

使用1570-nm輔助雷射之1530-nm全光纖式自發Q-切換摻鉕雷射

蔡宗祐, 方彥程

國立成功大學電機資訊學院微電子工程研究所

tzongyow@mail.ncku.edu.tw

[Optics Express Vol. 17, No. 24, pp. 21628-21633, Nov. 2009.](#)

1. 簡介

光纖雷射的Q-切換操作可藉由傳統bulk Q-開關和光纖的組合加以實現。為了減少在bulk Q-開關和光纖核心之間的耦合損失，精確的光學校準技術是必要的。全光纖式Q-切換雷射擁有光學校準容易和低共振腔損耗的優點。光纖式Q-開關可以是主動元件，例如聲光調變器 [1-3]，或者是被動元件，例如可飽和吸收光纖 [4-8]。使用可飽和吸收光纖實現被動式Q-切換產生高功率雷射脈衝是最簡單也是最經濟的方法。此外固態可飽和吸收Q-切換(SAQS)光纖擁有相當高的損壞臨界值，並且，可以把持住巨大的雷射增益將其轉換成一個Q-切換雷射脈衝。儘管擁這些優點，SAQS光纖在文獻是較為稀少的。對於一個SAQS光纖雷射而言，SAQS的吸收截面積(σ_a)應大於增益材質的輻射截面積(σ_e)。再者，使用連續波(CW)激發光源實現連續Q-切換脈衝，SAQS的回復時間(τ_{a2})應該短於增益材質的回復時間(τ_{g2})。



摻鉕光纖雷射輻射在所謂的eyesafe波段中1.5-1.6 μm 的範圍，常應用於LIDAR技術與其它需要Q-切換脈衝的操作。目前除了摻鉕光纖，沒有任何其它光纖可以成為摻鉕光纖雷射的SAQS材質。最近，我們分別在環形結構^[9]與駐波形結構^[10]發表了全光纖式自發Q-切換摻鉕雷射，其中摻鉕光纖可做為三階雷射的增益材質與二階吸收的SAQS。因為鉕的 σ_a 和 σ_e 大約相等，所以我們發展了SAQS光纖光子密度增強技術，如：double-passing route和模態場面積不匹配(MFA)。由於在自發式Q-切換雷射中， τ_a 和 τ_e 大約相等，我們引入一個可飽和放大激發開關(SAPS)用來產生連續Q-切換脈衝。SAPS的功能為在Q-切換脈衝過後，被動式切換激發光源強度和延遲增益數量增加速率。雖然全光纖被動式Q-切換雷射被驗證在低重覆率，但是隨著激發光源強度的增強，峰值脈衝功率快速地減少(即較少的脈衝能量和較大的脈衝寬度)。在最低的重覆速率250 Hz，峰值脈衝功率是100 W，而在1 kHz(即 $\sim 10/\tau_2$)獲得的峰值脈衝功率是20 W。低重覆率Q-切換操作主要肇因於鉕的長回復時間(10 ms)。因此縮短摻鉕SAQS光纖的回復時間技術可以解決原來的缺點和拓展該元件的應用。在本文中，我們驗證使用1570 nm輔助摻鉕雷射之1530 nm全光纖式自發Q-切換摻鉕雷射。1530與1570 nm兩者屬於鉕之中相同的躍遷能帶。鉕離子(Er^{3+})在原子能階 $^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 之間有寬廣的能量躍遷能帶，其吸收與輻射波長範圍從1.48到1.6 μm 。根據摻鉕光纖製造商nLight所提供的特性，該光纖在1530 nm的 $\sigma_{e,1530}$ 與 $\sigma_{a,1530}$ 是相同的，約 $6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。在1570 nm的 $\sigma_{e,1570}$ 與 $\sigma_{a,1570}$ 是 $2.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 和 $1.3 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。有效的吸收居量被定義為 $N_{a,\lambda} = [N_{a,1} - (\sigma_{e,\lambda}/\sigma_{a,\lambda})N_{a,2}]$ ，而 $\sigma_{a,\lambda}/\sigma_{e,\lambda}$ 比值即是在吸收

