

低重複頻率高能量全正常色散摻鐿光纖短脈衝鎖模雷射

Low Repetition Rate and High Energy Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser in All Normal Dispersion Cavity

林家弘、朱家亮、林鼎鈞

Ja-Hon Lin, Jia-Liang Jhu, Ting-Chun Lin

波長在 $1\ \mu\text{m}$ 左右的高能量短脈衝光纖雷射具有許多實際的用途。為了降低脈衝重複頻率以提高脈衝能量，我們在全正常色散環型雷射腔內熔接了 520 公尺長的單模光纖，產生了 365 kHz 低重複頻率的鎖模短脈衝雷射。當雷射的輸出耦合率為 80% 時，所產生的鎖模短脈衝具有相當寬的頻寬，預期可以應用在生醫檢測上；當雷射耦合率提高到 90%，最高輸出單一光脈衝的能量接近 100 nJ。在此雷射架構下我們也發現了 Q 開關鎖模的現象，透過 Q 波包調變可以進一步降低鎖模脈衝的重複頻率，增加光脈衝輸出的強度。

It is revealed that high-energy pulses from fiber lasers around $1\ \mu\text{m}$ has various practical applications. For this purpose, we have generated 365 kHz low-repetition-rate pulses in all-normal-dispersion Yb-doped fiber ring laser by adding 520 m single mode fiber in the laser cavity. With 80% output coupler, the spectral bandwidth of mode-locked pulse is relative wide, which can be used in biomedical diagnosis. In use of 90% output coupler, the highest energy pulse around 100 nJ has been experimentally demonstrated. Besides, Q-switched mode-locking was observed in this laser configuration. By the modulating of Q-switching envelope, the repetition rate of mode-locked pulse can be further reduced to enhance the intensity of the output pulses.

一、前言

波長在 $1\ \mu\text{m}$ 左右的高能量短脈衝光纖雷射具有許多實際的用途，已經廣泛的應用在軍事、生物醫學工程和科學研究等^(1, 2)。其中摻鐿光纖雷射 (ytterbium-doped fiber laser) 由於具有非常寬廣的「增益頻寬」和非常高的「斜效率」^(3, 4)，除了可

以作成波長可調的雷射外 (tunable laser)，也常利用「被動鎖模 (passive mode locking)」的技術來產生中心波長約 $1\ \mu\text{m}$ 左右的鎖模短脈衝輸出。根據文獻報導，許多被動鎖模的技術，例如非線性極化旋轉 (nonlinear polarization rotation, NPR)⁽⁵⁾、飽和吸收體如奈米碳管 (saturable absorber)⁽⁶⁾、半導體飽和吸收鏡 (semiconductor saturable absorber mirror)

(7, 8)、甚至是混合了非線性極化旋轉 (NPR) 和半導體飽和吸收鏡 (SESAM) 等等的鎖模技術⁽⁹⁾，都被廣泛應用在光纖雷射上產生穩定的短脈衝輸出。

傳統上，為了產生皮秒等級以下的超短脈衝輸出，通常會將雷射腔內的淨色散 (net dispersion) 操作在負值，利用光克爾非線性效應所產生脈衝的啾頻 (chirping) 與反常群速度色散 (anomalous dispersion) 的交互作用來達成脈衝的壓縮，產生「類孤子 (soliton like)」的脈衝或稱為「色散管理孤子 (dispersion managed soliton)」。然而，此類脈衝的最高能量將被限制在數個奈米焦耳等級以防止脈衝分裂或是多重脈衝 (multiple-pulse) 的產生⁽¹⁰⁾。操作在 $1\ \mu\text{m}$ 波段的「摻鏡光纖」與「單模光纖」的色散值均為正值，因此摻鏡光纖雷射的共振腔內必須加入一些色散補償元件，例如光柵對⁽⁷⁾、稜鏡對⁽¹¹⁾ 或是光纖元件⁽¹²⁾ 如光子帶隙光纖和高階模態光纖，以得到超短脈衝輸出。

為了產生單一脈衝能量超過 10 nJ 而且不產生脈衝分裂的「自相似脈衝 (self-similar pulse)」，會在雷射共振腔內加入色散補償元件，但腔內淨色散仍然維持在正常色散⁽¹³⁾。近來，操作在「全正常色散」的摻鏡鎖模光纖雷射被廣泛研究，它可以產生超過 20 nJ 高能量的光脈衝，在此摻鏡光纖雷射腔內並沒有加入任何反常色散元件⁽¹⁴⁻¹⁹⁾，它是利用共振腔內雙折射元件所提供的「光濾波效應」達到光脈衝整形的目的⁽¹⁴⁾，當脈衝在如此大的全正常色散環境下傳播時，可以藉由「耗散過程 (dissipative process)」維持脈衝的型態，此效應與光脈衝在雷射腔中傳播所歷經的增益和損耗有關，因此將此類光脈衝稱之為「耗散孤子 (dissipative soliton)」。

