

# 环形腔自锁模掺钛蓝宝石激光器\*

戴建明 沈宇震 刘 新 三清月

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

**摘 要** 实现了环形腔掺钛蓝宝石激光器的自锁模运转。在双向同时锁模时获得脉宽为 36 fs 的锁模脉冲; 在单向锁模时得到脉宽为 32 fs 的锁模脉冲。并对激光器的运转特性进行了分析。

**关键词** 环形腔激光器, 掺钛蓝宝石激光器, 自锁模。

## 1 引 言

自从 1991 年 Spence 等人首次获得掺钛蓝宝石激光器稳定的自锁模运转<sup>[1]</sup>以来, 自锁模掺钛蓝宝石激光器得到了迅速发展, 至今为止, 已获得从激光器中直接输出 8 fs 的最窄锁模脉冲<sup>[2]</sup>。但是, 在一般情况下, 自锁模掺钛蓝宝石激光器都采用驻波腔。本文采用了环形腔对掺钛蓝宝石激光器进行自锁模实验研究, 在理论上, Agnesi 和 Heatley 等人<sup>[3, 4]</sup>对环形腔自锁模激光器进行了研究; 在实验上, Pelouch 等人<sup>[5]</sup>利用附加腔启动实现环形腔掺钛蓝宝石激光器的自锁模运转, 并获得 60 fs 的锁模脉冲, 但激光器只能够单向锁模。本文报道不附加任何调制元件, 利用激光光束在增益介质中产生的自聚焦效应与增益光阑结合实现环形腔掺钛蓝宝石激光器的自锁模运转。实验中发现激光器既能够双向同时锁模, 也能够单向锁模。在双向同时锁模时获得脉冲宽度为 36 fs 的锁模脉冲, 在单向锁模时获得脉冲宽度为 32 fs 的锁模脉冲。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

环形腔自锁模掺钛蓝宝石激光器的结构如图 1 所示。激光器采用“8”字形环形像散补偿腔。掺钛蓝宝石棒(9 mm)端面布儒斯特角切割, 光轴位于水平面内并与棒轴垂直, 品质因数  $FOAM = 236$ , 吸收系数  $\alpha_{490} = 2.4 \text{ cm}^{-1}$ 。采用氩离子激光器全线泵浦, 泵浦光由曲率半径  $R = 20 \text{ cm}$  的凹面镜 M 会聚后经腔镜  $M_1$  进入掺钛蓝宝石棒,  $M_2$ 、 $M_3$  为球面反射镜, 曲率半径为  $R_2 = R_3 = 10 \text{ cm}$ ,  $M_4$  为平面输出镜, 在中心波长 800 nm 处的透过率为  $T = 3.5\%$  左右,  $M_4$  为平面全反镜。P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub> 和 P<sub>4</sub> 构成的熔石英四棱镜系统用来进行腔内色散补偿, 压缩脉宽。棱镜对 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub>(P<sub>3</sub> 和 P<sub>4</sub>) 的间距为 60 cm 左右, 谐振腔长 295 cm, 像散补偿角为 26°。利用两个

\* 国家攀登计划资助项目、国家教委光电子信息工程开放实验室部分资助项目。

收稿日期: 1996 年 2 月 9 日; 收到修改稿日期: 1996 年 5 月 1 日

快速光电二极管和一台高频示波器监视激光器输出的锁模脉冲序列，利用相关器测量锁模脉冲宽度，利用单色仪测试锁模脉冲的频谱特性。

## 2.2 运转特性

### 2.2.1 连续光运转特性

利用单模氩离子激光器全线泵浦，首先实现环形腔掺钛蓝宝石激光器的连续运转，泵浦阈值为 1.2 W。当泵浦功率为 4.5 W 时，可使沿顺时针和沿逆时针两个方向输出的激光功率相等，均为 190 mW，两束光总的输出为 380 mW 左右，光束的发散角都较小，输出模式均为  $TEM_{00}$  模。调节腔内各反射镜，可以使任何一束激光的功率渐渐变小，另一束光则相应变强，直到其中一束光的功率为零，而两束光总的输出功率基本保持不变，为 380 mW。

