

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

光反饋式Nd環形雷射之探討

Investigation of Neodymium Ring Lasers with Optical Feedback

計畫編號： NSC 89-2112-M-032-017

執行期限： 88年 8月 1日 至 90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：光反饋,單縱模,環形雷射)

本計畫之主要目的是探討(1)光反饋作用對脈衝式及連續波式Nd環形雷射之輸出特性、及對脈衝式環形雷射腔內兩逆向光場之動力過程的影響,及(2)光反饋單模運作的條件。為研究光反饋在瞬態或穩態時的效應,我們針對兩型光反饋式Nd環形雷射系統進行研究:系統一是由閃光燈激發的可飽合吸收體(LiF:F₂⁻)被動式Q-開關Nd:YAG雷射;系統二是由二極體雷射激發的Nd:YVO₄連續波雷射。此二環形雷射系統皆可產生能量(或功率)穩定的準單向輸出;其環形腔內兩逆向運行的光場強度之比值相當懸殊,並隨操作條件之不同而改變。當系統一之較強脈波形成時,其較弱脈波則因增益耗損而被抑制。值得注意的是:不同的激發方式(或強度)可導致不同的初始光場的性質,進而導致不同的輸出特性。在系統一部份,我們以不同初始穿透率(T_0)的可飽和吸收體及不同反射率(R_0)的輸出耦合鏡進行實驗,結果發現只有在 T_0 及 R_0 夠低時,才能實現單模運作。理論方面,我們以變率方程近似來分析此二環形雷射的運作,其結果與實驗有很好的一致性。

Abstract (Keywords: optical feedback, single longitudinal mode, ring laser.)

The main purpose of this project is to investigate (1) the effects of optical feedback on the output characteristics of a pulsed and a continuous-wave neodymium ring lasers,

and on the dynamic process of the counter-propagating optical fields within the cavity of a pulsed ring laser; and (2) the conditions for single-mode operation. In order to study the effects of optical feedback on ring lasers, either in transient or steady state, our effort has been focused on the two Nd ring lasers: System one is a flashlamp-pumped, saturable absorber Q-switched Nd:YAG ring laser, and system two is a diode laser-pumped cw Nd:YVO₄ laser. It turns out that both of the lasers may generate stable output energy (or power) quasi-unidirectionally, and there is a discrepancy in intensity between the counter-propagating fields, which varies with laser operation conditions. When the stronger pulse of system one is being developed, the weaker one gets suppressed because of gain depletion. It is noted that the initial properties of the optical field within the laser cavity may be quite dependent on the way (or intensity) of laser excitation, thus, may give rise to different output characteristics. Experiments with system one by varying the initial transmittance (T_0) of the saturable absorber and the reflectance (R_0) of the output coupler reveal that single-mode operation may be realized only when both T_0 and R_0 are low enough. Theoretical analyses of the two ring lasers are analyzed by rate-equation approximation, and in comparison with experiment, our theoretical simulation shows fairly good agreement.

二、計畫緣由與目的

單模雷射具備穩定的輸出特性及良好

的單色性，它們在干涉光學、光譜學、非線性光學、光通訊等領域中有廣泛的應用。實現單模雷射的方式很多，例如：製作共振腔夠短的小型雷射、將雷射在起始振盪處(threshold)附近操作、使用特殊的選頻裝置(如繞射光柵或Fabry-Perot標準具)、注入單頻光苗(injection seeding)、以耦合共振腔選頻、使用可飽和吸收體Q開關、或利用光反饋作用等[1-6]。這些方式或使雷射振盪頻率為唯一，或使某振盪頻率在多模競爭中擁有特別的優勢，因而產生單模輸出。

一般線形共振腔雷射為駐波型雷射，即使其雷射介質的增益曲線(gain curve)是均勻增寬的(homogeneously broadened)，都有空間燒洞(spatial hole burning)的問題[2-4]，不同縱模可自不盡相同的增益區域獲得足夠的增益，導致多模的產生。然而，若採用環形腔及譜線均勻增寬的雷射介質，並使雷射以單橫模、單向(如逆時針方向)運作，則在腔內發生的所有行波(traveling waves)將共用相同的增益體積而彼此強烈競爭；其中，增益最大的縱模將可抑制其他縱模的發展，導致單縱模的輸出。然而，單模運作能否維持穩定取決於獲得最大增益的縱模能否唯一、且穩定地存在。