近來藉由雷射腔長的增加，並利用半導體飽和吸收鏡作為被動鎖模產生的元件，成功地產生次百萬赫 (sub-megahertz) 低重複頻率的鎖模摻鏡全光纖短脈衝雷射^(16, 17)。然而，由於半導體飽和吸收鏡或其他光學元件的頻寬限制，使得鎖模脈衝的光頻譜受到侷限。根據報導，大約 217.4 千赫低重複頻率被動鎖模短脈衝可以藉由增加單模光纖的長度來產生⁽¹⁸⁾，不過此類鎖模雷射的光譜頻寬大約只有次奈米的寬度，限制了短脈衝產生的最短寬度，而具有寬廣光譜頻寬的高能量光脈衝可以應用在生物醫學測量如光學同調斷層掃描上^(1, 2)。為了讓全正常色散摻鏡光纖雷射具有較寬頻寬且高能量的鎖模短脈衝，可以藉由非線性極化旋轉技術產生 699 千赫低重複頻率光脈衝，當雷射操作在鎖模狀態下可以產生超過 50 奈米寬的光頻譜和 20 nJ 的高脈衝能量⁽¹⁹⁾。在本篇報導中，我們將此環型摻鏡光纖雷射的腔長再度增加，除了產生更低重複頻率與更高能量的光脈衝輸出，也探討採用不同輸出耦合率所得到的光脈衝特性。

二、非線性極化旋轉

對於被動鎖模光纖雷射，「非線性極化旋轉 (nonlinear polarization rotation)」技術^(20, 21) 是一種常被使用來產生「皮秒」甚至是「飛秒」等級短脈衝的方法，此鎖模技術同時與振幅調變 (amplitude modulation, AM) 及頻率調變 (frequency modulation, FM) 有關，當一光脈在雙折射光纖中傳播時，此光脈衝會同時歷經線性和非線性相位變化。

圖 1 為在鎖模光纖雷射中產生「非線性極化旋轉」的示意圖，在此假設非線性極化旋轉主要

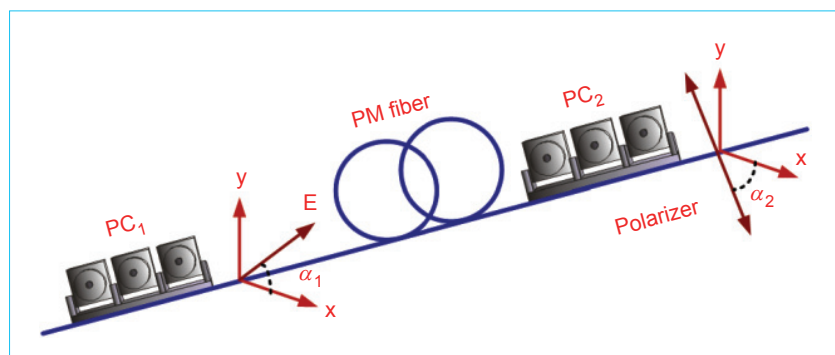


圖 1. 非線性極化旋轉機制產生的示意圖，其中， E 為入射光電場的方向， x 是光纖快軸方向， y 是慢軸方向。

發生在極化維持光纖 (polarization maintain fiber, PM fiber) 中，其中 α_1 為入射光的電場方向和單模光纖的快軸之夾角， α_2 則為線性偏振器 (in-line polarization) 與光纖快軸之夾角，在光纖雷射中光的極化方向可以靠著極化控制器 (polarization controller, PC) PC_1 與 PC_2 來調整。在此，我們假設入射光訊號的電場表示為 $E(t)$ ，此入射光訊號電場在光纖快軸 $E_x(t)$ 及慢軸 $E_y(t)$ 可以用以下方程式來表示：

$$E_x(t) = E(t)\cos\alpha_1 \quad (1)$$

$$E_y(t) = E(t)\sin\alpha_1 \quad (2)$$

當光通過單模光纖後，快軸和慢軸的電場可以分別表示為：

$$E_x(t) = E(t)\cos\alpha_1 \exp(-j\phi_x) \quad (3)$$

$$E_y(t) = E(t)\sin\alpha_1 \exp(-j\phi_x) \cdot \exp[-j(\Delta\phi_L + \Delta\phi_{NL})] \quad (4)$$

其中，

$$\phi_x = (n_x + n_x^{NL})\beta L \quad (5)$$

$$\Delta\phi_L = (n_y + n_x)\beta L \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{NL} &= \frac{n_2(\sin^2\alpha_1 - \cos^2\alpha_1)|E(t)|^2\beta L}{3} \quad (7) \\ &= \frac{\gamma PL}{3}\cos 2\alpha_1 \end{aligned}$$