### 2.2.2 自锁模运转特性

细调激光器各腔镜及棱镜，激光器总的输出功率略有下降，两束光的总输出功率为 320 mW 左右。输出模式多呈现以基模为主的多模状态，少数情况下亦可能为  $TEM_{00}$  模，这时，若轻轻振动全反镜  $M_1$  或输出镜  $M_2$ ，即可启动自锁模脉冲，此时输出光束必定为  $TEM_{00}$  模。

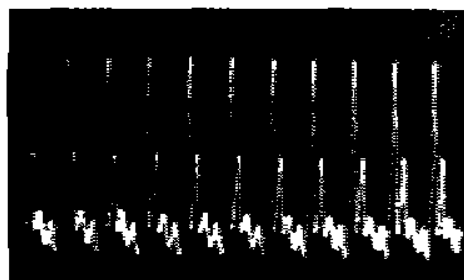


Fig. 2 The stable pulse train

实验中发现对于环形腔掺钛蓝宝石激光器，既能够实现双向同时锁模，也能够实现单向锁模。双向锁模时，当沿顺时针和沿逆时针两个方向输出的锁模脉冲平均功率相同或相近时，两列锁模脉冲非常稳定。与双向连续运转时的输出功率相比，双向锁模时的平均功率有所下降，约为 160 mW。图 2 为沿顺时针方向输出的锁模脉冲序列，脉冲序列的重复频率为  $\sim 100$  MHz。图 3(a) 为沿顺时针方向输出的锁模脉冲相关曲线，由相关曲线得到锁模脉冲宽度为 36 fs；图 3(b) 列出了相应的锁模脉冲光谱曲线，由光谱曲线得到锁模脉冲光谱宽度为 20 nm，此时  $\Delta t \Delta \nu = 0.36$ ，接近  $\text{sech}^2$  (双曲正割函数) 脉冲的傅里叶变换极限。对沿逆时针方向输出的锁模脉冲进行测量，得到的脉冲宽度和光谱宽度与沿顺时针方向的结果基本相同。此时若在一定范围内伸缩棱镜改变腔内负色散量，锁模脉冲宽度基本没有变化。当外界扰动使锁模停止后轻击腔镜可同时启动两个方向的锁模。调节激光器的折叠镜以改变其到掺钛蓝宝石棒的距离，这样能够增加一个方向的锁模脉冲强度，另一方向的锁模脉冲强度同时下降，这时两列锁模脉冲的稳定性变差。继续调节可实现激光器单向锁模，而另一列锁模猝灭。当激光器处于单向锁模状态时，锁模脉冲非常稳定，平均功率较高，约为 300 mW。图 4(a) 为激光器仅有沿顺时针方向的锁模时测得的相关曲线，图 4(b) 为相应的光谱曲线。由相关曲线和光谱曲线可得锁模脉冲宽度为 32 fs，光谱宽度为 22 nm， $\Delta t \Delta \nu = 0.34$ 。调节激光器也可形成仅有沿逆时针方向的锁模，在不改变棱镜间距的情况下，锁模脉冲的平均功率、脉冲宽度和光谱宽度与上述结果基本相同。

与驻波腔掺钛蓝宝石激光器的自锁模不同，本文在实验中还发现，在多数情况下，无论是双向锁模还是单向锁模，锁模光谱在  $\sim 780$  nm 处存在较强的连续光成分，随着锁模状态从双向向单向过渡，锁模光谱中的连续成分逐渐减少，如图 3(b) 和 4(b) 所示。但在单向锁模

