

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

二極體雷射激發之氟化鋰 Q-開關 Nd:YVO₄ 雷射的設計與
運作

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC90-2112-M-032-008-

執行期間：90年08月01日至92年01月31日

執行單位：淡江大學物理系

計畫主持人：唐建堯

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 6 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

二極體雷射激發之氟化鋰Q-開關Nd:YVO₄雷射的設計與運作

Design and operation of a diode-pumped LiF:F₂- Q-switched Nd:YVO₄ laser

計畫編號： NSC 90-2112-M-032-008

執行期限： 90年 8月 1日 至 92年 1月 31日

主持人： 唐建堯 執行單位：淡江大學 物理系

一、中文摘要(關鍵詞：被動式Q開關,可飽和吸收體,二極體激發式Nd:YVO₄雷射)

我們探討二極體激發式LiF:F₂⁻ Q-開關Nd:YVO₄雷射的設計與運作。為探知LiF可飽和吸收體(SA)的運作極限,我們亦使用增益較高、操作範圍較大的閃光燈激發式Nd:YAG雷射來進行實驗。我們發現:當LiF-SA之初始穿透率(T_0)夠高時, Nd:YVO₄/LiF雷射能成功地Q-switching,而使用相同SA及輸出耦合鏡之閃光燈激發式Nd:YAG/LiF雷射卻不一定。在特定情況下,若增加pump雷射之驅動電流, Nd:YVO₄/LiF雷射可由CW運作模式變遷到Q-開關模式。此外,我們發現除了雷射腔組態及SA的性質外, SA-Q開關雷射的輸出特性(脈衝能量及時間寬度)與激發條件密切相關。為能定性地描述此型雷射的一般運作特性,一般分析SA-Q開關雷射的速率方程式模型需作修正;而定量分析的可靠與否則取決於雷射運作參數的精確度。

Abstract (Keywords:passive Q-switch, saturable absorber, diode-pumped Nd:YVO₄ laser)

The design and operation of a diode-pumped LiF:F₂⁻ Q-switched Nd:YVO₄ laser have been investigated in this project. To explore the operation limit of the LiF saturable absorber (SA) a flashlamp-pumped Nd:YAG laser (with higher gain and wider range of operation) was also employed. We found that when the initial transmission (T_0) of the LiF-SA is high, the flashlamp-pumped Nd:YAG/LiF laser may fail in Q-switching in spite that the Nd:YVO₄/LiF laser (with the same SA and output coupler) does. Under certain circumstances, the Nd:YVO₄/LiF laser may change its mode of operation from CW to Q-switching by increasing the drive current of the pump laser. Further, we found that, in addition to the laser configuration and SA properties, the characteristics of laser output (pulse energy and duration) of a SA Q-switched laser has much to do with the pumping conditions. In order to explain the general performance of this type of laser, it is necessary to modify the commonly employed rate-equation model. Whether or not a quantitative analysis can be reliable then depends on the accuracy of laser parameters.

二、計畫緣由與目的

二極體激發式固態雷射具備高效率、高光束品質、及高穩定性,而其體積小、能與其它系統整合的特性更提高了其應用性,因而其研發受到相當的重視;尤其是構造簡單而可能產生高功率脈衝的SA-Q開關雷射。一個好的SA-Q開關除了

要有好的材料特性外，須具有夠大的吸收截面積，如此才能快速地Q-switching、有效地自增益介質汲取能量[1,2]，並在雷射的組態設計上允許較大的空間；Cr⁴⁺:YAG SA晶體也因而被廣泛利用。摻釹釩酸鈮Nd:YVO₄晶體是一種性能優良的CW雷射介質；吸收波長範圍寬，受激輻射截面積大(可使threshold低、斜率效率高)，適於製作二極體雷射激發的全固態雷射[3]。然而，因它的受激輻射截面積與Cr⁴⁺:YAG的吸收截面積相當接近，並用於Q開關雷射時，效率及雷射的組態受到限制[4]。因此，以吸收截面積較大的LiF:F₂⁻(σ_s≅1.6×10⁻¹⁷cm²[5])來發展效率更好的Nd:YVO₄/LiF:F₂⁻ Q開關雷射似是相當可能的。

理論上，被動式Q開關雷射之最佳化已受到相當廣泛的探討[6-9]；然而，這些理論多採用簡化的速率方程式模型，忽略雷射介質的激發條件、激發態的衰變、以及自發輻射；因而，其分析結果與雷射介質的激發條件無關，也不能廣泛地解釋雷射在實驗上所表現的一般特性(尤其是脈衝能量及時寬的變化)，其適用性受到相當的限制。此外，文獻中發表的各項雷射運作參數之數據相當分歧，值得進行實驗加以檢驗和分析；唯有如此，雷射之最佳化設計才會更有實質意義。

