

二極體激發式主動 Q-開關 Nd:YVO₄ 雷射的腔內頻率轉換技術：綠光、黃橘光與紅光雷射

Technology of Intracavity Frequency Conversion in Diode-Pumped Actively Q-Switched Nd:YVO₄ Laser: Green, Yellow-Orange and Red Lasers

陳意鑫、陳永富

Yi-Shin Chen, Yung-Fu Chen

利用頻率轉換技術，將摻鉍固態雷射轉換為可見光雷射是重要且實用的課題。若加入 Q-開關裝置，可見光雷射的功率將可獲得明顯地提升且變得更為實用，特別是在工業上與醫療上。本文目的在介紹如何用頻率轉換技術產生綠光、黃橘光以及紅光波段的全固態雷射，且針對相關理論以及實驗架構做一完整的描述。

Most of Nd-doped solid-state laser was utilized for visible light source generation by frequency conversion. By introducing a Q-switching element, the power of visible laser could be scaled up obviously and be applied practically, especially in industrial and medical application. The succinctly description of correlative theory and experimental frame are the main purpose of this article.

一、前言

固態雷射由於具有體積小、高效率、壽命長、維護容易等優點，與其他種類雷射相比，在應用上十分有競爭優勢。為了能使固態雷射的應用層面更為廣闊，利用非線性晶體來做頻率轉換是個十分熱門的技術及研究方向。許多的研究結果顯示，若能

利用 Q-開關雷射做頻率轉換，其轉換效率將大大的提高，能達成的波段開發也能更廣。本文分別從 Q-開關雷射以及非線性晶體做頻率轉換為出發點，將基本相關理論作一簡介。最後將目前相關的實驗成果做介紹及討論。

二、Q-開關雷射介紹

1. Q-開關的分類

Q-開關的分類有兩種：

- (1) 主動式 Q-開關：重複率可由外在信號控制而改變。例如機械式元件 (如：旋轉鏡面)、聲光晶體 (acousto-optic)、以及電光晶體 (electro-optic) 等。
- (2) 被動式 Q-開關：重複率無法經由外在信號來控制，而與材料本身的性質有關。例如有機染料片、色心晶體 (LiF:F)、摻四價鉻的鈮鋁石榴石晶體 (Cr⁴⁺:YAG) 等。

2. Q-開關雷射的動作機制⁽¹⁾

在脈衝式雷射中，擔任腔內品質因子 Q 調制工作的元件稱為 Q-開關。Q-開關在共振腔內的角色就如同水庫的閘門似的，控制著輸出與否 (圖 1)。當 Q-開關打開時共振腔內的損耗就會增加 (low- Q)，此時腔內的增益小於損耗而無法共振出光，因此增益介質上的居量反轉濃度 (population inversion) 並不會減少，且其反轉濃度會持續地增加至比穩定態 (CW 輸出模式) 高。當 Q-開關關掉時，則腔內的損耗會突然下降，此時腔內的增益遠大於損耗，光

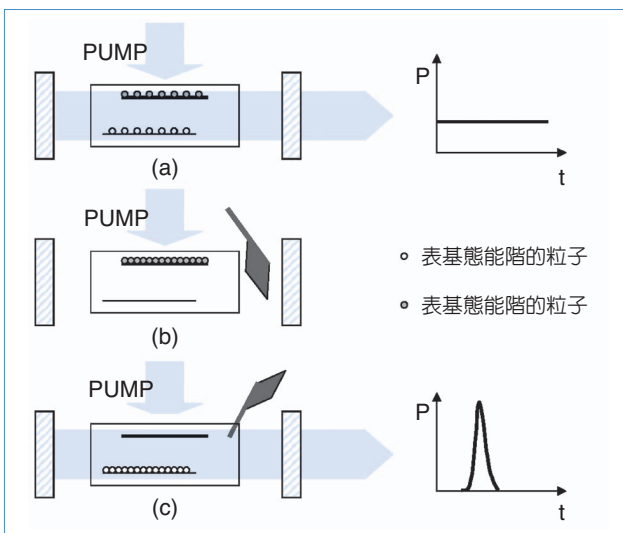


圖 1. 說明 Q-開關的動作機制。(a) 正常的連續波 (CW) 雷射輸出。(b) Q-開關 on 時，無雷射輸出，粒子大量累積至上能階。(c) Q-開關 off 時，形成脈衝式雷射輸出。

子在瞬間大量的產生，因此會有一個能量很高的脈衝雷射輸出；同時增益會很快地往下掉，當掉到與腔內的損耗相同時 (臨界點, threshold)，光子密度達到最高值，接著增益繼續掉到臨界點以下，光子很快就消失了。這整個產生脈衝雷射的過程大約只有幾個到幾十個奈米秒而已，而脈衝寬度越窄，所得到的脈衝峰值功率也就越高。

在聲光 (A-O) 晶體 Q-開關裝置中，當超聲波進入一穿透性的光學材料時，此光學材料的行為就像是一個光學相位光柵。當光束入射此光柵，大部分的光即會被繞射脫離原方向至一個甚至更多不同的方向。適當的選擇參數，繞射光就能被偏折出雷射的共振腔 (low Q)。當 Q-開關上轉換器的供應電壓被關掉，無超聲波傳入時，共振腔就可回到 high Q 值的狀態，此時帶著超高峰值功率的脈衝光就產生了。

