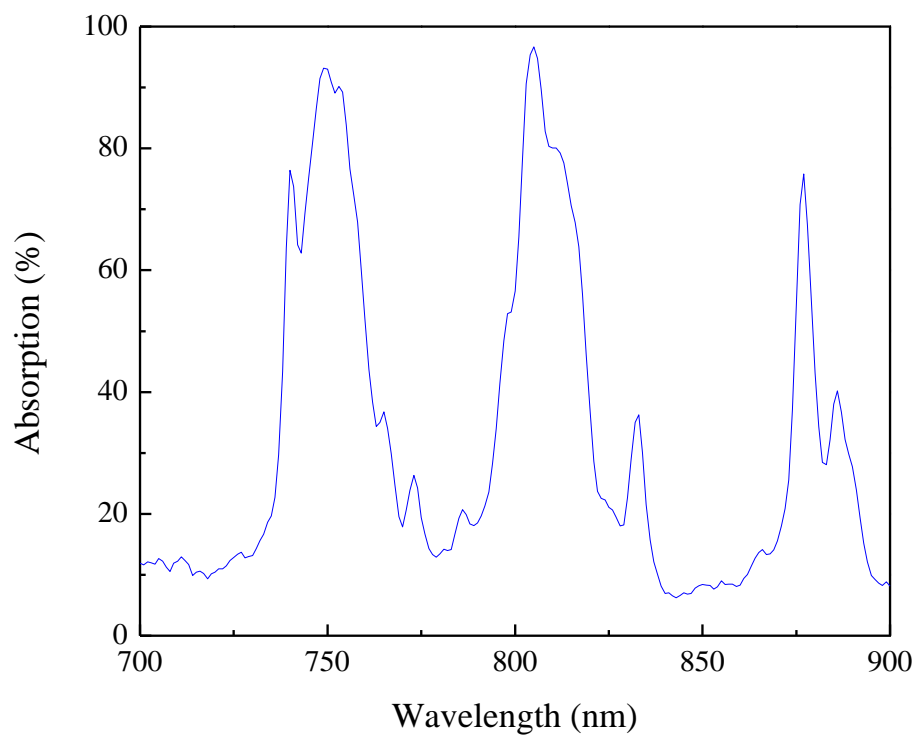


圖 2.2.4：摻雜釹離子濃度 0.6 at.% 的 Nd:YVO₄ 晶體吸收光譜圖

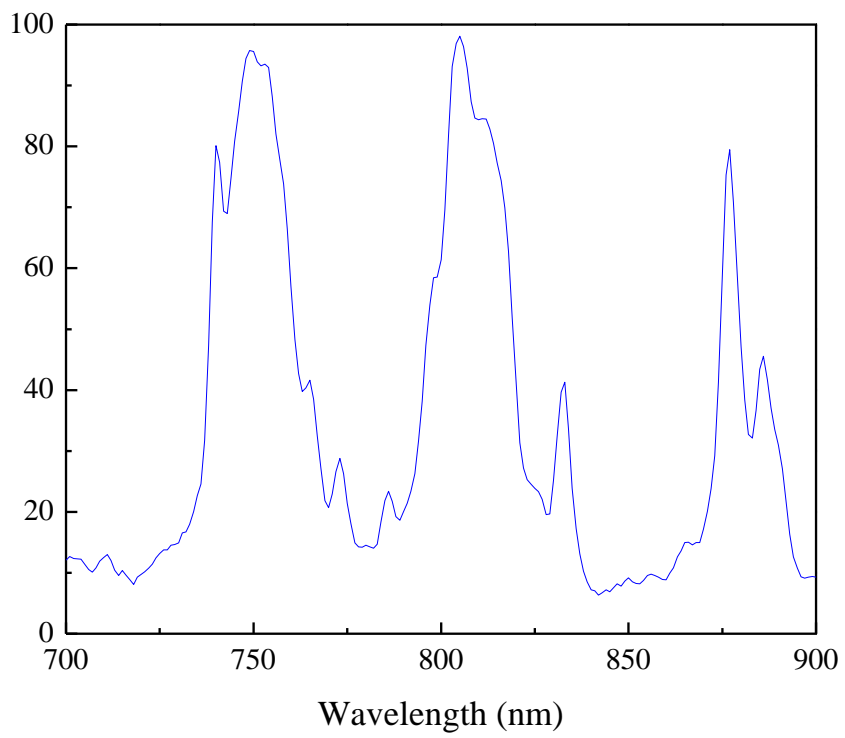


圖 2.2.5：摻雜釹離子濃度 0.8 at.% 的 Nd:YVO₄ 晶體吸收光譜圖

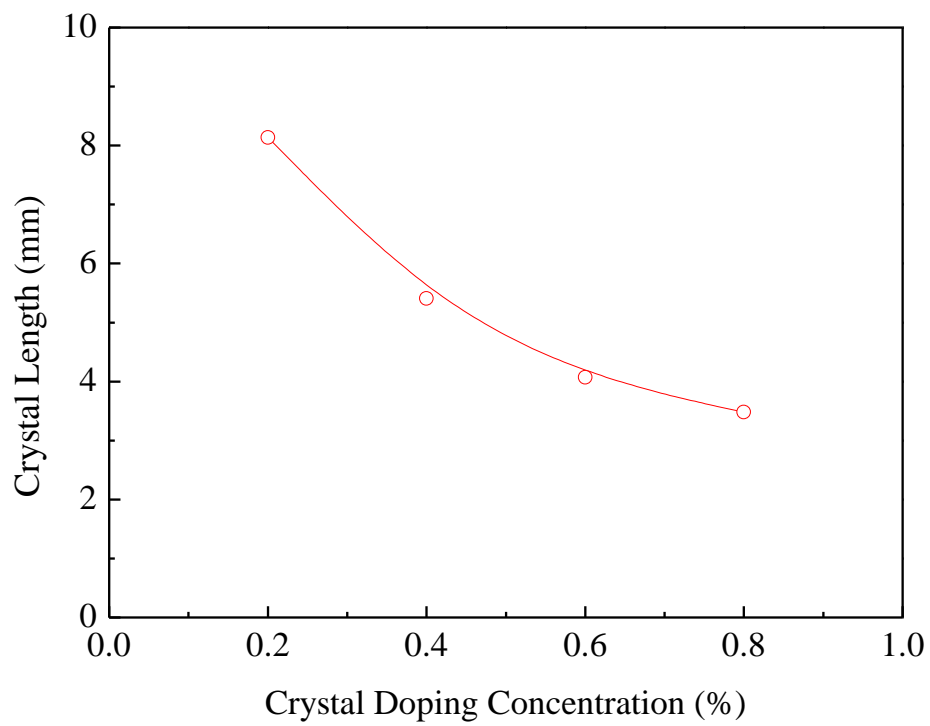


圖 2.2.6 : Nd:YVO₄ 晶體濃度與晶體最佳長度的關係圖

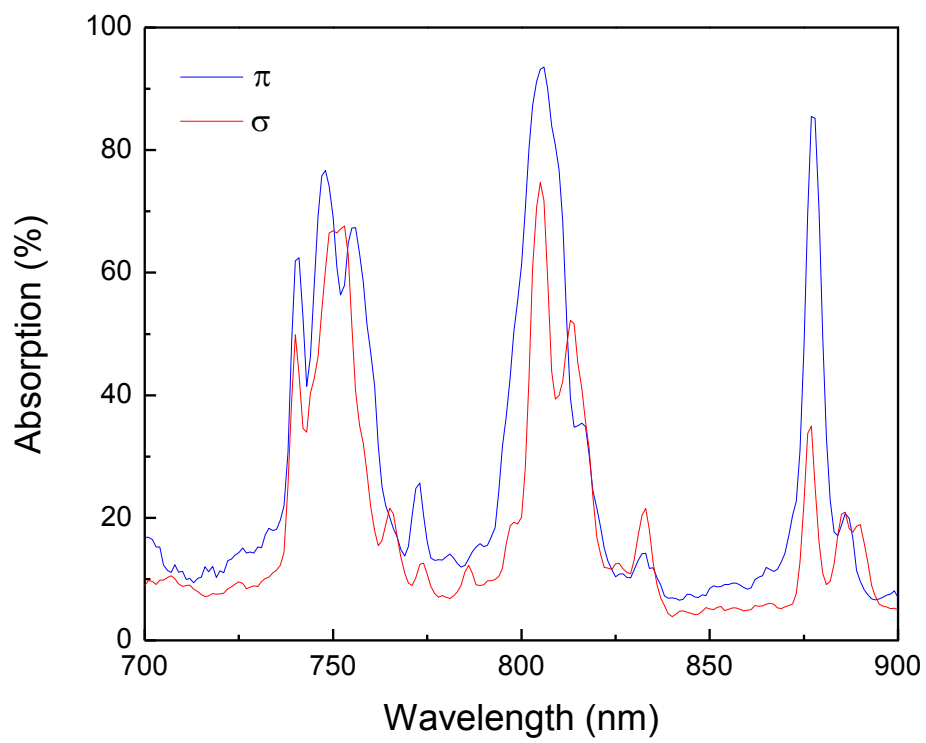


圖 2.2.7：摻釹離子濃度 0.2 at. % 的 Nd:YVO₄ 晶體之 π 偏振與 σ 偏振吸收光譜比較圖

2.3 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄ 兩晶體之螢光光譜分析

摻雜釹離子晶體的簡化能階結構圖如圖 2.3.1 所示，三條螢光譜線帶分別為 0.9 μm ($^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{9/2}$)、1.6 μm ($^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{11/2}$)、1.3 μm ($^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{13/2}$)，其中 0.9 μm 屬於準三能階雷射，而 1.06 μm 與 1.3 μm 屬於四能階雷射。

我們對 Nd:YAG 與 Nd:YVO₄ 晶體做螢光光譜的測量，而得到三組螢光譜線如圖 2.3.2 及圖 2.3.3。由圖中可看出 Nd:YAG 晶體的三組螢光譜線的中心波長分別為 946 nm、1064 nm 與 1319 nm。而 Nd:YVO₄ 晶體的三組螢光譜線的中心波長分別為 914 nm、1064 nm 與 1342 nm。這三組螢光譜線正代表著三組不同的能階，在同一能階中又分裂出各個次能階。因此，我們可以藉由此圖觀察不同能階或相同能階的螢光譜線，以了解雙波長雷射中兩波長雷射在能階中之相互關係。

由於 Nd:YVO₄ 是雙折射晶體，除了有很強的偏振吸收特性外，也有很強的偏振輻射特性。因此我們針對其 π 偏振與 σ 偏振分別測量螢光光譜。而 Nd:YVO₄ 在雙波長雷射的研究中，我們將它做為波長 1064 nm 雷射的增益介質，所以我們在波長 1064 nm 附近做放大觀察，以比較兩偏振的螢光譜線如圖 2.3.4。

很清楚地，此兩晶體在主峰 1064 nm 波段，都有很強的輻射。其 π 偏振螢光分量強度遠大於 σ 偏振分量，且譜線寬度非常狹小，亦即能量幾乎完全集中在 1064 nm 波段。