飽和的狀態(即 $N_{a,\lambda=0}$)時 N_{a2} 對 N_{a1} 的數量比。當SAQS被一個1570 nm雷射完全飽和時， $N_{a,1570}=0$ ， $N_{a2}=N_{aT}/3$ 且 $N_{a1}=2 N_{aT}/3$ ，這表示 $N_{a,1530}=N_{aT}/3$ ，其中 N_{aT} 是SAQS光纖鉕離子總數量。因此 $N_{a,1530}$ 的初始值 N_{ai} 可被作用於SAQS光纖的1570 nm雷射 $I_{a,1570}$ 調變，且其Q-切換的幅度介於 N_{aT} 和 $N_{aT}/3$ 之間。更重要的是 $I_{a,1570}$ 可以縮短 $N_{a,1530}$ 的回復時間。當SAQS光纖在1530nm產生Q-切換脈衝後， $N_{a,1530}$ 等於0而且 $N_{a,1570}$ 等於 $-N_{aT}/2$ (即 $I_{a,1570}$ 在SAQS中具有增益)。 $I_{a,1570}$ 會立即修正這個暫態，讓 $N_{a,1530}$ 很快地回到初始條件 N_{ai} ，為下一個Q-切換做準備。為了簡化分析 $I_{a,1570}$ 對鉕生命週期的效果，我們假設 N_{a2} 、 N_{a1} 和 $I_{a,1570}$ 的在SAQS的濃度為均勻分布並推導出 $N_{a,1530}$ 有效生命週期 τ'_{a2} 如下：

$$\tau'_{a2} = \frac{\tau_{a2}}{1 + \left(1 + \frac{\sigma_{a,1570}}{\sigma_{e,1570}}\right) \frac{I_{a,1570}}{I_{s,1570}}}, \text{ where } I_{s,1570} = \frac{h\nu}{\tau_{a2}\sigma_{e,1570}} \frac{A_a}{\Gamma}. \quad (1)$$

A_a 是光纖核心的截面積， Γ 是侷限因子， $I_{s,1570}$ 是SAQS光纖的飽和功率。已知 $\sigma_{a,1570}/\sigma_{e,1570} \sim 0.5$ ，則當 $I_{a,1570}/I_{s,1570}$ 的比值大於6時，有效生命週期 τ'_{a2} 較實際生命週期 τ_{a2} 短一個數量級。

2.實驗:

圖1為全光纖式自發Q-切換雷射結構。Q-切換雷射可產生穩定脈衝，且脈衝重覆率可由1570 nm雷射調變，1570 nm雷射為由980 nm激發光源產生之摻鉕雷射。藉由使用光分功率器將980 nm激發光源以一定比例分開，分別做為Q-切換雷射與1570雷射的激發光源，可以將雷射系統加以簡化。增益材質是一條核心直徑14 μm 、長度210 cm的摻鉕光纖，在1530 nm有19 dB/m的吸收損失。SAQS光纖是一條長度為20 cm的摻鉕光纖，核心直徑為4 μm ，在1530 nm有110 dB/m的吸收損失。介於增益光纖與SAQS光纖的模態場面積不匹配造成光子強度在SAQS光纖中升高並將其快速飽和，因此產生Q-切換動作。SAQS的數值孔徑與模態場直徑分別為0.2和6.5 μm ，侷限因子 Γ 大約是0.53。因此由Eq.(1)可知飽和功率 $I_{s,1570}$ 為1.2mW。在共振腔內的980/1530 nm的WDM被用來保護SAQS光纖免於受到激發光源的影響。同樣地，1530/1570 nm WDM被用來避免增益光纖受到1570 nm雷射光源的影響。整個雷射系統共振腔的長度大約4公尺。