三、非線性頻率轉換技術

在固態雷射的增益介質中，要產生可見光能階的躍遷是很困難的。因此利用非線性晶體來做頻率 (波長) 轉換是十分廣泛的用法。在三波相互作用的非線性頻率轉換過程 (SHG、SFG、DFG) 中，要達到有效率的能量輸出，入射光波與輸出光波在非線性晶體中存在固定的相位關係，亦即必須達到相位匹配。

1. 非線性光學

非線性光學係用於研究物質的光學性質，特別是物質受到強光照射的情形。在強光的作用下，物質的非線性現象會特別的明顯，其電極化向量與電場強度的關係改為⁽²⁾

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

$\chi^{(1)}$ 為線性電極化率， $\chi^{(2)}$ 和 $\chi^{(3)}$ 分別為二階和三階非線性電極化率。當光強度不大時，電場強度小，電極化向量與電場的關係以第一階的線性關係最為明顯。光強度增大或是物質的 $\chi^{(2)}$ 和 $\chi^{(3)}$ 較大，便會使得第二階與第三階的非線性效應增強，物質對光的非線性現象因而顯著。

將電場以 $\mathbf{E} = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + c.$ 表示，代表著兩頻率不同的光照射到物質，代入 (1) 式中，以 \mathbf{P} 的二階展開說明非線性光學的一些基本現象。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^{(2)}(t) &= \varepsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}^2(t) \\ &= \varepsilon_0 \chi^{(2)} \left[E_1^2 e^{-2i\omega_1 t} + E_2^2 e^{-2i\omega_2 t} + 2E_1 E_2 e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} \right. \\ &\quad \left. + 2E_1 E_2^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t} + c. \right] + 2\varepsilon_0 \chi^{(2)} (E_1 E_1^* + E_2 E_2^*) \end{aligned} \quad (2)$$

由 (2) 式中可看出，物質受到兩種頻率的電場作用下，可能會產生二倍頻 (second-harmonic generation, SHG)、混頻中的和頻 (sum-frequency generation, SFG) 與差頻 (difference-frequency generation, DFG) 的輻射光。

$$\text{倍頻: } P(2\omega_1) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E_1^2 \Rightarrow \omega_3 = 2\omega_1$$

$$P(2\omega_2) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E_2^2 \Rightarrow \omega_3 = 2\omega_2$$

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

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

2. 雙折射性相位匹配

雙折射性相位匹配 (birefringent phase matching) 為最常見且重要的相位匹配技術。藉由雙折射性晶體的特性來調制作用波長在晶體中的相速度以及波向量，以達到相位匹配所需的條件。

3. 臨界與非臨界相位匹配

在相位匹配角 θ_{pm} 為 90° 時，稱之為非臨界相位匹配 (noncritical phase matching, NCPM)，而 $\theta_{pm} \neq 90^\circ$ 時稱之為臨界相位匹配 (critical phase matching, CPM)。NCPM 類晶體有兩點優於 CPM 類晶體。第一，對入射光束 (基頻光) 的發散角較不敏感。第二，NCPM 類型的走離角 (walk-off angle) 為零，因此在光束大小以及晶體長度上比較沒有限制。

4. 準相位匹配

準相位匹配 (quasi-phase matching, QPM) 是一種雙折射性相位匹配的替代技術，經由晶體非線性極化率的週期性調制來補償頻率轉換過程中由於折射率色散造成的基頻光與諧波光之間的相位失配。QPM 類型晶體不存在走離效應，因此為了提高轉換效率，晶體長度可以做得很長。

四、實驗架構與討論

以 Nd:YVO₄ 為增益介質的固態雷射裡，1064 nm 與 1342 nm 為最常被拿來當作頻率轉換技術裡的基頻光。以這兩種波長，搭配適當的非線性晶體，經過不同的頻率轉換機制 (SHG、SFG、DFG、OPO 甚至 THG...等)，便可得到不同波段的雷射輸出；波長範圍可由紫外、可見光到紅外波段。本節分別就 532 nm、671 nm 以及 593 nm 三種不同波段的可見光雷射，對其實驗架構以及結果做一簡介及討論。

1. 基頻光

在 1064 nm 以及 1342 nm 的雷射輸出效率研究中，為了得到最高的效率輸出，無論是共振腔設計 (腔長、結構) 或者是增益晶體的種類、參數 (長度、Nd 離子摻雜的濃度⁽³⁾...等)，都是提升輸出功率的重要因素。

我們採用單端激發式的直線腔架構 (如圖 2)。激發光源為 20 W 的半導體雷射，輸出波長為 808 nm，以光纖耦合至 1:1 的輸出耦合鏡組，聚焦至 *a*-cut 的 Nd:YVO₄ 上，其激發光點大小為 0.3 mm。晶體中 Nd 離子的摻雜濃度為 0.25%，晶體長度為 9 mm，以銅座包覆且通水溫控於 20 °C。做為 Q-開關的 A-O 晶體長度為 20 mm，材質為 TeO₂，晶體兩端面皆對 1064 nm 以及 1342 nm 做抗反射的鍍膜，中心頻率操作在 41 MHz，提供 3 W 的 rf 訊號。輸入耦合鏡 M1 是個焦距為 1 m 的凹面鏡，凹面上對輸出的兩波長鍍高反射膜 ($R > 99.8\%$)，且

