

自启动、低功率泵浦的自锁模 Ti:蓝宝石 激光器和它的高效连续运转

徐冰 周建平* 王益民 李传东 吴建光 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所, 上海 201800 · 华盛顿州立大学)

摘要 报道了一台自启动、长时间稳定、低功率泵浦的自锁模 Ti:蓝宝石激光器和它的高效连续运转的实验结果。实验中观测到 53 nm 的光谱带宽(FWHM), 此谱宽可支持 13 fs 的激光脉冲, 受自相光仪测量仪器的限制, 测得的脉宽为 24.6 fs, 实际脉冲脉宽可能小于 20 fs。此激光器在自启动锁模、低功率泵浦时, 脉宽小于 50 fs。激光器在连续运行时获得 0.2 W 的泵浦阈值, 35% 的斜率效率和 1.1 W 的激光输出(4 W 泵浦)。

关键词 自启动, 自锁模, Ti:蓝宝石激光器

1 引言

Ti:蓝宝石具有宽的增益带(660~1100 nm)和大的增益截面($\sim 3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$), 因此用此晶体作介质, 极易产生超短脉冲、高功率激光^[1]。最引人瞩目的是应用自锁模技术的 Ti:蓝宝石激光器, 可获得超短脉冲激光^[2]。这种激光器结构简单、运行稳定, 已被广泛应用。目前国际上自锁模 Ti:蓝宝石激光器产生的最短脉冲为 8.5 fs^[3], 对应的光谱宽度为 151 nm。

Ti:蓝宝石激光器能自锁模产生超短脉冲的机理一般认为是光克尔(Kerr)效应, 即谐振腔内的振荡光通过增益介质产生自聚焦。自聚焦改变振荡光的空间分布, 由于腔内光阑的存在(可分软光阑和硬光阑两种), 振荡光受到一个与强度相关的损耗调制, 腔内高功率光束有着更高的透过率。因此对于一个光脉冲, 克尔效应与腔内光阑的联合作用相当于一个快饱和体, 对脉冲的前后沿有压缩作用。

克尔效应产生的自相位调制, 使振荡光频谱展宽。由激光锁模理论可知, 激光的频谱 $\Delta\nu$ 越宽, 可能得到的锁模脉冲宽度 $\Delta\tau$ 将越窄, 其极限关系可用带宽时间积表示为 $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = \text{常数}$, 对于双曲正割型(sech²)脉冲, 常数为 0.315。由于谐振腔内光学元件产生的色散、宽的频谱, 导致严重的群速色散, 为此腔内引入具有对色散起补偿作用的棱镜对, 来增加腔内的负色散量, 达到压缩脉冲的目的。因此, Ti:蓝宝石激光器输出脉冲的宽度由谱宽和色散补偿的好坏决定。

Ti:蓝宝石激光器的腔内损耗 $\sim 1 \times 10^{-7}$ ^[4], 而自锁模的启动阈值 $\sim 1 \times 10^{-5}$, 因此一般需要给一人为的扰动, 来启动锁模。因此能否自启动锁模, 其关键是看激光器对小的噪声起伏的

敏感程度。初期的自启动的自锁模 Ti:蓝宝石激光器都是靠在腔内置入可饱和吸收体来达到自启动锁模的^[4,5]。激光器的自启动锁模范围,对于小腔镜的间距变化非常敏感,因此对于自启动锁模,小腔镜的间距可调范围只有几十微米^[6]。

2 实验装置

自锁模 Ti:蓝宝石激光器的实验装置如图 1 所示,激光腔呈典型非对称 X 型,短臂长为 58.8 cm,长臂长为 101 cm。小腔由两个曲率半径为 10 cm 的凹面镜构成,Ti:蓝宝石棒置于其中,晶体偏离小腔的中心位置不超过 1 mm。X 型腔的折叠角为 16°,如此小的折叠角有利于减小腔内的各种像差和群速色散的影响。为获得超短的脉冲输出,我们采用高品质因素(FOM>150)、高浓度(0.15%)的 Ti:蓝宝石棒,其长度为 4.75 mm,端面切割成布儒斯特角。作为腔内光学元件,短的 Ti:蓝宝石棒可以减小难以补偿的高阶色散的产生,且有利于振荡光与泵浦光的模式匹配和减小热效应影响。色散补偿的棱镜对的材料选用三阶色散较小(-230 fs^3)的熔石英,顶角为 68°,它们在腔内的间距为 58.3 cm。作为比较,我们分别使用在 790 nm 附近透过率为 12.5%和 5%的输出耦合镜。会聚泵浦光的凸透镜的焦距为 105 mm,腔内没有附加光阑和起动装置。泵浦源为全线输出的氩离子激光器。