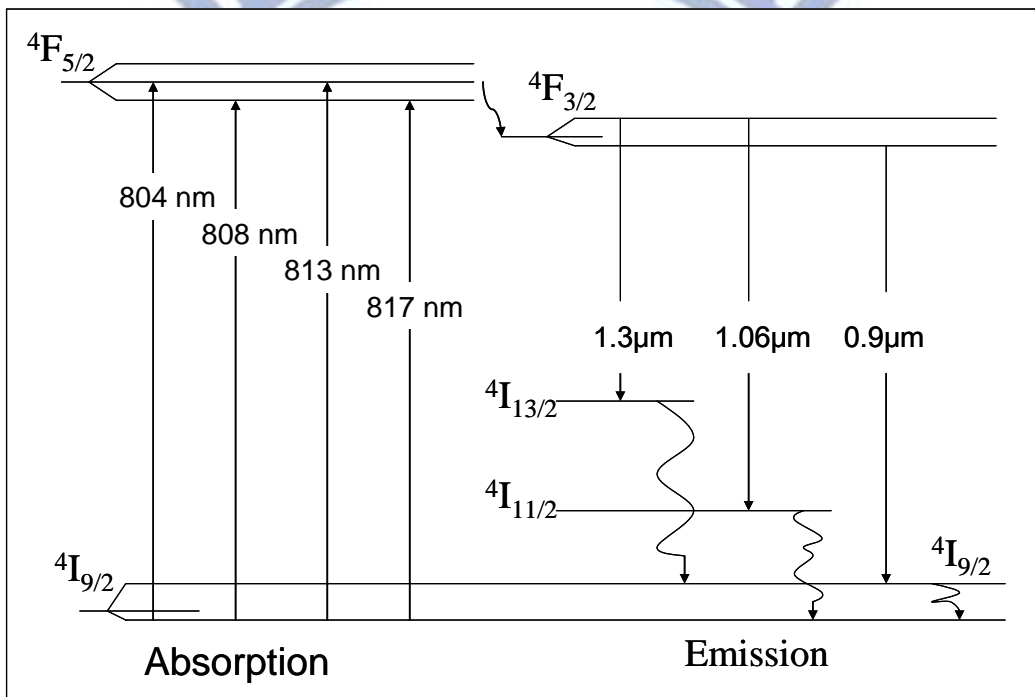


圖 2.3.1：摻雜釹離子晶體的簡化能級結構圖

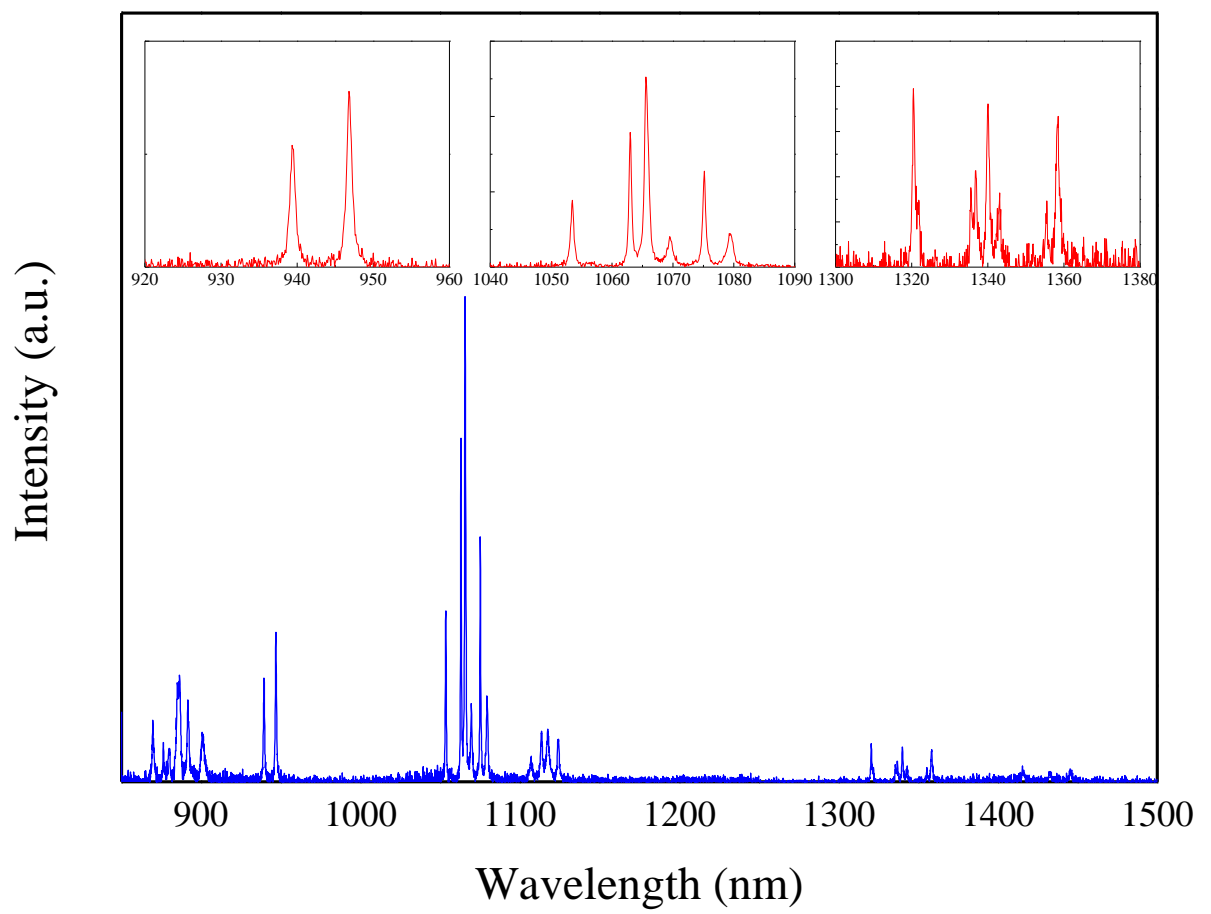


圖 2.3.2 : Nd:YAG 螢光譜線圖

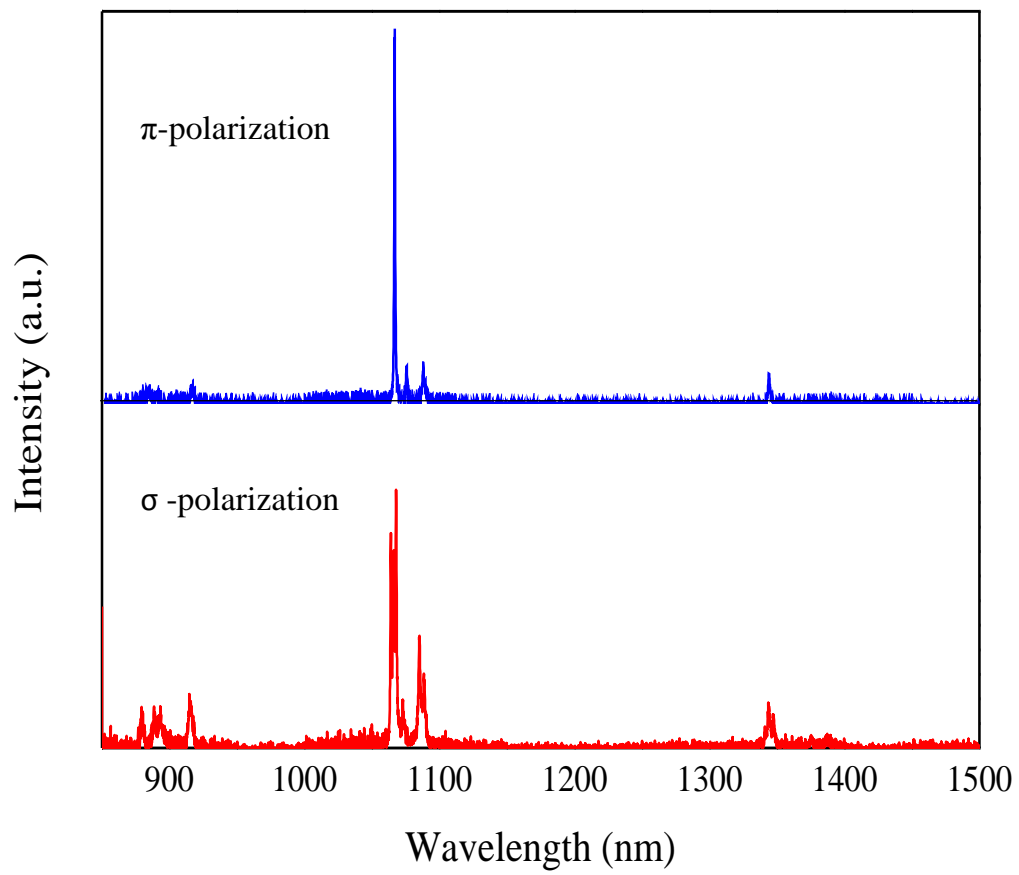


圖 2.3.3 : Nd:YVO₄ 晶體之螢光光譜圖

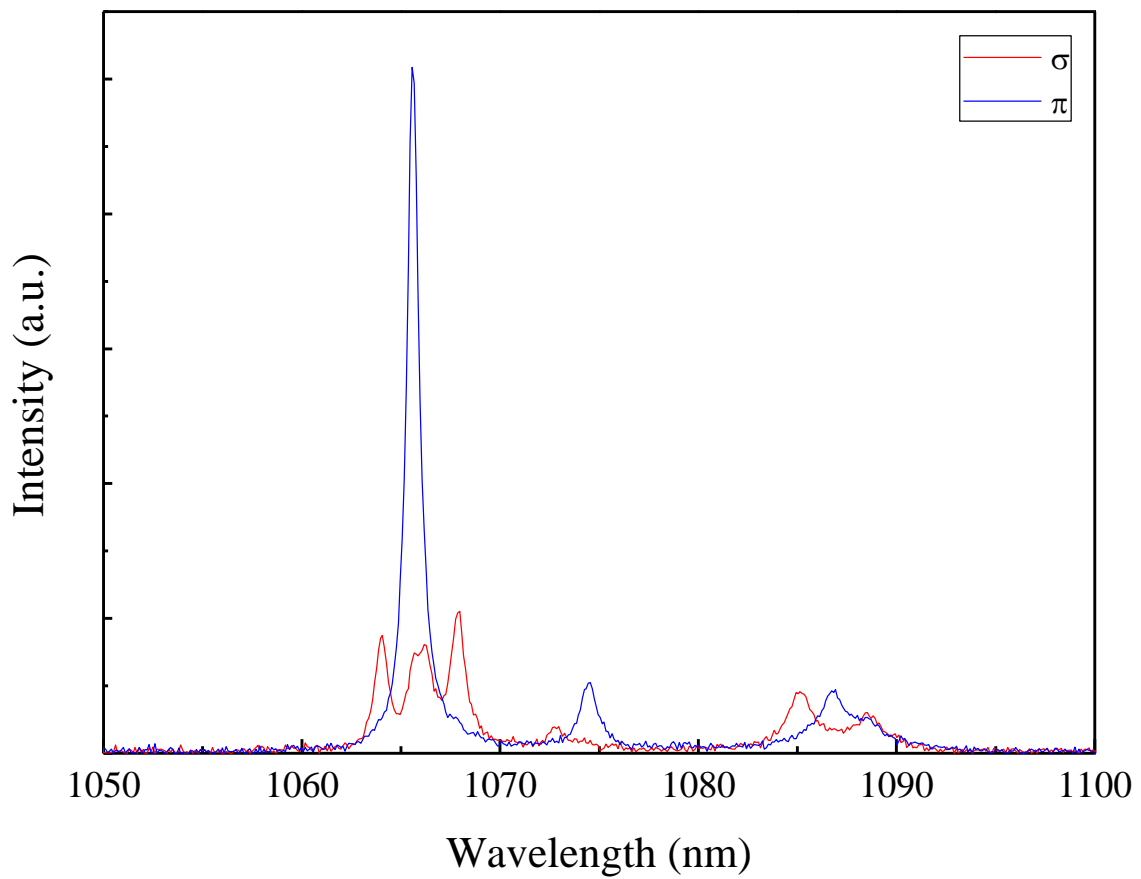


圖 2.3.4 : Nd:YVO₄ 晶體在主峰 1064 nm 附近之 π 偏振與 σ 偏振
螢光譜線比較圖

第三章 Nd:YAG 之準三能階雷射

3.1 導論

我們以圖 3.1.1 準三能階雷射的簡化示意圖來說明此能階的特性，從圖中可以看出由於下能階與基態能階非常接近，其能階差 $\Delta E \geq KT$ ，根據波茲曼分布原理(Boltzmann distribution law)，下能階的電子濃度 N_1 的計算式可表示為：

$$N_1 = N_0 \exp\left(\frac{-\Delta E}{KT}\right) \quad (3.1)$$

N_0 為基態能階電子濃度，若下能階與基態能階的能階差 ΔE 很小，或晶體溫度 T 上升，下能階的電子濃度將增加，如此將造成居量反轉 (Population Inversion) 的困難度。而且，共振腔中欲激發的光子會因為碰撞到下能階的電子而被吸收，此即所謂重複吸收耗損 (Re-absorption Loss)。因此，準三能階的雷射受熱和重複吸收損耗的影響，需操作在較低的溫度以及使用較短的雷射晶體，這也是三能階雷射系統效能較差的原因。在我們的實驗中，固定晶體長度為最佳化約 2 mm 左右的情況下，我們先研究了在連續激發的情況下，946 nm 的雷射輸出結果。為了提高雷射的轉換效率，我們改為使用脈衝激發的方式來探討準三能階雷射中熱效應的影響[23-29]。

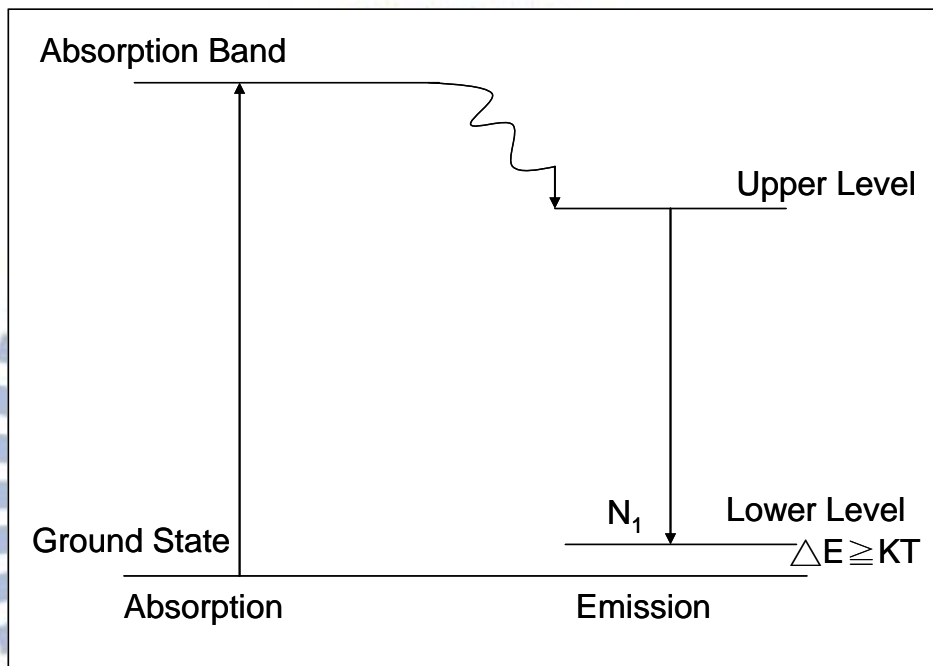


圖 3.1.1：準三能階雷射的簡化示意圖

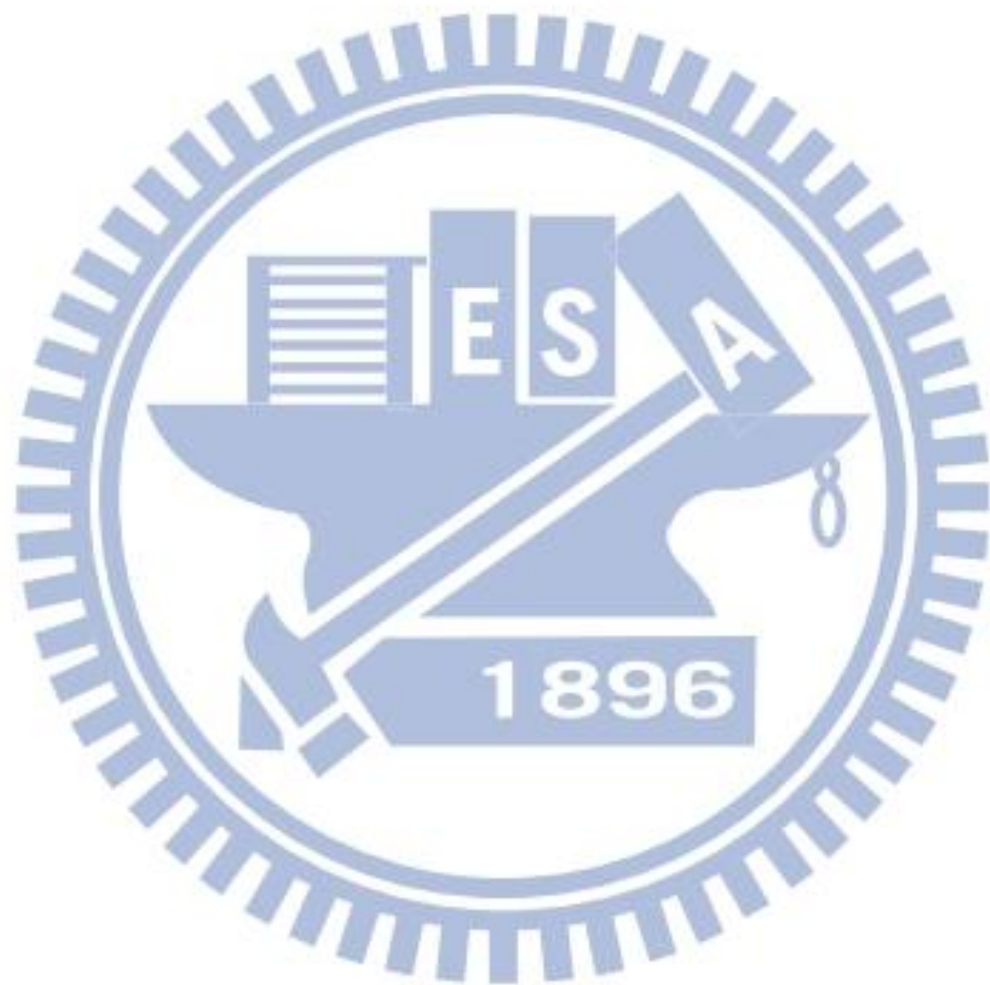
3.2 波長 946 nm 之 CW 雷射特性

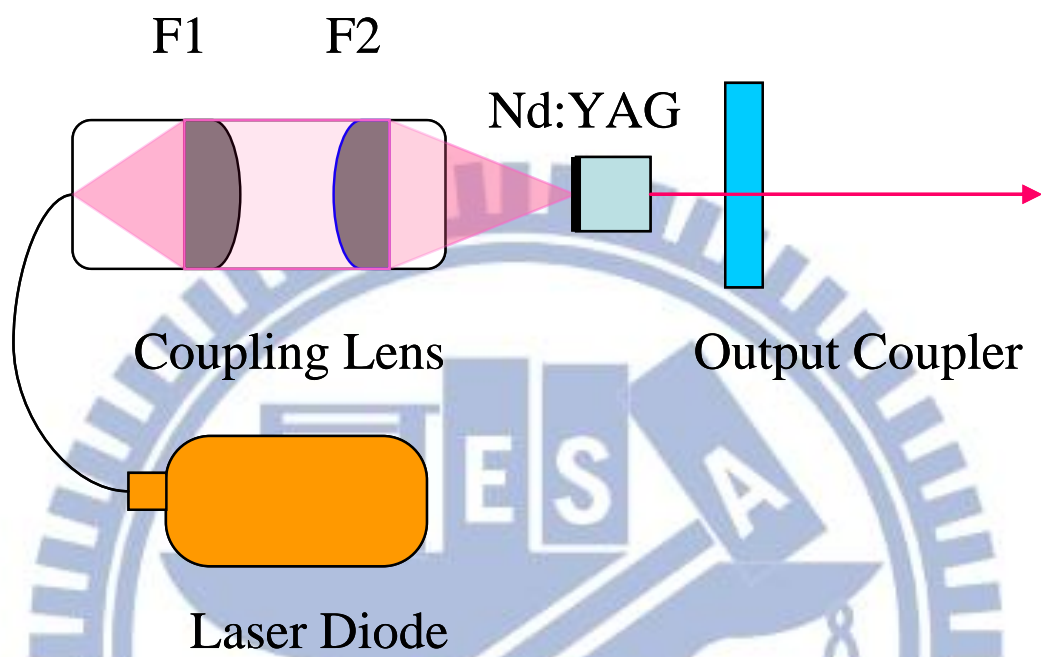
圖 3.2.1 為波長 946 nm 雷射的架構圖。共振腔是由表面鍍膜的增益介質與平面輸出耦合鏡所構成。我們使用摻雜釹離子濃度 1.1 at. %、長度 2 mm、截面積 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 的 Nd:YAG 晶體做為增益介質。Nd:YAG 晶體的第一面鍍上對波長 946 nm 與 473 nm 的高反射率鍍膜(HR, $R > 99.8\%$)及對波長 808 nm 與 1064 nm 的高穿透率鍍膜(HT, $T > 95\%$)；晶體的第二面則鍍上對波長 946 nm 與 1064 nm 的抗反射鍍膜(AR, $R < 0.2\%$)。我們分別使用 3 面對 946 nm 有不同反射率的平面鏡作為輸出耦合鏡，分別為 93%、95%與 97%。激發光源為 LUMICS 20-W 808-nm 光纖耦合半導體雷射，輸出光纖芯蕊直徑為 200 μm ，可操作在連續或脈衝出光兩種模式。連接至聚焦透鏡組可改變不同激發光束直徑，其中第一面透鏡(F1)焦距固定在 5 cm，而第二面透鏡(F2)則有 2.5 cm、3.5 cm、5 cm、7.5 cm 及 10 cm 五種不同焦距可做更換。因此聚焦在雷射晶體上的激發光束直徑大小可為 100 μm 、140 μm 、200 μm 、300 μm 與 400 μm 五種。