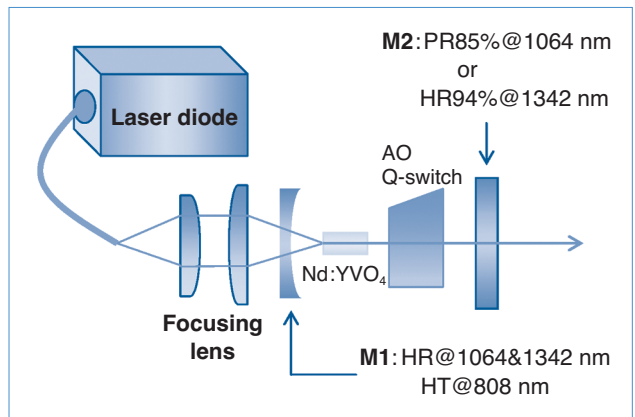


圖 2. 基頻光實驗架構圖。

對激發光源波長為高穿透 ($T > 90\%$)。在輸出耦合鏡方面，當要得到 1064 nm 的雷射輸出時，選用鏡面鍍膜為對 1064 nm 部分反射 ($PR = 85\%$) 的平面鏡。同理，選用鍍膜為對 1342 nm 高反射 ($R = 94\%$) 的輸出耦合鏡時，可得到 1342 nm 的雷射輸出。上述的設計是為了要使激發光源能最有效率的進入共振腔、聚焦於增益晶體上，並針對所要波長設計最適當的共振腔。由於 1342 nm 在 Nd:YVO₄ 裡的增益比 1064 nm 來得小，因此需選用較高反射率的鍍膜來提供較好的共振腔品質。此實驗架構腔長約為 5 cm。

就圖 2 架構中，未加入 A-O 晶體做為 Q-開關時，我們分別可得到 1064 nm 與 1342 nm 的連續波 (CW) 雷射輸出。如圖 3，在 15.2 W 的激發功率下，1064 nm 波段輸出功率為 7.7 W，1342 nm 波段輸出功率為 4.62 W。光轉光效率分別為 50.6%、30.4%，光束品質 M^2 約為 1.1。

當在腔內加入 A-O 晶體做為 Q-開關時，我們可得到脈衝式輸出。在 Q-開關動作重複率為 30 kHz 時，激發功率與輸出功率關係如圖 3 所示。當激發功率為 15.2 W 時，1064 nm 的平均輸出功率為 4.9 W，脈衝寬度為 14 ns，峰值功率約為 11.6 kW。1342 nm 的平均輸出功率為 3.35 W，脈衝寬度為 60 ns，峰值功率為 1.86 kW。一定激發功率下，隨著 Q-開關的重複率增加，脈衝寬度增寬，平均輸出功率上升，但瞬間峰值功率下降。

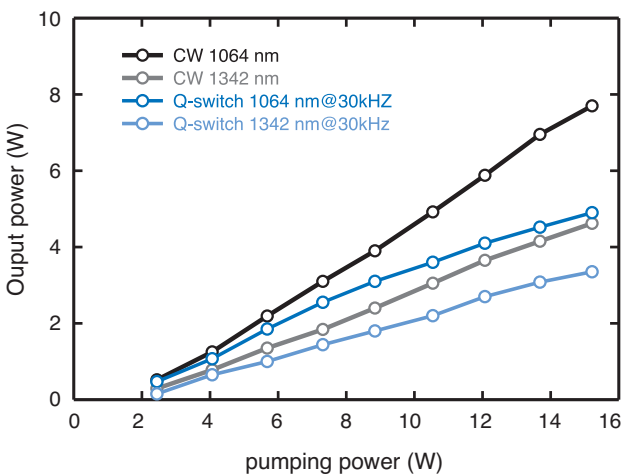


圖 3. 激發功率與 CW、脈衝式基頻光雷射輸出功率關係圖。

2. 532 nm 綠光雷射

以 1064 nm 做為基頻光，經過非線性晶體做二倍頻諧波轉換，即可得到可見光波段的 532 nm 綠光雷射。以二極體雷射為激發光源、A-O 晶體做為 Q-開關的腔內倍頻固態雷射，具有效率高、體積小、重複率高等特點，在雷射測距、雷達、水下通訊、光學儲存以及醫療等方面皆有廣泛的應用。因為 Nd:YVO₄ 晶體的熱傳性質較差，在高重複率高功率的固態雷射中，一般採用 Nd:YAG 晶體。利用 Nd:YVO₄ 晶體為增益介質的半導體激發全固態高重複率腔內倍頻雷射的研究，已可獲得平均為 4.5 W 的綠光輸出⁽⁴⁾。KTP 由於它廣大的透光波段 (350 nm—4000 nm)、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，已然成為二倍頻諧波轉換中最受歡迎的晶體，也是 Nd-doped 固態雷射的最佳拍檔。

實驗架構如圖 4，同樣採用二極體雷射為激發光源，其輸出的 808 nm 雷射經由光纖耦合至 2:1 的耦合鏡組，聚焦至 a-cut 的 Nd:YVO₄ 晶體上。Nd:YVO₄ 晶體的 Nd 離子的摻雜濃度為 0.25%，使用低濃度的 Nd:YVO₄ 晶體是為了避免因熱堆積而造成晶體的損壞⁽³⁾。晶體長度為 9 mm，以銅座包覆且通水溫控。耦合鏡組的輸出面，針對 1064 nm 鍍上高反射膜，做為共振腔的前鏡。輸出耦合鏡上的鍍膜對 1064 nm 波段為高反射，且對 532 nm 為高穿透。在非線性晶體的選用上，我們挑選了幾根不同長度以及鍍膜的 II 類相位匹配 KTP 晶體 ($\theta = 90^\circ$ ，