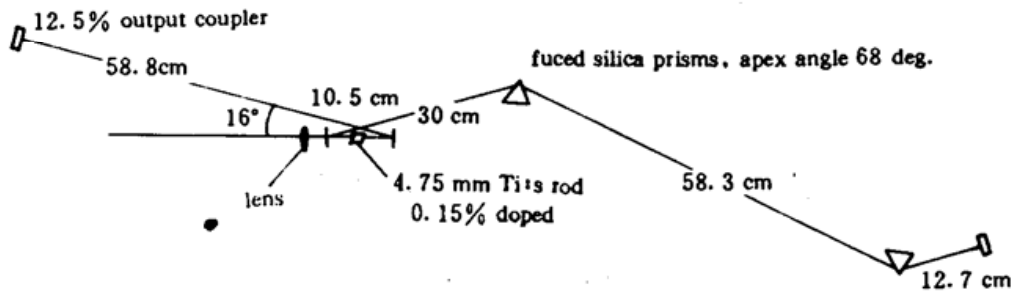


Fig. 1 Experimental arrangement for self-mode-locked Ti:sapphire laser

3 实验结果

3.1 低泵浦阈值的自锁模运行

细致地调整泵浦光束的水平高度,让它平行于工作台面;调整棱镜的端面垂直于工作平

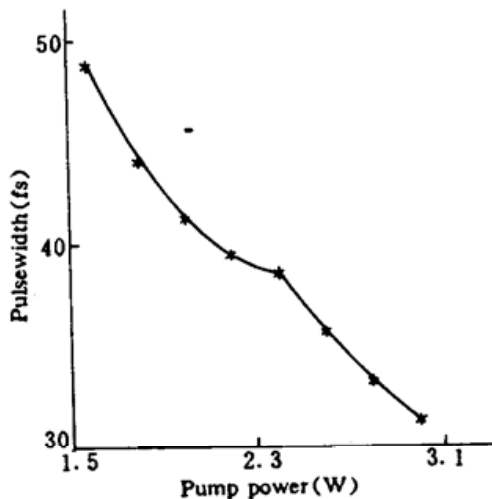


Fig. 2 The dependence of pulsewidth on pump power

台;细调棱镜的间距、两棱镜插入光路中的深度、偏向角、小腔镜的间距和 Ti:蓝宝石晶体在小腔中的位置。当处于自锁模运行最佳腔结构时,连续运转输出椭圆形的激光光斑,长轴在垂直于水平面的方向上(表明有 TEM_{01} 模存在),它的输出光的光谱在不同的模之间抖动,这时只要给予一个轻微的扰动(如轻拍激光器的任意一个调整架),激光器就可以实现稳定的自锁模运行,这时输出的激光光斑的空间分布为 TEM_{00} 模。若在锁模激光中有连续分量存在,只要改变泵浦光强或棱镜插入的深度,即可获得完全的锁模激光(可

从光谱仪上确认)。实验中用透过率为 12.5%的输出耦合镜时,得到自锁模运行的阈值泵浦功

率为 1.58 W, 脉冲宽度为 48.8 fs, 输出功率为 147 mW。而此时连续运转输出功率为 53 mW, 仅为锁模时的 1/3。这时的自锁模运行可维持几十分钟, 这期间平均功率起伏小于 3%, 我们认为起伏主要来自氩离子激光器的泵浦光。一旦停止锁模, 也只要给予一个轻微的扰动即可启动锁模。当泵浦功率为 2.0 W 时, 激光器的自锁模运转稳定时间大于 2 h。令人意外的是, 改用 5% 透过率的输出耦合镜, 并未得到期望的更低的自锁模泵浦阈值, 甚至还略高一点, 为 1.61 W。采用不同的透过率的输出耦合镜, 在锁模泵浦阈值时的实验结果比较见表 1。图 2 显示低泵浦阈值的自锁模运行时输出脉宽与泵浦功率的关系。

