

# 非稳腔 CPM, Nd : YAG 激光器的腔结构分析与染料浓度的选择

王加贤 张文珍

(华侨大学应用物理系, 泉州 362011)

**提要** 本文分析由凸面全反射镜和抗共振环组成的非稳腔对撞脉冲锁模 Nd : YAG 激光器的腔结构, 研究了腔长和染料浓度对输出性能的影响, 由此得到较佳的工作条件和实验结果。

**关键词** 非稳腔, 对撞脉冲锁模(CPM), 单脉冲序列

## Analyse of cavity structure and choice of dye concentration for CPM unstable resonator Nd : YAG laser

WANG Jiaxian, ZHANG Wenzhen

(Department of Applied Physics, Huaqiao University, Quanzhou 362011)

**Abstract** The cavity structure of a colliding pulse mode locked Nd : YAG laser, which has an unstable resonator with a convex mirror and antiresonator ring, is analysed. The cavity length and dye concentration on the influence of output characteristics is investigated. Thus, we have obtained the best operating condition and experimental results.

**Key words** unstable resonator, colliding pulse mode-locked (CPM), single pulse train

## 1 引言

利用 Siegman 提出的带抗共振环的半共焦腔作对撞脉冲锁模, 已成功地在 Nd : YAG 激光器中获得了平均脉宽 10 ps 左右、单脉冲序列能量 10 mJ 的激光输出<sup>[1]</sup>。为了大幅度地提高输出能量, 我们研究了凸面全反射镜和抗共振环构成的非稳腔对撞脉冲锁模(简称 CPM)Nd : YAG 激光器。这种腔结构兼有非稳腔能提高输出能量和对撞脉冲锁模能压缩脉宽的双重优点。在最佳工作条件下, 可得到能量近 100 mJ、脉宽 10 ps 左右的单脉冲序列<sup>[2]</sup>。本文分析 CPM 非稳腔的腔结构, 导出主要参量的计算式, 研究腔长及染料浓度对输出性能的影响, 由此得到较佳的工作条件和实验结果。

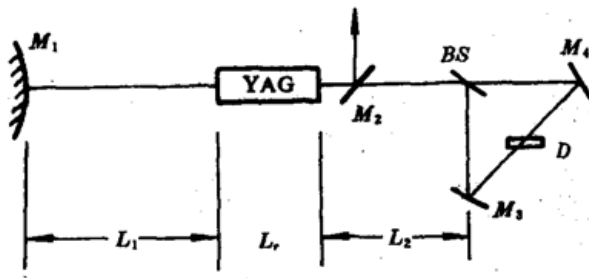


Fig. 1 Schematic of CPM unstable resonator

## 2 腔结构分析

实验装置简图如图 1 所示。 $M_1$  是曲率半径  $R_1$  的凸面全反射镜(对  $1.06 \mu\text{m}$ , 下同);  $M_3, M_4$  是  $22.5^\circ$  的全反射介质膜片, 它们与分束器 BS 组成抗共振环 (ARR), 其长度  $L_3 = 430 \text{ mm}$ , 染料盒  $D$  置于环路中间;  $M_2$  是有一定反射透射比的介质膜片, 它的面法线与光路成  $45^\circ$ , 靠近 YAG 棒, 作为耦合输出镜; 采用  $4.5 \times 80 \text{ mm}$  的 Nd: YAG 棒,

它的二个端面与凸面镜和分束器的距离分别是  $L_1$  和  $L_2$ ,  $L_2 = 335 \text{ mm}$ ,  $L_1$  在实验中调整。

把抗共振环等效为平面全反射镜(设为  $M_s$ ), 并忽略低重复率(如 1 PPS) 工作时棒和染料的热透镜效应, CPM 非稳腔就可看成平凸空腔, 其等效腔长  $L = L_1 + L_2 + \frac{1}{2} \times L_3 + (L_r/n)$  ( $L_r$  和  $n$  分别为棒的长度和折射率)。腔的参量因子  $g_1 = 1 - (L/R_1) > 1$  (因为  $R_1 < 0$ ),  $g_2 = 1$ ,  $g_1 \times g_2 > 1$ , 属于正分支非稳腔。腔的轴线上存在着一对共轭像点  $P_1$  和  $P_2$ , 设  $P_1$  与  $M_1$  的距离为  $r_1$ ,  $P_2$  与  $M_s$  的距离为  $r_2$ , 可求出

$$r_1 = L \left[ \sqrt{\frac{g_1}{g_1 - 1}} - 1 \right], \quad r_2 = r_1 + L \quad (1)$$

