

脉宽易变的高功率 Nd:YAG 激光器*

林礼煌 欧阳斌 康玉英 葛文 陈时胜

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文描述一台由两级 Nd:YAG 激光器组成的紧凑高功率激光系统的结构及其工作性能。激光系统分成三个部分: 对撞脉冲式的主-被动锁模振荡器, 单脉冲选择器和四程放大器。振荡器输出锁模脉冲列的包络幅度起伏小于 $\pm 4\%$, 其脉冲宽度可以在宽范围内(20ps~2.5 ns)方便地切换。对于单个 0.1 mJ、200 ps 的激光脉冲, 四程放大器能提供 7×10^3 的放大倍数。

关键词: 对撞脉冲锁模, 四程放大器。

一、引 言

在激光与物质相互作用、激光核聚变和 X 射线激光研究中, 不同的研究目标要求激光脉冲宽度能够从皮秒(ps)量级至纳秒(ns)量级改变。这样宽时间跨度的激光脉冲, 传统上由几台以不同工作方式(如锁模、调 Q 及脉冲整形等)的激光振荡器提供的。

本文报道一台紧凑的高功率 Nd:YAG 激光系统的结构及其输出性能, 该激光系统由一台对撞脉冲式的主-被动锁模 Nd:YAG 激光器、一台单脉冲选择器(普克耳斯 Pockels 盒电光开关)和一台 Nd:YAG 放大器等部分组成。放大器和几个光学部件相结合, 构成一个四程放大器。振荡器具有高的输出稳定性, 输出锁模脉冲列的包络幅度起伏 $< \pm 4\%$, 并能根据需要, 方便地在 20 ps~2.5 ns 范围内改变脉冲宽度。四程放大器能够对选出的小信号单脉冲提供有效放大。

二、激光系统及输出特性

1. 对撞脉冲式主-被动锁模激光器

Siegman^[1] 首先提出用带非谐振环的激光腔在固体激光器中实现对撞脉冲锁模的操作方式, 随后一些研究者在实验研究上取得重要进展。作者的研究表明^[2], 对撞脉冲锁模是被动锁模中较好的工作方式, 在可饱和吸收体中建立的粒子数布居瞬态光栅^[3], 能起着稳定和压缩脉宽的作用。不过, 对撞脉冲锁模固体激光器输出脉冲的幅度稳定性仍比主-被动锁模固体激光器^[4] 低得多, 不能满足某些使用的要求。

本文实验在对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器中, 加入一个声光调制器, 实现了对撞脉冲式主-被动锁模。实验表明, 该工作方式具有上述两种锁模方式的优点。特别是对于光化学

收稿日期: 1990年9月6日; 收到修改稿日期: 1990年10月25日

* 本文部分内容曾在 OLEO'90 会议上发表; 本课题由国家自然科学基金资助。

稳定性良好,而弛豫时间长不易用作锁模的可饱和吸收体,如 BDN 染料(双-[4-二甲基-二

硫代-二苯基乙酮]-镍)^[5]、色心晶体(特定掺杂 YAG 晶体——Cr:Nd:YAG 晶体^[6]和氟化锂色心晶体——LiF:F₂⁻晶体^[7]),也都能在此激光器中使用并实现稳定的锁模输出。

对撞脉冲式主-被动锁模激光器如图 1 中虚线方框中所示。以 50 MHz (射频)驱动的

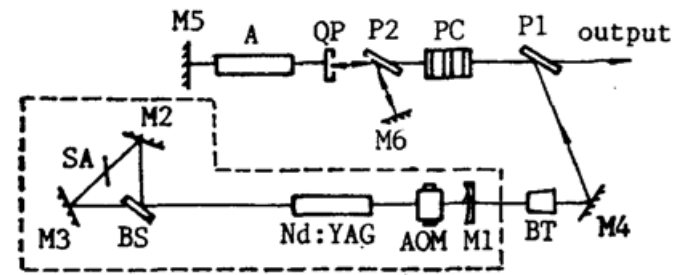


Fig. 1 Schematic of the laser system

的、以熔凝石英为介质(以钨酸锂作换能器)的声光调制器位于激光腔内靠近输出腔镜 M1 处,用来提供主动幅度调制。输出腔镜为平凹反射镜(凹面曲率为 10 m,对 1064 nm 而言,反射率 50%),其平面镀减反射膜层。非谐振环的分束器 BS,对 45° 角入射的 s-偏振分量的反射与透射比近似 50/50。工作介质 Nd:YAG 棒直径 4 mm,长 65 mm,两端面镀减反射膜层,安放在双椭圆柱泵浦室内由两根直管氙灯泵浦。可饱和吸收体 SA 位于非谐振环的中点。

