

对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的研究

林 星 张文珍 庄辉鸣 吴逢铁
(华侨大学物理系)

孙 占 鳌

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了对撞脉冲锁模Nd:YAG激光器的腔型,在500 MHz示波器上观察到了稳定的锁模脉冲串,测得平均脉宽为10 ps左右;详细研究了染料浓度与锁模阈值的关系,并证实了泵浦能量增大时锁模多脉冲的出现。

对撞脉冲锁模(OPM)是近年来才发展起来的一种新型锁模技术,1981年 Fork^[1]等人首次报道了在环形染料激光器中实现了OPM,近两年来已在Nd:YAG及Ar⁺激光器^[2]中实现了OPM运转。

为了实现Nd:YAG对撞脉冲锁模,我们把SMG-1锁模激光器*(腔形见图1)改成抗共振系统,如图2所示。

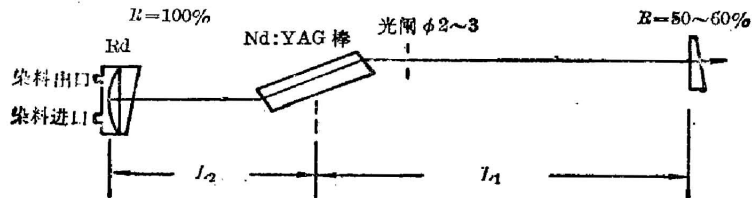


图1 接触反射式Nd:YAG锁模腔

Fig. 1 Contact-reflection mode-locked Nd:YAG cavity

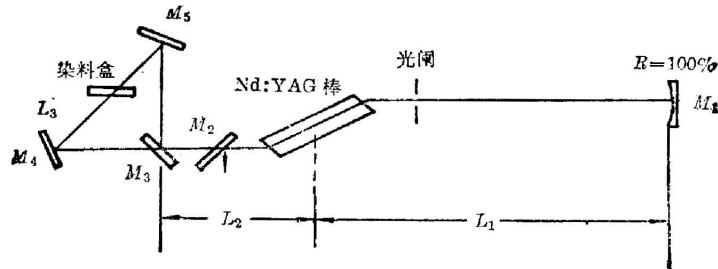


图2 抗共振环形CPM腔

Fig. 2 Antiresonant ring CPM cavity

收稿日期: 1985年2月5日; 收到修改稿日期: 1985年3月23日

* 中国科学院上海光学精密机械研究所制造。

图 2 中: M_1 为全反射镜, R_d (曲率为 3m), M_2, M_3 为半反半透介质膜片(对 $1.06\mu\text{m}$), M_4, M_5 为 $1.06\mu\text{m}$ 全反射介质膜片, L_3 为抗共振环路长度, 总腔长 L_0 为 1705mm, 染料盒放在环路的中心分界处, 染料为五甲川溶于 1.2-二氯乙烷溶液中。 M_2 的放入不但起到输出耦合的作用, 而且使锁模信号经过增益介质进行一次再放大, 增强了输出功率。

光路调准后, 于 M_2 镜输出处用 8801-21 型光二极管作检测, 用 500 MHz 示波器观察到了稳定的锁模脉冲串波形, 如图 3 所示, 照片中的条件是输入 1000 V, 100 μf , 染料对 $1.01\mu\text{m}$ 的光透过率 $T_0=52.8\%$, 盒厚 1mm, 示波器中的标尺: 200 mV/div, 20 ns/div, 重复 10 次曝光。在同样条件下, 用 SMJ-2 型双光子荧光脉宽测量仪测量脉宽, 测出 $\Delta z=1.67\text{mm}$ ($T_0=52.8\%$), 根据公式: $\Delta t_{\text{TPF}}=(\sqrt{2} n \Delta z/c)$ 得到 $\Delta t_{\text{TPF}}=10.4\text{ps}$ 。经多种条件的测量, T_0 为 48~53% 时, 测得锁模平均脉宽均为 9~12 ps 范围内, 比反射式脉宽 30 ps 左右窄了 3 倍左右。