3.2 自启动的自锁模运行

在 3.5 W 全线泵浦下, 用透过率为 12.5% 的输出耦合镜。细调 Ti: 蓝宝石激光器各个光学元件的位置(关键是两个小腔镜的间距和 Ti: 蓝宝石晶体在小腔中的位置), 不需要任何人为扰动, 即可自启动锁模。稳定运行时间大于 4 h 以上(受测量时间限制), 脉冲宽度为 38 fs, 输出功率为 520 mW, 功率起伏小于 5%。即使锁模被人为中断(挡住泵浦光或腔内振荡光, 然后再去掉障碍物), 激光器马上能自行启动, 恢复锁模运行。对于自启动锁模的稳定区, 小腔镜的间距仅有 $\sim 20 \mu\text{m}$ 可供调节, 一旦超出此范围, 激光器仍能自锁模, 但不能自启动。在实验中发现自启动锁模运行并不能得到最短的脉冲输出, 要重新调节腔内的各元件, 在同样的泵浦功率下, 可获得稳定的 32 fs 脉冲输出, 但输出功率下降为 410 mW。

Table 1 Threshold pump power, pulsedwidth and output power for different transmissions of output couplers

Output coupler transmission	Threshold pump power (W)	Pulsedwidth (fs)	Output power (mW)
5%	1.61	46	185
12.5%	1.58	48.8	147

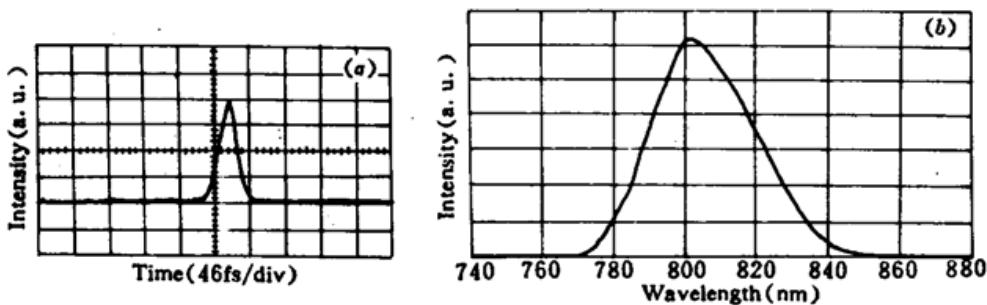


Fig. 3

(a) sweep intensity autocorrelation trace of the 24.6 fs pulses (9.2 fs/div);

(b) corresponding spectrum with a FWHM bandwidth of 34 nm

3.3 小于 25 fs 的自锁模脉冲

在 3.8 W 全线泵浦下, 我们获得 24.6 fs 的稳定的锁模脉冲输出, 光谱带宽(FWHM)为 34 nm, 中心波长在 803 nm, 图 3 (a), (b) 分别为脉宽测量的自相关曲线和对应的光谱曲线, 带宽时间积 $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0.391$, 大于 sech^2 脉冲的变换极限 0.315, 这表明激光脉冲的群速色散未被完全补偿。这时的输出功率为 490 mW, 稳定运行时间大于 2 h, 功率起伏小于 5%。实验中我们还观测到更宽的光谱带宽(最宽达 53 nm), 但测到的最短脉宽也为 24.6 fs, 就光谱带宽而

言,完全可支持 20 fs 以下的激光脉冲。

3.4 激光器的高效连续运转

尽管为长腔,而且腔内有色散补偿棱镜,但只要改变小腔镜的间距,激光器在连续运行时仍具有极低泵浦阈值、大的斜率效率和高功率输出的特性。表 2 列出了用透过率为 5% 和 12.5% 的输出耦合镜时的泵浦阈值和斜率效率。激光器在 4 W 泵浦时,输出功率为 1.1 W。图 4 显示输出激光功率随泵浦功率的变化关系。

