

对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的实验研究

刘一先 马海明 孙迭麓 李富铭

(复旦大学物理系)

提 要

本文报道了对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的实验装置, 试验了影响对撞脉冲锁模激光器性能的各种参量。在最佳参量运转时获得了最短的脉宽为 8 ps, 输出能量的稳定性 $\sim \pm 7\%$ 。

一、引 言

随着科学研究的不断深入发展, 对于获得 ps 脉冲直到 fs 脉冲的技术最近有了新的进展, 由 Fork 等人^[1]提出的对撞脉冲锁模技术(简称为 OPM 技术)是获得 fs 激光光源的一种重要手段。Tang 等人^[2]用此方法从一台连续氩离子激光器泵浦的对撞脉冲锁模若丹明 6G 染料激光器中获得了 60 fs 的超短光脉冲。与此同时, Siegman^[3,4]提出了实现对撞脉冲锁模激光器的另一种结构装置, 称为非共振环形腔, 并由 Vanherzeele 等人^[5]以及 Buchert 等人^[6]分别在 Nd:YAG 和 Nd:glass 激光器中得到了实验证明。我们也采用了类似于 Siegman 所建议的装置, 在 Nd:YAG 激光器中实现了对撞脉冲锁模, 获得了平均脉宽为 8 ps 的激光输出, 其脉宽比驻波锁模(在相同条件下)缩短了 3 倍, 系列脉冲能量为 ~ 2.6 mJ。输出能量的稳定性 $\sim \pm 7\%$, 比驻波锁模时的输出稳定性提高了 ~ 3 倍。

二、实 验 装 置

我们的实验装置示意图表示在图 1 中。一个非共振环结构是由一块反射率和透射率均为 50% 的平面镜 B_1 和两块曲率半径为 5 m, 反射率为 100% 的凹球面镜 M_1 以及 M_2 组成。在环的中心位置放置有效吸收长度为 ~ 30 μm 的可饱和吸收盒 K_1 , 染料采用循环流动方式, 实验中使用了国产的五甲川和进口的 Kodak 9860 两种染料, 均以 1, 2-二氯乙烷作溶剂。Nd:YAG 激光棒为 $\phi 6 \times 80$ mm, 置于双椭圆聚光腔内, 用两根掺铈的脉冲氙灯泵浦, 最高重复频率为 10 pps。小孔光阑 A 的直径为 2 mm。输出耦合镜 M_3 是透射率为 50% 的平面镜。

在脉冲氙灯的激励下, 从 Nd:YAG 棒产生的光辐射由 B_1 分成强度相等的两束光, 这两个脉冲光在位于环中心位置处的吸收盒中实现对撞。由于这两个逆向传播的脉冲彼此之间是相干的, 因而在吸收体中重叠干涉的结果使吸收体中产生瞬态的受激分子的周期性空间分布, 形成了粒子数分布光栅, 这个光栅有效地同步, 稳定和缩短激光脉冲, 达到稳定的锁模

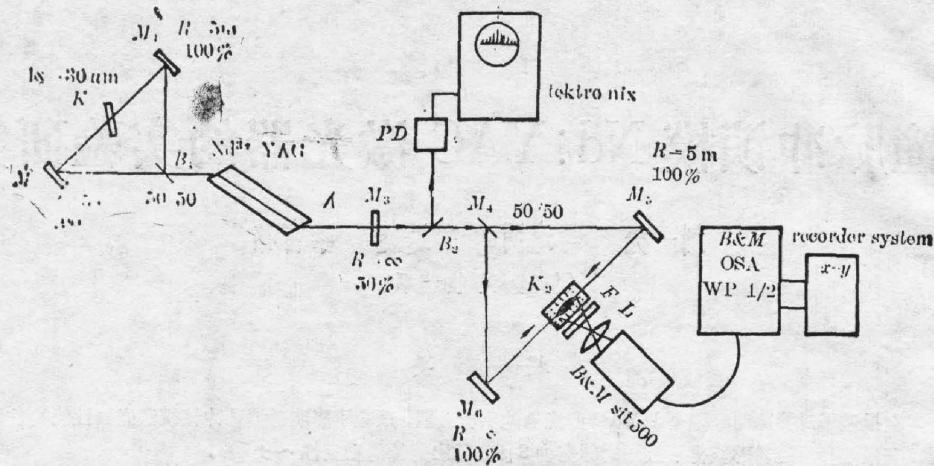


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

脉冲输出。在这个环中 B_1 镜的作用相当于微波技术中的混合波导联结接头，或称 T 型接头，它可以使非共振环中两个对撞脉冲的能量几乎无损失地沿原入射光束方向从环中耦合输出。