三、研究方法及成果

為探討LiF Q-開關運作的極限情況，除了二極體激發之Nd:YVO₄雷射外，我們使用增益較高、操作範圍較大的閃光燈激發式Nd:YAG雷射來進行實驗。考慮Q-開關運作所需滿足之第二起振條件[1,2,4,8]：

$$r(1-s) > \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_0}\right) + L}{\ln\left(\frac{1}{T_0}\right)}, \quad (1)$$

其中 $r = (\chi_s f_s A) / (\chi f_g A_s)$ ， χ 及 χ_s 分別為雷射上能階及SA基態的居量減少因子， σ_g 及 σ_s 為雷射受激輻射及SA吸收截面積， A 及 A_s 為雷射光束在增益介質及SA中的面積， s 為SA激發態與基態吸收截面積之比， R 為輸出鏡反射率， L 為腔內損失率。由(1)式可知，當SA的 T_0 夠高、或雷射輸出鏡的反射率 R 夠低時，Q-開關運作之條件可被破壞。我們先後使用 $R \cong 0.29, 0.42, 0.6, 0.8, 及 0.9$ 的輸出耦合鏡，及 $T_0 \cong 0.98, 0.96$ 的LiF-SA於此閃光燈激發的Nd:YAG雷射，如圖一。結果在各種組合下，雷射的輸出皆有如未使用SA(free running)那般，最先總是1至3個尖峰(spiking)，隨後即為典型的遲滯振盪(relaxation oscillation)，如圖二。然而當 $R \cong 0.9$ 並使用 $T_0 \cong 0.94$ 的LiF-SA時，Q開關作用終於顯現，如圖三；圖中脈衝之能量及時寬皆非定值；此與pump速率隨時間變化相關。

我們以二極體激發之Nd:YVO₄雷射進行類似實驗。當 $R = 0.94$ 而LiF-SA的

$T_0 = 0.94$ 時，Nd:YVO₄/LiF雷射最初以CW模式運作(threshold 激發功率約為150mW)。當激發功率增加到165mW時，發生了相當奇異的變化，如圖四；其中(a)~(d)四種情況的激發功率分別165, 166, 173, 191mW；雷射的運作模式竟由CW轉變為Q-switching。使用 T_0 較低的LiF時，情況大不相同：當 $T_0 = 0.96$ 時，雷射從threshold開始以CW模式運作，大幅增強激發功率後，雷射輸出出現了介於圖四(b)-(c)之間的不穩定情況；而當 $T_0 = 0.98$ 時，大幅增加激發功率後，在增強的CW輸出之上也加上如圖四(b)的小幅度振盪。此部分實驗裝置與圖五類似，但二極體雷射光(最高約0.6W，無光纖)經透鏡準直後，由15cm焦距透鏡聚焦到Nd:YVO₄雷射晶體(1%, at., 3×3×1 mm)上(尺寸130μm×100μm)，雷射腔長65mm。

SA Q開關雷射的輸出特性除了與雷射腔組態及SA的性質相關外，其運作及輸出脈衝的能量和時寬亦與激發條件密切相關。我們使用一光纖耦合輸出之二極體pump雷射、 $T_0 \cong 0.98$ 之LiF-SA、及 $R = 0.985$ 的輸出耦合鏡來進行實驗，裝置如圖五；pump光先經透鏡準直，再由8-mm焦距透鏡聚焦於Nd:YVO₄雷射晶體(FWHM約為200μm)，而雷射腔長為50mm。實驗結果如圖六，結果顯示：當激發功率增加時，除了脈衝重複率增加外，脈衝的能量亦會增加，而其時寬卻會縮短；但這些變化逐漸趨緩—有趨近於某極限的趨勢。為取得更多的數據，我們使用 $T_0 \cong 0.92$ 的LiF-SA晶體(但未鍍膜,通過一次造成約5%的反射損失)、及 $R = 0.90$ 及 0.80 的輸出耦合鏡來進行實驗，並驗證了上述觀點。