一般環形雷射之單向運作是使兩逆向波之一遭受單向損失(或較大的損失、或較小增益)，迫使雷射只能在另一方向單向運作[2,4,7]。相較之下，「光反饋」是將環形雷射兩輸出光束之一沿原路徑反射而(部份)注回腔中，使反向運行兩波(在發展過程中)耦合；在饋入方向運行的波因而在增益競爭上占有優勢，導致其強度的巨幅領先，使雷射以準單向(quasi-unidirectional)模式運作，並可產生單模輸出[5,8,9]。雖然過去已有許多關於光反饋的應用及優缺點的討論[10,11]，然而，仍有許多基本問題，例如：光反饋作用對於不同激發方式(脈衝式或連續波式)及不同激發強度之環形雷射之輸出特性的影響、雷射腔內兩逆向光場之間的

競爭情況、及單模運作的條件等，則有待探討。因此，我們設置不同的兩型光反饋式環形Nd環形雷射系統來進行研究，探討光反饋在瞬態及穩態下的作用。

三、研究方法及成果

為能瞭解光反饋的作用，我們探討兩套光反饋式Nd環形雷射系統：系統一是由閃光燈激發的可飽和吸收體Q-開關Nd:YAG雷射；系統二是由二極體雷射激發的Nd:YVO₄連續波雷射。

系統一之結構如圖一；其環形腔是由三面高反射鏡(HR)及一面低反射鏡M₄(輸出耦合鏡)所構成，此低反射鏡為一石英玻璃基板或其他(主要是39%反射率之)部份反射鏡。在45度入射角，石英玻璃基板對σ-偏振光之反射率較高(約8%)，對π-偏振光之反射率則低於1%；所以此雷射可產生高度的σ-偏振光(但在使用部分反射鏡為輸出耦合鏡時，則需在腔內置入線偏振片以產生偏振光)。雷射腔內有一Nd:YAG雷射晶體(閃光燈腔中)、一限制光束大小(產生單橫模)的孔徑(A)，及一作為被動式Q開關(可飽和吸收體,SA)的LiF:F₂-晶體。位於腔外(output 2)輸出光束線上的部分反射鏡M₅為反饋鏡。

我們以不同初始穿透率(T_0)的LiF:F₂可飽和吸收體、及不同反射率的M₄進行測試：當 $T_0=80%$ 而M₄反射率在50%以上時，即使雷射在起振點(threshold)附近操作，其輸出脈衝幾乎都是多模的。而在 $T_0=31%$ 及M₄反射率夠低時(如39%)，可以實現單模運作。

為了解不同程度的光反饋效應，我們變換反饋鏡(M₅反射率在4%至98%之間)及輸出耦合鏡(M₄反射率為8%或39%)，並同時測量兩個輸出脈衝的能量，其結果(如表一及表二)顯示：光反饋可造成雷射輸出的兩光束有極其懸殊的脈衝能量比。值得注意的是即使在反饋光和操作電壓變化相當大的情形下，仍可獲得時寬及能量相當穩定的單模輸出(圖一,output 1)；然而，將

輸出倍頻後，以標準具(etalon)檢驗干涉條紋發現：雖然輸出為單模，但頻率並不固定。

在光反饋作用下，雷射腔內兩逆向、強弱不等的光波對增益的競爭力不等；其強者可能將增益快速消耗，導致弱者被壓抑的情形。為驗證此觀點，我們用感光二極體偵測雷射輸出的兩個脈波之波形；其典型結果(如圖二所示)證實了上面的論述。

此外，我們亦詳細觀察光反饋作用對雷射起振條件(threshold)的影響；結果發現當雷射在起振點運作時，光反饋並不能降低起振條件，但是卻可使雷射成功擊發率明顯增加。

理論方面，我們以變率方程近似(包含自發輻射及反饋的貢獻)來模擬此環形雷射的運作，分析環形共振腔內兩逆向光場的光子數、相關量子態居量數、和可飽和吸收係數等如何隨時間變化的關係，並假設不同的操作條件來作數值模擬，其結果與實驗有很好的一致性。