实验中,使用了不同种类(即具有不同弛豫时间)、不同透过率的可饱和吸收体,如五甲川染料的二氯乙烷溶液(循环流动),BDN 染料片(含有 BDN 分子的聚酯薄膜),Cr:Nd:YAG 晶体和 LiF:F₂⁻晶体等。用这些可饱和吸收产生的锁模脉冲列分别覆盖从 20 ps~2.5 ns 范围(非连续变化)的脉冲宽度。特定的可饱和吸收体预先被测试、标记和校正光程长。并固定在特制的机械机构上,方便地在非谐振环中快速更换,从而实现已确定脉宽的脉冲列的切换。

振荡器输出的脉冲列被快速光电二极管接收后,由快速示波器显示。单脉冲选择器选出的单个脉冲,由条纹相机测量脉冲宽度(FWHM)。考虑到实验室中的条纹相机的条纹管,光谱响应在紫外至可见光区,因此,对 1064 nm 的光脉冲,测量时先将光波经 KDP 倍频晶体倍频成 532 nm 光波后,再射入条纹相机狭缝。条纹相机测得 532 nm 光脉冲的形状和半宽度,扣除由条纹相机本身固有的时间展宽值,就得出 532 nm 脉冲的实际半宽度 Δt_s ,再推算出 1064 nm 光脉冲的实际半宽度 Δt 。假定脉冲形状为高斯型,则有 $\Delta t = \sqrt{2} \Delta t_s$ 。为了保证式中因数 $\sqrt{2}$ 的可靠性,要求进入倍频晶体的 1064 nm 光脉冲为小信号,不产生其它非线性效应,且 KDP 晶体对入射激光处于最佳匹配角状态。

实验中,已经获得下述脉冲宽度的锁模脉冲列:

20 ps~60 ps(用五甲川染料溶液)^[8];

150 ps~800 ps(用 BDN 染料片);

600 ps~1.3 ns(用 Cr:Nd:YAG 色心晶体);

2.0 ns~2.5 ns(用 LiF:F₂⁻晶体)。

图 2 示出用上述四种可饱和吸收体时振荡器输出的典型锁模脉冲列的示波图,和相应的条纹相机记录的二次谐波激光脉冲波形。

实验表明,由于采用对撞脉冲式主-被动锁模操作,获得的激光脉冲两翼背景很干净;输出光为 s 偏振方向的线偏振光;激光腔内不用选模光阑也实现单横模 TEM₀₀ 输出。