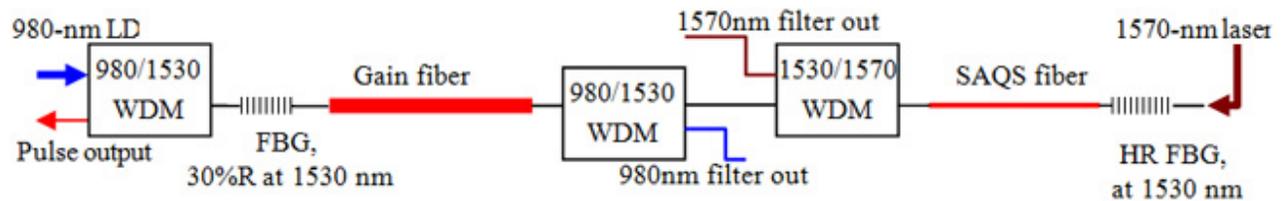


Fig. 1. Schematic diagram of a self-Q-switched, all-fiber erbium laser at 1530 nm with a tunable repetition rate using an auxiliary 1570 nm laser.

圖2(a)與2(b)分別為 $I_{a,1570}=0$ 與 $I_{a,1570}=10$ mW情況下，重覆率 R_{pr} 對輸出Q-切換性能的關係圖。當 R_{pr} 介於0.9-10 kHz，無論是否給予 $I_{a,1570}$ 輸入，Q-切換脈衝皆為穩定。當 R_{pr} 低於0.9 kHz時，則為不穩定。在低 R_{pr} 產生的不穩定狀況，藉由置入可飽和放大激發開關(SAPS)可以獲得改善。而可調變激發光源 $I_{a,1570}$ 在高 R_{pr} 時，藉由縮短回復時間來改善Q-切換的效率。當沒有 $I_{a,1570}$ 輸入的情況下，在接近雷射臨界點的脈衝半高寬(FWHM)大約是0.9 μs ，能量為1.1 μJ ，重覆率 $R_{pr}=0.9$ kHz。重覆率 $R_{pr}=0.9$ kHz意指 $N_{a,1530}$ 在被Q-切換脈衝飽和過後只有1.1 ms的回復時間(即 $\tau_{a2}/9$)。假設SAQS完全被每一個脈衝飽和，透過計算可以得到 $N_{a,1530}$ 切換幅度介於0-0.1 N_{aT} 。更高的激發功率會縮短 $N_{a,1530}$ 的回復時間，導致高脈衝重覆率與低脈衝能量輸出的結果。在激發光源大於100 mW時，仍然可以觀察到脈衝輸出，但是脈衝寬度約為數微秒且能量非常低。如此低效率的Q-切換行為，吾人稱之為Q-擾動(Q-fluctuation)，它只讓增益光纖儲存少部分的

能量並且對增益數量抽取效率不佳。

當1570 nm雷射打開後，Q-切換脈衝輸出結果被大幅度改善。比較有加入與沒有否入 $I_{a,1570}$ 兩種情況，如圖2(a)。在相同的重覆率 R_{pr} ，脈衝能量在加入 $I_{a,1570}$ 的情況下確實獲得改善，驗證了 $N_{a,1530}$ 的回復更快速且幅度更大。由於 $N_{a,1530}$ 回復的數量增加，因此需要更高功率的激發光源。改善 $N_{a,1530}$ 回復速度代表在增益光纖中增益數量擁有更高的hold-off ratio，因此可以獲得更好的Q-切換輸出結果。如圖2(b)所示，Q-切換脈衝寬度更短且脈衝能量更高。