下面我们来探讨锁模的阈值与染料溶液的透过率、厚度、浓度的关系。

1. 可饱和吸收体厚度的选择

染料的弛豫时间 T_r 和浓度、染料盒厚度 l 对获得更短, 更稳定的被动锁模脉冲是重要的参数, 应满足如下关系^[4]

$$(2nd/c) \leq T_r \quad (1)$$

我们使用的五甲川染料溶于 1.2-二氯乙烷溶液中, T_r 在 10~30 ps 之间, 取 $T_r=20\text{ps}$, $n=1.45$, 则要求 d 不得大于 2mm, d 定义为在溶液中脉冲穿过距离的一半, 对于透射式 OPM 结构, $d=(l/2)$, 这样, 染料盒在腔内的有效长度不得大于 4mm, 我们采用厚度为 1mm 的染料盒按布儒斯特角放置后等效于 1.5mm, 如果吸收染料的厚度等于或少于脉冲长度时, 瞬态光栅的作用将更明显。对盒厚的要求实际上就是限制了小信号透过率的范围, 因为单程损耗小于 1, 工作才能稳定。

在我们实验条件下, 一般采用染料盒厚度为 1mm, 空盒两镜片对弱光 $1.06\mu\text{m}$ 的透过率为 90%。

2. 可饱和吸收体浓度配制

当染料盒厚度固定时, 我们发现刚配好的染料透过率不稳定, 放置到第二天重测小信号透过率总是变大, 且稳定下来可维持数天, 待染料稳定后可按下面公式配制所需要的透过率

$$T_0 = \exp(-\alpha_0 l / M), \quad (2)$$

式中 α_0 为原液的线吸收系数, 我们的原液是 5mg 五甲川染料溶于 10ml 1.2-二氯乙烷中, l 为染料盒的厚度, M 为对原液的稀释倍数, 用 751 型分光光度计标定 ($\lambda=1.01\mu\text{m}$)。这样, 只要先配制一种溶液, 测出 T_0 (定义为染料的透过率, 实测值应扣除染料盒本身的吸收), 然后算出 α_0 , 那么就可按你所需要的 T_0 , 由 (2) 式计算出应把原液稀释的倍数 M , 计

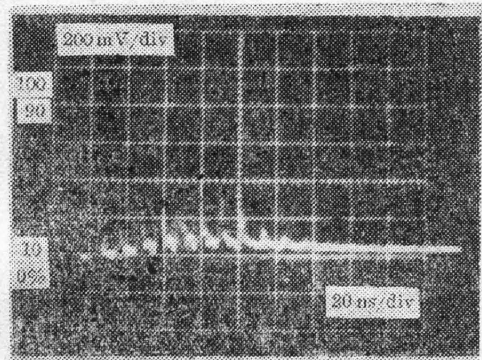


图 3 Nd:YAG 激光对撞锁模脉冲串照片
Fig. 3 Pulse train of the colliding pulse mode-locked Nd:YAG laser

算值与标定值相当吻合。如 $\alpha_0 = 120 \text{ cm}^{-1}$, $M = 16$, 得出 $T_0 \approx 52\%$ ($l = 1 \text{ mm}$), 标定值也一样。

3. 锁模阈值与染料透过率的关系

(1) 当染料溶液厚度相同时, 锁模阈值与染料透过率的关系:

为了探讨染料透过率与锁模激光及稳定性的关系, 我们按(2)式配制了多种不同透过率(浓度)的染料, 实验中发现每一浓度均有明显的锁模阈值, 泵浦能量增加到一定程度将出现多脉冲锁模, 其结果如表 1 及图 4 所示。