系統二部份的實驗說明如下：由二極體雷射(最大輸出功率為0.6瓦、波長~808nm)激發之Nd:YVO₄雷射，如圖四；其環形共振腔呈直角三角形，而M₃處兩臂夾角約為70°；雷射的雙向運作，有4個輸出，其中一束用於光反饋、一束用來觀測雷射輸出光譜特性；經M₂輸出的那兩束光是要測量比較的主要對象。實驗顯示：(1)無反饋時，腔內反向運行的兩束光競爭顯著；雖然各輸出功率不穩定，但是其總和幾乎是一個定值；(2)有反饋時，雷射雙向輸出的功率之強弱比值可達100，但不能維持穩定(最大的穩定比值在60~70)；(3)當激發功率增加時，雙向輸出功率之比亦隨之增加，但有逐漸飽和的趨勢，如圖四；(4)雖可產生準單向的單模輸出，但難以維持長期的穩定性。在理論部分，我們分析反饋作用對此環形雷射之雙向運作的影響，發現：(1)腔內光場之threshold不受反饋作用的影響；(2)雙向輸出強度可用一比例關係

式來描述；其比值與較弱輸出光束之功率呈一線性關係。

四、討論與結論

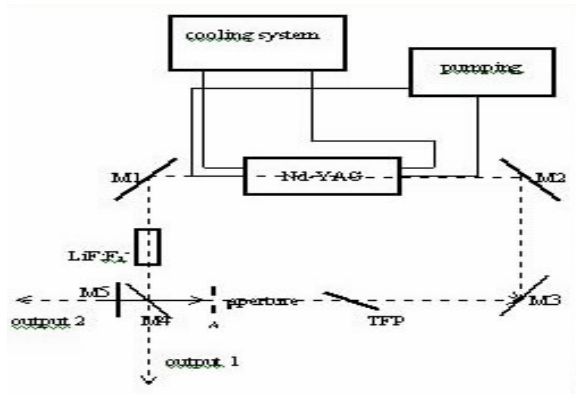
光反饋可使前述二環形雷射容易地準單向運作、產生相當穩定的能量(或功率)輸出；然而，單模運作並非可以任意達成。由閃光燈激發的系統一能否以單模運作與可飽和吸收體之初始穿透率、及輸出耦合鏡之反射率相關；我們認為此與雷射介質增益的大小、及自發輻射光場的性質有密切關聯。雖然系統二亦可產生單模輸出，其反饋作用機制對環境變化或擾動非常敏感，使輸出頻率難以維持長期穩定；然而，若在腔中置入 etalon，應可改善其穩定性。雖然光反饋可使環形雷射腔內兩逆向光場強弱懸殊，其強弱差距隨操作條件之不同而改變，但主要的準單向輸出光之強度對反饋率的改變並不敏感。值得注意的是：在系統二腔中，兩逆向光場的強度差異隨激發功率之增加而擴大，並有傾向飽和的趨勢，此與相關理論之預測(為固定)不符[8,12]，這是有待探討的問題。

五、參考文獻

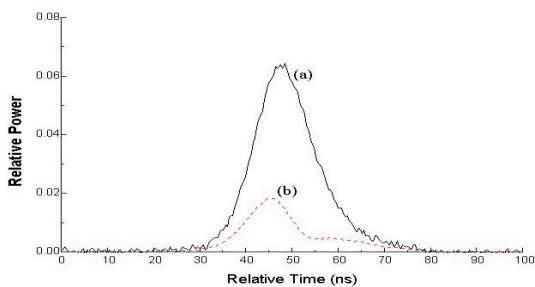
1. S.L. Chin, Optics and Laser Technology, pp. 85-88 (1980).
2. *Principles of Lasers*, 3rd. ed., by O. Svelto, Plenum Press, New York, 1989.
3. *Laser Physics*, by M. Sargent III, M.O. Scully, and W.E. Lamb, Jr., Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1974.
4. C.L. Tang, H. Statz, G.A. deMars, and D.T. Wilson, Phys. Rev. **136**, A1 (1964).
5. M. Hercher, M. Young, and C. B. Smoyer, J. Appl. Phys. **36**, 3350 (1965).
6. A. Agnesi, et. al., IEEE J. Quantum Electron. **34**, 1480 (1998).
7. R.J. Freiberg, P.P. Chenausky, and C.J. Buczel, Appl. Optics **12**, 1140 (1973).
8. F.R. Faxvog, and A.D. Gara, Appl. Phys. Lett. **25**, 306 (1974), and references therein.
9. P.P. Pashinin, E.J. Shklovsky, V.V. Tumorin, and C.-Y. Tang, Laser Physics **9**, 340 (1999).