首先，我們以連續光激發，固定激發光束直徑大小為 200 μm ，使用三種不同的輸出耦合鏡比較結果，如圖 3.2.2 所示。由圖中可以看出此三者的差異性不大。然而，使用對波長 946 nm 部分反射率為 $R=95\%$ 的輸出耦合鏡時，整體輸出 946 nm 的雷射光的功率較慢飽和，激發光波功率可以增加至 20.1W 才飽和，而其雷射光轉換效率約可達 20%，所以我們以此輸出耦合鏡做後續的研究。

接下來，我們改變激發光束直徑大小分別為 200 μm 與 300 μm 做波長 946 nm 雷射的實驗，所得結果如圖 3.2.3。我們可明顯看出，激發光

束直徑大小為 200 μm 的激發光源有較小的激發功率閾值(約 1.9 W)，相對雷射光轉換效率較佳，可達 20%。而以激發光束直徑大小 300 μm 的激發光源有較大的激發功率閾值(約 5.2 W)，且相對雷射光轉換效率較差，約 18%。





Laser Diode	LUMICS 20 W , Core diameter:200 μ m
Pumping Spot Size	100 μ m, 140 μ m, 200 μ m, 300 μ m, 400 μ m
Nd:YAG	1.1% doped 3*3*2mm ³ S1: HR @ 946 nm, 473 nm , HT@808 nm,1064 nm S2: AR@ 946nm, 473 nm
Output Coupler	S1 : PR,R=93%,95%,97% @946 nm S2 : AR@946 nm

圖 3.2.1 : 波長 946 nm 雷射的架構圖

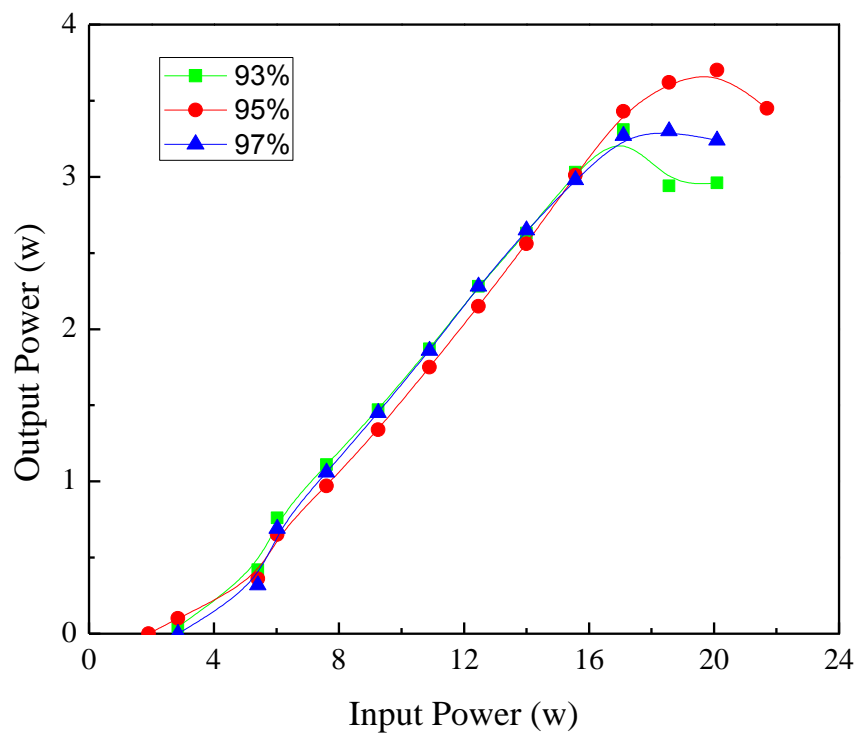


圖 3.2.2 : CW 雷射輸出耦合鏡反射率大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖

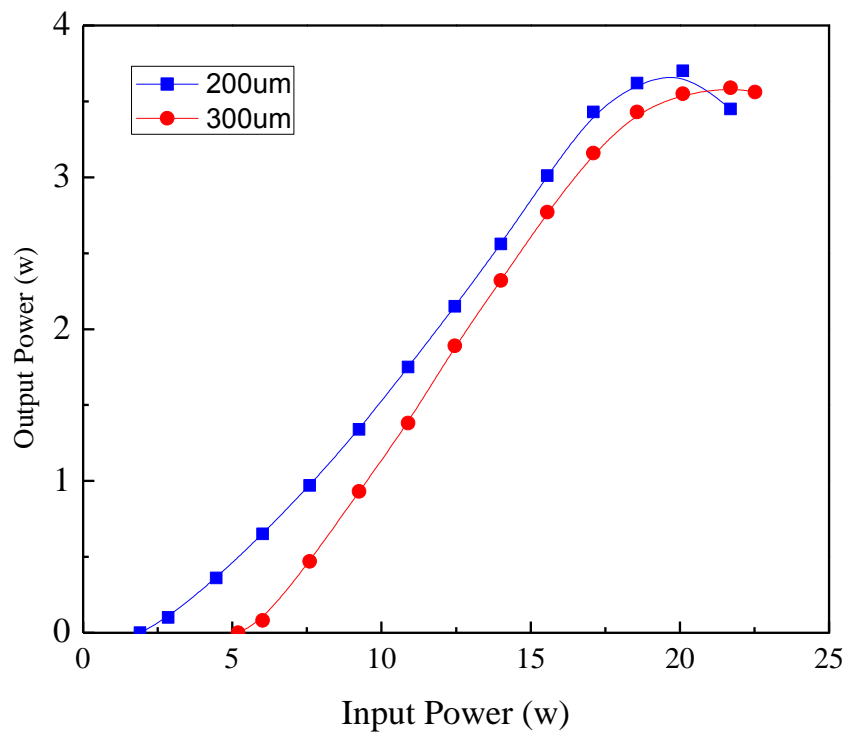


圖 3.2.3：CW 雷射激發光束直徑大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖

3.3 波長 946 nm 之脈衝雷射特性

為了解決熱效應的問題，我們改為以脈衝激發的方式，操作在脈衝光週期為 400 μs 、duty 50% 來研究波長 946nm 雷射光特性。首先，我們一樣固定激發光束直徑大小為 200 μm ，使用三種不同的平面輸出耦合鏡做比較，所得結果如圖 3.3.1 所示。由圖中可看出，使用對波長 946 nm 部分反射率為 $R=93\%$ 的輸出耦合鏡時有較小的激發功率閾值(約 2.85 W)，而是用反射率為 $R=97\%$ 的輸出耦合鏡時有較大的激發功率閾值(約 5 W)。初期，以反射率 $R=93\%$ 做為波長 946 nm 雷射的輸出耦合鏡其雷射光轉換效率較好。隨著激發光源功率增加到 10 W 後，則以反射率 $R=97\%$ 做為波長 946 nm 雷射的輸出耦合鏡之整體雷射光轉換效率較好，約可達 20%。因此，我們以對波長 946 nm 反射率為 97% 的輸出耦合鏡做不同聚焦比例的研究。

我們仍以脈衝激發的方式激發，改變激發光束直徑大小分別為 100 μm 、140 μm 、200 μm 、300 μm 與 400 μm 觀察 946 nm 雷射的輸出結果，所得如圖 3.3.2 所示。由圖中我們可以看出，激發光束直徑大小為 300 μm 的雷射光源有較低的激發功率閾值約 2.85 W。我們固定激發功率在 22.5 W，對激發光束直徑大小與輸出功率的作圖，如圖 3.3.3 所示。從圖中我們可以明顯的看出，激發光束直徑大小為 300 μm 的雷射光源，有較好的雷射光轉換效率(約 20.1%)。另外，與 CW 雷射相比較，以脈衝的激發方式在激發功率達到 22.5 W 時，雷射光仍無飽和現象，且輸出雷射相對較為穩定。

