

# 染料调 Q 单纵模 Nd : YAG 环形激光器

黄茂全 郑晋玲 潘 庆 彭堃墀

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

**提要** 应用调 Q 染料可使环形腔处于单向行波运转并具有选模特性, 研制成功染料调 Q 单纵模 Nd : YAG 环形激光器, 输出稳定, 选单纵模几率高达 90% 以上。

**关键词** 单向行波运转, 环形腔, 单纵模

## 1 引 言

调 Q 单纵模 Nd : YAG 激光器是激光制导、激光雷达和高分辨率光谱学等的重要光源。由于调 Q 激光器的腔内增益高, 形成输出脉冲时间极短, 一般选频器不能充分发挥选模作用。为此, 前人相继提出预脉冲调 Q 选模技术、籽脉冲注入锁定技术。预脉冲调 Q 选模, 控制技术要求非常苛刻, 或者因为预脉冲幅度太小, 或者因为泵浦波动腔内增益过高往往出现多纵模振荡<sup>[1]</sup>; 而籽脉冲注入锁定技术成本高、难度大。最近出现正反馈选模的调 Q 技术<sup>[1]</sup>, 器件又不易购置。为了工作需要, 我们研制了一台简单的染料调 Q 单纵模 Nd : YAG 环形激光器, 输出稳定, 单纵模选出率高达 90% 以上。

## 2 激光器设计思想和工作原理

虽然均匀加宽增益介质 Nd : YAG 具有自选模特性, 但由于驻波效应引起的空间烧孔而导致多模运转<sup>[2]</sup>。为了消除空间烧孔, 选用环形腔。一般环形腔是双向输出。通常采用由起偏器、半波片、F-R 旋转器组成的光单向器、晶体 Q 开关和选频器。其结构复杂、技术难度大, 而且很难做到长时间单纵模运转。我们发现调 Q BDN 染料具有使环形腔处于单向行波运转的特性, 其规律简述如下(详细实验和理论另有专文介绍)。

实验装置如图 1 所示。 $I^+$  表示顺时针方向光强,  $I^-$  表示逆时针方向光强。 $M_1, M_3$  为全反射平面镜,  $M_2$  是反射率为  $R$  的输出镜。

(1) 如果将调 Q BDN 染料片  $D$  置于 Nd : YAG 棒左端, 经  $M_1, M_3$  到  $M_2$  间任一位置上, 均有  $I^+ \gg I^-$ ; 而如果将调 Q 染料片  $D$  置于 Nd : YAG 棒右端到  $M_2$  间任意位置上, 均有  $I^- \gg I^+$ 。

(2) 正、逆二光束的比值主要由输出镜  $M_2$  的反射率  $R$  决定。对图 1 实验装置,  $I^+/I^- \approx 1/R$ ,  $R$  越小, 单向性越好。对调 Q 高增益激光器,  $R$  一般可在 0.04 ~ 0.20 之间选用。我们选  $R =$

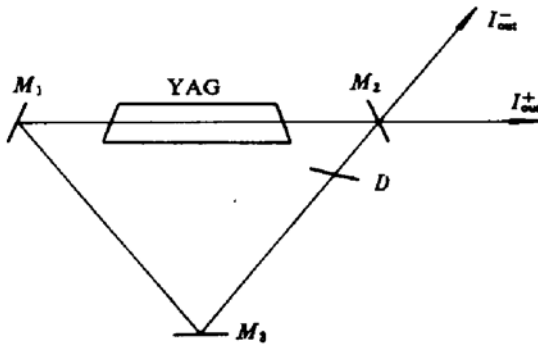


Fig. 1 Schematic diagram of an unidirectional operation

0.04 的输出镜  $M_2$ , 其单向性  $I^+/I^- \approx 25$ , 已可以认为是单向行波输出。

为了充分利用调 Q 染料的选择特性, 我们从各个模的激光强度的建立过程来讨论选模机制。为此, 先写出染料调 Q 的无量纲速率方程<sup>[3]</sup>

$$d\varphi'/d\tau = [\Delta N_s' + \Delta N_s(\sigma N_s/N_s \Delta N_s) - 1]\varphi' \quad (1)$$