球面波在腔内往返一周后波面的几何放大率

$$M = (2g_1 - 1) + 2 \sqrt{g_1(g_1 - 1)} = 1 - \frac{2L}{R_1} \left[ \sqrt{1 - \frac{R_1}{L}} + 1 \right] \quad (2)$$

腔的等效菲涅耳数为<sup>[3]</sup>

$$N_{eq} = \frac{a^2(M^2 - 1)}{4M\lambda L g_1} \quad (3)$$

式中  $a$  为棒的圆截面半径,  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 。

光束在 YAG 棒处和染料处的截面比  $b$  与锁模性质有很大关系<sup>[4]</sup>, 由图 1 和像点位置可求出,

$$b = \frac{S_{rod}}{S_{dye}} = \left( \frac{r_1 + L - L_2 - \frac{1}{2} \times L_3}{r_1 + L} \right)^2 \quad (4)$$

设  $n_0$  为建立衍射限脉冲光在腔内来回的次数, 用波动光学的观点分析, 可得到  $M^{n_0} = 2N_{eq}$ , 所以建立衍射限脉冲所需的时间

$$\tau = \frac{2L \ln 2N_{eq}}{c \ln M} \quad (M > 0) \quad (5)$$

利用上面这些式子可以分析 CPM 非稳腔性能。

## 3 腔长的实验研究

一般非稳腔激光器, 大多采用单端衍射或者在腔内放置带孔的倾斜反射镜耦合输出。为了消除光束受到输出镜(其直径或孔径是 YAG 棒的  $1/M$ ) 限光硬边缘的衍射效应而引起的腔内光强的不均匀性和空间调制现象, 克服小尺寸耦合镜给工艺制作和光路调整带来的困难, 我们设计的 CPM 非稳腔则采取在环路与棒之间斜插一块均匀反射的介质膜片耦合输出。这种方法等同于透射耦合, 它还有一个显著的优点, 即可以随时更换不同反射透射比的介质膜片, 方便

地调整输出能量大小以适应不同需要。

采用图 1 的输出方式, 由于  $M_2$  是均匀反射的介质膜片, 其直径大于 YAG 棒的  $M$  倍, 所以几何损耗仍然是  $\delta = 1 - 1/M^2$ 。它不是有用的输出, 为了减少它, 宜选取较小的  $M$  值, 根据(2)式分析, 则必须减小  $L$  和(或)增大  $|R_1|$ , 但过大的  $|R_1|$  会降低激光器的热稳性<sup>[5]</sup>。我们在现有的实验条件下比较  $R_1 = -2000$  mm,  $-4000$  mm,  $-9000$  mm 时激光器的性能, 包括输出能量和稳定性, 结果是  $R_1 = -4000$  mm 较为合适。较小的腔长则会减少被锁定的纵模数, 而锁模激光器的输出能量是随着纵模数的减少而减少。综合考虑二方面因素, 我们认为必须通过实验确定一个合适腔长以提高输出能量。

选取  $M_2$  的反射透射比为 70% : 30% (设膜片无吸收), 染料(五甲川溶于二氯乙烷) 的小信号透过率  $T_0 = 25\%$ , 然后改变  $L_1$ , 得到的实验结果以及由(2), (3), (4), (5)式求出的描述非稳腔性能的特征量的数值列于表 1。

Table 1 Experimental results and value of major parameters for different cavity length

Cavity length (mm)	$M$	$b$	$N_{eg}$	$\tau$ (ns)	Mode-locked threshold (J)	Output energy (mJ)
850	2.44	0.53	2.35	9.83	73.5	76.0
1100	2.73	0.59	2.01	10.16	78.0	82.0
1450	3.13	0.65	1.70	10.36	82.0	75.5

结果表明, 1) 锁模阈值随腔长的增加而增加, 这是由于腔长较大, 几何损耗  $\delta$  较大, 光束截面比  $b$  也较大, 损耗的增加使阈值提高,  $b$  的增大使阈值降低(注意到  $b < 1$ ), 但前者的影响大于后者。2) 在高出各自锁模阈值 10% 的泵浦能量下,  $L = 1100$  mm 时激光器的输出能量较大, 与上面的分析相符。若在这附近继续调整腔长, 可望进一步提高能量。用非共线二次谐波法对不同腔长所对应的锁膜脉冲的脉宽进行测量, 在实验误差范围内基本一致(10 ps)。在 500 MHz 示波器上观察到稳定的单脉冲序列, 序列中的脉冲个数比 CPM 稳定腔少。实验中还发现, 长腔的稳定性优于短腔, 长腔的锁模单脉冲区也比短腔略宽。光束的远场发散角可利用(1), (2)二式求出的  $r_1$  和  $M$  进行计算, 其值随腔长的增加略有降低, 与实验结果相符。综合各方面性能, 取  $L = 1100$  mm 较为合适。