其中，傳播常數 $\beta = 2\pi/\lambda$ ，光纖的傳播長度為 L ，光纖的非線性係數 $\gamma = n_2\omega_0/cA_{\text{eff}}$ ， ω_0 為光的中心角頻率， c 為光在光纖中的傳播速度， A_{eff} 為光在光纖中的有效模態面積，光脈衝的瞬時功率為 P ，光纖的線性雙折射係數分別為 n_x 和 n_y ，而非線性雙折射係數為 n_x^{NL} 和 n_y^{NL} ，它與入射光訊號強度的關係可以由下面的關係式來表示：

$$\begin{aligned} n_x^{NL} &= n_2\left(|E_x|^2 + \frac{2}{3}|E_y|^2\right) \quad (8) \\ &= n_2|E(t)|^2\left(\cos^2\alpha_1 + \frac{2}{3}\sin^2\alpha_1\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_y^{NL} &= n_2\left(|E_y|^2 + \frac{2}{3}|E_x|^2\right) \quad (9) \\ &= n_2|E(t)|^2\left(\sin^2\alpha_1 + \frac{2}{3}\cos^2\alpha_1\right) \end{aligned}$$

當光訊號經過光纖偏振器時，正交極化電場的分量 $E_x(t)$ 和 $E_y(t)$ 會互相干涉，因此輸出光訊號的電場可以表示為：

$$\begin{aligned} E''(t) &= E'_x(t)\cos\alpha_2 + E'_y(t)\sin\alpha_2 \\ &= E(t)\exp(-j\phi_x)\left\{\cos\alpha_1\cos\alpha_2 \quad (10) \right. \\ &\quad \left. + \sin\alpha_1\sin\alpha_2\exp[-j(\Delta\phi_L + \Delta\phi_{NL})]\right\} \end{aligned}$$

因此經過非線性極化旋轉機制所引起的穿透率變化可以表示成：

$$\begin{aligned} T = \frac{|E''|^2}{|E|^2} &= \cos^2\alpha_1\cos^2\alpha_2 + \sin^2\alpha_1\sin^2\alpha_2 \quad (11) \\ &\quad + \frac{1}{2}\sin 2\alpha_1\sin 2\alpha_2\cos(\Delta\phi_L + \Delta\phi_{NL}) \end{aligned}$$

藉由方程式 (11) 我們可以得到在特定線性相位變化下，非線性極化旋轉所造成的穿透率 (T) 與光功率 (P) 的關係圖 (如圖 2，藍色曲線所示)。由此圖顯示在適當的入射光強度下所得到出射光的強度與入射光的強度呈現正比的關係，因此高強度的鎖模

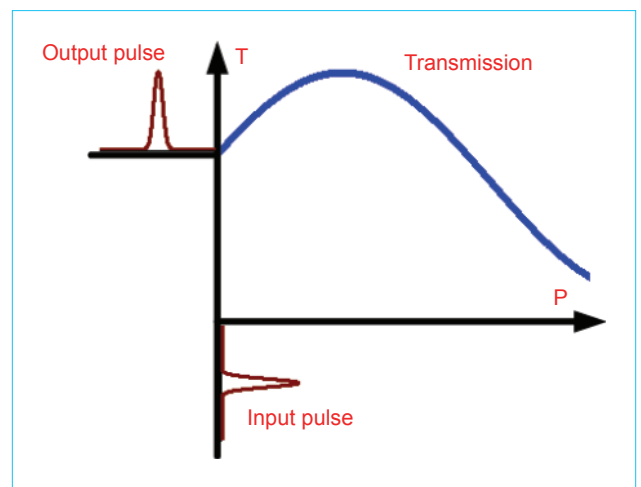


圖 2. 由非線極化旋轉所引起的穿透率 (T) 隨功率 (P) 的變化以及輸入脈衝與輸出脈衝的關係。

光脈衝 (ML pulse) 會比低強度的連續波 (CW) 遭遇較小的損耗，形成一個快速的光開關，此外也可以藉由此效應使得脈衝的前緣與後緣較弱的光衰減，而脈衝中心強度較強的光則會損耗較小，因而使得脈衝壓縮達到「脈衝整形 (pulse shaping)」的效果。

三、實驗裝置

圖 3 為環型腔摻鎳鎖模光纖雷射和摻鎳光纖放大器的示意圖，其中環型腔光纖雷射採用約 2.2 m 長度之摻鎳光纖 (其中纖核直徑為 $5\ \mu\text{m}$ ，數值孔徑 NA 為 0.13) 作為增益介質，並且使用一個 975 nm/1060 nm 的分波多工器 (wavelength-division multiplexing, WDM) 將中心波長為 975 nm 之雷射二極體泵激光源耦合至光纖雷射共振腔內。非線性極化旋轉機制是由兩個極化控制器 (polarization controller, PC) 和光纖線性偏振器 (in-line polarizer, ILP) 組合而成，其中光極化控制器由三個圓盤組合而成，而光纖分別纏繞在這些圓盤上。藉由調整其中任一圓盤的角度可以改變光在光纖中的極化狀態，再搭配雙折射的光纖與線性偏振器，就可以製造一個穿透率與強度相關的快速飽和吸收機制 (其