$$d\Delta N_s'/d\tau = -\Delta N_s' \varphi' / 2 \quad (2)$$

$$d\Delta N_s/d\tau = -\sigma \Delta N_s \varphi' \quad (3)$$

式中  $\Delta N_s = (N_{s2} - N_{s1})/N_s$  为增益介质粒子的相对反转密度,  $N_s$  为增益介质的总粒子密度,  $\Delta N_s = (N_{s2} - N_{s1})/N_s$  为染料粒子的反转密度,  $N_s$  为染料的总粒子密度,  $\Delta N_s$  为无染料时的相对阈值反转密度,  $\varphi'$  为光子密度,  $\sigma_s, \sigma_e$  分别为染料和增益介质的发射截面,  $\Delta N_s' = \Delta N_s/\Delta N_s$ ,  $\tau = t/\tau_c$ ,  $\varphi' = 2\varphi/N_s \Delta N_s$ ,  $\sigma = \sigma_s/\sigma_e$ ,  $\tau_c$  为腔内光子的平均寿命。方程(2)较文献[3]多了因子(1/2)是考虑到四能级反转粒子变化率比三能级系统小一半。由于各纵模净增益的差异和反转粒子数逐渐增大, 导致各纵模具有不同的阈值和不同的起振时刻, 我们仅讨论 1, 2 两个纵模。

在初始阶段, 若激光器件的激励恰好处于净增益最高的纵模 1 的阈值处, 染料分子仍处于基态,  $\Delta N_s = \Delta N_{s1} = -1$ ,  $\Delta N_s' = \Delta N_{s1}' = \Delta N_{s1}'$ 。

将初始条件代入方程(1), 并令  $d\varphi'/d\tau = 0$ , 可以得到

$$\sigma N_s/N_s \Delta N_s = \Delta N_{s1}' - 1 \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式, 得

$$d\varphi_1'/d\tau = [\Delta N_s' + \Delta N_s(\Delta N_{s1}' - 1) - 1]\varphi_1' \quad (5)$$

为了简化处理, 略去  $\varphi'$  达饱和光子密度  $\varphi_1'$  之前,  $\Delta N_s'$ ,  $\Delta N_s$  的变化, 并用由泵浦功率决定的最大相对  $\Delta N_s$  的反转粒子数  $\Delta N_{sm}'$  近似代替  $\Delta N_s'$ , (5) 式变为

$$d\varphi_1'/d\tau = (\Delta N_{sm}' - \Delta N_{s1}')\varphi_1' = \Delta_1 \varphi_1' \quad (6)$$

对第 2 个纵模, 要考虑时延  $\tau_0$ ,  $\tau' = \tau - \tau_0$ , 同理可得

$$d\varphi_2'/d\tau' = (\Delta N_{sm}' - \Delta N_{s2}')\varphi_2' = \Delta_2 \varphi_2' \quad (7)$$

积分(6), (7)得到

$$\varphi_1' = \varphi_{01} \exp(\Delta_1 \tau) = \varphi_0 \exp(\Delta_1 \tau) \quad (8)$$

$$\varphi_2' = \varphi_{02} \exp[\Delta_2 (\tau - \tau_0)] = \varphi_0 \exp[\Delta_2 (\tau - \tau_0)] \quad (9)$$

上两式利用了各纵模都由同等水平的噪声开始增长  $\varphi_{01} = \varphi_{02} = \varphi_0$ , (8)、(9)的结果可以用对数坐标图 2 清楚地表示出来。图中  $\tau_c$  是光子密度达饱和  $\varphi_1'$  的相对谐振腔光子寿命的时间。由图 2 看出,  $\varphi_1'$  首先达饱和  $\varphi_1'$ , 随之染料被漂白,  $\varphi_1'$ 、 $\varphi_2'$  立刻转为强烈的受激辐射。由于  $\tau_c$  时刻  $\varphi_1' \gg \varphi_2'$ ,  $\varphi_1'$  急剧的受激辐射使反转粒子数急剧下降到  $\varphi_2'$  的阈值以下而熄灭(或幅值很小)。这就是染料的选择模机制。

选模能力决定于  $\tau_c$  时刻  $\varphi_1'$ 、 $\varphi_2'$  的比值。

$$\varphi_1'/\varphi_2' = \exp[(\Delta_1 - \Delta_2)\tau_c] \exp(\Delta_2 \tau_0) \quad (10)$$

