

全光纖型飽和吸收Q-切換環形脈衝雷射

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

tytsai@ee.ncku.edu.tw

Optics Express, Vol. 17, Issue 3, pp. 1429-1434, Jan. 2009

1. 簡介

一個具有小纖核直徑的Q-切換光纖雷射可以在沒有使用聚焦元件下直接提供1-100 MW/cm²高強度密度的輸出。如此的一個高強度密度雷射可應用於微結構加工、非線性光學研究和生醫應用。如同一般傳統的大型Q-切換雷射，Q-切換光纖雷射可透過類似的主動[1-2]和被動式[3-5]Q-切換元件來實現。然而這些光纖雷射在共振腔內均包含了空氣空隙，因此在光纖，Q-切換和鏡子之間仍需要複雜的接合技術來處理光耦合問題。

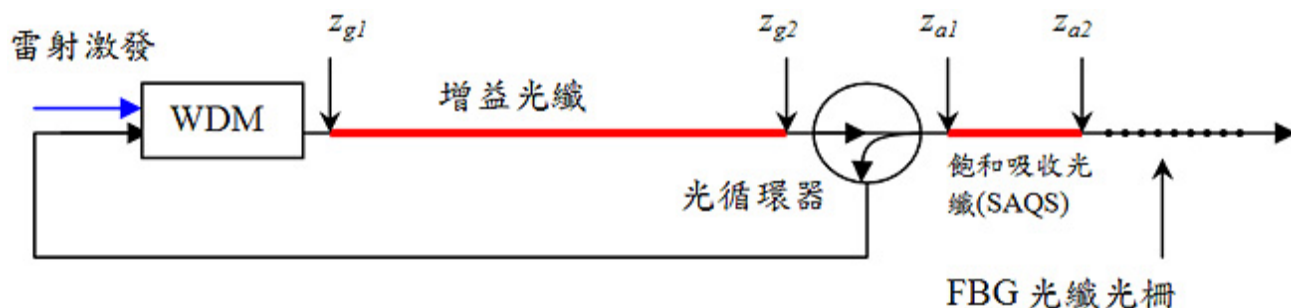


近年來由於全光纖Q-切換雷射不需使用光耦合技術且具有低共振腔能損的特性，全光纖Q-切換雷射技術的發展愈來愈受到研究矚目。所謂全光纖雷射通常是一個單一模式系統，被單模半導體雷射所激發，並可由一些已商品化的光纖元件如WDMs, FBGs等組成。雖然全光纖雷射系統的平均功率輸出受限於單模半導體雷射的激發功率(只有約數百毫瓦)，但它仍可達成1-100 W 瞬間光功率脈衝輸出。其製程簡易且材料成本相對低廉。

在這篇論文中，我們提出一個簡單的全光纖型飽和吸收Q-切換(SAQS)環形雷射的結構設計。並建立一組與位置相關的速率方程式來計算共振光子(n)、在增益光纖的增益數量(N_g)和在SAQS光纖的吸收數量(N_a)的空間非均勻分布。我們以單模摻鉍光纖在1550nm光波長下以理論模擬和實驗數據來驗證此雷射設計。值得注意的是，凡雷射材料是三能階式輻射材質也同時是二能階式可飽和吸收材質，皆可適用於此論文所提出的自我Q-切換的雷射結構設計。

2. 建模與模擬

圖一表示一個全光纖SAQS環型雷射的圖形設計。我們可以合理的推測：結構中在可飽和吸收光纖內光子密度應該是在增益光纖內光子密度的兩倍或者更大。此較大的光子密度會造成可飽和吸收光纖的快速飽和(漂白)，然後產生一個被動式的Q-切換行為。



圖一. 全光纖SAQS環型雷射的圖形設計

在模擬上，時間軸可切刻為 $t=k \times t_r$ ，其中 t_r 是光在共振腔往返一次的時間長度，而 k 為一正整數。速率方程式中的 $N_g(z)$ and $N_a(z)$ 在每一時間點都會被計算一次。

$$N_a(z_a, k) - N_a(z_a, k-1) = -p_a K_a N_a(z_a, k-1) n_a(z_a, k-1) \cdot t_r, \quad (1)$$

$$N_g(z_g, k) - N_g(z_g, k-1) = -p_g K_g N_g(z_g, k-1) n_g(z_g, k-1) \cdot t_r. \quad (2)$$

速率方程式中，在Q切換發生的極短期間內，雷射激發速率和群數自體輻射可以被忽略。當 $N_g(z, k)$ and $N_a(z, k)$ 在每一時間點被計算出後，共振光子數可由以下方程式計算而得：