原理請參照前一小節)。此外，為了確保雷射光在光纖中的傳播方向為單一方向，我們在此環型共振腔中放置一個光隔離器 (optical isolator)，並在腔內熔接了大約 520 m 長的單模光纖 (Hi1060) 來增加共振腔的長度，藉此降低鎖模脈衝的重複頻率並提高光脈衝的輸出能量。在此篇報導中，我們選用 90/10 和 80/20 兩種不同的光纖耦合器當作此雷射的輸出，其中 90% 或 80% 的光將被耦合到共振腔外，而 10% 或 20% 的光則再次回到雷射腔內，藉此來提高光纖雷射的輸出功率。在輸出光耦合器後，熔接了一個光隔離器來防止出射光反射回雷射共振腔內，造成鎖模脈衝的不穩定和輸出功率的跳動。

在此實驗中，為了監視雷射的操作狀態，在共振腔外熔接了一個 95/5 光纖耦合器，其中 5% 的輸出光訊號接上光譜分析儀 (Ando AQ-6315E)、示波器 (LeCroy 62Xs 600MHz) 等量測設備，此外我們使用光功率計 (Newport 1918C) 來量測雷射的輸出功率，95% 的輸出光則是接上摻鎳光纖放大器，其中摻鎳光放大器主要也是利用摻鎳光纖作為增益介質，它的泵激源同樣也是 975 nm 之雷射二極體。

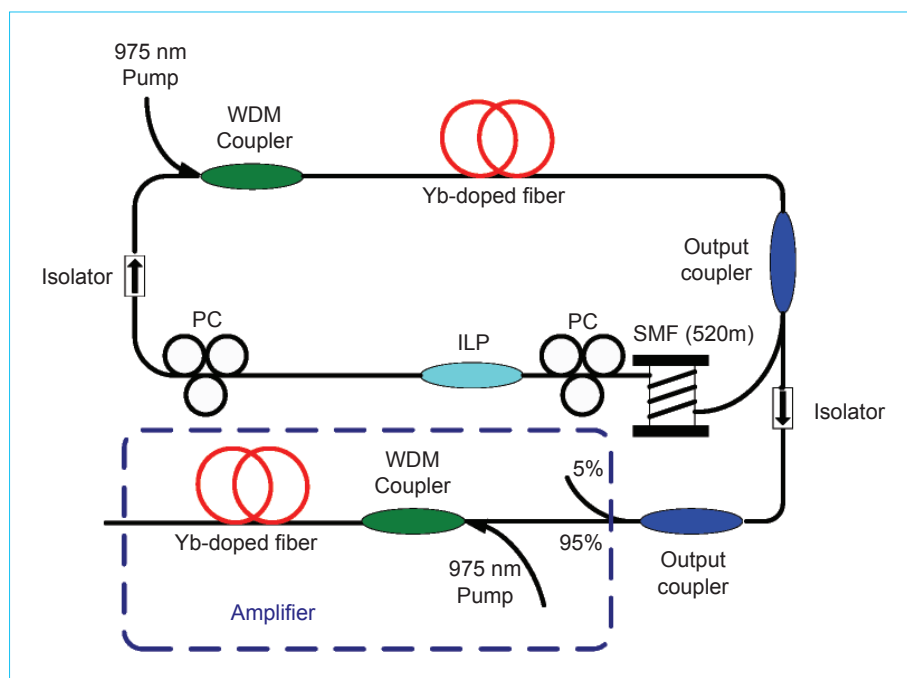


圖 3. 環型摻鎳鎖模光纖雷射與其放大裝置。

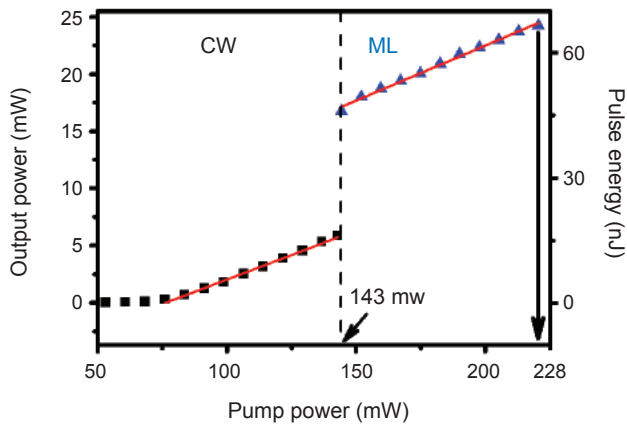


圖 4. 摻鏡光纖雷射使用 80% 輸出耦合器時，在不同泵激功率下的輸出功率 (左欄) 與對應的脈衝能量 (右欄) 和雷射的操作狀態 (黑色正方形：連續波的狀態，藍色三角形：連續波鎖模狀態)。

四、結果與討論

1. 80/20 輸出耦合器

圖 4 為泵激半導體雷射功率與輸出功率 (output power, 左欄) 和鎖模狀態下 (藍色三角形) 單一脈衝能量 (pulse energy, 右欄) 的關係圖。此圖顯示當泵激功率超過閾值時，隨著泵激功率的增加，光纖雷射的輸出功率與泵激功率的關係呈現線性的關係，而且當雷射的泵激功率增加至 143 mW 時，雷射的操作狀態會由連續波狀態 (CW, 黑色正方形) 進入到連續波鎖模狀態 (CW-ML, 藍色三角形)，而且輸出功率會有不連續的陡增。此外，藉由線性擬合得知雷射的斜效率在連續波狀態為 23.5%，可是當進入到連續波鎖模狀態時，雷射