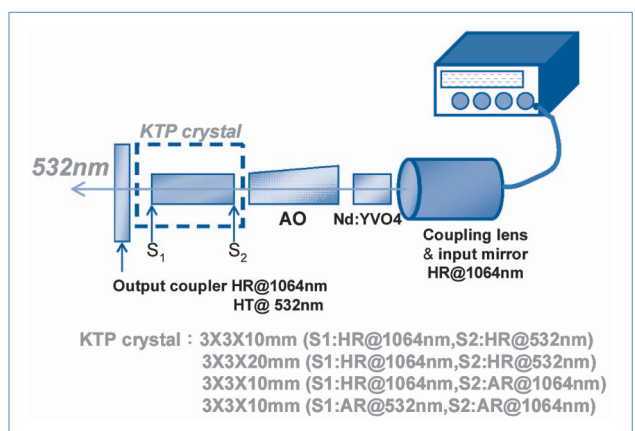


圖 4. 全固態 Q-開關腔內倍頻 532 nm 綠光雷射實驗架構圖。

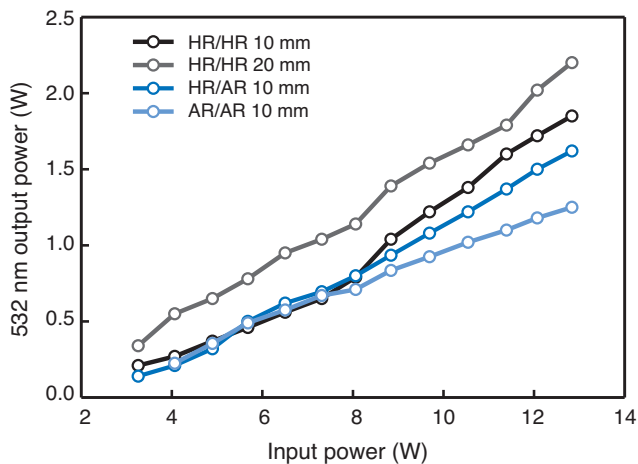


圖 5. 激發功率與 532 nm CW 雷射輸出功率關係圖。

$\phi = 23.5^\circ$) 來做比較。長度及鍍膜資料如圖 4 中所附。KTP 晶體同樣也以銅座包覆且通水溫控。晶體上 S_1 面鍍了對 1064 nm 為高反射的膜後，則在實驗架構上不需要輸出耦合鏡。其中特別的是，有的 KTP 晶體在 S_2 面針對 532 nm 做高反射鍍膜。這些非線性晶體由於長度與鍍膜而導致的輸出功率優劣與否，將在本節中討論。依晶體長度不同，此實驗架構腔長約為 4.5 cm 至 5.5 cm。

圖 5 為激發功率與 532 nm CW 雷射輸出功率關係圖。可看出兩面皆鍍高反射膜的兩根 KTP，其轉換效率高於另外兩根 KTP。其中長度為 20 mm 的 KTP 其輸出功率也高於 10 mm 的 KTP。在 12.8 W 的激發功率下，經由 KTP 晶體做二倍頻轉換，可得 2.2 W 的 532 nm 雷射輸出，轉換效率約為 17.2%。在實驗過程以及實驗結果中，觀察到 S_2 上鍍膜與否有兩點影響。第一， S_2 上鍍 532 nm 高反射膜可防止 532 nm 返回腔內造成增益介質對它的吸收，避免對輸出功率有不良的影響；在共振腔調整最佳化的過程中，也可感覺到雷射輸出的穩定度。第二， S_2 上鍍 532 nm 高反射膜後，由於 532 nm 的光不會返回腔內干擾 Nd:YVO₄ 偏振方向，因此可得到良好線性偏振 (大於 100:1) 的 532 nm 綠光；沒有針對 532 nm 鍍膜的晶體，其綠光的線偏振化約莫只有 10:1。而在 S_1 上鍍上 1064 nm 高反射膜 (HR/AR 10 mm) 的 KTP 晶體，在輸出功率的表現上也優於同樣長度，但兩端面只針對 1064 nm 鍍抗反射膜 (AR/AR 10 mm) 之 KTP 晶體。或許是

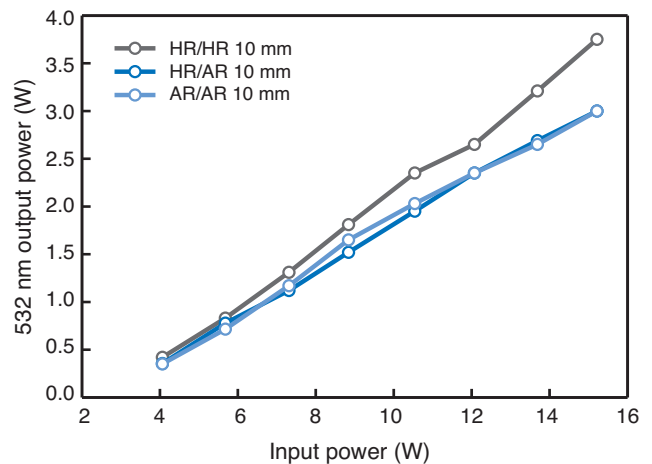


圖 6. 激發功率與脈衝式 532 nm 雷射輸出功率的關係圖。

直接在端面鍍膜可增加結構的緊湊性，減少元件造成的損耗，以致於在功率上可以有些許的提升。

較長的晶體長度可增加相互作用的距離，提升轉換效率；但在非線性晶體中存在的走離效應也會隨著晶體長度的增長，降低轉換效率。而直接在端面上鍍膜雖可提升輸出功率與穩定度，但是也附帶著比較昂貴的價格以及鍍膜在高功率輸出下的受損風險。這些晶體參數取舍上的問題，無法論定孰優孰劣，端看應用以及實際狀況而定。

