

对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的 若干运转特性

盛国平 林礼煌 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的详细实验研究, 给出在可饱和吸收体的不同位置、厚度和浓度下, 以及在不同的泵浦能量下的运转特性。用这种激光器通常能输出脉宽为 11~12 ps 的锁模激光脉冲。

一、引 言

1981年, Fork 等人^[1]在环形染料激光器中实现了对撞脉冲锁模(简记为 OPM), 首次获得了脉宽小于 0.1 的光脉冲输出, 显示了这种新的被动锁模技术的优越性。同年, Siegman^[2]指出可以在带非谐振环激光腔^[3]中实现了对撞脉冲锁模。此后, Vanherzeele 等^[4,5]、Buchert 等^[6]分别在这种腔中实现了 Nd:YAG 激光器、硅酸盐钕玻璃激光器和连续染料激光器的对撞脉冲锁模。

对撞脉冲锁模技术是利用腔内两个强度相等、相向传播的光脉冲在可饱和吸收体中对撞, 在吸收体分子的布居上产生瞬态光栅, 从而实现锁模的。关于对撞脉冲锁模染料激光器的锁模机制及运转特性已有详细报道^[7-9], 但关于对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器, 在理论和实验上还缺乏详细研究。本文报道我们在可饱和吸收体的不同位置、厚度和浓度下, 以及在不同的泵浦能量下, 对对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的输出脉冲宽度、峰值功率、光谱宽度和振荡双阈值的实验研究结果。该激光器输出的光脉冲宽度一般为 11~12 ps, 最短输出光脉冲的宽度为 8 ps。

二、实 验

1. 实验装置

我们利用带非谐振环激光腔实现 Nd:YAG 激光器的对撞脉冲锁模, 实验装置如图 1 所示。非谐振环实质上是一个环路干涉仪, 它由分束板 BS, 全反射镜 M_1 和 M_2 组成, 代替线形激光腔中的全反射端镜。输出镜 M_3 的曲率半径为 2.6 m, 反射率为 20%。激光腔结构等效于半共焦腔, 腔长约为 1.3 m, Nd:YAG 棒长 67.5 mm, 口径 $\phi 4$ mm, AP 为 $\phi 2$ mm 的选基横模光阑。可饱和吸收体为五甲川染料的 1, 2-二氯乙烷溶液, 弛豫时间为

收稿日期: 1985年6月21日; 收到修改稿日期: 1985年7月16日

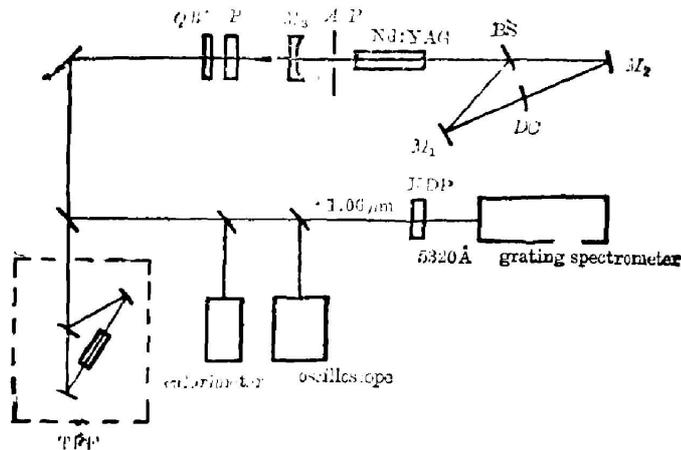


Fig. 1 Experimental set-up

$9 \pm 1 \text{ ps}^{[10]}$ 。可饱和吸收体染料盒 DC 位于环路中与分束板 BS 等光程的位置附近, 盒厚为 1 mm , 装在可以沿光轴方向精密平移的平动台上。

染料盒可采用两种方式放置: 一种是以布儒斯特角放置, 这时可饱和吸收体的有效厚度 L_{eff} 为 1.2 mm ; 另一种是染料盒法线方向与光轴成一很小夹角, 此时 L_{eff} 为 1 mm 。