的斜效率則增加為 26.5%。我們推論輸出功率與斜效率在鎖模狀態增加的原因是由於「非線性極化旋轉」的機制所造成，當雷射操作在連續波鎖模狀態時所遭遇的損耗比連續波狀態要小。當半導體雷射泵激功率增加到 228 mW 時，可以得到的雷射最高輸出功率為 24.7 mW，其對應的脈衝輸出能量約為 65 nJ。

圖 5(a) 和 (b) 分別顯示雷射操作在鎖模狀態時光譜儀和示波器所量測到的輸出光譜和長時間的脈衝序列。圖 5(a) 顯示當雷射操作在鎖模狀態時輸出的光譜有兩個峰值產生，分別落在 1030 nm 與 1072 nm，這兩個波長分別對應了摻鏡光纖的三能階與四能階能帶，整個光譜延伸超過 50 nm 的頻寬。圖 5(b) 為鎖模狀態時示波器所顯示的脈衝時間序列，由此圖可得知鎖模脈衝的時間間隔為 2.74 μ s，其對應的脈衝重複頻率為 365 kHz。

2. 90/10 輸出耦合器

為了提高脈衝能量，我們將此雷射的輸出耦合器從 80/20 更換成 90/10，圖 6 所示為泵激功率改變時光纖雷射輸出功率 (左欄) 和所對應鎖模狀態 (藍色三角形) 的單一脈衝能量 (右欄)。由此圖可看出，雷射的演變狀態跟 80/20 輸出耦合器類似，隨著泵激功率的提高，雷射會從連續波狀態 (黑色方形) 轉變為連續波鎖模狀態 (藍色三角形)。然而，在雷射進入連續波鎖模狀態 (CW-ML) 之前，會過渡到 Q 開鎖模 (QML) 的狀態 (紅色圓形)，而且輸出功率並沒有明顯陡增的現象發生。藉由線性擬合 (紅線)，可以得知此雷射的斜效率約為 25.3%，當泵激功率增加到 228 mW 時，可以得到最高

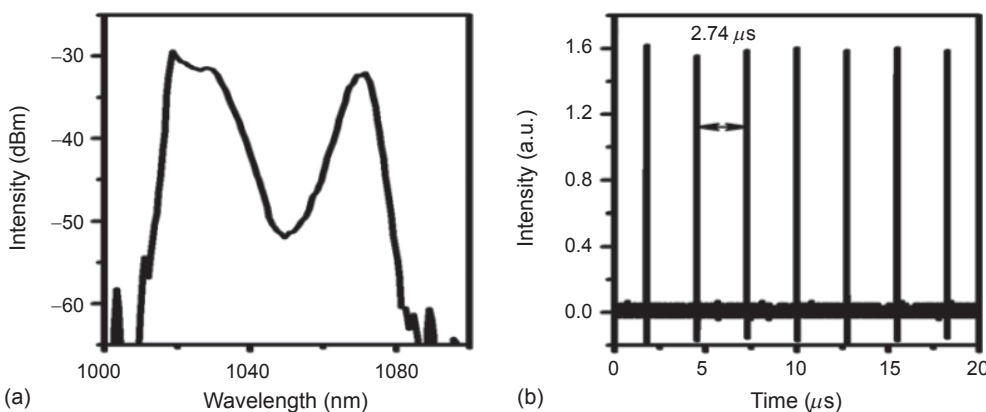


圖 5. 摻鏡光纖雷射使用 80% 輸出耦合器時，連續波鎖模狀態時雷射輸出的 (a) 光譜和 (b) 長時間脈衝序列。

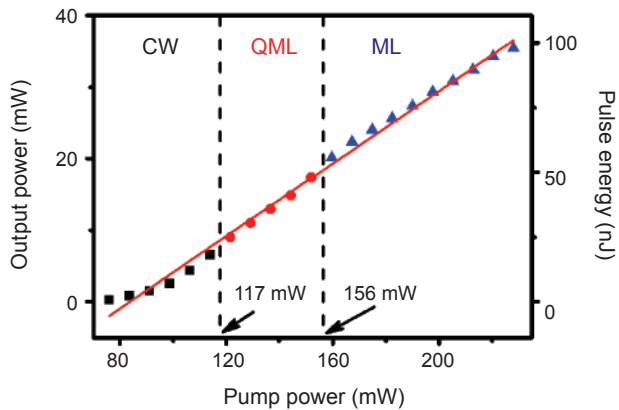


圖 6. 摻鏡光纖雷射使用 90% 輸出耦合器時，在不同泵激功率下的輸出功率 (左欄) 與對應的脈衝能量 (右欄) 和對應雷射的操作狀態 (黑色正方形：連續波狀態，紅色圓形：Q 開關鎖模狀態，藍色三角形：連續波鎖模狀態)。