當在腔內擺入 A-O 晶體 (晶體長度為 20 mm，材質為 TeO₂，晶體兩端面皆對 1064 nm 以及 1342 nm 做抗反射的鍍膜) 做為 Q-開關，可得脈衝式的綠光雷射輸出。其不同晶體與其輸出功率的關係如圖 6 所示。為了避免在高功率輸出下 KTP 端面上的鍍膜受到損傷，預期會有良好效率之 HR/HR 20 mm 的 KTP 晶體在這個實驗裡將不被使用。實驗結果顯示，HR/HR 10 mm 的 KTP 晶體有最好的轉換效率，約為 24.7%。可以明顯看出其二倍頻轉換效率較 CW 模式輸出時為佳。這是由於 1064 nm 基頻光的高峰值功率在非線性晶體中提高了二倍頻轉換效率。在 CW 輸出模式，激發功率為 8.84 W 以上時，HR/AR 10 mm 的 KTP 晶體轉換效率優於 AR/AR 10 mm 的 KTP 晶體；但是在脈衝輸出模式下，兩者的輸出效率卻差不多。推論可能是因為在高功率輸出時，端面上針對 1064 nm 高反射的鍍膜受到損傷，以致於原本的優勢不再。但是同樣有鍍

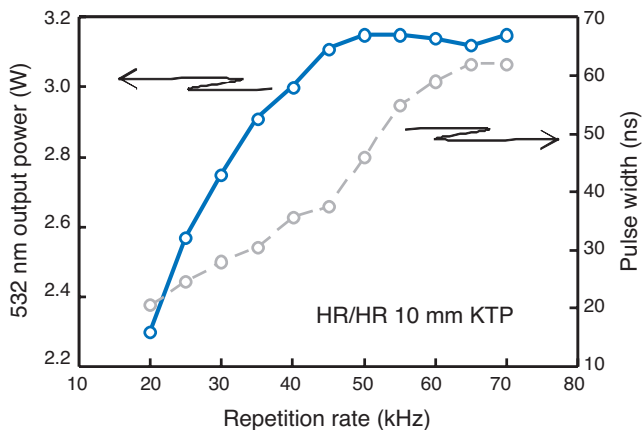


圖 7. 定激發功率時，532 nm 平均輸出功率與脈衝寬度隨著 Q -開關重複率變化之關係圖。

膜的 HR/HR 10 mm KTP 晶體就沒有此現象。因此，鍍膜品質的好壞也是十分重要的。在高功率激發下，直接於端面上鍍膜的晶體在使用上需特別的留意。

其中效率最好的 HR/HR 10 mm KTP 在激發功率為 15.2 W， Q -開關動作重複率為 45 kHz 時，可得到 3.75 W 的 532 nm 的平均輸出功率，脈衝寬度為 38.4 ns，峰值功率為 2.17 kW。由圖 7，激發功率固定為 13.7 W 時，隨著 Q -開關的重複率增加，脈衝寬度增寬，平均輸出功率上升且有逐漸飽和的現象，但峰值功率逐漸下降。

3. 671 nm 紅光雷射

利用 1342 nm 為基頻光，倍頻後可獲得 671 nm 的紅光雷射輸出。因其基頻光受激輻射有效截面積較低⁽⁵⁾，因此轉換效率沒有比同樣為二倍頻轉換所得的 532 nm 綠光雷射來的高。與半導體雷射單獨產生的 671 nm 紅光相比，半導體雷射激發全固態紅光雷射的光束品質要好的多。因此在對光束品質有特殊要求的領域，有廣泛的應用前景。

腔內倍頻 671 紅光雷射的實驗架構與前面的 532 nm 綠光雷射十分類似。實驗架構如圖 8 所示。二極體雷射輸出的 808 nm 雷射經由光纖耦合至 1:1 的耦合鏡組，聚焦至 a -cut 的 Nd:YVO₄ 晶體上，其 Nd 離子的摻雜濃度為 0.25%，晶體長度為 9 mm，同樣以銅座包覆且通水溫控。前鏡上鍍膜對 1064 nm 以及 808 nm 為高穿透，以及對 1342 nm 以及

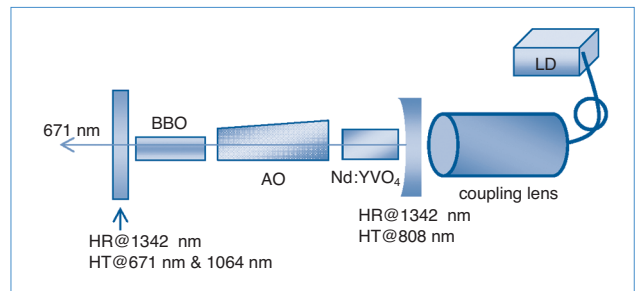


圖 8. 全固態 Q -開關腔內倍頻 671 nm 紅光雷射實驗架構圖。

671 nm 為高反射。非線性晶體採用 I 類相位匹配類型的 BBO 晶體 ($\theta = 20.3^\circ$, $\phi = 0^\circ$)，晶體尺寸為 $3 \times 3 \times 8$ mm，兩端面皆鍍有對 1342 nm 抗反射膜，同樣也以銅座包覆且通水溫控。做為 Q -開關的 A-O 晶體長度為 20 mm，材質為 TeO₂，晶體兩端面皆對 1064 nm 以及 1342 nm 做抗反射的鍍膜。輸出耦合鏡上的鍍膜針對 1342 nm 做高反射以及對 671 nm、1064 nm 做高穿透。由於在 Nd:YVO₄ 晶體中，1064 nm 比 1342 nm 的受激輻射有效截面積要來的高出許多，因此必須在共振腔設計上對 1064 nm 做高透射損耗，抑制它在腔內的共振發生。如此才能確保在高功率激發下，只有 1342 nm 能產生共振。此實驗架構腔長約為 4.5 公分。