表 1 不同染料浓度的锁模现象

Table 1 Mode-locking phenomena with different dye concentrations

电 压 V	950	960	970	980	1000	1010	1020	1050	1080	1100	1120	1150	1180	1200	1220	1230
透 过 率 T_0																
36.9%									○	○						
40.1%						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△
46.1%					○		○	○	○	○	○	○	○	△	△	
50%		○		○	○			○	○	△		△				
55%			○		○			○	○	△		△				
59.9%		○		○	○		○	○	○	△		△	△	△	△	
66.1%		○		○	○		○	△	△	△	△	△	△	△	△	
72%	○	○		○	○		△	△								
80.5%	○	○		○	△		△									

注: 表中○代表单脉冲锁模, △代表多脉冲锁模。

在我们实验条件下, 当 T_0 在 50% 左右, 锁脉冲串最稳定, 峰值也很高, 单脉冲锁模区最宽。浓度增大时, 锁模阈值增高, 输出能量增大, 但易损坏元件。

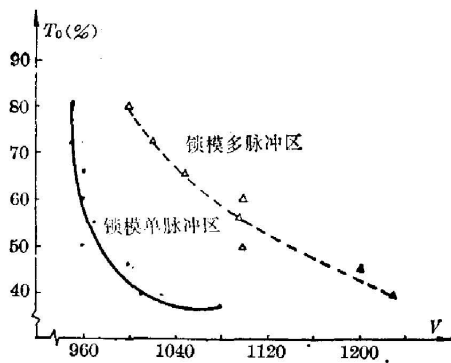


图 4 染料浓度与锁模阈值的关系

Fig. 4 Relation between dye concentration and mode-locking threshold

从图 4 可以看出: 染料的 $T_0 \geq 50\%$ 时, 锁模泵浦阈值几乎不变, 但多脉冲的出现随染料浓度的减少而提早, 单脉冲锁模区变窄。在我们的实验中, 证明了当泵浦能量增加到一定数值, 出现单脉冲锁模变为多脉冲锁模的现象。

(2) 相近的透过率, 锁模阈值与染料溶液厚度的关系:

在不同染料盒厚度中, 我们配制了不同染料溶液浓度使各盒透过率相近, 进行了锁模阈值的实验, 其结果如表 2 所示。

从表 2 可以看到, 虽然染料盒的厚度不同, 但透过率相近时(其浓度越大, 厚度越薄), 其锁模阈值也基本相近, 说明了只要透过率相同, 在一定范围内染料盒厚度对锁模阈

表 2 相近透过率, 盒厚与锁模阈值的关系

Table 2 Relation between thickness of the cell and mode-locking threshold with transmissivity held nearly unchanged

染料盒厚度 $l(\text{mm})$	1	1.5	2	2.5
染料透过率 T_0	50%	48.1%	51.4%	48.4%
锁模阈值 (V)	960	990	960	970

值的影响不大。

从这些实验可知, 锁模的阈值大小决定于染料溶液的透过率, 调整染料溶液的浓度、厚度可得到各种不同的锁模阈值, 这样就可以得到在一定范围内不同功率的锁模脉冲。

4. 对撞脉冲锁模稳定性

被动锁模腔型和腔参数的考虑主要是保证 TEM_{00} 模工作, 锁模脉冲串稳定。稳定参数 S 定义为

$$S = K(\sigma_a/\sigma_g), \quad (3)$$

式中 K 为光束在增益介质处的光束面积与光束在吸收介质处的光束面积之比, 通常是一个大于 1 的常数, σ_a 为可饱和染料的吸收横截面, σ_g 为增益介质的放大横截面, $(\sigma_a/\sigma_g) \gg 1$, 因此, K 值越大越稳定。

(1) 接触反射式腔型

图 1 所示的 SMG-1 型为接触反射式腔型, 染料盒与后凹面全反射镜 ($R_a=3\text{m}$) 紧靠在一起, 这种腔型元件最少, 无子腔, 稳定性较非接触式的有所提高。其缺点是组合染料盒加工困难, 一旦凹面反射镜损坏后难于更换, 而且凹面全反射镜的最佳曲率半径 R_a 与染料的折射率有关^[5], 全反射镜与染料靠得很近易受染料热效应影响, 使吸收介质处的光束面积增大, 此腔型的 $K < 1$ 。