从对撞脉冲锁模激光器输出的脉冲系列用 B_2 镜分取一小部分光由 PIN 光电探测器接收并送到频带为 500 MHz 的示波器显示和记录。从 B_2 镜透射的光束应用于脉宽的测量，测量装置如图 1 的右边所示，采用了双光子荧光(TPF)的三角形装置，染料盒的长度为 40 mm，盛有 $10^{-3} M$ 的若丹明 6G 乙醇溶液。从染料盒中产生的双光子荧光经滤光片 F 滤光后由透镜 L (用国产海鸥牌 DF-7 照相机物镜) 将荧光轨迹成像到 BM 光谱公司生产的 OSA WP -1/2 摄像机的 SIT 500 增强型硅靶管中，并且由 OSA 系统处理得到双光子荧光轨迹。

从对撞脉冲锁模激光器输出的脉冲系列的能量用 NJ-J₁ 型脉冲激光能量计进行了测量。

三、实验结果

1. 锁模脉冲波形的观察

从对撞脉冲锁模激光器输出的锁模脉冲系列由 PIN 光电探测器接收并送到示波器中显示，典型的示波图形如图 2 所示。

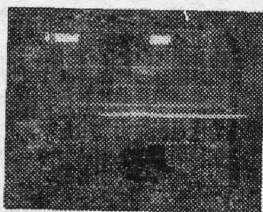


Fig. 2 Oscillogram of the pulse train from the colliding pulse mode locking of the Nd:YAG laser

2. 脉冲宽度的测量

对锁模激光器的脉宽测量装置我们采用了双光子荧光三角形方法的三种不同形式。除图 1 所示的测量装置外，还采用了由 Clobes 等人^[7]所建议的双光子荧光光电测量方法，染料盒的厚度 $\approx 30 \mu m$ ，若丹明 6G 乙醇溶液采用循环流动，染料盒用步进电机逐点驱动，参考池的厚度为 1 mm，染料不流动，用光电倍增管接收荧光信号，经放大和模数转换之后由定标器记录读数。

在上述同一装置中还采用了扫描记录方式，染料盒用步进电机连续扫描，由光电倍增管

接收的信号送到 PAR-162 型双通道取样积分器中进行取样平均, 用 X-Y 记录仪记录其相关函数曲线, 激光重复频率为 10 pps。当对撞脉冲锁模激光器不是处于最佳运转条件时, 由上述两种方法测得的脉宽为 10~13 ps。

由于上述两种方法均需要大量的实验数据点才能得到一个平均脉冲宽度, 而且还不能达到实时监控对撞脉冲锁模激光器的运转, 因此我们改用了图 1 所示的 OSA 测量装置。利用这种装置可以很方便地调整对撞脉冲锁模激光器使其处于最佳工作状态。在对撞脉冲锁模激光器处于最佳工作状态时, 由 OSA 测量的典型相关函数曲线如图 3 所示, 根据相关函数与脉宽的关系可求得脉宽为

$$\Delta t_{1/2} = \frac{\Delta r}{\beta} = \frac{2 \Delta l k n}{\beta c} = \frac{2 b m k n}{\beta c},$$

式中 Δl 为 OSA 显示屏上测得的相关函数曲线的半强度处的空间距离, 它是等于半强度处对应的道数差值 m 乘以两道之间的间距 b , 本装置中 $b = 25 \mu\text{m}$; n 为若丹明 6G 乙醇溶液的折射率 ~ 1.4 ; k 是由照相机物镜成像时的一个校正因子, 这个因子的确定是在双光子荧光轨迹处(注意光程的校正)放置一只已知宽度的窄缝, 窄缝在微光照亮后从 OSA 屏上直接测量窄缝像的宽度, 由此求得 $k \approx 1.3$; c 是光速; β 为激光谱线的线型因子, 我们的全部实验结果是假定激光谱线为高斯型, 即 $\beta = \sqrt{2}$ 。从图 3 的相关函数曲线, 由上式计算的脉宽为 $\Delta t_{1/2} = 8 \text{ ps}$, 获得了接近于荧光宽度极限的脉宽。