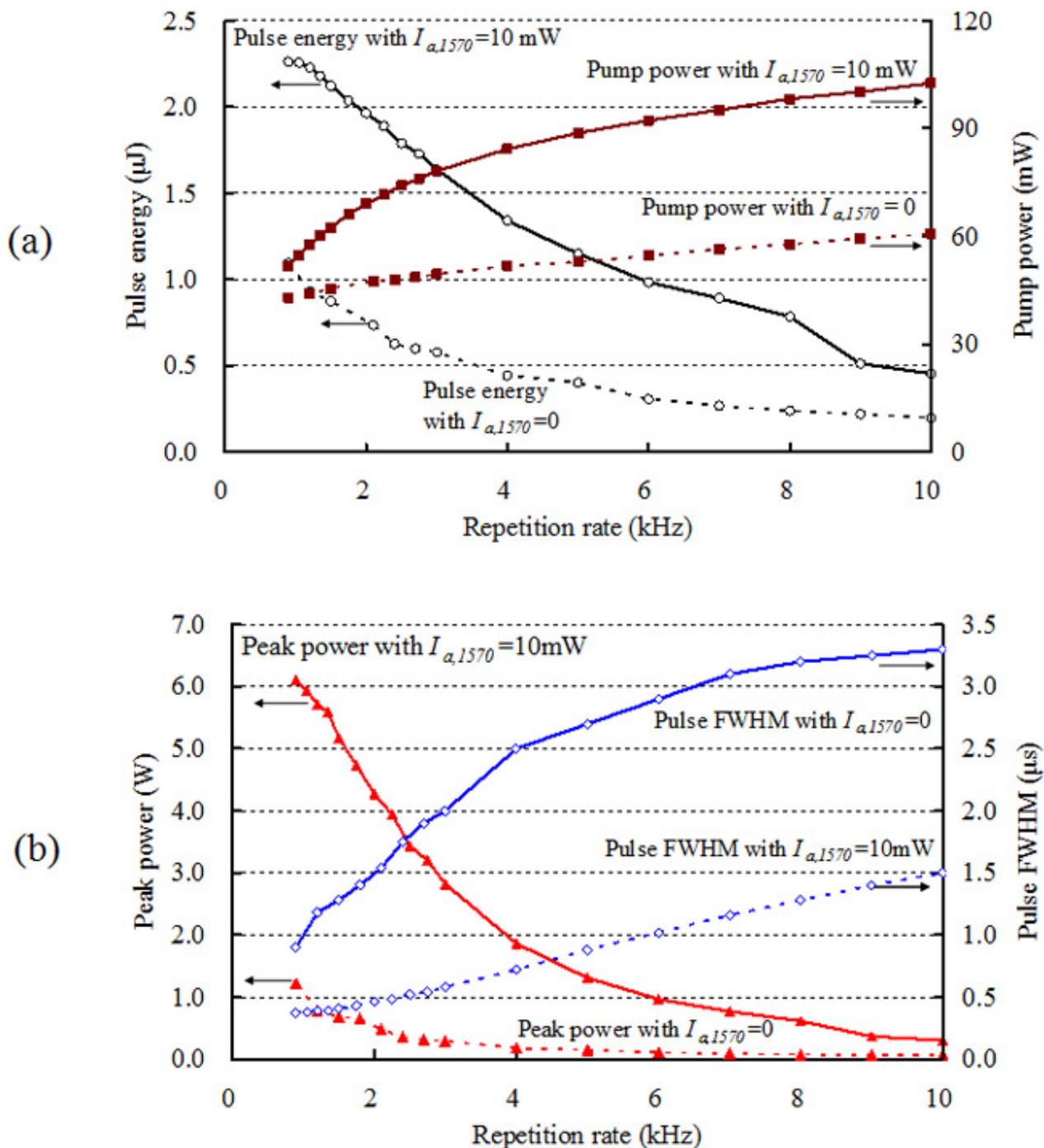


Fig. 2. The Q-switching performances with $I_{a,1570}=0$ and $I_{a,1570}=10\text{ mW}$. (a) Pulse energy and pump power related to pulse repetition rate, (b) pulse peak power and pulse FWHM related to pulse repetition rate.