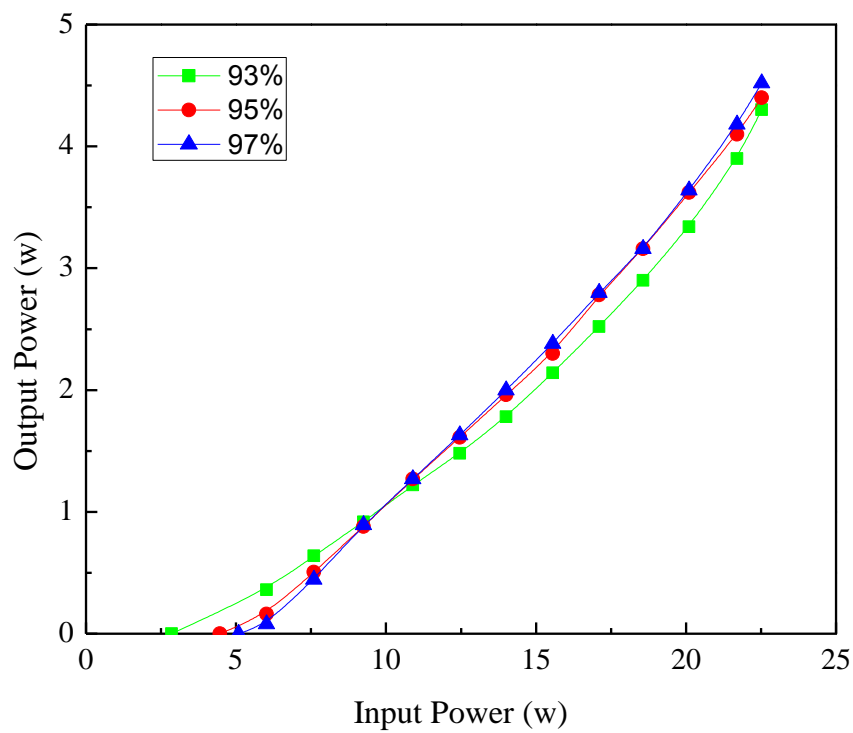


圖 3.3.1：脈衝光激發雷射輸出耦合鏡反射率大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖

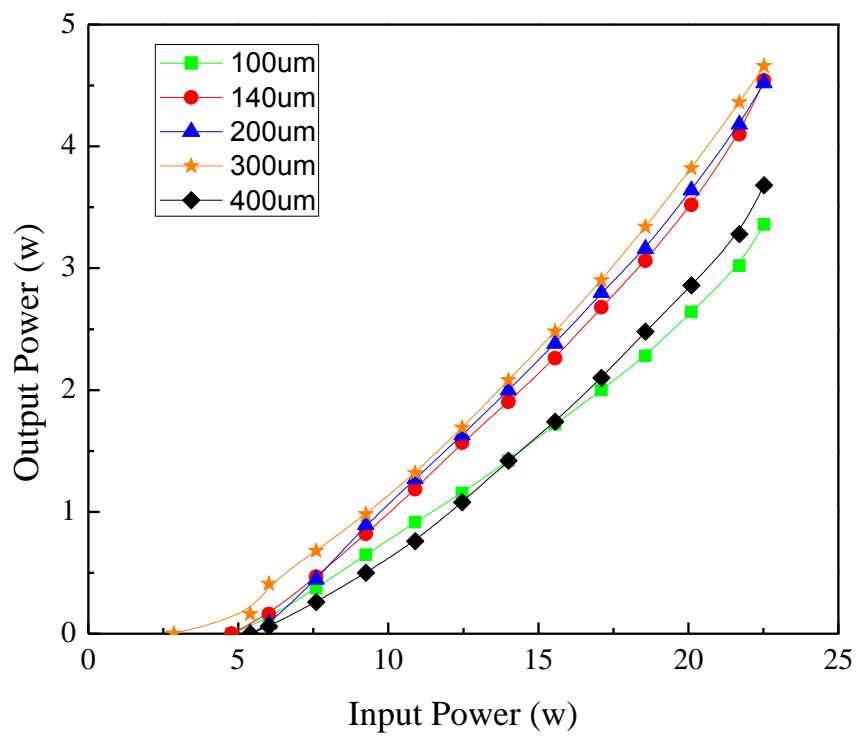


圖 3.3.2：脈衝激發光束直徑大小對波長 946 nm 雷射輸出功率關係圖

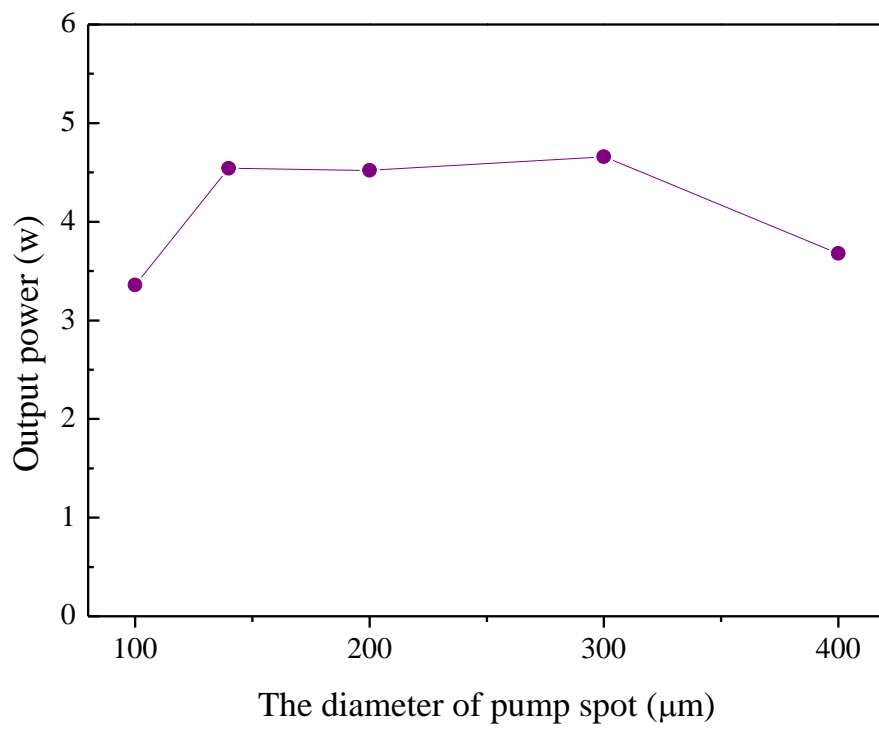


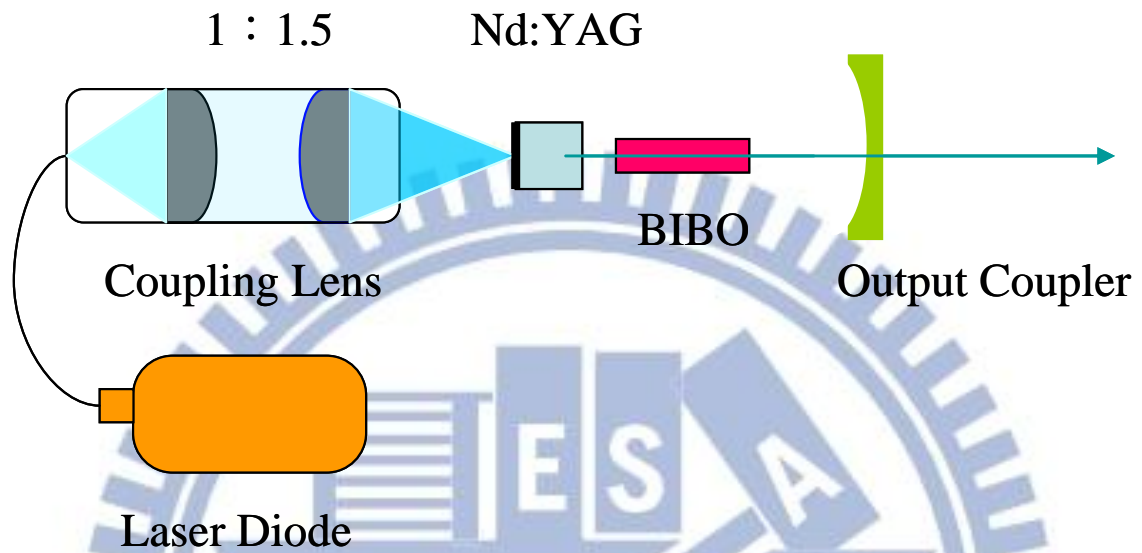
圖 3.3.3：脈衝激發光束直徑大小與輸出功率的關係圖

3.4 倍頻藍光雷射之特性

我們知道選擇適當的非線性倍頻晶體，對腔內倍頻之固態雷射而言是相當重要的，因為如此才能產生較高效率的倍頻光輸出。我們比較了 BIBO 與 LBO 兩晶體，發現 BIBO 晶體的非線性光學係數(nonlinear optical coefficients d_{eff})大約是 LBO 晶體的三倍，因此，我們以 BIBO 晶體做為波長 946 nm 的倍頻晶體將可得到較佳的光學轉換效率。

圖 3.4.1 為倍頻藍光雷射的架構圖[13-14]，我們延續 946 nm 的雷射架構，加入 BIBO 藍光雷射的倍頻晶體以及改變輸出耦合鏡。我們以曲率半徑 5 cm 的凹面鏡做為輸出耦合鏡，其第一面鍍上對波長 946 nm 的高反射率鍍膜(HR, $R > 99.8\%$)及對波長 473 nm 高穿透鍍膜(HT, $T > 95\%$)，第二面鍍上波長 473 nm 抗反射鍍膜(AR, $R < 0.2\%$)。在 Nd:YAG 晶體與輸出耦合鏡間置入長度 5 cm、截面積 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 的 type-I 倍頻晶體 BIBO，其切角為 $\theta = 18.3^\circ$ 、 $\phi = 90^\circ$ 。我們使用聚焦比例 1:1.5 的聚焦鏡組，在 Nd:YAG 晶體上的激發光束直徑大小為 $300 \mu\text{m}$ 。

我們分別以脈衝光及連續光波激發倍頻藍光雷射所得的結果如圖 3.4.2。其中以脈衝光激發所得的雷射輸出相對較為穩定，激發功率與輸出雷射功率幾乎呈現線性的關係。且激發功率增至 22.5 W 時，輸出藍光雷射功率仍無飽和的現象。而雷射光學轉換效率為 8%。反觀以連續光波激發藍光雷射，其雷射較不穩定且激發功率增至 14 W 即出現飽和的現象。



Laser Diode	LUMICS 20 W , Core diameter:200 μ m
Pumping Spot Size	300 μ m
Nd:YAG	1.1% doped 3*3*2mm ³ S1: HR @ 946 nm, 473 nm , HT@808 nm,1064 nm S2: AR@ 946nm, 473 nm
BIBO	2*2*5 mm ³ , Type-I , $\theta=18.3^\circ$ 、 $\phi=90^\circ$
Output Coupler	S1 : HR@946 nm , HT@473 nm , ROC=5 cm S2 : AR@473 nm

圖 3.4.1：倍頻藍光雷射之架構圖

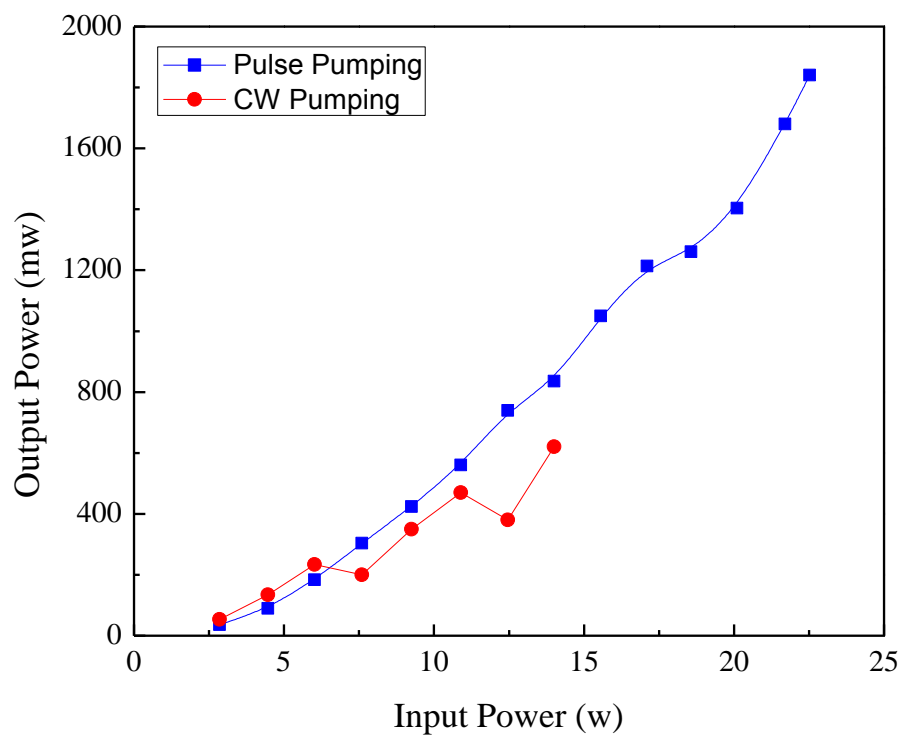


圖 3.4.2：脈衝光與連續光波激發 Nd:YAG 晶體之藍光雷射
輸出功率比較圖

第四章 Nd:YVO₄之四能階雷射

4.1 導論

相較於準三能階，四能階雷射其下能階之能量遠大於基態能階，如圖 4.1.1。且下能階的自發輻射生命期(Spontaneous lifetime)很短，使得經激發輻射躍遷的電子在下能階的分布量趨近於零，因而電子容易達成居量反轉，且無前述再吸收耗損的問題，所以，對溫度的要求沒有準三能階雷射來得嚴格。且 Nd:YVO₄ 晶體具有較高的吸收係數、吸收寬帶達 8 nm、且有效輻射截面亦較大，若加上一般腔內倍頻技術對於基頻光的極化方向有特殊偏好，因此具有雙折射性單光軸的 Nd:YVO₄ 晶體在腔內倍頻應用上，光學轉換效率較高。因此，我們選定 Nd:YVO₄ 晶體做為波長 1064 nm 的紅外光雷射以及倍頻轉換之 532 nm 綠光雷射的增益介質。

另外，在波長 1064 nm 腔內倍頻轉換 532 nm 綠光雷射的研究中。KTP 是最被廣泛應用的非線性晶體，因為它具有高非線性係數、高損壞閾值、即較大的可接受角等優點，且其二次諧波輸出波長在 492 nm 與 1700 nm 之間，非常適合做為波長 532 nm 綠光雷射中的非線性倍頻晶體。

由以上的分析，我們可以預期四能階雷射的光學轉換效率將比準三能階大很多，其波長 1064 nm 及倍頻綠光雷射的輸出光束品質相對於波長 946 nm 即倍頻藍光雷射將更好更穩定，這也是在各方面應用較廣泛且技術較為成熟的主因[30-34]。

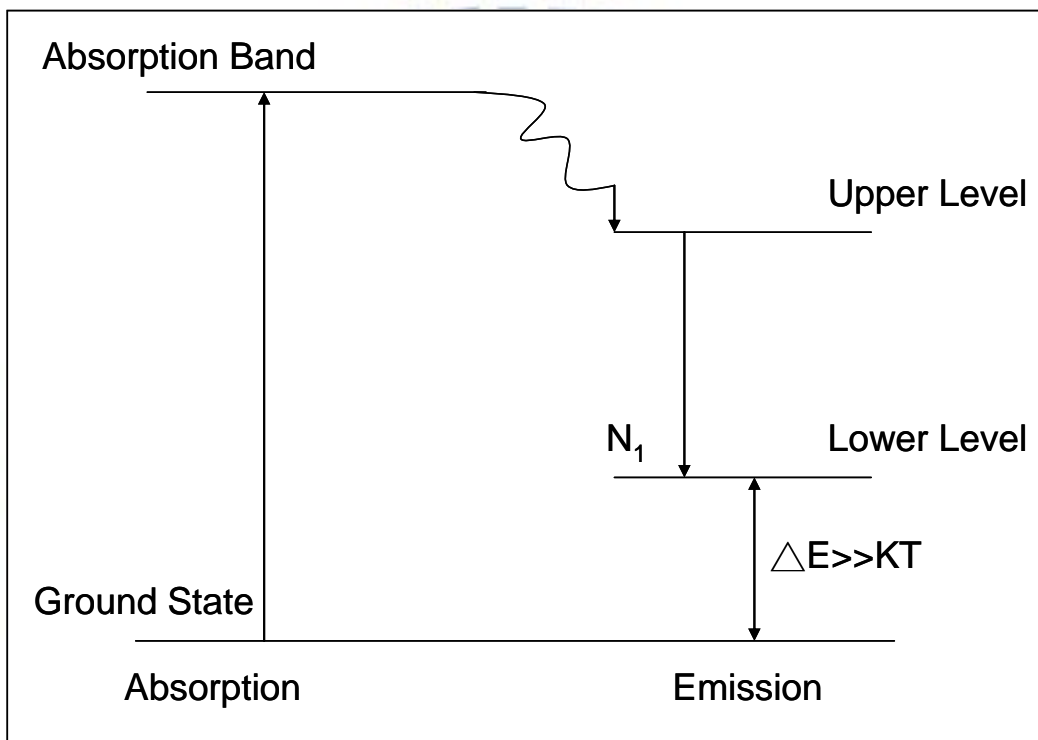


圖 4.1.1：四能階雷射的簡化示意圖

4.2 波長 1064 nm 及倍頻轉換 532 nm 綠光雷射之特性

如圖 4.2.1 為波長 1064 nm 雷射的架構圖，其共振腔為一個凹平腔，腔長 3 cm。前鏡為曲率半徑 5 cm 的凹面鏡，鍍上對波長 1064 nm 與 532 nm 的高反射率鍍膜(HR, $R > 99.8\%$)及對波長 808 nm 的高穿透率鍍膜(HT, $T > 95\%$)。輸出耦合鏡的第一面鍍上對波長 1064 nm 部分反射鍍膜(PR, $R = 70\%$)，第二面鍍上對波長 1064 nm 抗反射鍍膜(AR, $R < 0.2\%$)。雷射的增益介質為摻雜釹離子濃度 0.4 at. %、長度 6 mm、截面 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 的 a-cut Nd:YVO₄ 晶體。Nd:YVO₄ 晶體的兩面皆鍍上對波長 1064 nm 的抗反射鍍膜(AR, $R < 0.2\%$)及對波長 808 nm 的高穿透率鍍膜(HT, $T > 95\%$)。激發光源為 LUMICS 20-W 808-nm 光纖耦合半導體雷射，可連接輸出控制器調整連續或脈衝激發雷射的模式。而其輸出光纖芯蕊直徑大小為 200 μm 。連接至聚焦比例 1:1 的聚焦鏡組，使得投射在 Nd:YVO₄ 晶體上的激發光束直徑大小為 200 μm 。

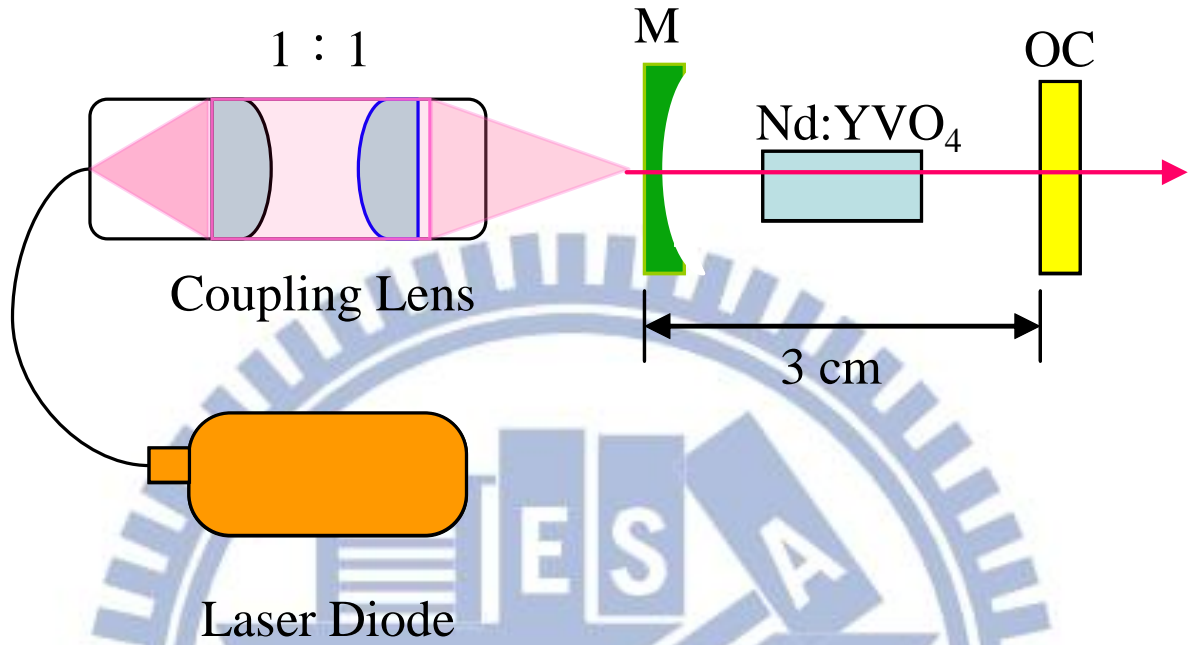
我們以連續激發雷射的模式來激發波長 1064 nm 雷射，實驗所得的結果如圖 4.2.2。波長 1064 nm 雷射的光學轉換效率極高，可達 49.4%。且激發功率與輸出功率幾乎呈線性關係。即使激發功率達到 22 w，輸出功率仍無飽和現象，這說明了此架構對波長 1064 nm 雷射的輸出極為穩定。