10. S.M. Jarrett and J.F. Young, Opt. Lett. **4**, 176 (1979).
 11. F.R. Faxvog, Opt. Lett. **5**, 285 (1980).
 12. F. Aronowitz, and R.J. Collins, Appl. Phys. Lett. **9**, 55 (1966).

六、 附圖



圖一. 反饋式Nd:YAG環形雷射裝置示意圖.

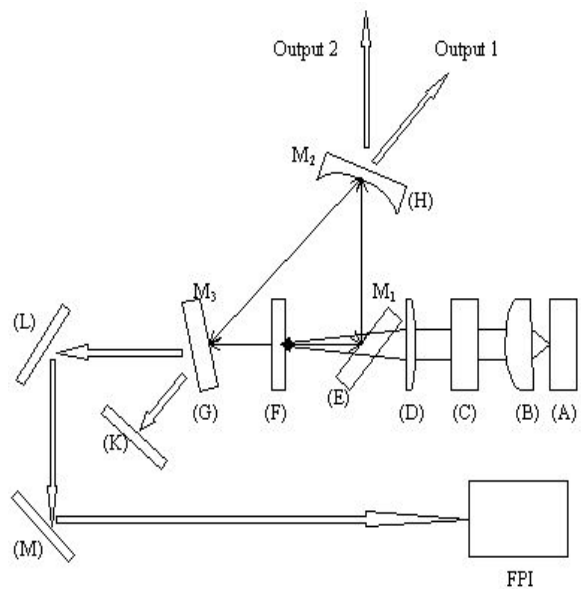


圖二. 光反饋Nd:YAG環形雷射輸出的兩個脈波：(a)逆時鐘輸出(output 1), FWHM=14 ns; (b)順時鐘輸出(output 2)×90; 輸出耦合鏡反射率=8%, 反饋鏡反射率=29%.

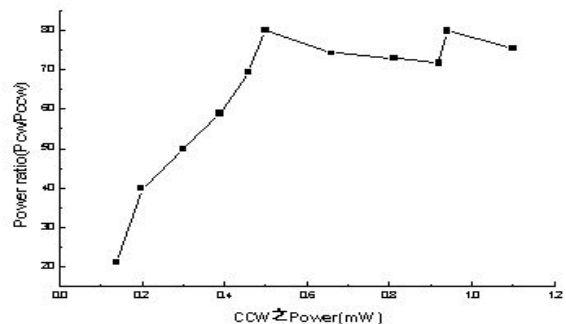
七、 附表

反饋鏡的反射率	逆時鐘輸出能量	順時鐘輸出能量
4%	9.8± 0.3mJ	101.7± 7.5μJ
29%	9.4± 0.3mJ	29.2± 4.5μJ
42%	9.6± 0.4mJ	13.67± 1.5μJ
60%	9.6± 0.2mJ	9.98± 0.57μJ
80%	9.3± 0.3mJ	5.53± 0.43μJ
90%	9.4± 0.5mJ	1.82± 0.11μJ
98%	9.3± 0.4mJ	1.48± 0.07μJ

表一. Nd:YAG環形雷射輸出的兩個脈衝能量與反饋鏡反射率之關係；輸出耦合鏡反射率為8%。



圖三.反饋式Nd:YVO₄環形雷射示意圖。(A)diode laser; (B)準直透鏡; (C)變形稜鏡; (D)聚焦透鏡; (E,G,L,M) 45-度高反射鏡; (F) laser crystal; (H)98% output coupler; (K) 0度高反射鏡; FPI, scanning Fabry-Perot interferometer. 環形腔周長~31cm.



圖四.反饋式Nd:YVO₄環形雷射輸出功率比.

反饋鏡的反射率	逆時鐘輸出能量	順時鐘輸出能量
4%	7.4± 0.2mJ	156± 28.6μJ
29%	7.3± 0.2mJ	31.2± 4.7μJ
42%	7.5± 0.2mJ	25.1± 3.5μJ
60%	7.3± 0.1mJ	21.6± 2.7μJ
80%	7.4± 0.1mJ	3.65± 0.26μJ
90%	7.2± 0.2mJ	1.91± 0.25μJ
98%	7.3± 0.3mJ	<1μJ

表二. Nd:YAG環形雷射輸出的兩個脈衝能量與反饋鏡反射率之關係；輸出耦合鏡反射率為39%。