的輸出功率 35.4 mW。此雷射的單一脈衝能量約為 97.3 nJ，比先前使用 80/20 輸出耦合器所得到單一脈衝能 (約 65 nJ) 還要高，利用此雷射所產生低重複頻率高能量的光脈衝可以藉由適當的放大後應用在微加工處理上 (micromachining)⁽²²⁾。

圖 7(a) 顯示泵激功率在 129 mW 時，Q 開關鎖模 (QML) 狀態下脈衝的時間序列和對應的光頻譜。不同於一般連續波鎖模狀態下每個脈衝輸出強度都是定值的情形，Q 開關鎖模脈衝會被外面的 Q 波包所調變，因此輸出脈衝的峰值功率會較連續波鎖模狀態所產生脈衝的峰值功率還要高。圖 7(a) 顯示在較長時間下 Q 開關鎖模的脈衝序列，其中 Q 波包的時間間距約為 197 μs ，對應的重複頻率為

5.1 kHz。圖 7(a) 內部顯示的圖為 Q 開關鎖模狀態下雷射輸出的光譜，由此圖得知光譜的中心波長落在 1028.8 nm，而 3 dB 頻寬為 2.9 nm。圖 7(b) 為單一波包 Q 開關鎖模脈衝展開的圖形，此圖顯示在 Q 波包內有許多鎖模短脈衝存在。為了得到此 Q 波包的寬度，我們使用下列公式去擬和：

$$I = \frac{I_0}{\left[\exp\left(-1.76\frac{t}{t_1}\right) + \exp\left(1.76\frac{t}{t_2}\right) \right]^2} \quad (12)$$

其中， I_0 為比率因數 (scaling factor)，而 t_1 和 t_2 則分別代表 Q 波包上升和下降時間，其中紅色實線為利用方程式 (12) 擬合的結果，藉由擬合可以得知 t_1 和 t_2 分別為 92 μs 和 52 μs ，而由定義 $\tau = (t_1 + t_2)/2$ 可得知 Q 波包的寬度為 72 μs ，由此我們可以預估脈衝的峰值功率約為 82.4 W。

圖 8 顯示當雷射處於連續波鎖模狀態下，在不同泵激功率 ($P = 197 \text{ mW}$ 和 228 mW) 的雷射輸出光譜，其中紅色實線為泵激功率在 197 mW 時鎖模狀態的光譜。不同於使用 80/20 輸出耦合器鎖模時的光譜圖 (如圖 5(a) 所示)，在此架構下的雷射鎖模光譜僅有一個峰值存在，其光譜中心波長位在 1032 nm 而光譜的 3 dB 頻寬為 10.6 nm，至於位在長波長的峰值則消失不見。這是由於摻鏡光纖在 1030 nm 比在 1080 nm 具有較高的輻射截面 (emission cross section)，因此當改用 90% 的輸出耦合器時，雷射腔內具有較大的損耗，因此四能階的 1080 nm 受激輻射光不足以產生。當泵激功率從

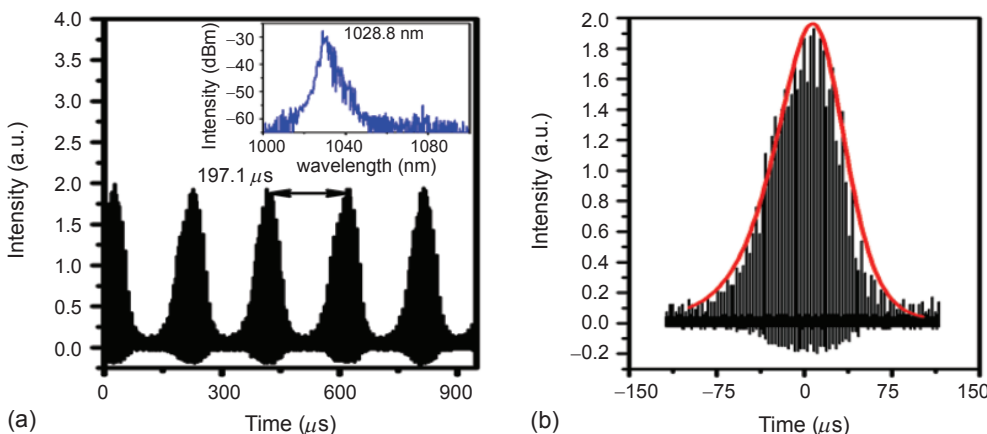


圖 7. Q 開關鎖模時，(a) 長時間的脈衝序列與其對應的光譜 (內圖) 和 (b) 單一波包 Q 開關鎖模脈衝展開序列 (紅色實線為擬合的曲線)。

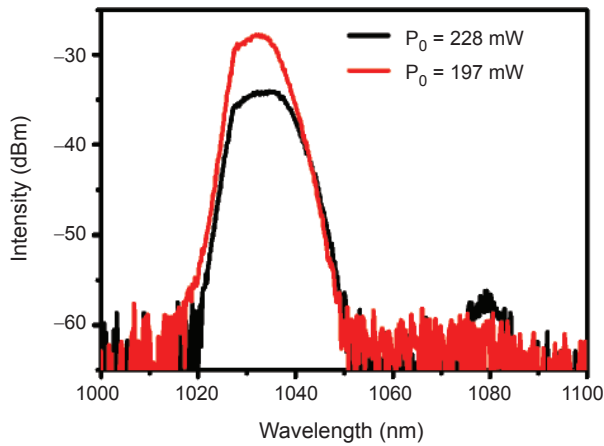


圖 8. 摻鏡光纖雷射使用 90% 輸出耦合率在不同泵激功率下 (紅色： $P_0 = 197$ mW 黑色： $P_0 = 228$ mW) 的連續波鎖模光譜。