接下來，我們觀察腔內倍頻的 532 nm 綠光雷射實驗，其架構如圖 4.2.3。共振腔的前鏡為一凸凹透鏡，同時可做為聚焦鏡組的第二面透鏡。前鏡凸面的曲率半徑為 -10 cm，凹面的曲率半徑為 5 cm，搭配焦距 10 cm 的透鏡組合成聚焦比例 2:1 的聚焦鏡組。前鏡鍍上對波長 1064 nm 與 532 nm 高反射率鍍膜(HR, $R > 99.9\%$)。雷射的增益介質為截面 3×3

mm²，長度 2 mm 的 YVO₄ 配上摻雜釹離子濃度 0.2 at. %、長度 6 mm 的 Nd:YVO₄ 擴散鍵結(diffusion-bond)晶體所構成。倍頻晶體為長度 10 mm，截面 3×3 mm² 的 Type-II KTP 晶體，切角為 $\theta=90^{\circ}$ ， $\phi=23.5^{\circ}$ 。第一面鍍上對波長 1064 nm 及波長 532 nm 抗反射鍍膜(AR, R<0.2%)，第二面鍍膜則鍍上對波長 1064 nm 的高反射率鍍膜(HR, R>99.9%)以及對波長 532 nm 的高穿透鍍膜(HT, T>97%)。共振腔長度 2.8 cm。激發光源為 OPTO POWER CORPORATION 15-W 808-nm 光纖耦合半導體雷射，可連接輸出控制器調整連續或脈衝激發雷射的模式。而其輸出光纖芯蕊直徑大小為 1000 μm 。

我們以連續激發雷射的模式來產生綠光雷射，所得的實驗結果如圖 4.2.4。在激發光源功率等於 16 W 時，輸出綠光雷射漸漸有飽和的現象，但相對於藍光雷射則穩定許多，其雷射光學轉換效率約為 13%。

另外，我們發現使用脈衝激發的模式下，雷射輸出的真實脈寬會因為出光時間延遲而縮短，這在實際應用上可能會造成一些問題。例如眼科中的醫療雷射，就有可能因真實脈寬的縮短而產生治療上的誤差。為了解決這個問題，我們研究了不同聚焦比例的情況下，脈寬變化的趨勢。我們使聚焦在晶體上的光束直徑大小為 500 μm 及 100 μm ，操作在週期 1 ms、duty=50%的情況下，比較綠光雷射的輸出脈寬。實驗結果如圖 4.2.5 與圖 4.2.6。從圖中我們可以比較出，在激發功率較小，激發光束直徑由 500 μm 改成 100 μm 時，雷射的脈寬與設定的週期相差從 50 μs 減少到 20 μs 。如此一來，誤差由 10 % 縮小到 4%。另外隨著輸入功率的增加，脈衝寬度也越長。即表示隨著激發的單位面積能量增加，雷射愈不會有延遲出光的現象產生。



Laser Diode	LUMICS 20 W , Core diameter:200 μm
Pumping Spot Size	200 μm
Nd:YVO ₄	0.4 at. % doped 3*3*6 mm ³ S1 , S2: AR @ 1064 nm , HT@808 nm
M	HR@1064 nm,532 nm , HT@808 nm Curvature ROC=5 cm
Output Coupler	S1 : PR70% @1064 nm S2 : AR@1064 nm

圖 4.2.1 : 波長 1064 nm 雷射架構圖

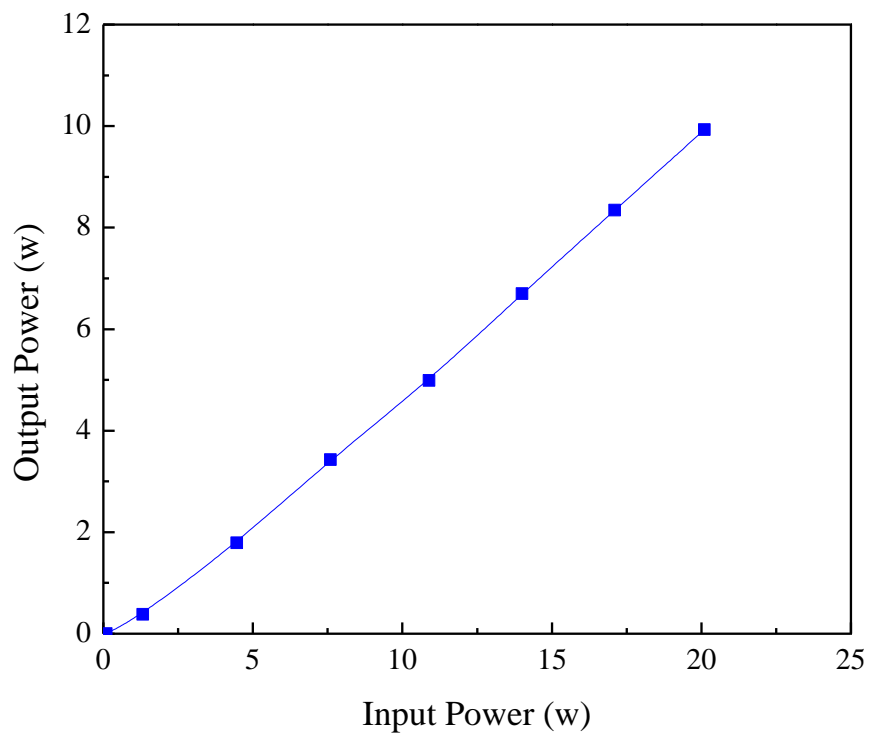
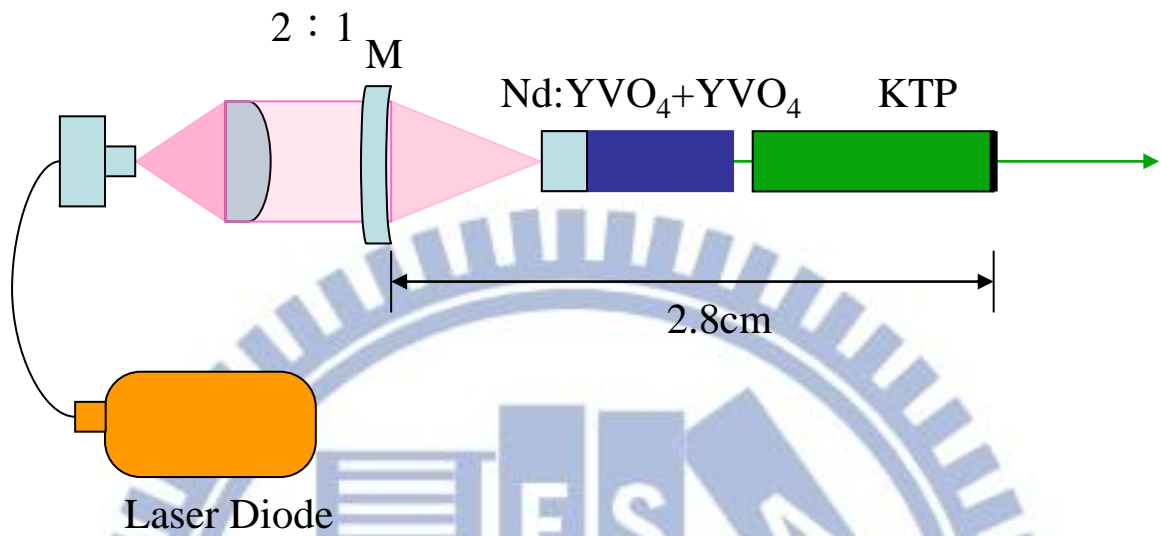


圖 4.2.2：波長 1064 nm 雷射輸出功率圖



Laser Diode	1. LUMICS 20 W , Core diameter:200 μm 2. LUMICS 20 W , Core diameter:1000 μm
Pumping Spot Size	100 μm
Nd:YVO ₄ +YVO ₄	3*3*2 mm ³ YVO ₄ +3*3*6mm ³ Nd:YVO ₄ 0.2 at. % doped
M	ROC1= -10 cm , ROC2= 5 cm S1 : HT@808 nm S2 : HR@1064 nm,532 nm
KTP	3*3*2 mm ³ Type-II $\theta = 90^\circ$, $\phi = 23.5^\circ$ S1 : AR@1064 nm, 532 nm S2 : HR@1064 nm , HT@532 nm

圖 4.2.3：倍頻綠光雷射之架構圖

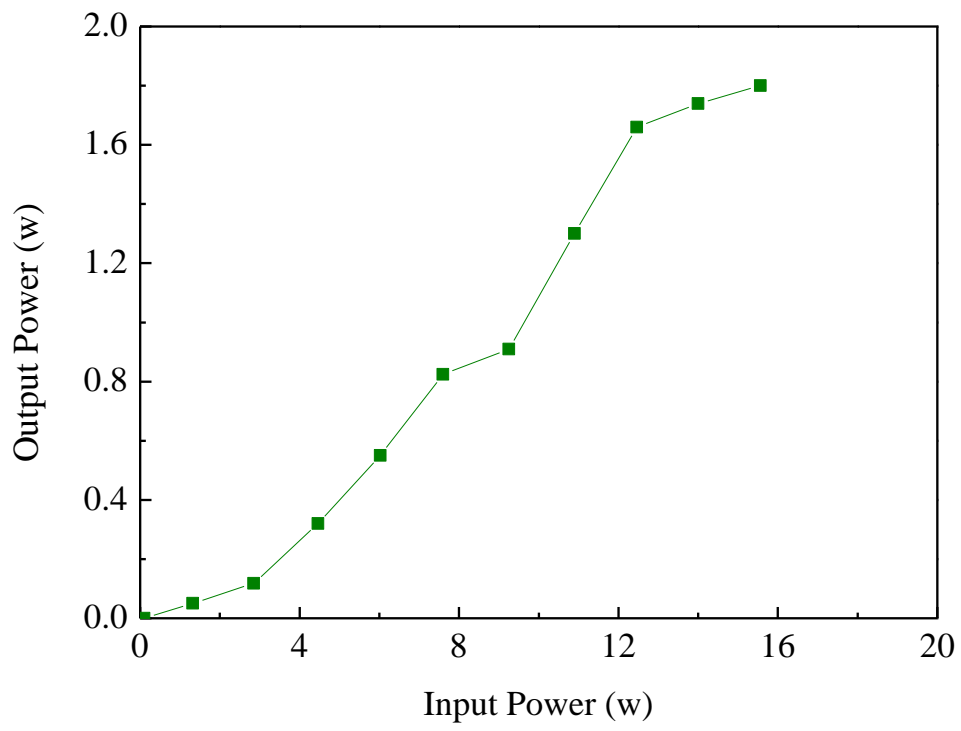


圖 4.2.4：倍頻綠光雷射輸出功率圖

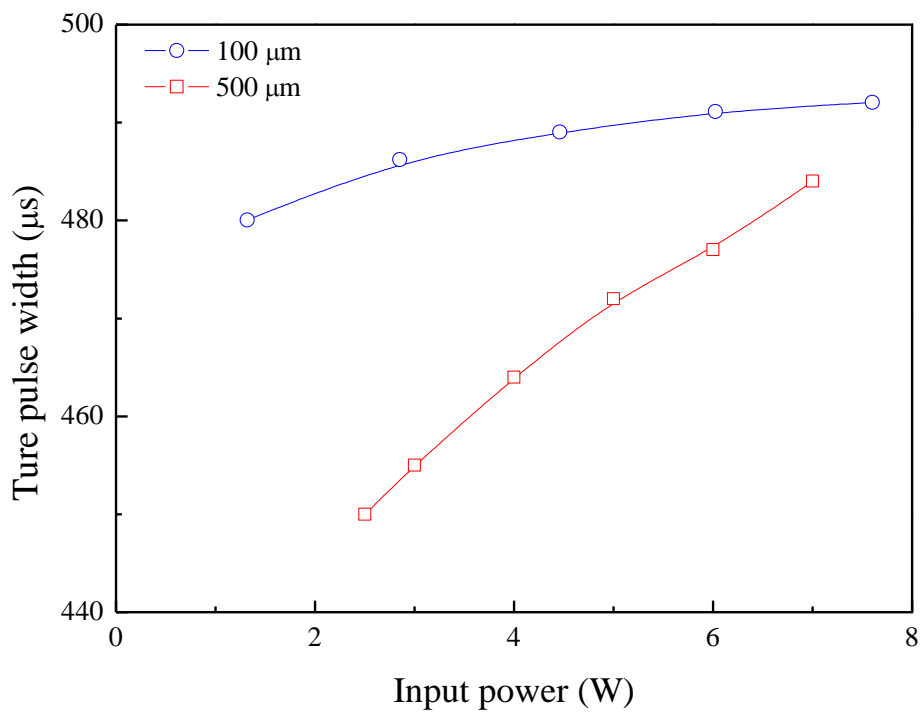


圖 4.2.5：激發光束直徑大小對波長 532 nm 綠光雷射輸出之影響圖

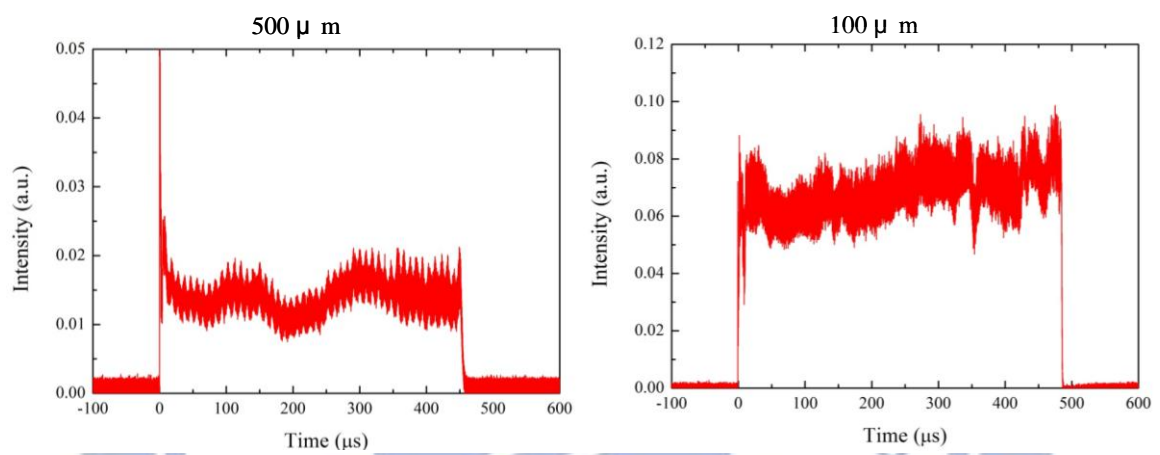


圖 4.2.6：激發光束直徑大小 500 μm 與 100 μm 之綠光雷射脈衝
波形比較圖

第五章 雙波長雷射

5.1 導論

近年來國內外不乏準三能階與四能階雙波長雷射的研究，我們從文獻中整理出最主要有兩個方向：同一晶體同一共振腔而使用對兩種波長不同反射率的耦合鏡[9][11]，或使用同一晶體不同共振腔的模式[8][10]。第一種方式易造成兩種波長互相競爭，使得波長 0.9 μm 雷射遭受抑制。第二種方式往往架構複雜，在調整上很困難。而受限於準三能階雷射特性導致晶體長度無法太長，因此無論哪一種方式，光學轉換效率皆不高。

我們以同軸雙晶體且雙共振腔的架構來產生雙波長雷射。波長 946 nm 的雷射共振腔在內，波長 1064 nm 的雷射共振腔包於其外。如此，可有效達到能量再利用，使整體光學轉換效率大幅提升至 30% 以上。另外，波長 1064 nm 的雷射共振腔之腔長可以藉由輸出耦合鏡位置的調整而改變，以改變波長 946 nm 與波長 1064 nm 雷射輸出功率的比值。