將 A-O 晶體放至腔內擔任 Q -開關的角色，可得到脈衝式的 671 nm 雷射輸出。目前的實驗結果為，在激發功率為 15.2 W 時，可得到 1.62 W 的 671 nm 脈衝式紅光雷射輸出，光轉換效率約為 10.6%。如圖 9，在激發功率為 13.7 W， Q -開關重複率為 30 kHz 時，可得最佳的 1.5 W 的平均功率輸出，脈衝寬度為 74 ns，峰值功率為 676 W。671 nm 雷射的輸出脈衝寬度隨著重複率的提高而增寬。

4. 593 nm 黃橘光雷射

具有結構緊湊特性的黃橘光固態雷射，近來於醫學以及生物科技領域有越來越多的應用。得到黃橘光波段雷射的方式包括有：以 Cr:fosterite 雷射做二次諧波轉換 (SHG)⁽⁶⁾、 Q -開關調頻 Nd:YAG 雙波長雷射做混頻 (SFG)⁽⁷⁾，以及腔內的 Nd:YAG Raman 雷射做倍頻⁽⁸⁾。之前，本實驗室也已經以半導體雷射單端激發式的 Q -開關可調頻 Nd:YVO₄ 雷

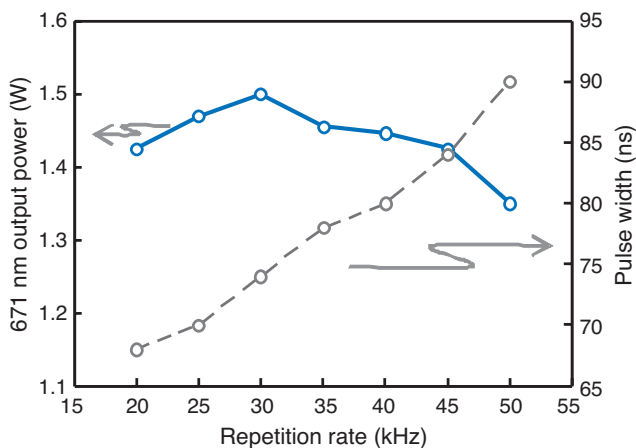


圖 9. 定激發功率時，671 nm 脈衝式雷射平均輸出功率與脈衝寬度隨著 Q -開關重複率的變化關係。

射為架構，利用 BBO 晶體做腔內雙波長混頻，得到 340 mW 的 593 nm 雷射輸出⁽⁹⁾。

許多有週期性極化的材料使得準相位匹配技術 (QPM) 已可取代傳統的雙折射性相位匹配技術。此種材料中，常見的為具有高非線性係數 ($d_{33} = 27$ pm/V) 的 PPLN (periodically poled lithium niobate)。另一種材料，PPKTP (periodically poled KTiOPO₄) 雖然非線性係數 ($d_{33} = 17$ pm/V) 不比 PPLN 高，但其特點為具有高的破壞閾值 (> 900 MW/cm² for 5 ns pulse)，且晶體厚度可達 1 mm。

在接下來介紹的實驗裡，我們利用 PPKTP 晶體將 1064 nm 以及 1342 nm 做腔內混頻，得到波段為 593 nm 的脈衝式雷射輸出。為了得到高效率的混頻光，兩基頻光需要有良好的空間以及時間上的重疊。之前我們已經有了利用雙波長 (1064 nm 以

及 1342 nm) 系統得到良好混頻效率的經驗⁽⁹⁾。實驗架構十分類似，如圖 10 所示。 a -cut 的 Nd:YVO₄ 晶體長度為 8 mm，Nd 離子的濃度為 0.3%。晶體以銅座包覆且通水溫控於 20 °C。晶體兩端面皆對 1064 nm 以及 1342 nm 做抗反射的鍍膜。激發光源為 20 W 的光纖耦合半導體雷射，其輸出的 808 nm 雷射光經過耦合鏡組聚焦至晶體上，激發光點大小約為 0.3 mm。M1 為輸入耦合鏡，也就是共振腔的前鏡，為焦距等於 1 m 的凹面鏡；其上針對兩基頻光波長鍍高反射膜 ($R > 99.8\%$)，且對激發光源波長為高穿透 ($T > 90\%$)。M2 為平面鏡，鍍有 1342 nm 的高反射膜 ($R > 99.8\%$)，且對 1064 nm 高穿透 ($T > 95\%$)。M3 也為平面鏡，鍍膜為對 1064 nm 高反射以及對 593 nm 高穿透 ($T > 90\%$)。做為 Q -開關的 A-O 晶體長度為 20 mm，兩端面皆對 1064 nm 以及 1342 nm 做抗反射的鍍膜。非線性晶體 PPKTP，尺寸為 5 mm 長、1 mm 厚、2 mm 寬，極化週期為 12.6 μ m，晶體兩端面也對 1064 nm 以及 1342 nm 做抗反射的鍍膜。PPKTP 晶體以 TE cooler 做溫控，溫控的誤差約在 0.25 °C 上下。