$\tau_c$  可由(8)式求出

$$\tau_c = \frac{\ln(\varphi_2'/\varphi_0)}{\Delta_1} \quad (11)$$

式中  $\varphi_0$  由所选用的染料片确定,  $\Delta_1$  由  $\Delta N_{em}$ 、染料片初始吸收损耗确定。

为了提高选模能力, 依据(10)式, 可采用如下措施:

(1) 缩短腔长  $L$ 。这将使纵模间隔  $\Delta\nu_q = c/2L$  扩大, 增加两模增益差, 即  $(\Delta_1 - \Delta_2)$  增大, 从而使  $\exp[(\Delta_1 - \Delta_2)\tau_s]$  增大, 来提高选模能力。

(2) 改善泵浦波形, 即前沿变缓。使  $\Delta N_e$  由  $\Delta N_{e1}$  上升到  $\Delta N_{e2}$  的时间  $\tau_0$  增长, 从而使  $\exp(\Delta_2\tau_0)$  增大, 来提高选模能力。

另外, 由定义  $\tau_s = t_s/\tau_c$ , 得到光子密度达到饱和值  $\varphi_s$  的时间为  $t_s = \tau_s \times \tau_c$ , 一般为数微秒<sup>[4]</sup>或更长, 凡超过阈值的模都有增长的机会, 特别是那些损耗和增益相差很小的接近增益曲线中心  $\nu_0$  附近的模式还是有可能同时振荡输出的(尽管振幅大小不同)。实验中用 300 MHz 的示波器观察, 偶尔有微弱的拍频调制。表明有多纵模输出。因  $t_s$  过长自发辐射损耗使输出功率减小。

为了缩短  $t_s$ , 提高单纵模输出功率和染料的选模能力。我们在图 3 中, 将闲置光  $I^-$  用一个曲率半径为  $r$  的凹面镜  $M_1$  反馈到 BDN 染料片  $D$  上以加速染料的吸收饱和。为了防止反馈光干扰腔中振荡模式, 我们选用小曲率半径  $r = 50 \sim 100$  mm 的凹面镜反馈光束, 先汇聚而后很快发散折出谐振腔外。其提高选模能力的机理讨论如下:

假设由  $M_1$  反馈到染料片上的光子密度为  $\varphi'_1 = \alpha\varphi_1$ ,  $\varphi'_2 = \alpha\varphi_2$ ,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  是加反馈的腔内第 1、2 个纵模的光子密度。 $\alpha$  由输出镜  $M_2$  的反射率  $R$  决定,  $\alpha = (1 - R)^2$ , 各模射入染料片上的总光子密度为

$$\varphi'_{1s} = (1 + \alpha)\varphi_1 = (1 + \alpha)\varphi_0 \exp(\Delta_1\tau') \quad (12)$$

$$\varphi'_{2s} = (1 + \alpha)\varphi_2 = (1 + \alpha)\varphi_0 \exp[\Delta_2(\tau' - \tau_0)] \quad (13)$$

染料片一旦给定, 饱和光强  $\varphi_s$  就是确定的了。由于  $\varphi_1 \gg \varphi_2$ , 饱和主要由  $\varphi_1$  决定。即

$$\varphi'_s = \varphi_s = (1 + \alpha)\varphi_0 \exp(\Delta_1\tau'_s) \quad (14)$$

$\tau'_s$  为达饱和光强的相对谐振腔光子寿命的时间。由(8)、(14)式,  $\exp(\Delta_1\tau_s) = (1 + \alpha)\exp(\Delta_1\tau'_s)$ , 即

$$\tau'_s = \tau_s - [\ln(1 + \alpha)/\Delta_1] \quad (15)$$

在  $\tau'_s$  时刻,

$$\varphi'_2 = \varphi_0 \exp[\Delta_2(\tau'_s - \tau_0)] \quad (16)$$

选模能力是否提高可从  $\tau'_s$  时刻的  $\varphi'_2$  与未加反馈  $\tau_s$  时刻的  $\varphi_2$  比较来判断。由(9)和(16)式有

$$\frac{\varphi'_2}{\varphi_2} = \frac{\varphi_0 \exp[\Delta_2(\tau_s - \tau_0)]}{\varphi_0 \exp[\Delta_2(\tau'_s - \tau_0)]} = \exp[\Delta_2(\tau_s - \tau'_s)]$$

将(15)式代入上式

$$\frac{\varphi'_2}{\varphi_2} = \exp[\Delta_2/\Delta_1 \ln(1 + \alpha)] > 1 \quad (17)$$