5.2 實驗架構

我們設計了如圖 5.2.1 的雙波長雷射架構。它是一個同軸雙晶體雙共振腔的結構。其中，波長 946 nm 的雷射共振腔在內，而波長 1064 nm 的雷射共振腔包覆於外。理由如第三章所闡述，946 nm 的雷射會有再吸收耗損的問題，所以為了確保它能出光，我們先對它激發。而殘餘的 808 nm 雷射，可以再利用做為外層 1064 nm 雷射共振腔的激發光源。

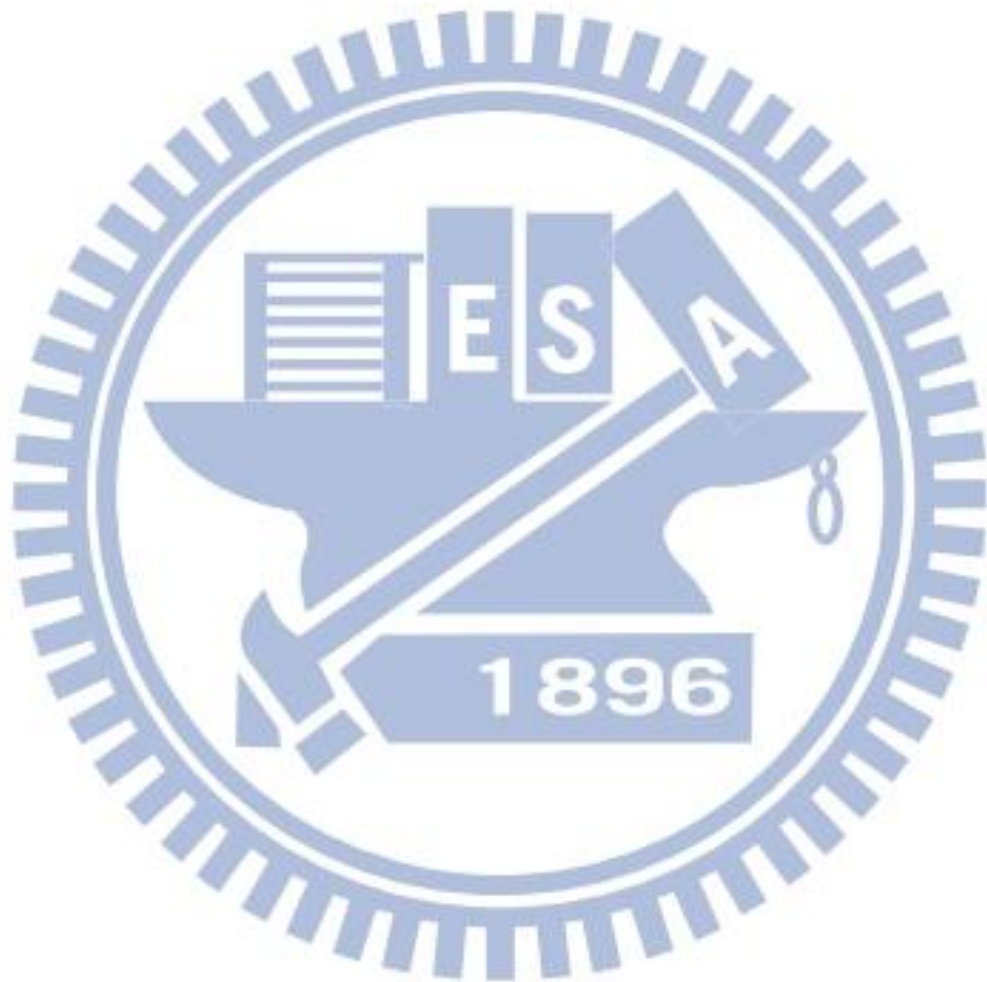
波長 946 nm 的雷射共振腔是由表面鍍膜的增益介質與一面平面鏡做為輸出耦合鏡所構成。我們使用摻雜釹離子濃度 1.1 at.%、長度 2 mm、截面 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ，對 808 nm 雷射吸收率為 50% 的 Nd:YAG 晶體做

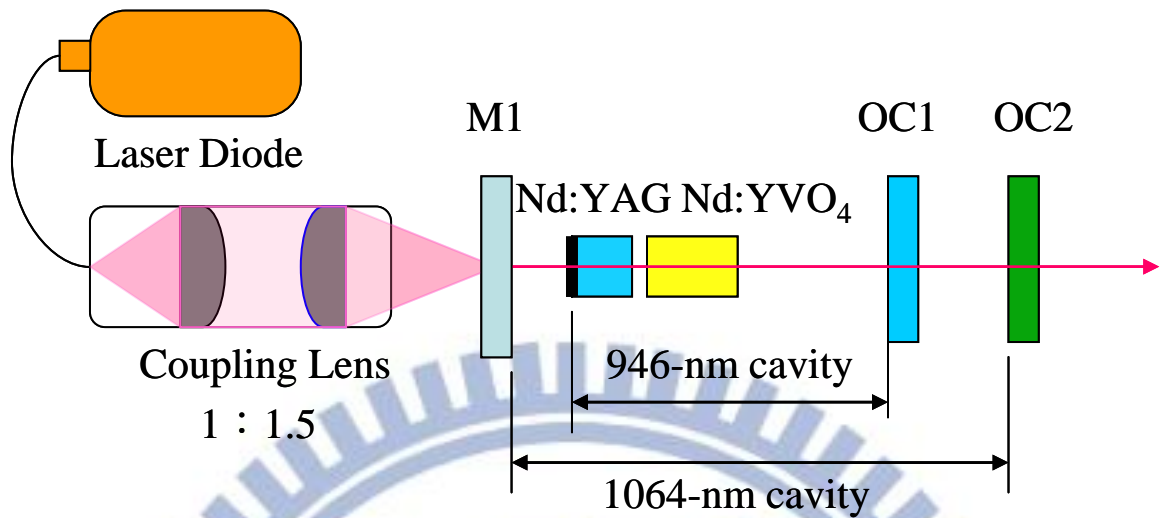
為增益介質。Nd:YAG 晶體的第一面鍍上對波長 946 nm 與 473 nm 的高反射率鍍膜(HR, $R > 99.8\%$)及對波長 808 nm 與 1064 nm 的高穿透率鍍膜(HT, $T > 95\%$)，並以此面作為此共振腔的前鏡；晶體的第二面則鍍上對波長 946 nm 與 1064 nm 的抗反射鍍膜(AR, $R < 0.2\%$)。輸出耦合鏡(OC1) 的第一面鍍上對波長 946 nm 為反射率 $R=95\%$ 及對波長 1064 nm 高穿透率(HT, $T > 99\%$)的鍍膜，第二面則鍍上對波長 946 nm 及 1064 nm 抗反射鍍膜(AR, $R < 0.2\%$)。我們會將波長 946 nm 的雷射共振腔

波長 1064 nm 的雷射共振腔是由一面平面前鏡(M1)、增益介質與一面平面鏡做為輸出耦合鏡(OC2)組成。增益介質為摻雜釹離子濃度 0.2 at.%、長度 6 mm、截面 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 的 a-cut Nd:YVO₄ 晶體，晶體兩端面皆鍍上對波長 946 nm 與 1064 nm 抗反射鍍膜(AR, $R < 0.2\%$)。前鏡為一平面鏡，第一面對波長 808 nm 鍍有抗反射鍍膜($R < 0.2\%$)，第二面則鍍上對波長 1064 nm 高反射率(HR, $R > 99.8\%$)與對波長 808 nm 高穿透率鍍膜(HT, $T > 95\%$)。我們使用三面對 1064 nm 分別有反射率 10%、20% 以及 30% 的平面鏡作為輸出耦合鏡(OC2)，且此三面輸出耦合鏡皆鍍上對波長 946 nm 高穿透率鍍膜(HT, $T > 90\%$)。我們可以藉由移動 OC2 的位置來改變 1064 nm 共振腔的腔長，用以調整波長 946 nm 與波長 1064 nm 雷射輸出功率的比值 P_{946}/P_{1064} 。二極體激發幫浦為 Lumics 20-W 808-nm 光纖耦合雷射，其輸出光纖直徑大小為 200 μm 連接至兩耦合聚焦透鏡。其焦距比為 1 : 1.5，使得投射在共振腔上的激發光束直徑大小為 300 μm 。我們將 Nd:YAG 與 Nd:YVO₄ 晶體緊密的包覆在銅座之中，並控制水溫在 10⁰C 加以散熱。

接下來，我們更簡化雙波長雷射的架構。將波長 946 nm 與波長 1064

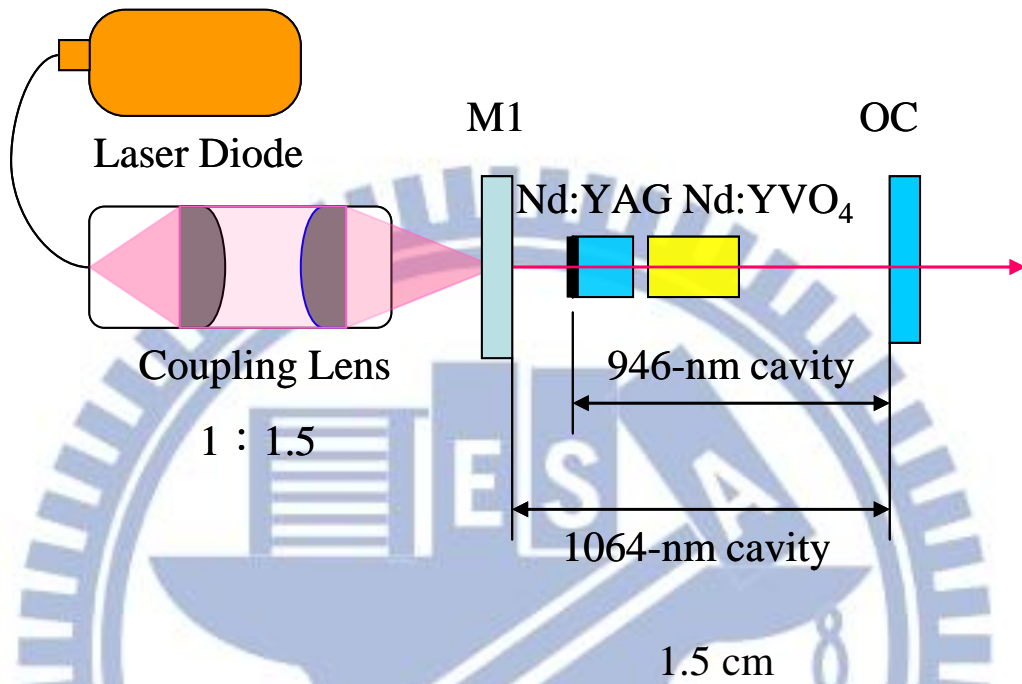
nm 的雷射共振腔改為共用一面輸出耦合鏡。其架構如圖 5.2.2。除了輸出耦合鏡外，其他組件皆與前述相同。在此架構下，共振腔腔長 1.5 cm。





Laser Diode	LUMICS 20W Core diameter : 200um
Pumping Spot Size	300 μm
Nd:YAG	3*3*2mm ³ , 1.1 at. % doped S1: HR @ 946 nm, 473 nm , HT@808 nm, 1064 nm S2: AR@ 946nm, 1064 nm
Nd:YVO ₄	3*3*6mm ³ , 0.2 at. % doped S1,S2: AR @ 946 nm, 1064 nm
Front Mirror	S1:AR@808 nm S2:HR@1064nm , HT@808 nm
OC1	S1: PR 95% @946 nm , HT@1064 nm S2: AR@946nm, 1064 nm
OC2	There are 3 mirrors with PR10%,20%,30% @1064nm , HT@946 nm

圖 5.2.1：雙波長實驗架構圖



OC	1. S1: PR95% @946 nm , PR1% @1064 nm S2: AR@946 nm,1064 nm
	2. S1: PR97% @946 nm , PR 10% @1064 nm S2: AR@946 nm,1064 nm
There are two output couplers to choose	

圖 5.2.2：最簡化雙波長雷射架構圖

5.3 實驗結果與討論

首先，我們以對波長 1064 nm 不同反射率的 OC2 來做實驗。二極體雷射激發光源固定在 20W。所得的結果如圖 5.3.1、圖 5.3.2 與圖 5.3.3。由此三圖我們可以明顯看出，波長 946 nm 與波長 1064 nm 雷射輸出功率的比值 P_{946}/P_{1064} 確實可以藉由調整平面耦合輸出鏡 OC2 的位置來做改變。隨著 OC2 的位置往後移動，亦即波長 1064 nm 的雷射共振腔變長， P_{946}/P_{1064} 值變大。由圖 5.3.1 可知，共振腔長度在 2.5 cm 時， $P_{946}/P_{1064} = 0.4$ ，腔長增為 5.0 cm 時， $P_{946}/P_{1064} = 0.97$ 。而且總輸出功率的變化不大，那是因為隨著 OC2 的位置往後移動，雖然波長 1064 nm 的雷射輸出功率減小，而波長 946 nm 雷射輸出功率則相對增加，使得總輸出功率變化不大。

另外，比較此三圖，我們可以發現：

- 一、對波長 1064 nm 有不同反射率的 OC2 會影響輸出總功率。共振腔長度相同時，使用反射率較大的 OC2 會有較大的總輸出功率。然而隨著腔長變長，影響就變小，亦即總輸出功率漸漸接近。
- 二、對波長 1064 nm 有不同反射率的 OC2 會影響調整時的靈敏度。比較圖 5.3.1 與圖 5.3.3，共振腔長度由 3 cm 增為 5 cm 時，OC2 反射率為 10% 時， P_{946}/P_{1064} 值由 0.54 增至 0.99，增加了 0.45。而 OC2 反射率為 30% 時， P_{946}/P_{1064} 值由 0.01 增至 0.33，增加 0.32。說明了，反射率較大，靈敏度則較小。亦即使用反射率較大的 OC2，隨著共振腔長度增加， P_{946}/P_{1064} 值增加較為緩慢。

我們使用對波長 1064 nm 反射率為 30 % 的 OC2，共振腔長 3 cm，激發光功率 20 W 時，可以得到總輸出功率 6.6 W，換算光學轉換效率為

33%。

接著，我們固定波長 1064 nm 的共振腔長度在 3.5 cm，以對波長 1064 nm 不同反射率的 OC2 為橫軸，輸出功率為縱軸做圖 5.3.4。可以看出對波長 1064 nm 不同反射率的 OC2 對整體雷射輸出功率、波長 946 nm 與波長 1064 nm 雷射輸出功率的影響。很明顯，反射率較高有助於波長 1064 nm 的競爭，而使得其輸出功率及總輸出功率皆較大。反之，波長 946 nm 雷射輸出功率則因此變小。

在最簡化的架構下。首先，我們使用的輸出耦合鏡為在第一面鍍上對波長 946 nm 反射率 $R=95\%$ 及對波長 1064 nm 高穿透率鍍膜 (HT, $T>99\%$)，第二面則鍍上對波長 946 nm 及 1064 nm 抗反射鍍膜 (AR, $R<0.2\%$) 做實驗，所得的結果如圖 5.3.5。由此圖我們可以得知，在此架構下雖然對波長 1064 nm 的反射率僅有 1%，激發光功率為 7.6 W 時即有波長 1064 nm 雷射輸出。在激發光功率增至 20 W 時，總雷射輸出功率為 3.78 W，其光學轉換效率為 19%。