M1 至 M2 之間可算是 1342 nm 波長的共振腔，其長度為 5 cm，定義為 d_{1342} 。而 M1 至 M3 這一段距離，可經由調變而得到最高的 593 nm 輸出功率。實驗結果顯示這一段距離，也就是 d_{1064} ，約等於 15 cm。有效的光學共振腔長度比 d_{1064}^* / d_{1342}^* 約等於 2.3。這個值非常的接近 Nd:YVO₄ 中，能階躍遷為 ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ 與 ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ 的兩受激輻射截面積比，也就是 $\sigma_{1064} / \sigma_{1342}$ 約等於 2.1。Lin 與 Shen⁽¹⁰⁾ 以理論分析提出過，在 Q -開關雷射中，雙波長最佳

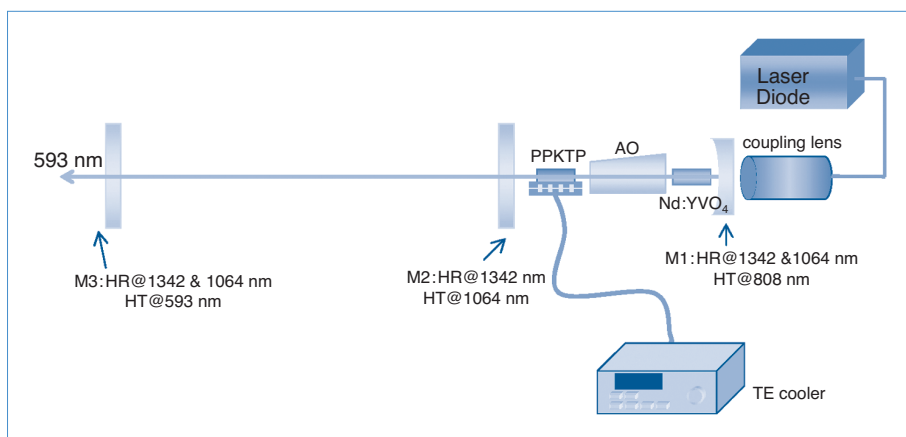
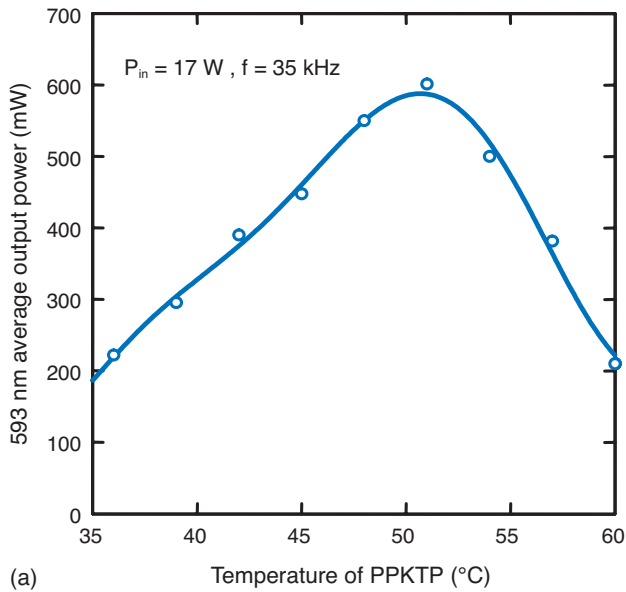
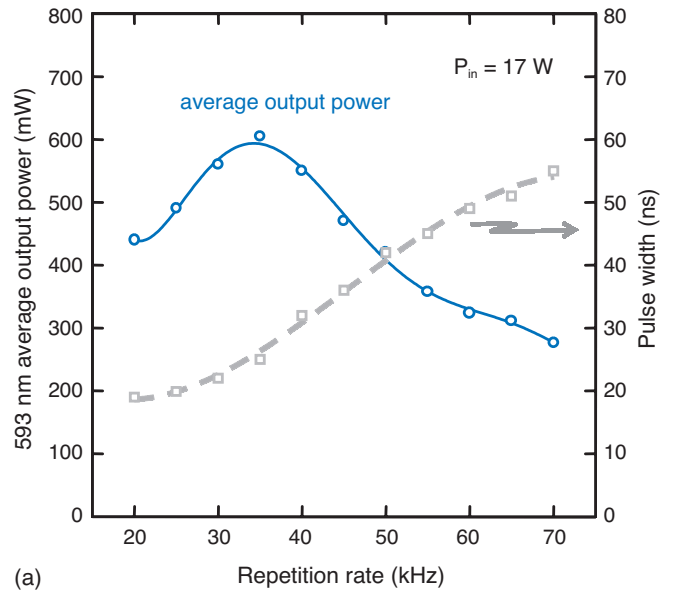


圖 10. 以 PPKTP 晶體做腔內混頻實驗架構圖。



(a)



(a)