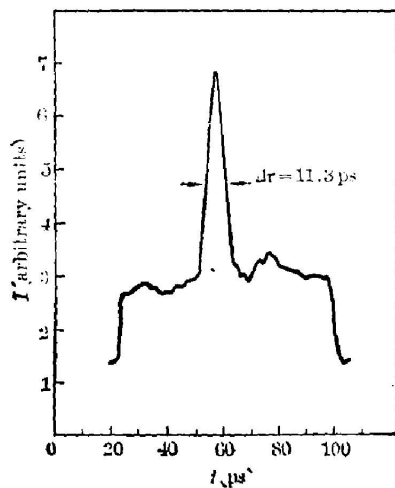


Fig. 3 Two-photon fluorescence correlation trace measured with an OSA measurement system; absorber, Kodak 9740

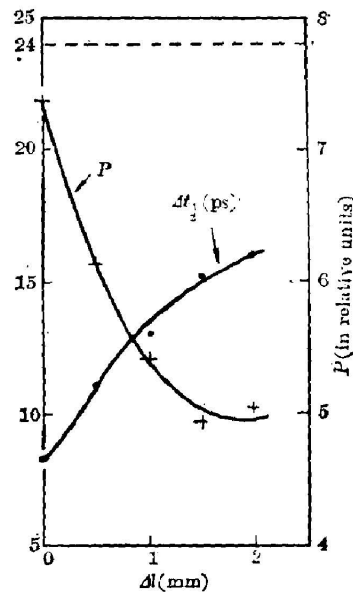


Fig. 4 Pulse-width and peak power versus cell offset; dashed lines indicate the pulsewidth of the standing-wave cavity; absorber, Kodak 9740

3. 脉宽 $\Delta t_{1/2}$ 和峰值功率 P 与染料盒离开环形结构中心位置的关系

逐点改变染料盒(五甲川染料)的位置并分别测量脉宽 $\Delta t_{1/2}$ 和峰值功率 P , 它们之间的关系表示在图 4 中。图中脉宽曲线的每一点是由 8 次实验数据的平均值, 而 P 值则是由示波器连续测量 30 次输出峰值幅度的平均值与 $\Delta t_{1/2}$ 的比值求得。由图清楚地表明脉宽 $\Delta t_{1/2}$

和峰值功率 P 与染料盒的位置密切相关, 当染料盒处于环的中心位置时, 两者具有最佳值, 脉宽起伏 $\sim 17\%$, 对照比为 2.9。而当染料盒偏离中心位置较大时, 脉宽起伏 $\sim 22\%$, 对照比下降到 2.6, 同时出现两组锁模脉冲系列。图中虚线是在相同条件下用 OSA 测量的驻波锁模时的脉宽平均值(为 24 ps)。

4. 脉宽与染料浓度的关系

染料盒放在环的中心位置处并与光轴成一小的夹角。对于五甲川和 Kodak 9860 两种不同染料在不同浓度下测量的脉宽表示在图 5 中, 由图可知, 锁模激光器中对于某种吸收体具有一个最佳吸收浓度, 五甲川比 9860 更加灵敏。对于五甲川在最佳浓度时的最小脉宽 ~ 8 ps, 脉宽起伏 $\sim 10\%$, 对照比为 2.9, 当偏离最佳浓度时脉宽起伏增加到 $\sim 18\%$ 。由 9860 染料得到的脉宽 ~ 18 ps, 脉宽起伏 $\sim 10\%$, 对照比为 2.9。实验表明五甲川可以得到更短的脉宽。在同一装置中两种染料的最佳浓度并不完全一致, 存在微小差别, 这与染料的吸收特性有关。五甲川-1, 2 二氯乙烷的吸收峰值在 $1.06 \mu\text{m}$ 处与锁模激光波长一致, 而 9860 的吸收峰为 $1.051 \mu\text{m}$, 偏离激光波长较远。另外就其吸收恢复时间来看, 五甲川比 9860 为短^[8,9], 因而五甲川染料可得到更短的脉宽。