(2) 抗共振腔型

图 2 所示的抗共振腔型虽然比较复杂, 但其优点是染料盒易于加工, 只要染料盒是布儒斯特角放置仍能保证无子腔, 在我们的实验条件下对染料盒的正中放置要求并不太严格, 只要误差不大于 $\pm 2\text{mm}$ 对输出仍影响不大。此腔型的 $K > 1$, 稳定性好。若把 M_4 、 M_5 改为小曲率半径全反射镜, 可进一步缩小可饱和染料处的光点面积以增大 K 值, 且染料盒远离凹面全反射镜, 其全反射镜的曲率半径不受染料热扰动影响。

此腔型的等效光学长度 $L_0 = L_1 + L_2 + (L_3/2)$, 凹面镜曲率半径的最佳选取应满足^[5]

$$4 \left\{ \left[2 \frac{L_0}{L_1} + 1 \right] - \left[2 - \left(2 \frac{L_0}{L} - 1 \right)^2 \right]^2 \right\}^{-1} L_0 \leq R \leq 2L_0. \quad (4)$$

(4)式只要满足 $[2(L_0/L) - 1]^2 \leq 2$, 就有实解, 这时棒的位置应放在使 $(L_1/L_0) = (5/6)$ 处, 缩短环路长度, 使棒尽量靠近半透分束板是可以满足的。

在图 2 中, 若 M_2 不放入便成为另一种腔型, 即在 M_3 处有输出, 但这种构型输出能量较少, 且易破坏腔内各光学元件。加入 M_2 后, 由于增加了一级放大, 不但输出能量增大, 而且方向性变好, 稳定性也好。

在抗共振环形腔中用 500 MHz 示波器观察到了稳定的锁模脉冲串;用双光子荧光脉宽测量仪测出了平均脉宽在 10 ps 左右;分析了影响被动锁模稳定性的诸因素。实验表明 CPM 有明显的阈值现象,稳定工作区较宽。详细讨论了 CPM 的阈值与染料溶液的厚度、浓度、透过率的关系,以多次曝光拍下的照片说明了锁模脉冲串稳定性较高,重复性较好。CPM 体系中染料盒加工方便,换染料及浓度的测量也方便,节省染料,有利于重复率工作。此外,我们曾用 BDN 染料膜(0.1 mm)作为饱和吸收体,也在示波器上观察到部分锁模现象,说明了 OPM 体系有利于被动锁模的操作。

我们认为 Nd:YAG 的 CPM 体系尚可进一步研究各种参数的关系,寻找最佳的锁模条件,以便得到更窄的脉冲。

参加本工作的还有:郑云山,戴金龙,庄金川等同志。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fork, B. L. Greene *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, No. 9 (1 May), 671.
- [2] H. Vanherzele, J. L. Van Eck *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 20 (15 Oct), 3484.
- [3] D. Kuhlke, W. Rudolph *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 4 (Apr), 526.
- [4] G. Z. Baumann, R. L. Goldstein; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 11 (Nov), 523.
- [5] G. Z. Baumann; *Opt. Commun.*, 1984, **48**, No. 6 (15 Jan), 421.

Investigation of a colliding pulse mode-locked Nd:YAG laser

LIN XING ZHANG WENZHEN ZHUANG HUIMING AND WU FENGJIE
(Physics Department, Hua Chiao University, Quanzhou)

SUN ZHANAO
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 5 February 1985; revised 23 March 1985)

Abstract

Cavity configuration of a colliding pulse mode-locked Nd:YAG laser is reported. Stable mode-locked pulse trains were observed on a 500 MHz oscilloscope and the average pulse duration was measured to be 10 ps. The relation between dye concentration and threshold of mode-locking was studied in detail. It was found that mode-locked multi-pulses would appear when the pump energy was increased.