藉由長度為原來兩倍的SAQS光纖，我們可以改善Q切換的效果。在1530 nm，SAQS有44 dB的能量損失，

甚至大於增益光纖。所以，在沒有 $I_{a,1570}$ 的提供下，只有用激發源是無法達到雷射臨界點的。使用具有10 mW的 $I_{a,1570}$ ，則可以得到穩定且連續的Q切換脈衝，結果顯示於圖3。可以得知，在激發源範圍在75 mW到200 mW，該脈衝是一個呈現穩定的形狀，其半功率寬度為40 ns，而且峰值功率大小超過100 W。在最低值的 $R_{pr}=0.1$ kHz 時，脈衝能量最高可以達到6 μ J，峰值功率=165 W。 R_{pr} 的值正比於激發源的功率大小，而且受限於980 nm激發的雷射二極體的最大輸出功率。高Q切換的效率是由於高濃度 N_{ai} 的增益數量，產生hold-off ratio，反覆這樣的過程，造成激發源增益的高抽取效率的結果。藉由在示波器的紀錄值，分析重覆速率的變化結果可以得知， $\Delta R_{pr}/R_{pr}$ 大約為7%到8%，峰值功率大約等於8%。由圖形的分析可以得知，雖然當 R_{pr} 提高時，穩定度更佳(較小的 $\Delta R_{pr}/R_{pr}$)，可是卻沒有與 R_{pr} 有強烈的關係。這裡說明了使用一個可飽和放大激發開關，可以得到更好且更穩定的結果。