197 mW 提高至 228 mW 時，此四能階的受激輻射光譜又會再度出現，其中心波長落在 1080 nm，此時位在 1032 nm 峰值的強度會些許下降 (圖 8 的黑色譜線所示)，這是因為部分泵激光源被摻鏡光纖吸收後，去激發產生四能階的雷射光譜。

五、摻鏡光纖放大器

在下面的實驗中，我們將被動鎖模摻鏡光纖雷射產生的光脈衝藉由自組的摻鏡光纖放大器 (圖 3 藍色虛線內所示) 來產生光脈衝的放大。圖 9 顯示了當摻鏡光纖雷射採用輸出耦合器為 80% (黑色正方形) 和 90% (藍色正方形) 時，光脈衝經過放大器後所得到的輸出功率 (左欄) 和其對應的光脈衝能量 (右欄)。當放大器所使用的半導體雷射泵激功率為 342 mW 時，使用 80% 和 90% 輸出耦合器的雷射輸出功率為 70.6 mW 和 84.7 mW，其所對應之脈衝能量為 195.4 nJ 和 229.1 nJ，藉由線性擬合可以得到此放大器的斜效率分別是 21.6% 和 24.4%。圖 10 所示之光譜為當環形腔摻鏡光纖雷射輸出耦合器為 90% 時，在鎖模狀態下所產生的光譜 (黑線) 和經過放大器後所產生的脈衝 (紅線)。我們可以明顯發現在此放大過程中光脈衝的頻譜並沒有展寬。

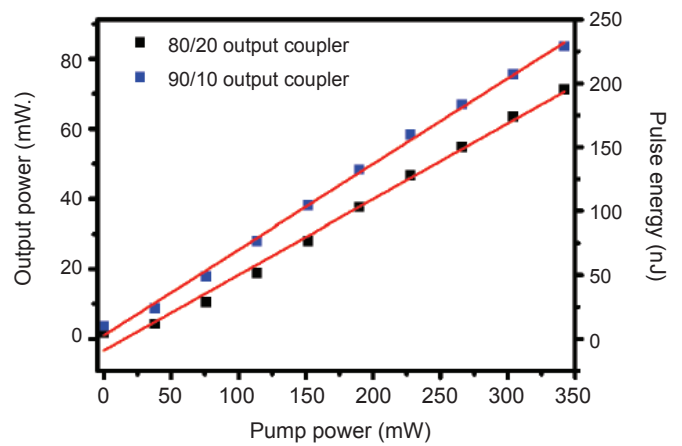


圖 9. 鎖模摻鏡光纖雷射使用 90% 和 80% 輸出耦合器，經過光放大器後在不同泵激功率下輸出的功率和對應的脈衝能量。

六、結論

為了在 $1 \mu\text{m}$ 的光波段產生高能量的光脈衝輸出，我們藉由單模光纖的加長並利用非線性極化旋轉的被動鎖模技術，由全正常色散環形腔摻鏡光纖雷射產生了 365 kHz 的低重複頻率鎖模光脈衝輸出。在實驗中分別採用了 80% 和 90% 的輸出耦合器做為雷射輸出，當使用 80% 的耦合器時，所產生之鎖模光脈衝光譜具有相當寬的頻寬，預期可以將它應用在光學斷層掃描上。此外，當使用 90%

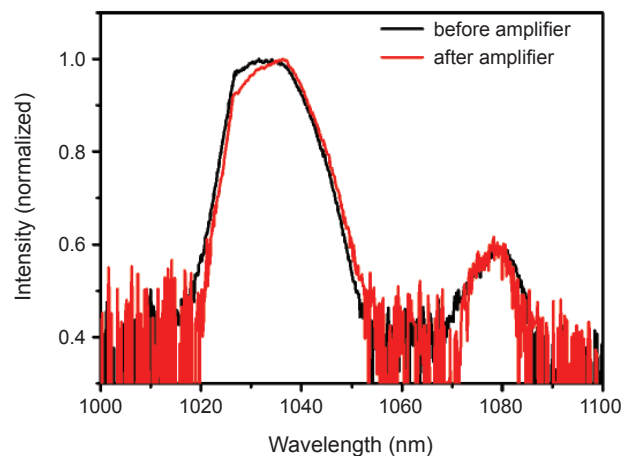


圖 10. 摻鏡光纖雷射使用 90% 輸出耦合器在鎖模狀態下雷射輸出 (黑色實線) 與經過放大器後 (紅色實線) 之光譜。

的耦合器作時，在雷射進入連續波鎖模的狀態前可以觀察到 Q 開關鎖模的現象。當半導體雷射泵激功率為 228 mW 時，所產生的鎖模光脈衝能量接近 100 nJ。最後，我們利用自組的光纖放大器將鎖模光脈衝放大，所產生的最高光脈衝能量約為 229 nJ。未來此摻鏡光纖雷射系統可以再藉由三級放大，產生更高強度低重複頻率的光脈衝，應用在微加工處理上。