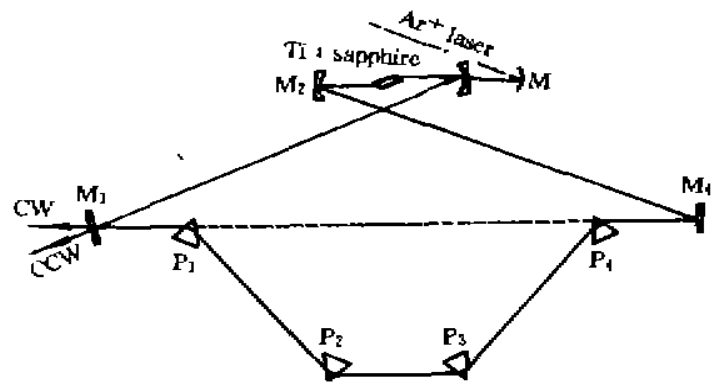


Fig. 1 Schematic of the cavity configuration for self-mode-locked Ti:sapphire laser

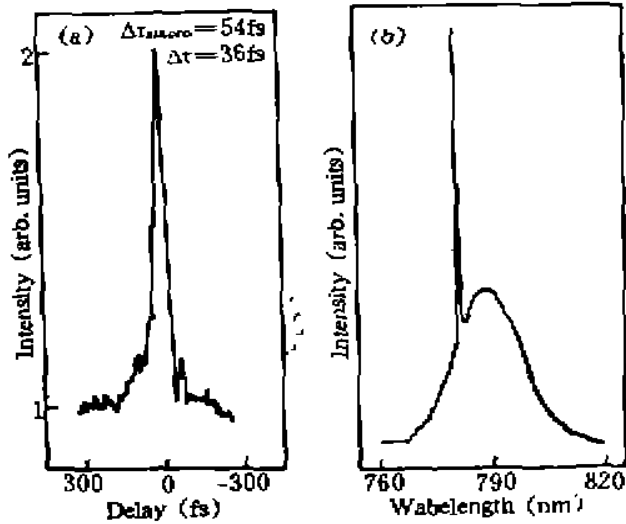


Fig. 3 (a) Autocorrelation traces of self-mode-locked pulse for clockwise direction. The autocorrelation FWHM is 54 fs, corresponding to a pulse duration of 36 fs, if a  $\text{sech}^2$  pulse shape is assumed. (b) the corresponding spectrum

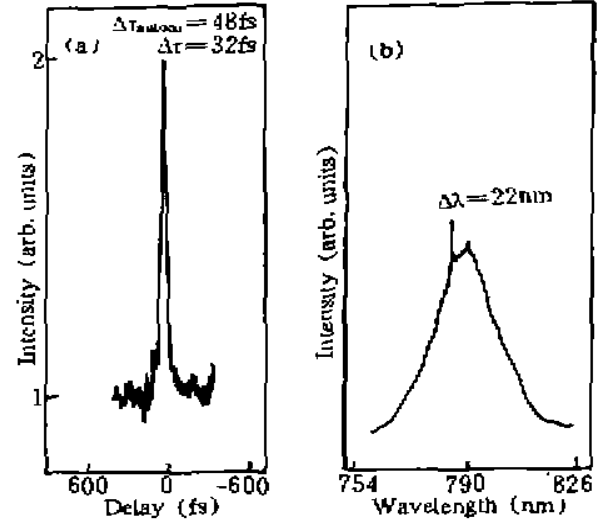


Fig. 4 (a) Autocorrelation traces of unidirectional, self-mode-locked  $\text{Ti:sapphire}$  laser. The autocorrelation FWHM is 48 fs, corresponding to a pulse duration of 32 fs, if a  $\text{sech}^2$  pulse shape is assumed. (b) the corresponding spectrum