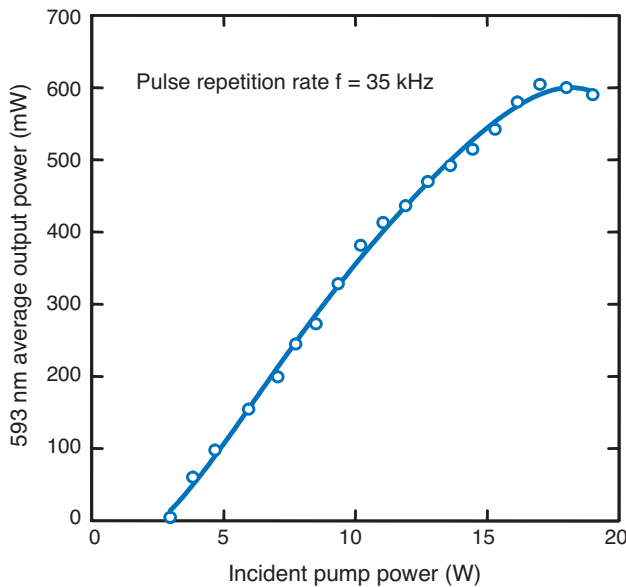
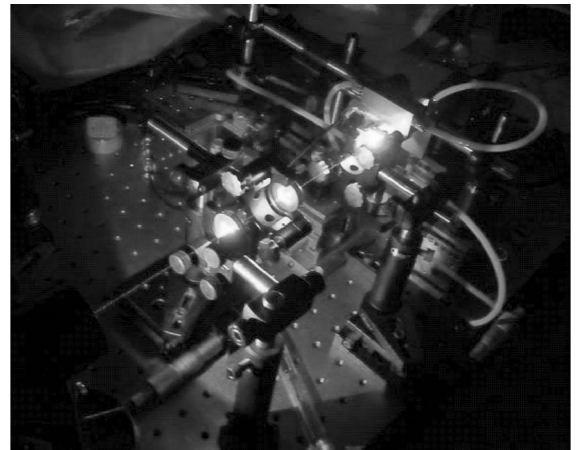


圖 11. (a) 定激發功率以及重複率下，PPKTP 晶體溫度與 593 nm 雷射平均輸出功率關係圖。
(b) 在 35 kHz 時，激發功率與 593 nm 雷射平均輸出功率關係圖。



(b)

圖 12. (a) 定激發功率下，593 nm 雷射平均輸出功率、脈衝寬度隨重複率改變而變化關係圖。
(b) 593 nm 黃橘光雷射實驗照片。

的時間重疊可由設計共振腔的長度比達成，而這與兩基頻光波長的有效受激截面積有關。本實驗的結果與此理論分析十分吻合。

將 PPKTP 的極化週期 $12.6 \mu\text{m}$ 代入 QPM 的理論中，可求得此晶體的最佳工作溫度約為 52.5°C 。圖 11(a) 為在 17 W 的激發功率下、 Q -開關重複率為 35 kHz 時，593 nm 雷射輸出功率與 PPKTP

晶體溫度的關係圖。實驗結果顯示最佳工作溫度為 $51 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，與理論值十分吻合。此曲線可視為是相位匹配溫度與轉換效率的關係曲線，其半寬高 ΔT 約為 17°C 。在最佳工作溫度下，混頻轉換效率隨著激發功率以及 Q -開關的重複率而改變。

圖 11(b) 顯示，重複率為 35 kHz 時，17 W 的激發功率可得到 610 mW 的 593 nm 雷射輸出，光轉換效率約為 3.6%，光束品質 M^2 為 1.5。當激發功率高於 17 W 時，593 nm 的輸出功率開始有飽和的現象，這是因為熱透鏡效應使得共振腔開始變得不穩定所造成的。圖 12(a) 顯示平均輸出功率與脈

衝寬度隨著重複率變化。重複率由 70 kHz 調頻至 20 kHz 時，脈衝寬度變化從 55 ns 至 18.5 ns，峰值功率由 70 W 增加至 1.1 kW。圖 12(b) 為 593 nm 黃橘光雷射實驗照片。

五、結語

為了得到最好的頻率轉換效率，相關理論以及實驗中的每個細節都必須要掌握。本文中介紹的 532 nm、671 nm 以及 593 nm 雷射，已能得到不錯的轉換效率。其中 532 nm 可進一步與其基頻光 1064 nm 混頻為紫外波段的 355 nm 雷射，671 nm 也可與 1342 nm 混頻為 447 nm 的藍光雷射。相關實驗已著手進行，相信很快就會有令人滿意的實驗成果。

參考文獻

1. W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed., Berlin: Springer-Verlag (1996).
 2. R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Boston: Academic Press (1992).
 3. Y. F. Chen, *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 234 (1999).
 4. Y. F. Chen, *Opt. Lett.*, **24**, 1032 (1999).
 5. A. W. Tucker, M. Birnbaum, and C. L. Fincher, *J. Appl. Phys.*, **48**, 4097 (1977).
 6. I. T. Mckinnie and A. M. L. Oien, *Opt. Commun.*, **141**, 157 (1997).
 7. C. G. Bethea, *IEEE J. Quantum Electron.*, **9**, 254 (1973).
 8. H. M. Pask and J. A. Piper, *Opt. Lett.*, **24**, 1490 (1999).
 9. Y. F. Chen and S. W. Tsai, *Opt. Lett.*, **27**, 397 (2002).
 10. W. X. Lin and H. Y. Shen, *J. Appl. Phys.*, **86**, 2979 (1999).
-
- 陳意鑫先生現就讀於國立交通大學電子物理研究所碩士班。
 - 陳永富先生為國立交通大學電子工程博士，現任國立交通大學電子物理研究所教授。
 - Yi-Shin Chen is a graduate student in the Institute of Electrophysics at National Chiao Tung University.
 - Yung-Fu Chen received his Ph.D. in electronics from National Chiao Tung University. He is currently a professor in the Institute of Electrophysics at National Chiao Tung University.