其次，我們使用的輸出耦合鏡為在第一面鍍上對波長 1064 nm 為部分反射率 $R=10\%$ 與對波長 946 nm 高反射率 $R=97\%$ 鍍膜，第二面則鍍上對波長 946 nm 與 1064 nm 抗反射 (AR, $R<0.2\%$) 做實驗，所得的結果如圖 5.3.6。我們可以明顯的看出，雖然我們增加了對波長 1064 nm 雷射的反射率，此時對波長 946 nm 雷射的影響不大。然而卻大大地增加波長 1064 nm 雷射的輸出功率，而使得總輸出功率大幅提高。在激發光功率 22.5 W 時，總輸出功率為 5.27 W，光學轉換效率達 23.4%。此時波長 946 nm 與 1064 nm 雷射的競爭幾乎相等，使得 P_{946}/P_{1064} 值維持在 0.8 與 1 之間。

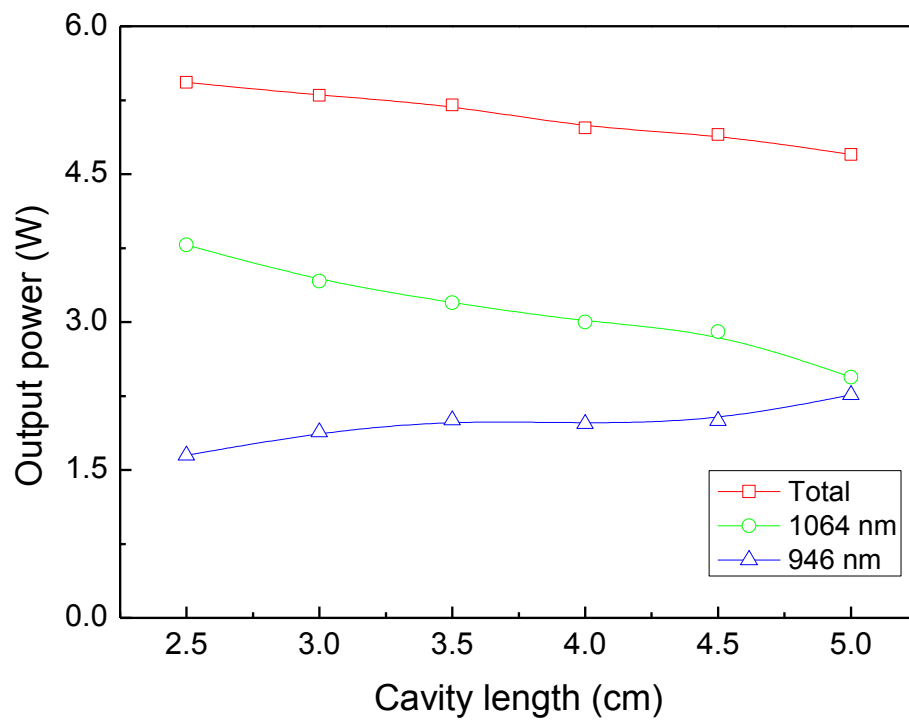


圖 5.3.1：平面耦合輸出鏡 OC2 為對波長 1064 nm 反射率 $R=10\%$ 之雷射輸出功率圖

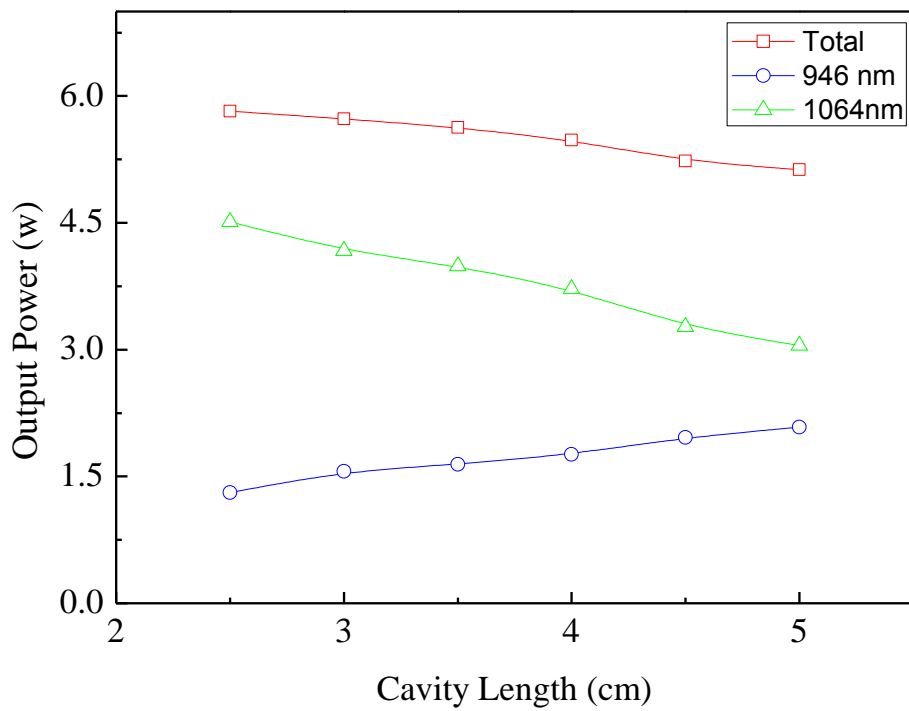


圖 5.3.2：平面耦合輸出鏡 OC2 為對波長 1064 nm 反射率 R=20%之雷射輸出功率圖

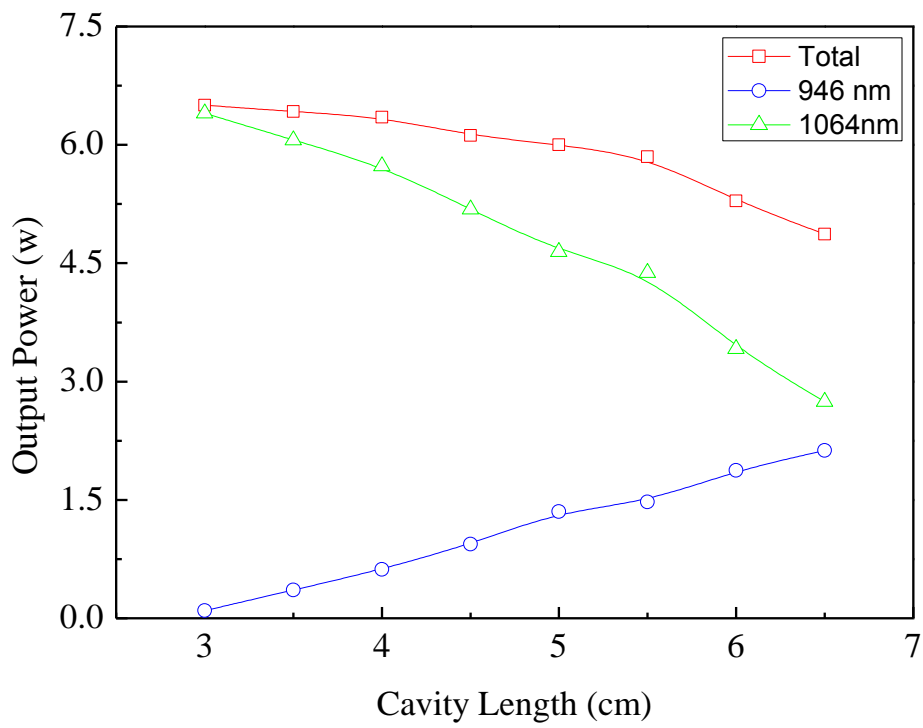


圖 5.3.3：平面耦合輸出鏡 OC2 為對波長 1064 nm 反射率 R=30%之雷射輸出功率圖

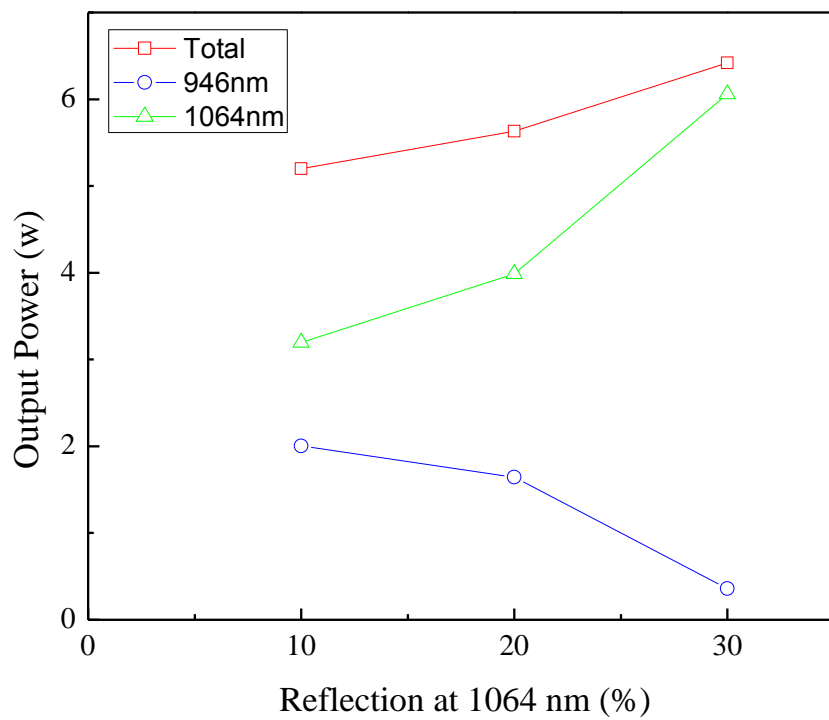


圖 5.3.4：平面耦合輸出鏡 OC2 對波長 1064 nm 不同反射率的鍍膜與雷射輸出功率關係圖

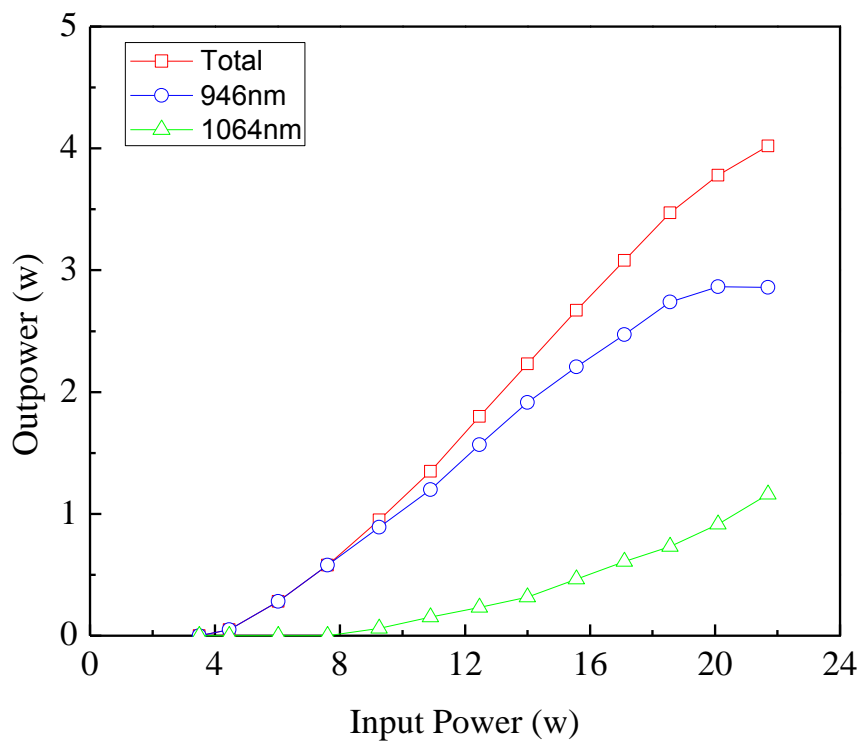


圖 5.3.5：平面輸出耦合鏡對波長 1064 nm 高穿透率鍍膜($T > 99\%$)之雙波長雷射輸出功率圖

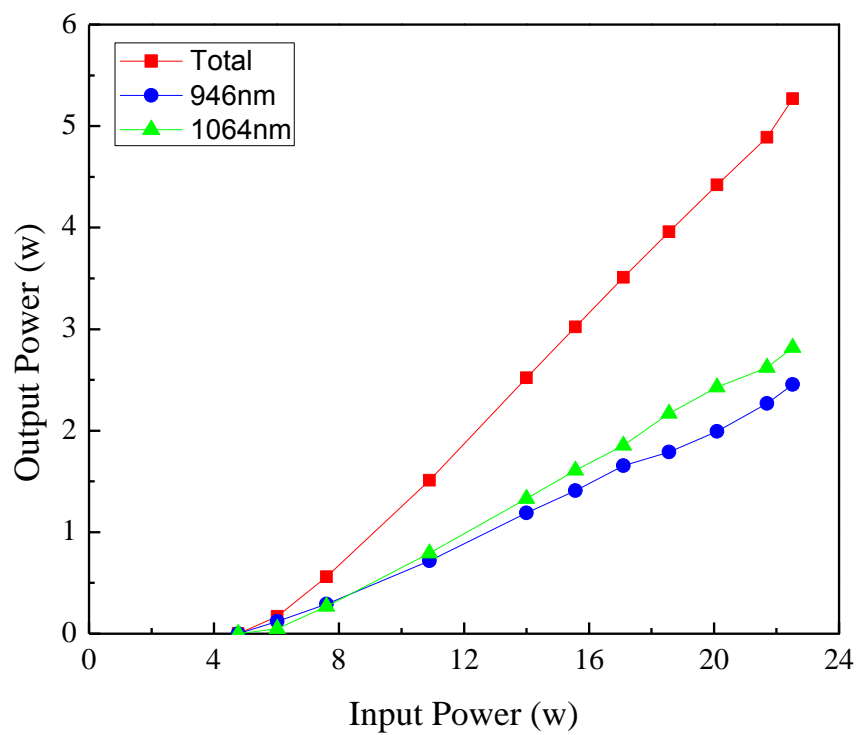


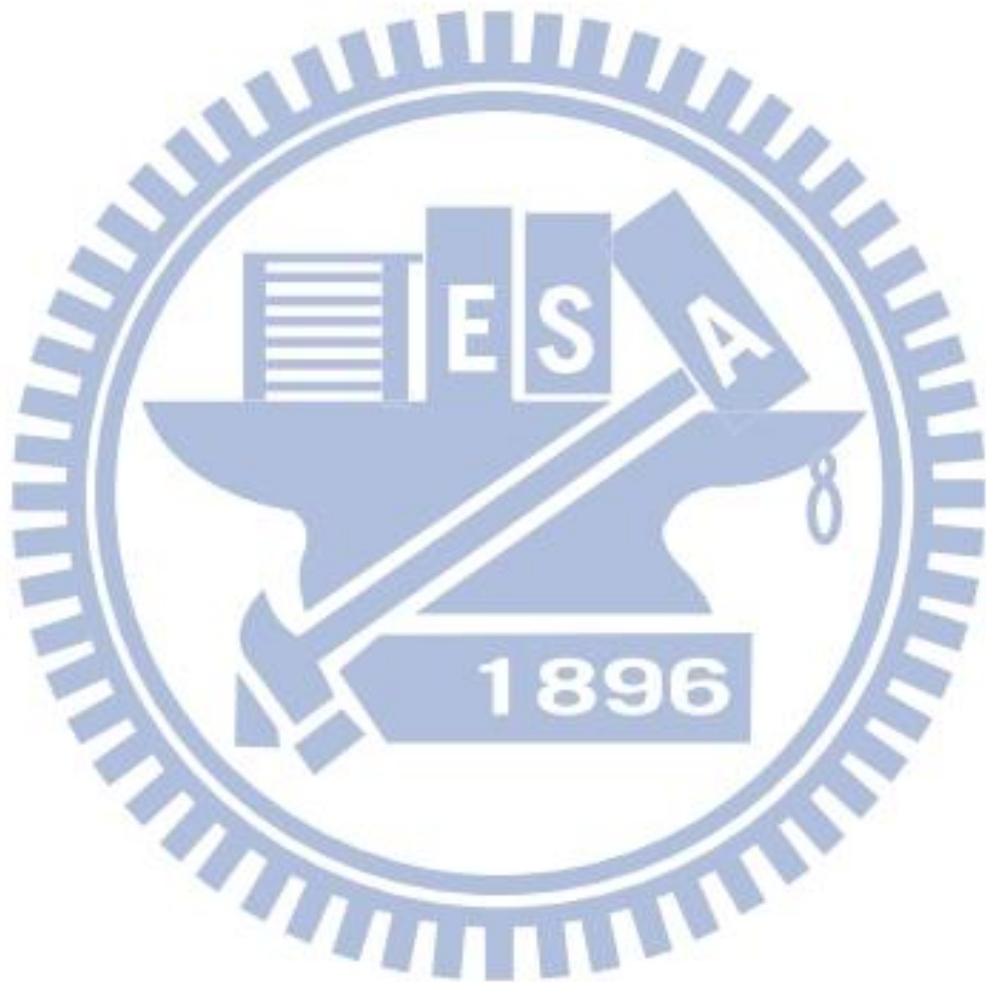
圖 5.3.6：平面輸出耦合鏡對波長 1064 nm 部分反射率 $R=10\%$ 鍍膜之雙波長雷射輸出功率圖