采用双光子荧光法 (TPF) 测量光脉冲宽度, 其介质为若丹明 6G 的丙酮饱和溶液, 长 6 cm 。为了防止双光子荧光装置中的光学反馈影响振荡器的运转性能, 在双光子荧光装置与输出镜之间插入由 $1/4$ 波片 QW 和偏光棱镜 P 构成的光隔离器。

利用快速响应的光电二极管和示波器观测锁模脉冲串, 用卡计测量脉冲串的总能量。输出光经 KDP 晶体倍频后, 用 1 m 光栅光谱仪测量谱线宽度。倍频光谱线宽度是基频光谱线宽度的 $1 \sim \sqrt{2}$ 倍^[11], 由此推算出锁模光脉冲的光谱宽度。

2. 带非谐振环激光腔的分析

如图 1 所示, 入射波从干涉仪的一臂入射到分束板 BS 上, 分成两束光波, 以相反方向在环中传播, 在可饱和吸收体 DC 中经历对撞后回到分束板 BS 上。假设分束板 BS 的反射率为 R , 透射率为 T , 忽略吸收和损耗, 则 $R+T=1$ 。考虑干涉仪中不存在染料盒 DC 时的情况。可以看到, 返回原入射臂的反射波与透射波的相位总是相同的, 干涉仪对入射波的反射率为 $4RT$; 在另一臂, 反射波与透射波的相位总是相差 π , 干涉仪将入射波耦合到该臂的耦合率为 $(T-R)^2$ 。

如果 $R=T$, 则入射波全部反射回原入射臂, 耦合到另一臂的能量为零, 干涉仪等效于一个全反射镜。此特性与入射波频率和环的长度无关。如果 $R \neq T$, 或者环中存在某些非光学对称元件, 会增加激光腔内损耗, 破坏腔内的横模分布, 激光器难于获得单横模运转。此时, 当环内有可饱和吸收体时, 强度不相等的两个脉冲产生的瞬态光栅效应减弱, 不利于锁模。理论分析^[12]和本实验研究都证实了这一点。

三、实验结果与讨论

图 1 中, 染料盒 DC 先后以布儒斯特角和非布儒斯特角放置, 在非谐振环中的等光程位

置($x=0$)附近,沿光轴方向移动染料盒 DC ,同时测量锁模脉冲串的平均脉宽、输出能量和倍频光谱线宽度随偏移量 $|x|$ 的变化情况。

图 2 示出在固定泵浦功率、可饱和吸收体的小信号透过率 T_0 (指实际的可饱和吸收体厚度的总透过率) 为 25% 时的一组典型测量结果。图 2(a) 示出因采取上述两种染料盒 DC 放置状态而导致可饱和吸收体厚度不同 (L_{eff} 为 1.2 mm 和 1.0 mm)、但总的透过率相同 (25%) 时,脉冲串的平均脉宽随 x 的变化曲线。显然,可饱和吸收体厚度较薄时,可以获得较窄的激光脉冲输出。图 2(b) 和图 2(c) 是当染料盒 DC 以非布儒斯特角放置 ($L_{\text{eff}}=1\text{ mm}$)、总透过率 $T_0=25\%$ 时,脉冲串总能量和平均单脉冲峰值功率随 $|x|$ 的变化曲线。平均单脉冲峰值功率是根据输出脉冲串总能量、平均脉宽和脉冲串包络半宽度内包含的脉冲个数推算出来的。图 2(d) 则是染料盒 DC 以布儒斯特角放置 ($L_{\text{eff}}=1.2\text{ mm}$)、总透过率 $T_0=25\%$ 时,倍频光谱线宽度随 x 的变化的曲线。从图中可以看到基频光谱线宽度随激光脉冲宽度的变窄而加宽的趋向。