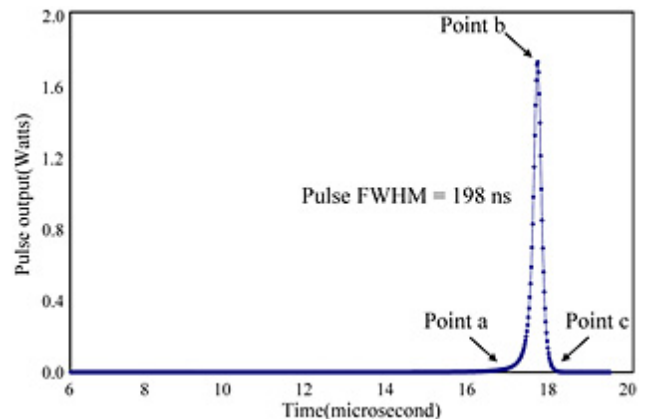
$$\begin{aligned} n_g(z_g, k) &= n_{ar}(z_{a1}, k-1) e^{-\alpha_g} \exp\left(\frac{\sigma_g}{A_g} \int_{z_{g1}}^{z_g} N_g(z, k) dz\right) \text{ in the gain region,} \\ n_{ai}(z_a, k) &= n_g(z_{g2}, k) e^{-\alpha_i} \exp\left(-\frac{\sigma_a}{A_a} \int_{z_{a1}}^{z_a} N_a(z, k) dz\right) \text{ from } z_{a1} \text{ to } z_{a2}, \\ n_{ar}(z_a, k) &= n_{ai}(z_{a2}, k) e^{-\alpha_r} \exp\left(\frac{\sigma_a}{A_a} \int_{z_{a2}}^{z_a} N_a(z, k) dz\right) \text{ from } z_{a2} \text{ to } z_{a1}, \\ n_a(z_a, k) &= n_{ai}(z_a, k) + n_{ar}(z_a, k) \text{ in the absorber region,} \end{aligned} \quad (3)$$

模擬開始的時間點即是雷射開始的臨界狀況，此時共振腔內的增益值等同於能損值。臨界點的 $I_p(z_g)$ and $N_g(z_g)$ 可以數值計算而得，如：

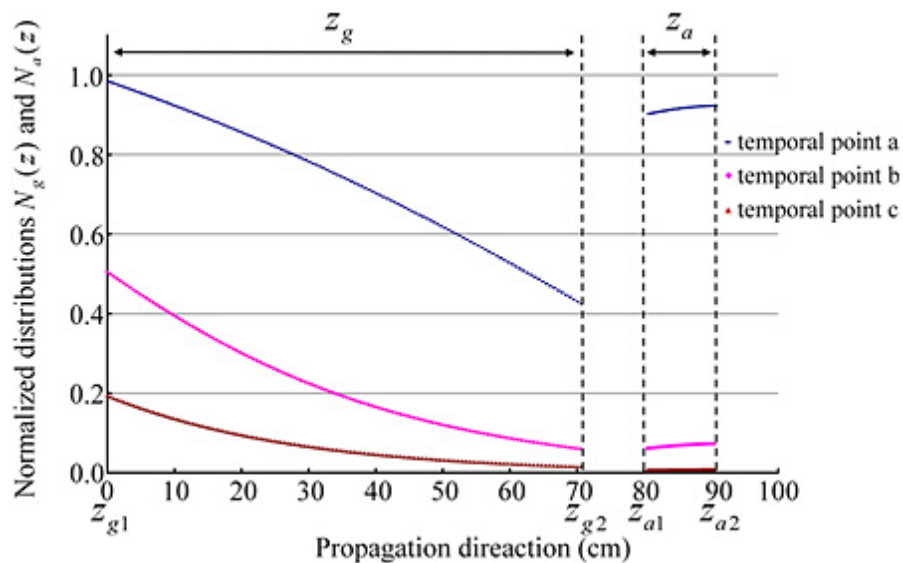
$$\frac{\sigma_g}{A_g} \int_{z_{g1}}^{z_{g2}} N_{gth}(z, 0) dz = (-\alpha_1 - \alpha_f - \alpha_2 - 2N_T \sigma_a l_a), \quad (4)$$

其他的模擬始值設定如下： $n_g(z_{g1}, 0) = 1 \times 10^2$ ， $A = 1.26 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ ， $t_r = 18 \text{ ns}$ ， $\sigma_g = \sigma_a = 5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ and $N_T = 1.38 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。這些值是採取實驗上所使用的參數。模擬的結果如圖二所示。其脈衝的瞬間脈衝功率約1.72W，脈衝寬度約198奈秒。

圖三顯示 $N_g(z_g)$ and $N_a(z_a)$ 在Q切換的三個時間點的空間變化。其中曲線已經正規化，即已經除以初始值 $N_g(z_{g1}, 0)$ and $N_a(z_{a2}, 0)$ 。圖中可以很清楚的看到SAQS光纖的吸收飽和速率大於增益光纖的增益飽和速率，而且SAQS光纖在脈衝結束時已達到完全飽和。