由以上雙波長的實驗結果可以看出，由於我們選用長度僅 2 mm 的 Nd:YAG 晶體做波長 946 nm 雷射的增益介質，並將此晶體與 Nd:YVO₄ 晶體緊密的包覆於銅座之中，保持工作溫度在 10°C，大幅改善了準三能階再吸收耗損的問題。另外，雙晶體且同軸共振腔的結構，可以使得波長 1064 nm 的共振腔再利用了殘餘的波長 808 nm 激發光源能量。在此架構的操作之下，整體雷射光的光學轉換效率可達 33%。

其次，我們可以藉由改變平面輸出耦合鏡的位置，來調整共振腔的腔長，以改變波長 946 nm 與波長 1064 nm 雷射輸出功率的比值 p_{946}/p_{1064} 。我們發現，OC2 以對波長 1064 nm 反射率較高的平面鏡做實驗，整體雷射的輸出功率較高，反之亦然。當 OC2 的反射率為 30%，而波長 1064 nm 的共振腔長為 3 cm 時， p_{946}/p_{1064} 的值非常小(接近 0)。隨著 OC2 往後移動，亦即讓共振腔增長，波長 1064 nm 雷射輸出功率下降，而波長 946nm 雷射的輸出功率亦隨之上升， p_{946}/p_{1064} 的值增加，而整體雷射輸出功率變動不大。我們也發現，可藉由不同對波長 1064 nm 反射率的 OC2，來改變調整 p_{946}/p_{1064} 值時的靈敏度。反射率大，靈敏度則較小。

另外，在最簡化的共振腔架構下。我們得知，雖然輸出耦合鏡對波長 1064 nm 的反射率只約有 1%，激發功率在 7.6 W 時即有波長 1064 nm 雷射輸出。隨著激發功率增大，波長 1064 nm 雷射輸出功率也漸漸增加。如此更呼應了我們在前面所描述，此架構下激發光能量再利用的事實。若我們使用在第一面鍍上對波長 1064 nm 部分反射率 $R=10\%$ 與對波長 946 nm 高反射率 $R=97\%$ 鍍膜的輸出耦合鏡，可將兩波長雷射的輸出功率調至幾乎相等大小，即 p_{946}/p_{1064} 值在 0.8 與 1 之間。

由以上的實驗結果與討論，充分說明了，此架構是一種相當有效率、簡單、可調且有實用價值的雙波長雷射架構。對於雙波長雷射在各方面的應用上，應可提供很大的助益[35-45]。



第六章 結論與展望

由此雙波長雷射的研究，我們對 Nd:YAG 與 Nd:YVO₄ 兩晶體特性更加的認識，而準三能階與四能階雷射在理論與實際操作上也更加的熟悉，並且更加清楚理解倍頻轉換技術的原理與應用，也成功達成預設的目標，即建立了穩定、簡單、光學轉換效率大且可調整兩波長輸出功率比值的雙波長雷射架構。

在波長 946 nm 雷射方面，由於它屬於準三能階雷射，會有熱效應及再吸收耗損的問題。所以當連續激發光源增至 20 W 時，輸出的波長 946 nm 雷射已有飽和的現象。我們改以脈衝光源激發，便無此現象的發生。且輸出雷射相對較為穩定許多。而激發光功率與輸出雷射功率幾乎呈線性的關係。光學轉換效率可以達到 20%。

在波長 1064 nm 與倍頻轉換 532 nm 綠光雷射方面，由於它屬於準四能階雷射，本身就相對較為穩定且技術已成熟。然而，在我們以脈衝激發綠光雷射時，發現雷射輸出的真實脈寬會因為出光時間延遲而縮短。這會造成精密醫療雷射上的問題。我們減小激發光源的直徑大小，也大幅改善了此一現象。

在雙波長的研究中，我們以雙晶體且同軸共振腔的架構，成功地再利用了殘餘的激發光源能量，使得整體雷射光的光學轉換效率提升至 33%。並且藉由改變平面輸出耦合鏡的位置，來調整共振腔的腔長，以改變波長 946 nm 與波長 1064 nm 雷射輸出功率的比值 p_{946}/p_{1064} 。 p_{946}/p_{1064} 可以從 0 調至 1。這是一種相當方便且實用的方式，對於雙波長雷射在各方面的應用上，應可提供很大的助益。

展望未來的工作，首先：對於高功率 Q-switch 的方式來產生雙波長

雷射是個令人感到興趣的課題[6][12][17]。再者，雙波長的倍頻或合頻轉換，即波長 946 nm 倍頻轉換為波長 473 nm 藍光雷射，波長 1064 nm 倍頻轉換為波長 532 nm 綠光雷射，或波長 946 nm 加波長 1064 nm 合頻轉換為波長 501 nm 綠光雷射，亦是值得研究的方向[16-17]。而更進一步的三波長雷射之研究，更是我們迫不及待想從事的目標。相信以現有基礎，應可在可預期的將來，對雙波長或三波長雷射的理論與架構，建立出一套更完整而有系統的模式。



參考文獻

- [1] 姚健全, 徐德剛, "全固態激光及非線性光學頻率轉換技術", 科學出版社(2007)
- [2] J. Machan, R. Kurtz, M. Bass, M. Birnbaum, and M. Kokta, "Simultaneous, multiple wavelength lasing of (Ho,Nd):Y₃Al₅O₁₂," Appl. Phys. Lett. **51**, 1313-1315 (1987).
- [3] W. Q. Shi, R. Kurtz, J. Machan, M. Bass, M. Birnbaum, and M. Kokta, "Simultaneous, multiple wavelength lasing of (Er, Nd):Y₃Al₅O₁₂," Appl. Phys. Lett. **51**, 1218-1220 (1987).
- [4] H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou, G. F. Yu, C. H. Huang, Z. D. Zeng, W. J. Zhang, and Q. J. Ye, "Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystal at transition from $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ and $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$," Appl. Phys. Lett. **56**, 1937-1939 (1990).
- [5] R. Zhou, W. Wen, Z. Cai, X. Ding, P. Wang, and J. YAO, "Efficient stable simultaneous CW dual-wavelength at 1.319 and 1.338 μm ," Chinese Optics Lett. Vol. **3**, No. 10, (2005).
- [6] J. L. He, J. Du, J. Sun, S. Liu, Y. X. Fan, H. T. Wang, L. H. Zhang, Y. Hang, "High efficiency single- and dual-wavelength Nd:GdVO₄ lasers pumped by a fiber-coupled diode," Appl. Phys. B **79**, 301-304 (2004).
- [7] G. C. Sun, Y. D. Lee, B. Z. Li, X. Y. Chen, M. Zhao, J. B. Wang, and G. Y. Jin, "Diode-Pumped Nd:YAG-LBO Laser at 544nm Based on Intracavity Sum Frequency Generation¹," ISSN 1054-660X, Laser Physics, Vol. **21**, No. 6, pp. 1024-1027 (2011).

- [8] Y. F. Lu, X. H. Zhang, J. Xia, G. Y. Jin, J. G. Wang, X. D. Yin, and A. F. Zhang, "1064 nm Nd:YAG laser intracavity pumped at 946 nm and sum-frequency mixing for an emission at 501 nm," *Laser Phys. Lett.* **7**, 335-338 (2010).
- [9] Y. Lu, B. Zhang, E. Li, D. Xu, R. Zhou, X. Zhao, F. Ji, T. Zhang, P. Wang, J. Yao, "High-power simultaneous dual-wavelength emission of an end-pumped Nd:YAG laser using the quasi-three-level and the four-level transition," *Optics Communication* **262**, 241-245 (2006).
- [10] N. Pavel, "Simultaneous Dual-Wavelength Emission at 0.90 and 1.06 μ m in Nd-doped Laser Crystals," *Laser Physics* **20**, 215-221(2010).
- [11] P. Li, D. Li, C. Li, and Z. Zhang, "Simultaneous dual-wavelength continuous wave laser operation at 1.06 μ m and 946 nm in Nd:YAG and their frequency doubling," *Optics Communication* **235**, 169-174 (2004).
- [12] 王君偉, "準三能階被動式 Q 開關藍光雷射的研究" 中山大學碩士論文(2001)
- [13] W. P. Risk and W. Lenth, "Room-temperature, continuous-wave, 946-nm Nd:YAG laser pumped by laser-diode arrays and intracavity frequency doubling to 473 nm," *Optics Letters*, Vol. **12**, No. 12 (1987).
- [14] Q. Zheng, L. Zhao, "Efficient blue laser generation at 473 nm by a BIBO crystal," *Optics and Laser Technology* **36**, 449-451(2004).
- [16] Y. F. Chen, "cw dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser," *Appl.Phys. B* **70**, 475-478 (2000).
- [17] Y. F. Chen and S. W. Tsai, "Diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ yellow

- laser with intracavity sum-frequency mixing," *Optics Lett.* Vol. **27**, No. 6 (2002).
- [18] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering Springer 5th*. Herndon, ch 2.
- [19] J. E. Geusic, H. M. Marcos, L. G. Van Uitert, "Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets," *Appl. phys. Lett.* **4**, 182(1964).
- [20] D. Pruss, G. Huber, A. Beimowski, V. V. Laptev, "Efficient Cr³⁺ sensitized Nd³⁺: GdScGa-garnet laser at 1.06 μ m," *Appl. Phys. B* **28**, 355-358 (1982).
- [21] R. C. Powell, *Physics of Solid-State Laser Materials*. New York (1998).
- [22] T. Yokozawa, H. Hara, "Laser-diode end-pumped Tm³⁺:YAG eye-safe laser," *Appl. Opt.* **35**, 1424-1426 (1996)
- [23] D. Hargis and A. Earman, "Diode-pumped microlasers promise portable projectors," *Laser Focus World*, pp. 243-251(1998).
- [24] Y. Zhao, S. Fleming and S. Poole, "22 mW blue output power from a Pr³⁺ fluoride fiber upconversion laser," *Optics Communication*, Vol. 114, pp. 285-288(1995).
- [25] D. Fluck and P. Gunter, "Efficient generation of CW blue light by sum-frequency mixing of laser diodes in KNbO₃," *Optics Communication*, Vol. 114, pp. 285-288(1995).
- [26] M. Pierrou and F. Laurell, "Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched

- KTiOPO₄ crystal," *Optics Letters*, Vol. 24, No. 4, pp. 205-207(1999).
- [27] H. Jones-Bey,"Expiring license opens field for solid-state blue laser," *Laser Focus World*, pp. 133-137(2000).
- [28] P. Zeller and P. Peuser,"Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{9/2}$ transition of Nd:YVO₄ and Nd:YAG," *Optics Letters*, Vol. 25, No. 1, pp. 34-36(2000).
- [29]T. Kellner, F. Heine, V. Ostroumov, G. Huber,"High power diode-pumped intracavity frequency doubled CW Nd:YAG laser at 473 nm," *Advanced Solid-state Laser*, Vol. 10,(1997).
- [30] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications 5th*, HBJ Saunder, ch. 6.
- [31] T. Y. Fan and R. L. Byer,"Diode laser-pumped solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron*, Vol. 24, No. 6, pp. 895-912(1998).
- [32] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peter, and G. Weinreich,"Generation of optical harmonics," *Phy. Rev. Lett.* Vol. 7, pp. 118(1961).
- [33] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communication*, New York, Oxford.
- [34] W. P. Risk,"Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses,"*J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 5, No. 7, pp. 1412-1423(1988).
- [35] Y. J. Huang, Y. P. Huang, H. C. Liang, K. W. Su, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "Comparative study between conventional and diffusion-bonded Nd-doped vanadate crystals in the passively mode-locked operation,"

Opt. Express 18, 9518-9524 (2010).

- [36] H. C. Liang, Y. J. Huang, W. C. Huang, K. W. Su, and Y. F. Chen, "High-power, diode-end-pumped, multigigahertz self-mode-locked Nd:YVO₄ laser at 1342 nm," Opt. Lett. 35, 4-6 (2010).
- [37] J. Y. Huang, W. Z. Zhuang, W. C. Huang, K. W. Su, C. Hu, K. F. Huang, and Y. F. Chen, "Comparative studies for Cr⁴⁺:YAG crystal and AlGaInAs semiconductor used as a saturable absorber in Q-switched Yb-doped fiber lasers," Opt. Express 17, 20800-20805 (2009).
- [38] S. C. Huang, H. L. Cheng, Yi-Fan Chen, K. W. Su, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "Diode-pumped passively mode-locked 1342 nm Nd:YVO₄ laser with an AlGaInAs quantum-well saturable absorber," Opt. Lett. 34, 2348-2350 (2009).
- [39] H. C. Liang, H. L. Chang, W. C. Huang, K. W. Su, Y. F. Chen, and Y. T. Chen, "Self-mode-locked Nd:GdVO₄ laser with multi-GHz oscillations: manifestation of third-order nonlinearity," Appl. Phys. B 97, 451-455 (2009).
- [40] J. Y. Huang, W. C. Huang, W. Z. Zhuang, K. W. Su, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "High-pulse-energy, passively Q-switched Yb-doped fiber laser with AlGaInAs quantum wells as a saturable absorber," Opt. Express 16, 21155-21160 (2008).
- [41] Y. T. Chang, Y. P. Huang, K. W. Su, and Y. F. Chen, "Comparison of thermal lensing effects between single-end and double-end diffusion-bonded Nd:YVO₄ crystals for 4F_{3/2}-> 4I_{11/2} and 4F_{3/2}->

- 4I13/2 transitions," *Opt. Express* 16, 21155-21160 (2008).
- [42] Y.P. Huang, K.W. Su, A. Li, Y.F. Chen, and K.F. Huang, "High-peak-power passively Q-switched Nd:YAG laser at 946 nm," *Appl. Phys. B* 91, 429-432 (2008).
- [43] J. Y. Huang, S. C. Huang, H. L. Chang, K. W. Su, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "Passive Q switching of Er-Yb fiber laser with semiconductor saturable absorber," *Opt. Express* 16, 3002-3007 (2008).
- [44] Y. P. Huang, H. C. Liang, J. Y. Huang, K. W. Su, A. Li, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "Semiconductor quantum-well saturable absorbers for efficient passive Q switching of a diode-pumped 946 nm Nd:YAG laser," *Appl. Opt.* 46, 6273-6276 (2007).
- [45] Y. F. Chen, Y. S. Chen, T. H. Ou, and K. W. Su, "Compact efficient diode-pumped Nd:YVO₄ Q-switched blue laser with intracavity frequency tripling," *Appl. Phys. B* 81, 517-520 (2005).