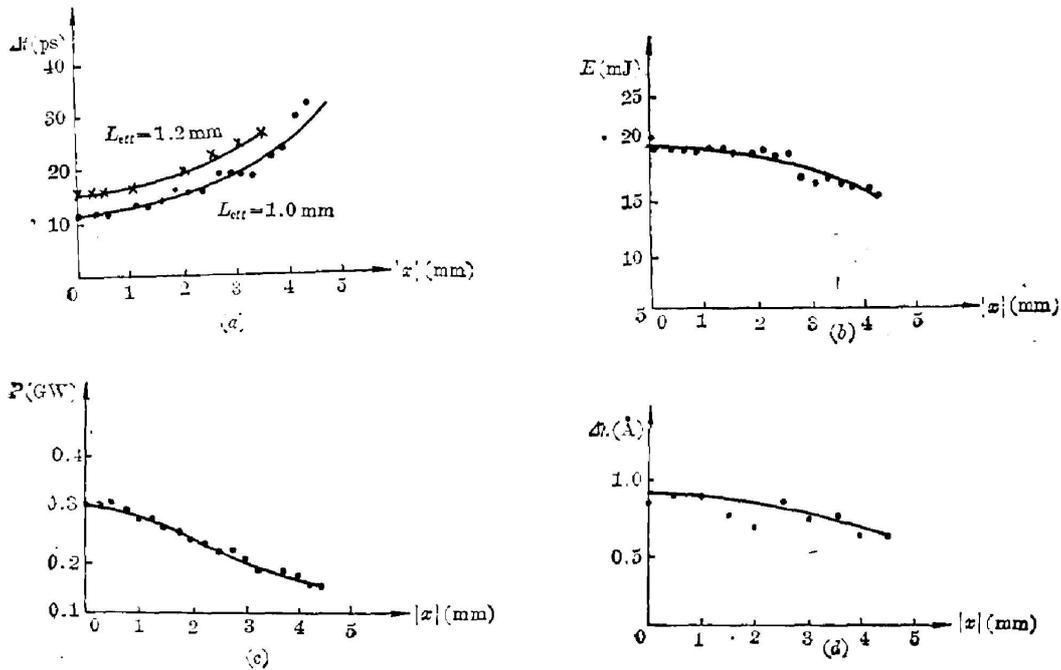


Fig. 2 Mode-locked pulse duration Δt (a), total output energy E (b), peak power P (c) and second harmonic spectrum width $\Delta\lambda$ (d), as functions of the displacement $|x|$ of the saturable absorber dye cell from the position of equal optical path in the antiresonant ring

图 2 表明,当染料盒 DC 位于 $x=0$ 处,输出的激光脉冲宽度最窄、峰值功率最高,输出最稳定。随着染料盒 DC 偏离 $x=0$ 处的距离 $|x|$ 的增大,激光脉冲宽度明显加宽、谱线宽度变窄、输出能量减小,单脉冲峰值功率相应下降,输出稳定性变差。这可由如下瞬态光栅的作用加以解释。由于激光脉冲具有一定的强度轮廓,当可饱和吸收体位于 $x=0$ 处,即相向两个激光脉冲重叠的中心位置时,可饱和吸收体内的瞬态光栅作用最强,对激光脉冲的压缩效果最明显,激光输出最稳定。随着可饱和吸收体偏离重叠的中心位置,瞬态光栅作用减

弱, 相向两个激光脉冲在可饱和吸收体内的相互作用时间减少, 耦合能力下降, 因而腔内损耗增加, 压缩率下降, 激光输出的稳定性也变差。

图 3 示出典型的双光子荧光图样的显微光密度计扫迹。

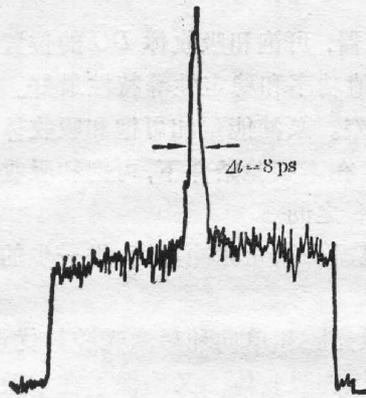


Fig. 3 Microdensitometric record of a typical TPF trace

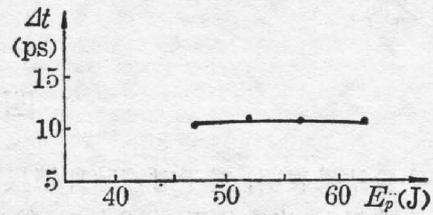


Fig. 4 Mode-locked pulse duration Δt as a function of the pumping energy. $T_0=19\%$, $L_{eff}=1\text{mm}$ and $x=0$