由(15)、(17)可以看出, 加反馈后,  $\tau'_s < \tau_s$ , 有利于单纵模  $\varphi_1$  的输出功率的提高。 $\varphi'_2 < \varphi_2$  有利于提高选模能力。

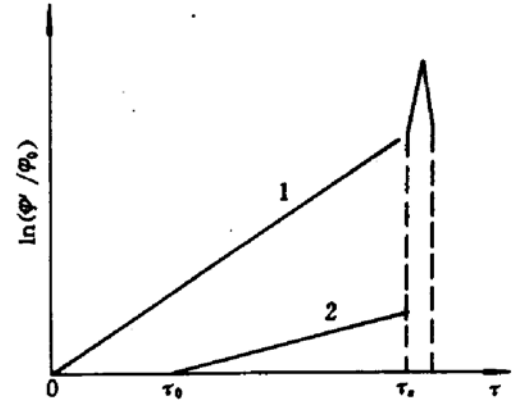


Fig. 2  $\ln(\varphi'/\varphi_0)$  as a function of the time  $\tau$

最后,由于现有产品调Q染料片不能高重复率工作。为了高重复率工作,我们将染料片装于圆框架上,圆框架与光路垂直,偏心放置,并用12V小直流电机驱动旋转。以避免光与染料片的固定位置处的染料粒子高重复率作用而损坏。

采用以上措施并插入厚度为2mm、清晰度为40的F-P标准具E,便可获得稳定的单纵模输出。

### 3 实验结果

实验装置如图3所示, $M_1$ 、 $M_3$ 为全反射平面镜, $M_2$ 是反射率为 $R$ 的输出镜, $M_4$ 为小曲率全反射反馈镜。

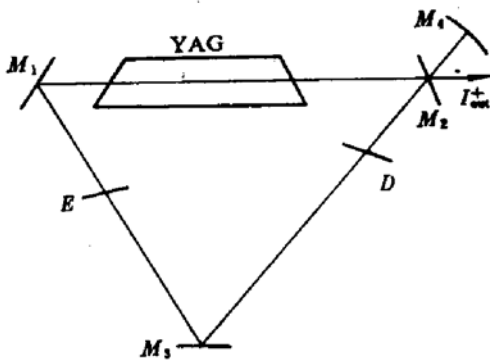


Fig. 3 Schematic diagram of a single longitudinal mode ring Nd:YAG laser of dye Q-switching

3.1 先拿走图3中的 $M_4$ 用能量计分别测量顺时针向能量输出 $W^+ = I^+ \Delta t$ 和逆时针向能量输出 $W^- = I^- \Delta t$ ,式中 $\Delta t$ 为脉冲宽度,经多次测量得到

$$\bar{W}^+ = \sum_i W_i^+ / n = 40 \text{ mJ}$$

$$\bar{W}^- = \sum_i W_i^- / n = 1.9 \text{ mJ}$$

最后得到 $\bar{W}^+ / \bar{W}^- = I^+ / I^- \approx 21$ ,加上反馈镜 $M_4$ 后测得, $\sum_i W_i^+ / n = 48 \text{ mJ}$ ,与上述测量值 $W$ 比较,能量提高20%。

#### 3.2 单纵模模式判别和脉冲宽度测试

3.2.1 应用日本VP5530B型300MHz示波器进行拍频模式判别和脉冲宽度测试,观察到脉冲宽度 $\sim 14 \text{ ns}$ 的光滑无拍频高斯波形,即单纵模。如果去掉 $M_4$ 反馈镜观察,幅度降低脉宽也略有增大,偶尔出现微弱的拍频调制。表明加反馈镜 $M_4$ 可以提高输出功率改善选模性能(因示波器迹线亮度太弱,不能拍照)。

我们又采用存贮示波器记录,受仪器限制,取样点少,作适当平滑处理,如图4(a)、(b)所示。图4(a)为加反馈镜 $M_4$ 的波形,脉宽13.6ns;图4(b)为不加反馈镜 $M_4$ 的波形,幅度较图4(a)略低,脉宽较图4(a)稍宽为14.8ns。与VP5530B型300MHz示波器的观察结果一致。