## 4 染料浓度的选择

在 CPM 非稳腔激光器中, 可饱和吸收体在锁模过程中起着关键的作用。它的浓度(以对  $1.06 \mu\text{m}$  光的小信号透过率  $T_0$  表示)直接影响激光器的各种参数, 如锁模阈值、单脉冲序列能量、锁模几率、单脉冲区及序列中的脉冲个数。我们选取几种不同浓度的五甲川溶液(厚 1 mm)进行实验, 结果如表 2 所示。

Table 2 Relations between lasers characteristics and dye concentration

Transmissivity ( $T_0 = \%$ )	Mode-locked threshold (J)	Output energy (mJ)	Mode-locked probability	Pulse numbers in a train
15	81.0	87.0	100%	3
20	76.5	83.0	100%	3~4
25	70.5	79.0	100%	5~6
30	62.5	75.5	100%	6~7
40	54.0	66.5	~80%	>10

从表 2 可知,随着染料透过率的减小(即浓度增大),锁模阈值提高,输出能量增加,序列中的脉冲个数减少。特别是当  $T_0 = 15\%$  时,示波器上观察到只有 3 个脉冲,而且中间主脉冲强度很高,但稳定性较差。这是一个很重要的现象,它展示了从 CPM 非稳腔激光器中直接获取单脉冲的可能性。我们还看到,染料透过率较大( $T_0 > 40\%$ )时,锁模几率下降,单脉冲区变窄。所以染料透过率在  $20 \sim 30\%$  较适宜,比 CPM 稳定腔及一般驻波锁模激光器所适用的小。对上述实验结果可以给出定性解释。

锁模脉冲是由最初存在于激光器自发噪声中的涨落脉冲集合发展而成的。它经历线性放大后,当光强上升到接近染料的饱和光强  $I_s$  时,染料的非线性过程和增益系数的下降使得一个最大的脉冲保留下来并迅速增长,其余的全被抑制掉。染料的吸收系数为,

$$K = \frac{K_0}{1 + I_s} = \frac{K_0}{1 + I \times b} \quad (6)$$

式中  $K_0$  是染料的小信号吸收系数,可粗略认为  $K_0 = 1 - T_0$ ,  $I, I_s$  分别为增益介质和染料处的光强,而且所有光强都归一化到染料的  $I_s$ 。

浓度大时(即  $T_0$  小),染料的吸收截面大,涨落脉冲在线性阶段所经历的时间缩短,则必须提高泵浦能量使线性阶段结束时最大的脉冲强度上升到使染料漂白,所以锁模阈值要随着染料浓度的增加而增加。对于较大的染料浓度,锁模阈值较高,可以增加泵浦能量建立较高的粒子数反转,当染料一被漂白,粒子数反转很快被耗尽,即可输出较高的能量。

与 CPM 稳定腔比较,CPM 非稳腔激光器适用的染料浓度大,锁模阈值高,序列中的脉冲个数少。我们认为原因是:1) 平凸腔内光束的截面比  $b < 1$ ,染料处的光强密度低;2) 非稳腔的能量损耗率包括几何损耗、输出损耗和染料的线性损耗等,它比稳定腔大。这二个因素使得染料不易被漂白,但漂白后,经历几次腔渡越(次数比稳定腔少),输出几个单脉冲后,腔内光强迅速下降,染料又恢复小信号吸收。

CPM 非稳腔比一般驻波腔有较大的能量损耗率(因为耦合输出方式不同),但却适用浓度较高的染料。其原因是,在抗共振环内形成的驻波场,其波腹处的光强是单向通过时的 2 倍,形成了染料反转粒子数的空间烧孔,这一效应使波腹附近染料的吸收系数下降很多从而更容易达到饱和,为了使涨落脉冲的选择和淘汰能充分进行,则必须增大浓度以提高小信号吸收。

## 5 结 论

所设计的非稳腔 CPM, Nd: YAG 激光器具有输出能量高、平均脉宽窄、能量大小容易控制等优点,特别是增大染料浓度可使序列中的脉冲个数减少,所以有实际的使用价值。但它的光束发散角和光斑尺寸较大,可考虑采用带自滤光小孔的负分支 CPM 非稳腔以提高光束质量。

## 参 考 文 献

- 1 林 星, 张文珍 *et al.*, 光学学报, 5(9), 794(1985)
- 2 Lin Xing, Zhang Wenzhen *et al.*, *Opt. Commun.*, 71(6), 367(1989)
- 3 A. E. Siegman, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-12(1), 35(1976)
- 4 朱振和, 霍崇儒, 物理学报, 30(2), 178(1981)
- 5 王加贤, 张文珍, 华侨大学学报, 14(1), 27(1993)