2. 四程放大器

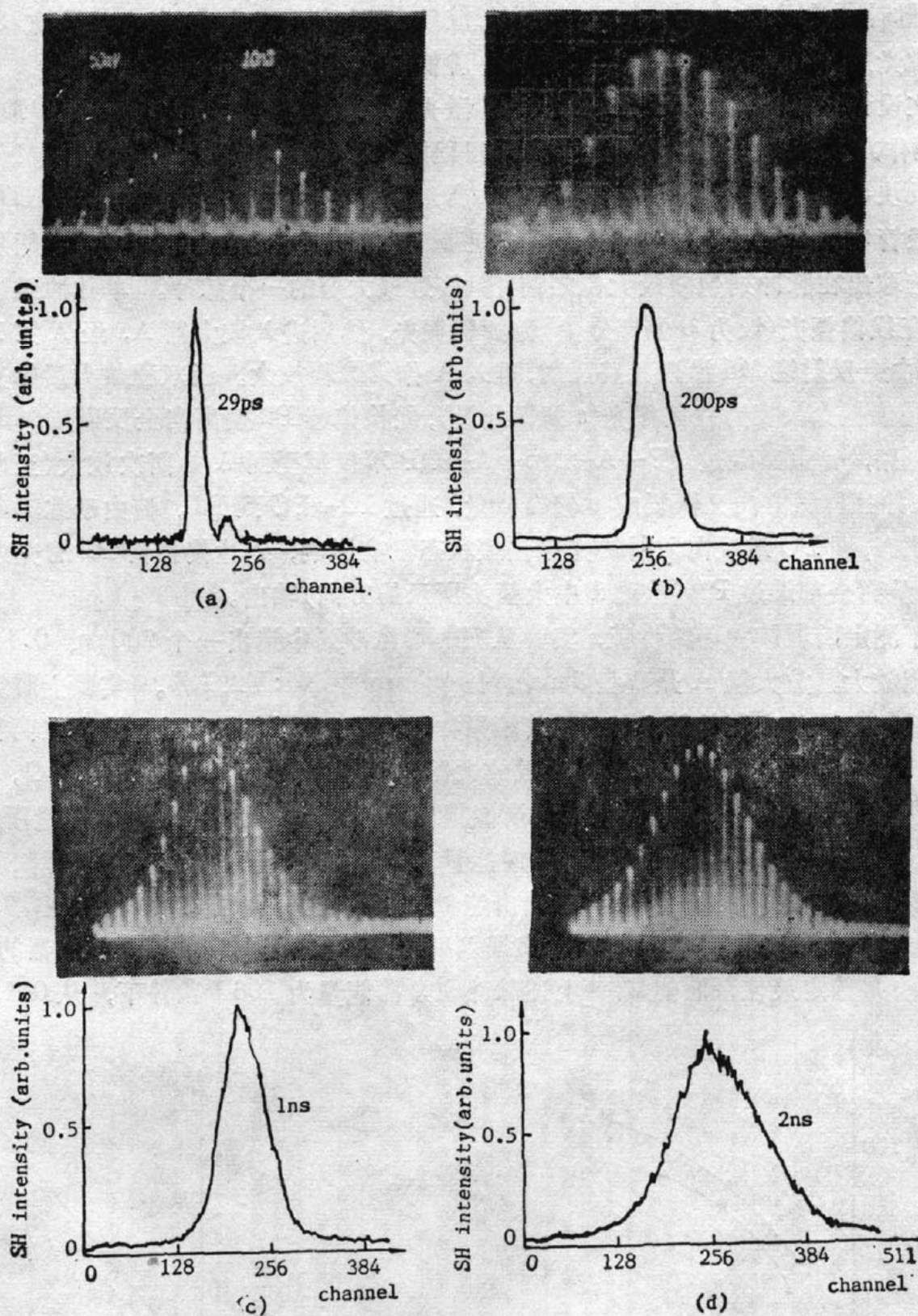


Fig. 2 Oscillograms of pulse trains (Top, all periods between adjacent pulses are 10 ns), and their corresponding streak camera traces at wavelength of 532nm (Bottom) for the different saturable absorbers:

(a) pentamethylidyne dye ($T=40\%$), (b) BDN dye film ($T=35\%$), (c) Cr:Nd:YAG color center crystal ($T=22\%$) and (d) LiF:F₂ color center crystal ($T=45\%$). The deduced pulsewidths (FWHM) of 1064-nm laser pulses are marked in the figures, respectively

事实上,由单脉冲选择器从锁模脉冲列所选出的单脉冲,能量往往很小,约为 $0.1 \sim 1$ mJ 量级,实际应用时需要多级放大器对其进行放大,方能达到使用水平。传统的激光放大方式中,光脉冲每次只通过放大介质一次作行波放大。这种放大方式,在小信号输入情况下,远未能从激光放大器中提取足够的储能,是一种低效率、高耗费的工作方式。