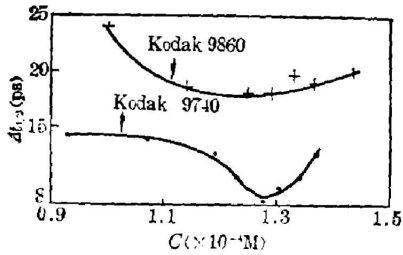


Fig. 5 Pulse-width versus concentration of saturable absorbers; solvent, 1, 2-dichloroethane; $t_2 \approx 30 \mu\text{m}$

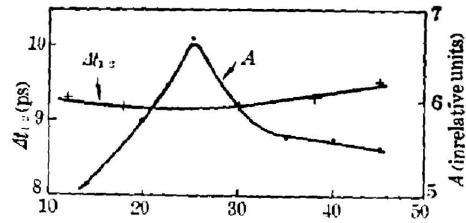


Fig. 6 Pulse-width ($\Delta t_{1/2}$) and output amplitude (A) versus temperature (T) of the dye; absorber, Kodak 9740

5. 脉宽 $\Delta t_{1/2}$ 和输出幅度 A 与吸收体的温度 T 的关系

将盛有五甲川-1, 2 二氯乙烷溶液的不锈钢小瓶置于恒温水槽中, 温度从 12°C 到 45°C 变化, 其输出脉宽和幅度的变化如图 6 所示。由图 6 可知, 其脉宽的平均值在所试验的温度范围内变化不是很明显, 但脉宽的起伏则随温度的增加而变大。输出幅度的平均值与染料温度有较大关系, 图 6 表明, 在 25°C 以下输出幅度随温度增加而增加, 由 14°C 到 25°C 平均幅度增加 $\sim 27\%$, 幅度起伏小于 8% , 在 14°C 时为 7% 。当温度超过 25°C 时, 输出幅度随温度增加而下降, 幅度起伏大于 14% 。由此可知, 为了获得稳定的锁模激光输出应将染料处于恒温状态, 温度不超过 25°C 。

另外, 我们还观察了染料盒与光轴的夹角对锁模性能的影响。当染料盒放置与光轴成布氏角时, 激光器的泵浦阈值具有明显的下降趋势, 但就其激光输出的稳定性并未观察到明显的变化。

综上所述, 对于我们的对撞脉冲锁模激光器的最佳工作条件是: (1) 染料盒置于环形结构的中心位置并与光轴成布儒斯特角; (2) 五甲川-1, 2 二氯乙烷的浓度为 $1.28 \times 10^{-4} \text{ mol}$; (3) 五甲川-1, 2 二氯乙烷溶液的温度应低于 25°C 并处于恒温状态中。

四、结 束 语

由我们的实验表明,对撞脉冲锁模技术比通常的驻波锁模技术可获得更短的超短脉冲光,一般可缩短 2~3 倍。另外,激光输出幅度的稳定性也更高,在我们的实验装置中其稳定性提高了 ~3 倍。用 OSA(或 OMA)测量超短脉冲光的宽度是一种简单、实时和高分辨的方法,利用 OSA 进行监测可以很方便地找到对撞脉冲锁模激光器的最佳工作条件。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fork, B. I. Greene *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, No. 9 (May), 671.
- [2] C. L. Tang, J. M. Halbout; *Proc. SPIE, Picosecond Lasers and Applications*, 1982, Vol. 322, 18.
- [3] A. E. Siegman; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1973, **QE-9**, No. 2 (Feb), 247.
- [4] A. E. Siegman; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 7 (Jul), 334.
- [5] H. Vanherzele, J. L. Van Eck *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 20 (Oct), 3484.
- [6] J. M. Buckert, D. K. Basa *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1984, **55**, No. 3 (Feb), 683.
- [7] A. R. Clobes, M. J. Brienza; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**, No. 9 (May), 287.
- [8] W. Koechler; *Solid State Laser Engineering*, (Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 1976), 465.
- [9] 邱佩华, 陈述春; *中国激光*, 1983, **10**, No. 3 (Mar), 143.

Experimental study of colliding pulse mode locking of a Nd:YAG laser

LIU YIXIAN, MA HAIMING, SUN DIECHI AND LI FUMING
(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

(Received 28 March 1985)

Abstract

In this paper, an experimental set-up of colliding pulse mode locking of a Nd:YAG laser is reported. The effect of various parameters on the characteristics of colliding pulse mode-locking was investigated. Under the optimal condition, the shortest pulse duration of 8 ps was obtained and the stability of output energy was about $\pm 7\%$.