為能解釋實驗結果，我們使用速率方程式模型(包含pumping及相關能階的decay項，並考慮了pump光的聚焦、及其與雷射光束在增益介質內的重疊效應)來進行理論模擬。我們針對Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG雷射進行了實驗及檢驗，因為文獻中已有許多關於它的研究結果。然而，採用已知雷射參數： $\sigma_g = 2.5 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ 及 $\sigma_s = 7 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ [10]計算結果與實驗的差異相當大。為此我們進行了另一實驗：測量Nd:YVO₄在1064nm的 σ_g 值；作法是測量CW-Nd:YVO₄雷射的起振激發功率及pump和雷射光束的重疊[11]。實驗及分析結果($\sigma_g \cong 1.25 \times 10^{-18} \text{cm}^2$)如圖七，其中 A/A_p 為雷射與pump光束的面積比。此外我們另由其他實驗分析獲得Cr⁴⁺:YAG的 $\sigma_s \sim 3 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ ；由這兩個參數算得的結果與我們的Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG雷射實驗結果在定性上相符，在定量方面則相當接近。

四、討論與結論

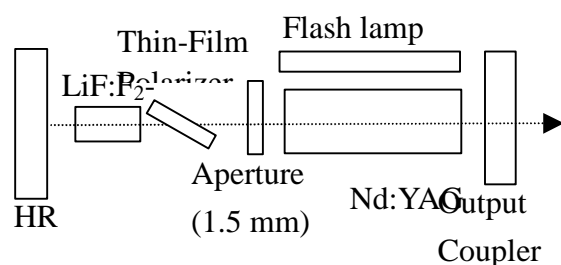
SA-Q開關雷射之運作需滿足第二起振條件，亦即SA之飽和能量密度需比增益介質小；然而，當SA之吸收效應相當弱時，外界的影響(例如，因pump光照射或類似gain-switching的spiking效應過強時)，SA之Q-開關功能可能會發生顯著的變化。SA Q開關雷射的輸出特性會因激發條件(pump 功率及聚焦情況)而變，而第二起振條件亦然。值得注意的是在的特殊情況下，Nd:YVO₄/LiF雷射的運作可由最初的CW模式變遷到Q開關模式，而其間的變化只是激發功率的增加；這現象

或與雷射腔內的增益及光子數(或光場)耦合產生spiking的作用相類似。在Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG雷射方面，我們已初步成功地驗證了修正後的理論模型。在Nd:YVO₄/LiF雷射方面，因為我們所使用之LiF-SA晶體的材質不很均勻且性質複雜(尚未經足夠的分析)，而目前實驗分析得到的 χ_s 值也相當特殊($\chi_s \sim 0.3$,且可能誤差大)，所以，尚不適合進行所謂的最佳化設計；若能更充分地分析LiF:F₂⁻晶體的性質，應可獲得更有價值的成果。

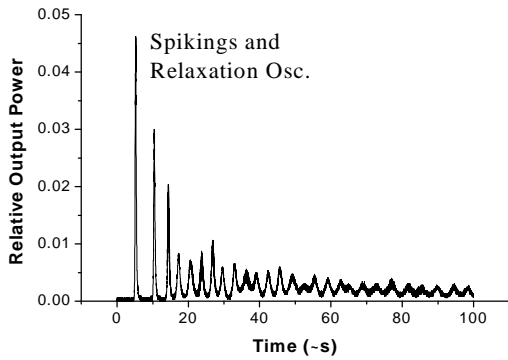
五、參考文獻

1. A Szabo and R.A. Stein, J. Appl. Phys. **36**, 1562 (1965).
2. A.E. Siegman, *Lasers*, 1st ed., Univ. Science, Mill Valley, Calif., 1986, Chap. 26.
3. N.P. Barnes, M.E. Storm, P.L. Cross, and M.W. Skolaut, IEEE J. Quantum Electron. **26**, 558 (1990).
4. Y. Bai, N. Wu, J. Zhang, J. Li, S. Li, J. Xu, and P. deng, Appl. Optics, **36**, 2468 (1997).
5. A. Lupei, V. Florea, T. Dascalu and V. Lupei, Optics Comm. **79**, 309 (1990).
6. J.J. Degnan, IEEE J. Quantum Electron. **31**, 1890 (1995).
7. X. Zhang, S. Zhao, Q. Wang, Q. Zhang, L. Sun, and S. Zhang, IEEE J. Quantum Electron. **33**, 2286 (1997).
8. G. Xiao and M. Bass, IEEE J. Quantum Electron. **33**, 41 (1997).
9. Y.F. Chen, IEEE J. Quantum Electron. **37**, 462 (2001).
10. Z. Burshtein, P. Blau, Y. Kalisky, Y. Shimony, and M.R. Kokta, IEEE J. Quantum Electron. **34**, 292 (1998).
11. P. Lapota and M. Brussard, IEEE J. Quantum Electron. **27**, 2319 (1991).