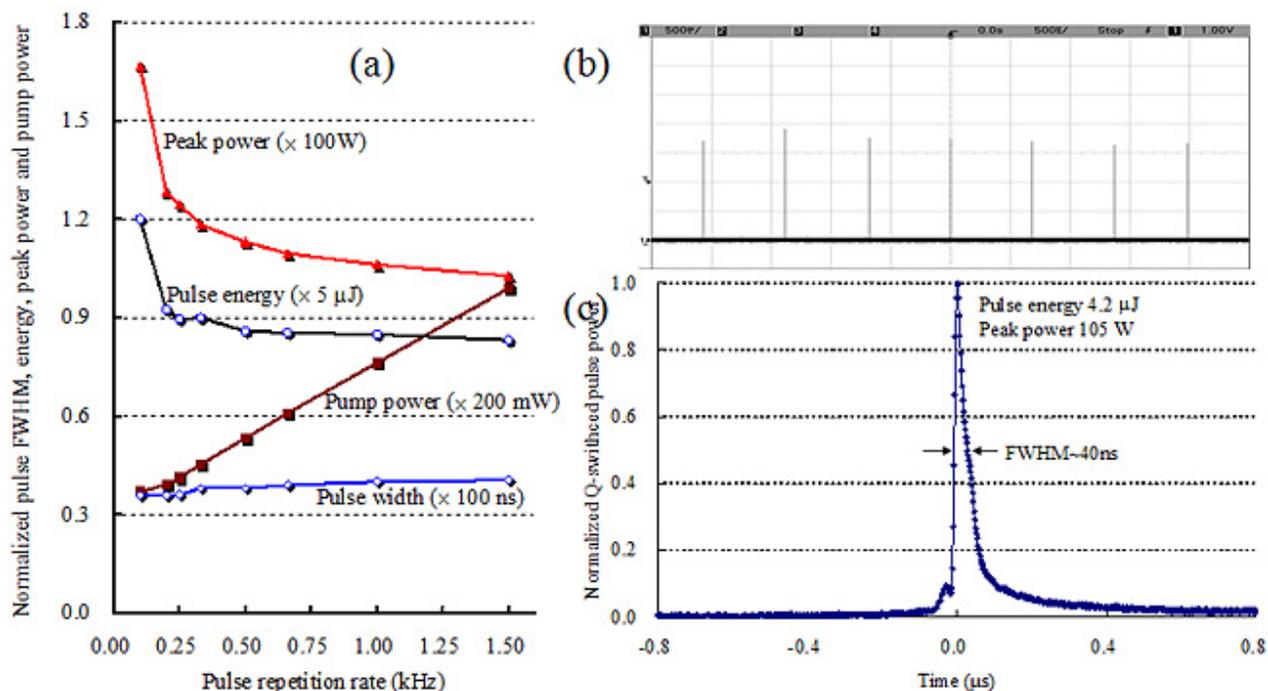


Fig. 3. (a) Q-switching performance using a 10-mW $I_{a,1570}$ and a SAQS erbium fiber with an absorption loss of 44 dB at 1530nm. (b) Sequential Q-switched pulses at 1.5 kHz captured on an oscilloscope, and (c) the corresponding pulse with a peak power of 105 W.

3. 結論

我們已經證明了，可以使用1570 nm輔助雷射 ($I_{a,1570}$)，調變且優質化一1530 nm全光纖式自發Q切換摻鉕雷射。 $I_{a,1570}$ 可施加於SAQS摻鉕光纖並藉以縮短其回復時間。鉕光纖的輻射波長1530 nm和 1570 nm 屬於相同的躍遷能帶 ($^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$)。我們使用一個具有22 dB吸收損失的SAQS光纖來說明縮短生命時間的效果，以及在重覆速率從0.9 kHz-10 kHz 的Q切換改善。藉由加倍SAQS光纖的長度，而且使用一個具有10 mW的 $I_{a,1570}$ 、在反覆速率0.1 kHz-1.5 kHz下，可以得到6-4 μ J的連續脈衝、38-40 ns的穩定脈衝寬度和165 W-105 W的峰值功率。

文獻參考

1. D. W. Huang, W. F. Liu and C. C. Yang, "Q-switched all-fiber laser with an acoustically modulated fiber attenuator," IEEE Photonics Technol. Lett. **12**, 1153-1155 (2000).
2. D. Zalvidea, N. A. Russo, R. Duchowicz, M. Delgado-Pinar, A. Díez, J.L. Cruz and M.V. Andrés, "High

- repetition rate acoustic-induced Q-switched all-fiber laser,” *Opt. Commun.* **244**, 315-319 (2005).
3. M. Delgado-Pinar , D. Zalvidea, A. Díez, P. Pérez-Millán and M. V. Andrés, “Q-switching of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating,” *Opt. Express* **14**, 1106 (2006).
 4. V. V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky, and E. M. Dianov, "Yb–Bi pulsed fiber lasers," *Opt. Lett.* **32**, 451-453 (2007).
 5. A. A. Fotiadi, A. S. Kurkov and I. M. Razdobreev, “All-fiber passively Q-switched Ytterbium laser,” 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, p. 515.
 6. P. Adel, M. Auerbach, C. Fallnich, S. Unger, H.-R. Müller and J. Kirchhof, "Passive Q-switching by Tm³⁺ co-doping of a Yb³⁺ fiber laser," *Opt. Express* **11**, 2730-2735 (2003).
 7. A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov and O.I. Medvedkov, "All fiber Yb-Ho pulsed laser," *Laser Phys. Lett.* **6**, 2, 135–138 (2009).
 8. S. D. Jackson, "Passively Q-switched Tm³⁺-doped silica fiber lasers," *Appl. Opt.* **46**, 16, 3311-3317 (2007).
 9. T. -Y. Tsai and Y. -C. Fang, "A saturable absorber Q-switched all-fiber ring laser," *Opt. Express* **17**, 1429–1434 (2009).
 10. T. -Y. Tsai, Y. -C. Fang, Z. -C. Lee and H. -X. Tsao, "All-fiber passively Q-switched erbium laser using mismatch of mode field areas and a saturable-amplifier pump switch," *Opt. Lett.* **34**, 19, 2891-2893 (2009).

Copyright 2010 National Cheng Kung University