本文设计一台同轴四程行波 Nd:YAG 激光放大器,已能从放大介质中提取足够的储能,其操作方式又比再生放大器^[9]简单。四程放大器由普克耳斯盒电光开关、Nd:YAG 放大器和几块导引光的光学元件构成,如图 1 所示。普克耳斯盒是双晶体纵向 KD*P,由一个雪崩二极管电路^[10]提供约 10 ns 宽的高压电脉冲(半波电压加压式驱动)。它能从脉冲列中稳定地选取出在脉冲列包络最大值之前、但接近最大值的一个脉冲。单脉冲经过 $1/4$ 波片 QP 后,变线偏振光(设为 p 偏振分量)为圆偏振光,然后进入放大器 A,经 A 第 1 程放大的光脉冲,由全反射镜 M5 沿原光路反射,进入 A 作第 2 程放大。经双程放大后的光从反向又经 QP,圆偏振光改变为线偏振光(s 偏振分量),经检偏器 P2 偏离向全反射镜 M6,又被全反射回原光路,光束又经过 QP→A→M5→A→QP 不仅再受到 A 的两次放大(至此一共通过 A 4 次),并且偏振方向又恢复成 p 偏振分量,通过 P2→PC 到 P1。但由于此时电光开关处于关的状态,即 PC 对反向入射的光束偏振状态没有影响,到达偏振器 P1 的光束仍为 p 偏振分量,从而全部透过 P1(从图 1 中大箭头所示的方向)输出。

为了测定四程放大器的性能,实验从振荡器脉冲列中选出一个 200 ps、0.1 mJ 的脉冲进行四程放大。放大器 A 是直径 5 mm、长 63 mm 的 Nd:YAG 棒。实验上研究了在不同泵浦能量下四程放大器的输出特性,其结果如图 3 和图 4 所示。图 3 给出在两种不同泵浦能量下(52J 和 90J),上述激光脉冲通过放大器 A 为 1、2、3 和 4 程时的增益 G 。结果表明:在泵浦能量较低的情况下,四程放大器所能提供的能量,受反转粒子数的数量所限制,四程放大易达到增益饱和;只有在足够的泵浦能量下,四程放大器才能充分地发挥四程放大的作用。图 4 则表明,随着泵浦能量增加,输出能量呈直线上升,四程放大未显现出增益饱和。因此,正确使用四程放大器,要求使用者根据入射脉冲的能量、脉宽,以及放大器的特性(如孔径,长度)来选定最佳泵浦能量。上述脉冲在泵浦能量为 106J 条件下,从 0.1 mJ 放大到

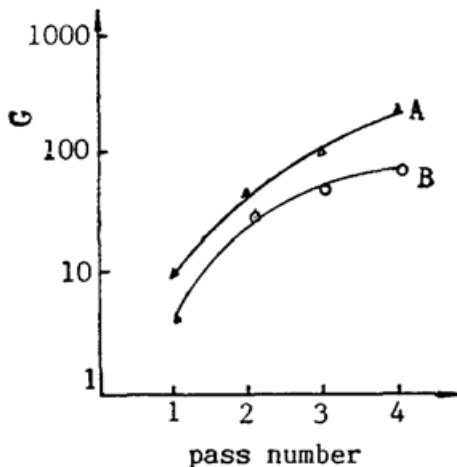


Fig. 3 Amplification of the four-pass amplifier for 0.1mJ input in 200-ps pulsewidth as a function of pass number under different pump energy (A—52J and B—90J)

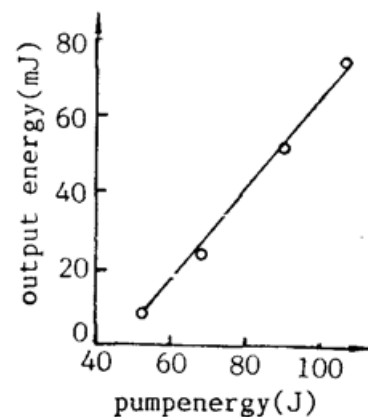


Fig. 4 Output energy from the four-pass amplifier as a function of pump energy for an input pulse energy of 0.1mJ with 200-ps duration