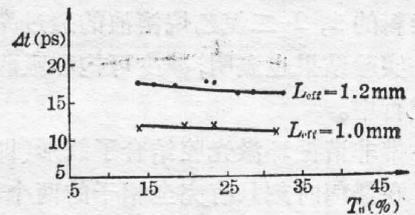


Fig. 5 Mode-locked pulse duration Δt as a function of the concentration of the saturable absorber

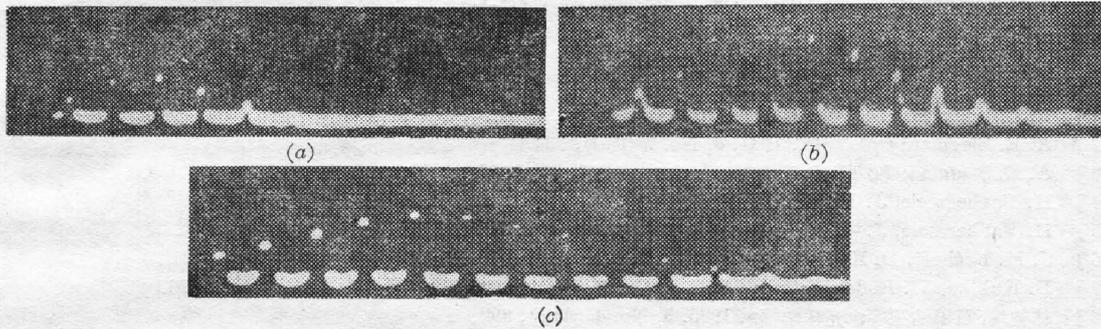


Fig. 6 Oscillograms of mode-locked pulse trains at different concentrations of the saturable absorber. (a) $T_0=19\%$; (b) $T_0=25\%$; (c) $T_0=30\%$

实验表明, 激光脉冲宽度(假定高斯型脉冲形状)随泵浦能量 E_p 和可饱和吸收体浓度的变化不明显, 如图 4 和图 5 所示。但随着可饱和吸收体浓度的提高, 输出能量增大, 脉冲串的脉冲个数减少(见图 6), 输出稳定性提高。此外, 可饱和吸收体浓度的提高, 使对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的第一振荡阈值(自由振荡阈值)和第二振荡阈值(锁模振荡阈值)^[13] 所对应的泵浦能量 E_p 有规律地提高, 如图 7 所示。激光脉冲峰值功率的提高加速了增益介质的增益饱和, 脉冲串变短。双阈值所对应的泵浦能量之间的间隔, 随着可饱和吸收体浓度的提高而增大, 延长了振幅甄别过程和脉宽压缩过程, 减小了可饱和吸收体的惯性影响, 使输出更加稳定。但是, 由于泵浦源和腔内光学元件破坏阈值的限制, 可饱和吸

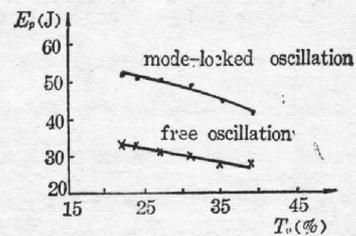


Fig. 7 Pumping energies corresponding to the 1st oscillation threshold and the 2nd oscillation threshold as functions of the concentration of the saturable absorber

收体的浓度不能太高。在本实验条件下,可饱和吸收体的小信号透过率一般选择在 25~30% 之间。

四、总 结

实验结果表明,对于对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器,可饱和吸收体 DO 的位置对输出特性影响很大,当它位于 $x=0$ 处时,输出脉冲宽度、峰值功率和稳定性等特性最好。随着可饱和吸收体 DO 位置向 $|x|$ 增大方向移动,上述特性变差。泵浦能量和可饱和吸收体浓度对脉冲宽度影响不大,但提高浓度能提高输出的稳定性。在本实验条件下,可饱和吸收体五甲川染料的 1, 2-二氯乙烷溶液的透过率选择在 25~30% 之间。