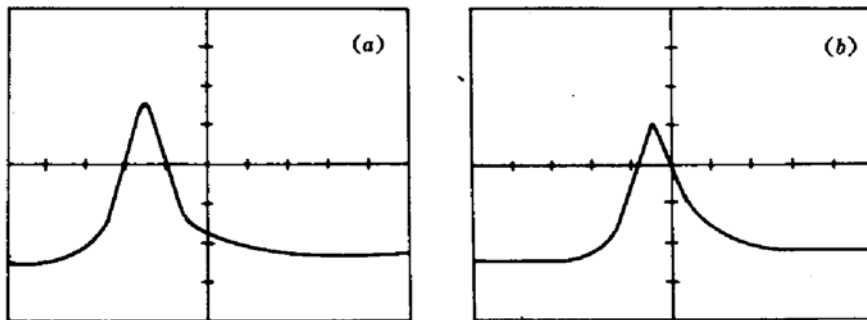


Fig. 4 Effect of the feedback mirror  $M_4$  on laser waveforms

长时间观测表明,输出稳定。选单纵模几率高达90%以上。

3.2.2 F-P标准具干涉环测试。我们采用的标准具,其清晰度 $F=40$ ,间距 $d=18\text{ mm}$ ,分辨率 $\delta\nu$ 为

$$\delta\nu = \frac{c}{2Fd} = \frac{3 \times 10^{11}}{40 \times 2 \times 18} \approx 208 \text{ MHz}$$

环形腔腔长50 cm,纵模间隔 $\Delta\nu_1 = c/L = 600 \text{ MHz}$ ,其倍频 $\Delta\nu_2 = 1200 \text{ MHz}$ 。这就是说用分辨率208 MHz的F-P标准具完全可以分辨纵模间隔为1200 MHz的模式。测试照片如图5(a)所示,确属单纵模。作为对比,我们将 $L$ 由50 cm增大到120 cm,并去掉 $M_1$ ,模式显著变坏,测试照片如图5(b)所示为多模。

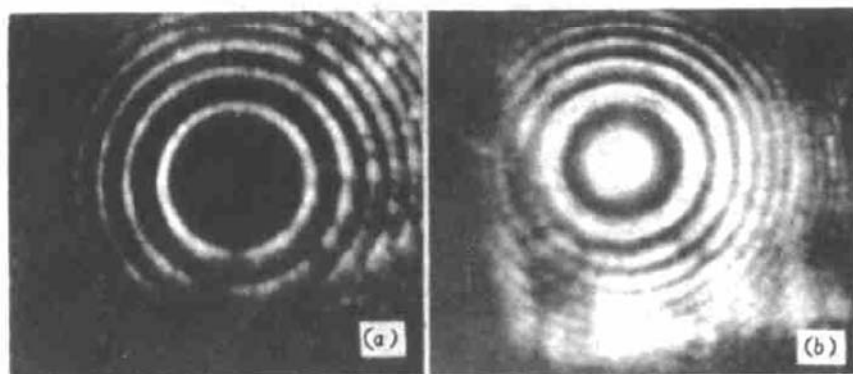


Fig. 5 Interference ring fringes obtained by a F-P etalon

(a) shows the case of single longitudinal mode operation;

(b) an ambiguous interference ring fringe without  $M_1$  (referred to Fig. 3) for comparison

### 参 考 文 献

- 1 Y. K. Park, R. L. Byer. Electronic linewidth narrowing method for single axial mode operation of Q-switched Nd:YAG laser. *Opt. Commun.*, 1981, 37(6): 411~416
- 2 E. S. Fry, Qiquan Hu, Xingfu Li. Single frequency operation of an injection-seeded Nd:YAG laser in high noise and vibration environments. *Appl. Opt.*, 1991, 30(9): 1015~1017
- 3 陈绍和,陈韬略等. 正反馈选模和调Q技术. *光学学报*, 1992, 12(2): 158~162
- 4 伍长征,王兆永等. *激光物理学*. 上海: 复旦大学出版社, 1989. 288~390

## A Single Longitudinal Mode Dye-Q-switched Ring Nd:YAG Laser

Huang Maoquan Zhen Jinling Pan Qing Pen Kuenchi

(Institute of Opto-Electronics Researches, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract** Based on the asymmetric controlling property and the mode selecting property of BDN dye, a single longitudinal mode ring Nd:YAG laser is operating. The output is stable and the probability of mode selecting is over 90%.

**Key words** unidirectional travelling-wave, ring cavity, single longitudinal mode