參考文獻

1. A. Unterhuber, B. Povazay, B. Hermann, H. Sattmann, A. Chavez-Pirson, and W. Drexler, *Opt. Express*, **13**, 3252 (2005).
2. M. Yamanari, Y. Lim, S. Makita, and Y. Yasuno, *Opt. Express*, **17**, 12385 (2009).
3. M. C. Paul, S. W. Harun, M. R. A. Moghaddam, S. Das, R. Sen, A. Dhar, M. Pal, S. K. Bhadra, and H. Ahmad, *Laser Phys.*, **19**, 1021 (2009).
4. S. W. Harun, M. C. Paul, M. R. A. Moghaddam, S. Das, R. Sen, A. Dhar, M. Pal, S. K. Bhadra, and H. Ahmad, *Laser Phys.*, **20**, 656 (2010).
5. M. Hofer, M. E. Fermann, F. Haberl, M. H. Ober, and A. J. Schmidt, *Opt. Lett.*, **16**, 502 (1991).
6. S. Kivistö, T. Hakulinen, A. Kaskela, B. Aitchison, D. P. Brown, A. G. Nasibulin, E. I. Kauppinen, A. Härkönen, and O. G. Okhotnikov, *Opt. Express*, **17**, 2358 (2009).
7. Y.-J. Song, M.-L. Hu, C.-L. Gu, L. Chai, C.-Y. Wang, and A. M. Zheltikov, *Laser Phys. Lett.*, **7**, 230 (2010).
8. G. H. Jang and T.H. Yoon, *Laser Phys.*, **20**, 1463 (2010).
9. K.-H. Lin, J.-J. Kang, H.-H. Wu, C.-K. Lee, and G.-R. Lin, *Opt. Express*, **17**, 4806 (2009).
10. H. Lim, F. Ö. Ilday, and F. W. Wise, *Opt. Lett.*, **28**, 660 (2003).
11. X. G. Zhou, D. Yoshitomi, Y. Kobayashi, and K. Torizuka, *Opt. Express*, **16**, 7055 (2008).
12. M. Schultz, O. Prochnow, A. Ruehl, D. Wandt, D. Kracht, S. Ramachandran, and S. Ghalmi, *Opt. Lett.*, **32**, 2372 (2007).
13. J. R. Buckley, F. W. Wise, F. Ö. Ilday, and T. Sosnowski, *Opt. Lett.*, **30**, 1888 (2005).
14. A. Chong, W. H. Renninger, and F. W. Wise, *Opt. Lett.*, **32**, 2408 (2007).
15. X. L. Tian, M. Tang, X. P. Cheng, P. P. Shum, Y. D. Gong, and C. L. Lin, *Opt. Express*, **17**, 7222 (2009).
16. X. L. Tian, M. Tang, P. P. Shum, Y. D. Gong, C. L. Lin, S. N. Fu, and T. S. Zhang, *Opt. Lett.*, **34**, 1432 (2009).
17. M. Zhang, L. L. Chen, C. Zhou, Y. Cai, L. Ren, and Z. G. Zhang, *Laser Phys. Lett.*, **6**, 657 (2009).
18. L. J. Kong, X. S. Xiao, and C. X. Yang, *Laser Phys. Lett.*, **7**, 359 (2010).
19. J.-H. Lin, D. Wang, and K.-H. Lin, *Laser Phys. Lett.*, **8**, 66 (2011).
20. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, New York: Academic Press (2001).
21. L. Yuhua, L. Caiyun, W. Jian, W. Boyu, and G. Yizhi, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **10**, 1250 (1998).
22. K. Özgören, B. Öktem, S. Yilmaz, F. Ö. Ilday, and K. Eken, *Opt. Express*, **19**, 17647 (2011).



林家弘先生為國立交通大學光電工程博士，現任國立台北科技大學光電工程系副教授。

Ja-Hon Lin received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associated professor in the Department of Electro-Optical Engineering at National Taipei University of Technology.



朱家亮先生現為國立台北科技大學光電工程系碩士班學生。

Jia-Liang Jhu is currently a M.S. student in the Department of Electro-Optical Engineering at National Taipei University of Technology.



林鼎鈞先生為國立台北科技大學光電工程碩士，現任旺宏電子股份有限公司工程師。

Ting-Chun Lin received his M.S. in electro-optical engineering from National Taipei University of Technology. He is currently an engineer of Macronix International Company.