圖二. 全光纖SAQS環型雷射輸出脈衝模擬

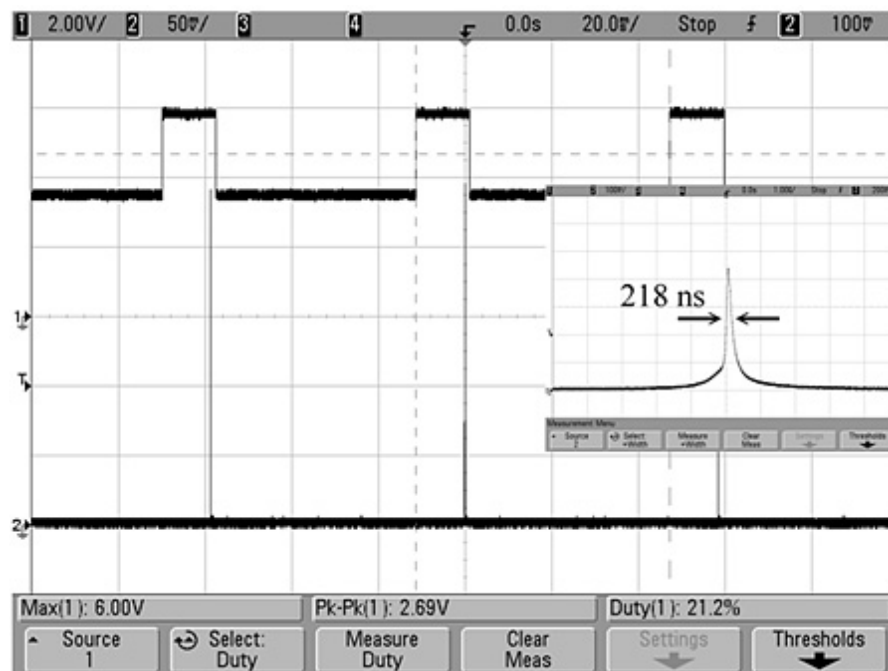


圖三. $N_g(z)$ and $N_a(z)$ 在三個時間點的飽和狀態。三個時間點已在圖二標示，分別是脈衝開始、脈衝最大值、脈衝結束的時間。

3. 實驗

實驗的架構如圖一描述。實驗上增益光纖和SAQS光纖皆為同型式的摻鉬光纖。此光纖的纖核直徑約4 μm ，在1550nm波長有30dB/m的吸收損失。SAQS光纖的長度有10cm而增益光纖有70cm。光纖光柵(FBG)在波長1550nm上有90%反射率。反射頻寬小於0.3nm。整體環型共振腔的總長度大約360cm。所有應用特性和之前模擬的參數很相似。實驗藉由一個175-ps fast EOT ET-3000砷化鎵銻的光檢測器偵測雷射脈衝輸出。

圖四顯示實驗測量到的穩定且連續Q-切換脈衝。調變速率被設定在25Hz。每個脈衝出現在激發光源的上升邊緣之後約12毫秒的時間點。每個脈衝約有0.37 μJ 的脈衝能量和218ns的脈衝寬度。瞬間脈衝功率可以達到1.69W，此實驗結果與之前模擬結果吻合。



圖四. 穩定且連續Q-切換脈衝。調變速率被設定在25Hz。每個脈衝出現在激發光源的上升邊緣之後約12毫秒的時間點。每個脈衝約有0.37 μJ 的脈衝能量和218ns的脈衝寬度。

4. 結論

我們已經提出一個簡單的全光纖可飽和吸收Q-切換雷射的設計，而且透過使用單模摻鉬光纖以數值模擬和實驗證明其高效率的Q-切換表現。我們也成功建立了一組與光纖位置相關的速率方程式，用以模擬 $n(z)$, $N_g(z)$ 和 $N_a(z)$ 在時間和空間分佈的變化。在這項實驗中我們也驗證達成具有218ns的脈衝寬度和1.69W的瞬間脈衝功率的雷射脈衝。實驗的資料與模擬的結果相當吻合一致。此提出的雷射架構簡單、成本低、效率高且可應用於不同的雷射材料。

文獻參考

1. H. H. Kee, G. P. Lees and T. P. Newson, "Narrow linewidth CW and Q-switched erbium-doped fibre loop laser," *Electron. Lett.* **34**, 1318-1319 (1998).
2. J. A. Álvarez-Chávez, H. L. Offerhaus, J. Nilsson, P. W. Turner, W. A. Clarkson and D. J. Richardson, "High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser," *Opt. Lett.* **25**, 37-39 (2000).
3. R. Paschotta, R. Haring, E. Gini, H. Melchior, and U. Keller, "Passively Q-switched 0.1-mJ fiber laser system at 1.53 μ m," *Opt. Lett.* **24**, 388 (1999).
4. M. Laroche, A. M. Chardon, J. Nilsson, D. P. Shepherd, and W. A. Clarkson, "Compact diode-pumped passively Q-switched tunable double-clad fiber laser," *Opt. Lett.* **27**, 1980-1982 (2002).
5. J. Y. Huang, H. C. Liang, K. W. Su, and Y. F. Chen, "High power passively Q-switched ytterbium fiber laser with Cr⁴⁺:YAG as a saturable absorber," *Opt. Express* **15**, 473-479 (2007).

Copyright 2010 National Cheng Kung University