实验结果也表明,减少可饱和吸收体的厚度可明显减少激光脉冲宽度,进一步的研究正在进行中。

带非谐振环激光腔结合了线形(即法布里-珀罗)激光腔和单向环形激光腔的优点,既保证了在任何时刻只有完全相干的两个激光脉冲通过可饱和吸收体,又确保了在增益介质中存在空间烧孔效应,是被动锁模激光器较理想的腔结构。

作者感谢孟绍贤、张伟清和康玉英等同志对本工作的帮助。

参 考 文 献

- [1] B. L. Fork, B. I. Greene *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **33**, No. 9 (1 May), 671.
- [2] A. E. Siegman; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 7 (Jul), 334.
- [3] A. E. Siegman; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1973, **QE-9**, No. 2 (Feb), 247.
- [4] H. Vanherzeele, J. L. Van Eck *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 20 (15 Oct), 3484.
- [5] H. Vanherzeele, J.-C. Diels *et al.*; *Opt. Lett.*, 1984, **9**, No. 12 (Dec), 549.
- [6] J. M. Buehert, D. K. Basa *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1984, **55**, No. 3 (Feb), 683.
- [7] D. Kuhlke, W. Ruddph *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 4 (Apr), 525.
- [8] 林礼煌, 石田祐三等;《光学学报》, 1985, **5**, No. 4 (Apr), 292.
- [9] M. Yoshizawa, T. Kobayashi; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**, No. 7 (Jul), 797.
- [10] 武佩华, 陈述春;《中国激光》, 1983, **10**, No. 3 (Mar), 143.
- [11] D. J. Bradley; 《Ultrashort Light Pulses》; ed by S. L. Shapiro, (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977), 72.
- [12] S. C. Sheng, A. E. Siegman; *J. O. S. A.*, 1976, **66**, No. 10 (Oct), 1932.
- [13] S. V. Chekalin, P. G. Kriukov *et al.*; *Opto-Electron.*, 1974, **6**, No. 4 (Jul), 249.

Some operating characteristics of a colliding pulse mode-locked Nd:YAG laser

SHENG GUOPING, LIN LIHUANG AND DENG XIMING

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

(Received 21 June 1985; revised 16 July 1985)

Abstract

We have detailed experimental studies on a colliding pulse mode-locked Nd:YAG laser. Operating characteristics of the laser under different conditions of position, thickness, concentration of saturable absorber, and pumping energy are given. Mode-locked light pulses with duration of 11~12 ps can routinely be obtained from this laser.

中国光学学会第二届理事会召开第二次全体理事扩大会议

1985年11月12日,值学会举行'85学术年会(见本刊五卷第十二期报道)之际,中国光学学会第二届理事会召开了第二次全体理事扩大会议。理事长王大珩主持了会议,到会的理事、各专业委员会主要负责人、地方光学学会的主要负责人,学会所属各刊物的编辑部负责人共104人出席了会议。

学会秘书长赖琮瑜向到会者介绍了学会1985年度经费的分配比例和使用情况,以及学会近期四项活动的计划。

聂宝成理事汇报了1986年在我国召开国际全息与信息学术会议的筹备情况,同时宣布学会的决定:王大珩理事长为这次国际会议的主席;王之江副理事长为中国方面的节日委员会主任;聂宝成理事任会务组组长;徐大雄理事任会议秘书长。

这次会议还决定:由激光专业委员会负责筹备在中国召开的1987年国际激光学术会议。

束越新理事向会议介绍了出席第五届国际颜色会议的概况。束越新的论文作为大会27篇宣讲报告之一在大会上宣讲,他在会上被选为国际颜色学会的18名委员之一。

北京信息光学仪器研究所宋菲君在这次会议上介绍了新近成立的全息与信息专业委员会的筹备和成立情况。该专业委员会由学会副理事长母国光任主任,徐大雄、宋菲君和凌德洪(苏州大学物理系教授)任副主任。

工程光学专业委员会潘君骅委员在会议上提请理事会审批成立测试、计量专业委员会。

学会副理事长母国光还就学会第二届一次常务理事会关于召开'85学术年会的决定下达以后,有关单位为筹备、召开年会所做的工作和这类大型会议作了评价性的发言。他希望,象'85大型学术年会,今后最好每三年举行一次,于学会理事会换届之际同时举行。

(乙 民)