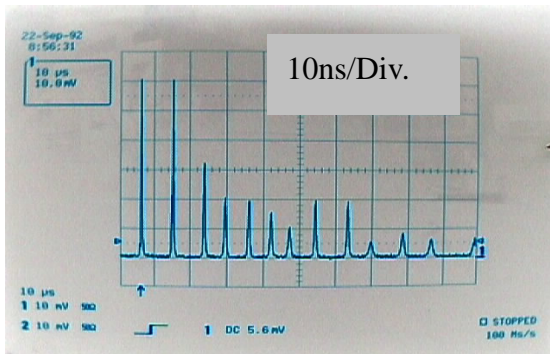
六、附圖



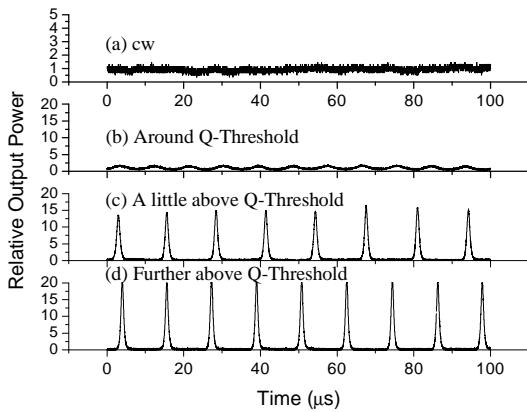
圖一. 閃光燈激發之Nd:YAG/LiF:F₂-雷射裝置示意圖.



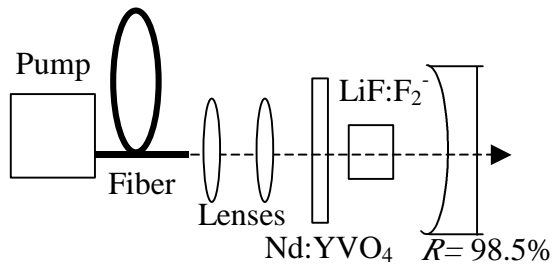
圖二.閃光燈激發之Nd:YAG/LiF:F₂-雷射輸出的脈波，LiF之初始穿透率 $T_0 > 95\%$ ，輸出耦合鏡反射率 R 介於0.29及0.90之間。



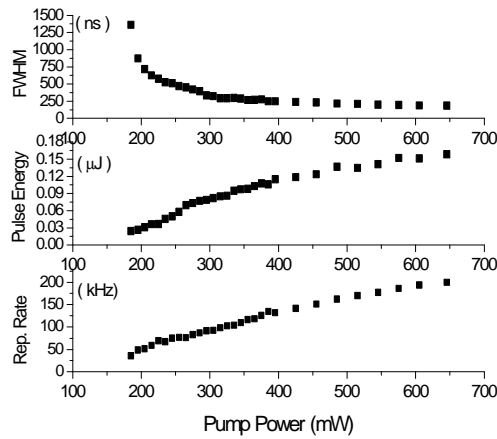
圖三. Nd:YAG/LiF:F₂-雷射轉為Q-switching輸出之情況. LiF的 $T_0 = 94\%$ ，而 $R = 90\%$



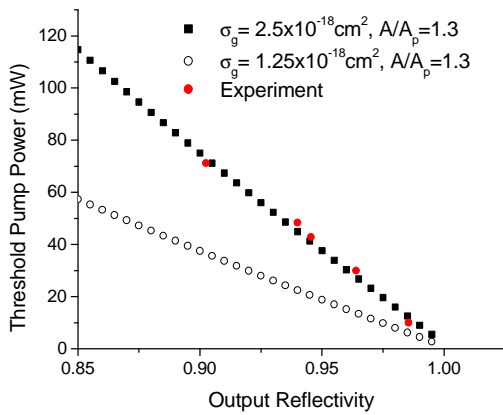
圖四. Nd:YVO₄/LiF:F₂-雷射由穩定cw輸出變為Q-switching輸出之情形; (a)cw輸出, 1.5 mW; (b)約在Q-threshold, 輸出1.6 mW; (c)輸出2.2 mW; (d) 輸出2.9 mW.



圖五. 二極體激發式Nd:YVO₄/LiF: Q-開關雷射裝置示意圖;輸出鏡曲率半徑=10cm。



圖六. 二極體激發式Nd:YVO₄/LiF: Q-開關雷射輸出; LiF 晶體的 $T_0=98\%$.



圖七. CW-Nd:YVO₄雷射之起振激發功率與輸出鏡反射率之關係。經分析,Nd:YVO₄之受激輻射截面積 $\sigma_g \approx 1.25 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$.