75 mJ, 表示四程放大器提供了 7×10^2 倍的放大倍数。

三、讨 论

(1) 利用对撞脉冲式主-被动锁模构形, 不仅确保锁模脉冲列的稳定性和再现性, 而且对于传统上因弛豫时间长、不易用作锁模的可饱和吸收体, 也能实现稳定的锁模输出。当把图 1 中声光调制器的驱动电源关闭, 便成为一个对撞脉冲被动锁模激光器。对五甲川染料作可饱和吸收体, 结果如文献[2]所述, 但对 BDN 及色心晶体, 输出脉冲列幅度稳定性明显变差, 脉冲宽度明显变宽; 而用 LiF:F_2^- 晶体时, 有时甚至不能获得完全调制的输出。当把非谐振环内的可饱和吸收体从环中移出, 放置在环外例如靠近输出镜 M1 的位置, 便构成类似于通常法布里-珀罗腔的主-被动锁模方式(声光调制器驱动电源开启)。虽然输出锁模脉冲列的稳定性仍然不变, 但条纹相机的记录却表明(对上述四种可饱和吸收体而言), 相应的脉冲宽度加宽和出现严重的脉冲分裂现象, 对 BDN 薄膜片、色心晶体尤为突出。

因此, 对撞脉冲锁模方式有可能因为在可饱和吸收体中建立布居数分布瞬态光栅和发生简并四波混频现象, 加强了对脉冲的甄别和压缩, 从而获得比法布里-珀罗腔更窄、性能更佳的脉冲^[3]。

(2) 四程放大器对于低能量、微弱信号的脉冲, 能有效地放大, 但对于长脉宽、高能量的脉冲, 四程放大易出现饱和。因此, 根据输入脉冲的情况, 本放大器可以很容易改成双程放大器(去掉 QP 和 M6, 仍由大箭头方向输出; 移去 M6, 从 M6 方向输出)、或者单程放大器(移去 M5、QP, 对 M6 可保留也可移去)。

对于更大口径的工作介质, 可以用大口径普克耳斯盒电光开关或法拉第磁光隔离器来实现四程放大。

(3) 本文描述的激光系统, 可以独立作为高功率激光光源, 也可作为更大口径的钕玻璃激光装置的前置部分, 以获得脉宽可变的种子脉冲加以放大。作者也曾用磷酸盐钕玻璃作工作介质, 重复上述的研究工作, 获得类似的结果。

本工作得到徐至展教授的支持, 在此表示感谢。感谢姚广涛、桂尤喜提供特定掺杂 YAG 色心晶体。

参 考 文 献

- [1] A. E. Siegman; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 4 (Jul), 334~335.
A. E. Siegman; *Proc. SPIE*, 1982, Vol. 322, 60~67.
- [2] Lin Lihuang *et al.*; *Chinese Phys. Lett.*, 1986, **3**, No. 7 (Jul), 329~332.
- [3] M. S. Stix *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 4 (Apr), 520~525.
- [4] W. Seka *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**, No. 4 (Apr), 2277~2280.
- [5] K. H. Drexhage *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1972, **QE-8**, No. 9 (Sep), 759.
- [6] 姚广涛等;《中国激光》, 1984, **11**, No. 7 (Jul), 441~443.
- [7] 张贵芬等;《光学学报》, 1982, **2**, No. 6 (Nov), 496~499.
- [8] 王世杰等;《中国激光》, 1989, **16**, No. 8 (Aug), 489~492.
- [9] J. Emrry *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, No. 7 (Jul), 3548~3555.
- [10] 莽燕萍等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 4 (Apr), 242~245.

High power Nd:YAG laser with variable pulse widths

LIN LIHUANG, OYUANG BIN, KANG YUYING, GE WEN AND CHEN SHISHENG
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica Shanghai 201800*)

(Received 6 September 1990; revised 25 October 1990)

Abstract

In this paper the construction and operation characteristics of a high power Nd:YAG laser system are described. The laser system consists of an active-passive mode-locked oscillator in colliding pulse regime, a single pulse selector and a fourpass amplifier. The oscillator generates mode-locked pulse trains with widely variable pulsewidths (20ps~2.5ns) and a fluctuation of the pulse-train envelope $< \pm 4\%$. For a 0.1mJ, 200-ps laser pulse, the four-pass amplification of 7×10^2 has been achieved.

Key words: colliding pulse modelocking, four-pass amplifier.