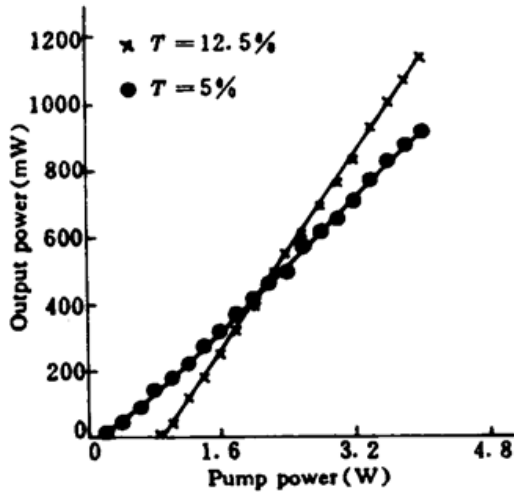


Fig. 4 Output power as a function of input power

Table 2 Threshold pump power and slope efficiencies for different transmissions of output couplers

Output coupler transmissions	Threshold pump power (W)	Slope efficiency
5%	0.20	24.0%
12.5%	0.88	35%

4 讨 论

自锁模运行腔结构最佳时,连续运转的激光光斑为椭圆形,这表明在腔内连续运转的激光模与泵浦光的模式并没有很好地匹配。

改用在 780 nm 处透过率为 5% 的输出耦合镜,并未降低自锁模的泵浦阈值。其原因这是由于自锁模时,激光光谱非常宽,对于不同的波长,其透过率各有不同。而在连续运转时激光器的工作波长在 780 nm 左右,所以这时的泵浦阈值仅为 0.2 W,远低于用透过率为 12.5% 的输出耦合镜时的 0.88 W。另外可以预料,若采用短腔和不插入棱镜,连续运转的泵浦阈值将更低,斜率效率和输出功率都将提高。

由于激光脉冲在测量时需要通过分光镜、透镜和反射镜等色散元件,脉冲会因此而展宽,因此对应于较宽带宽(>34 nm),尽管测到的脉宽为 24.6 fs,但实际脉冲小于 20 fs 是完全可能的。为获得更短的脉冲,对腔外的色散补偿实验研究正在进行中。

致谢 十分感谢刘玉璞、张影华两位老师对实验中的脉冲宽度和光谱带宽的测量给予的热忱帮助。

参 考 文 献

- 1 C. Rouyer, E. Mazataud, I. Allais *et al.*. Generation of 50-TW femtosecond pulses in a Ti:sapphire/Nd:glass chain. *Opt. Lett.*, 1993, 18(3):214~216
- 2 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60 fs pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, 16(1):42~44
- 3 J. Zhou, G. Taft, C. P. Huang *et al.*. Pulse evolution in a broad-bandwidth Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(15):1149~1151
- 4 Y. F. Chou, J. Wang, H. H. Liu *et al.*. Measurements of the self-starting threshold of Kerr-lens mode-locking laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(8):566

- 5 Y. Pang, F. Wise. Use of saturable absorber dyes for self-starting operation of a self-mode-locked Ti:Al₂O₃ laser. *Opt. and Quant. Electr.*, 1992, 24:841~849
- 6 Z. Y. Wei, W. K. Lee, S. P. Wong *et al.*. Investigation of self-starting for self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Chinese J. Lasers*, 1995, B4(1):1~7

Self-starting, Operation of a Self-mode-locked Ti:sapphire Laser with Low Pump Power and Its CW Operation

Xu Bing Zhou Jianping* Wang Yiming Li Chuandong Wu Jianguang
Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy Sciences, Shanghai 201800*

**Washington State University*)

Abstract A self-starting, stable ultrashort-pulsed Ti:sapphire laser with low pump power was demonstrated without additional materials or slit. The laser produced stable pulses of 24.6 fs. A bandwidth of 53 nm was observed which would correspond to less than 13 fs according to an ideal value of 0.315 for time-bandwidth product. Pumping threshold of CW operation was 0.2 W, and the output power was up to 1.1 W with an efficiency of 35%.

Key words self-starting, self-mode-locking, Ti:sapphire laser