时, 当泵浦功率增加到 5.5W 时能够完全消除光谱曲线中的连续成分。

### 3 实验分析

掺钛蓝宝石激光器的自锁模是利用激光光束通过增益介质时产生的自聚焦效应与腔内有限孔径(硬光阑或软光阑)的结合而实现的, 这种自锁模机制可以等效为谐振腔内插入一块快可饱和吸收体的被动锁模。在环形激光器中, 存在传播方向相反的两列行波, 因此, 在满足自锁模条件下能够产生两列不同方向的锁模脉冲。根据拉姆半经典理论<sup>[5]</sup>, 当考虑非线性效应时, 环形激光器中的两列行波之间存在耦合, 其耦合程度可用耦合系数  $C$

$$C = \frac{\theta_{\pm}\theta_{\mp}}{\beta_{+}\beta_{-}} = L^2(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

来表示, 式中  $\theta_{\pm}$ 、 $\theta_{\mp}$  为非线性增益互饱和系数,  $\beta_{+}$ 、 $\beta_{-}$  为非线性增益自饱和系数,  $L^2(\omega - \omega_0) = \gamma^2 / [\gamma^2 + (\omega_{ab} - \omega_0)^2]$ ,  $\gamma$  为激光上能级的衰减因子。实验中调节折叠镜与钛宝石晶体的距离时, 相当于改变了激光器的腔长, 主腔频率  $\omega_{ab}$  相应发生变化。当主腔频率  $\omega_{ab}$  被调谐偏离谱线中心时, 两列行波耦合较弱, 彼此能够独立振荡, 并且具有基本相等的光强, 在这种状态下能够实现双向自锁模。当调节激光器腔长使主腔频率  $\omega_{ab}$  被调谐至谱线中心  $\omega_0$  附近极窄的频区, 并且两列行波频率在  $\omega_0$  两侧几乎完全对称分布时, 两列行波存在较强的耦合或竞争, 这种状态下两个运转方向的自锁模都处于不稳定状态, 两列行波竞争的结果将使一列行波抑制另一列行波, 激光器逐渐进入单向运转状态。单向行波能够获得更大的增益, 因而单向输出的锁模脉冲强度明显增加, 而这又进一步增强了激光脉冲的非线性效应, 从而使锁模脉冲进一步被压缩, 因此单向运转的环形腔掺钛蓝宝石激光器更有利于获得高功率、窄脉宽的锁模脉冲。

**结 论** 利用激光光束通过增益介质时产生的自聚焦效应与增益光阑结合实现环形腔掺钛蓝宝石激光器的自锁模运转。当双向同时锁模时获得平均功率 160 mW、脉宽 36 fs 的锁模脉冲; 当单向锁模时获得平均功率 300 mW、脉宽 32 fs 的锁模脉冲。实验结果和理论分析表明, 当激光器输出的两列锁模脉冲光强基本相等时, 能够获得稳定的双向锁模运转; 而单向运转更有利于获得单束高平均功率、窄脉冲宽度以及稳定性极好的锁模脉冲。

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所为本实验提供了高质量的掺钛蓝宝石晶体。

### 参 考 文 献

- [1] D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbert, 60 fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, 18(1): 42~44
- [2] A. Stingl, M. Lenzner, C. Spielman, Sub-10-fs mirror-dispersion-controlled Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1995, 20(6): 602~204
- [3] A. Agnesi, Kerr-lens odelocking of solid-state lasers and unidirectional ring cavities. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, QE-30(4): 1115~1121
- [4] D. R. Heatley, A. M. Dunlop, W. J. Firth, Kerr lens effects in a ring rensoator with an aperture; mode locking and unidirectional operation. *Opt. Lett.*, 1993, 18(2): 170~172
- [5] W. S. Pelouch, P. E. Powers, C. L. Tang, Self-starting mode-locked ring-cavity Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1992, 17(22): 1581~1583
- [6] M. Sargent III, M. O. Scully, W. E. Lamb, *Laser Physics*. Chap. XI, 172~180, New York, John Wiley & Sons, 1977

## A Self-Mode-Locked Ring-Cavty Ti:Sapphire Laser

Dai Jianming    Shen Yuzhen    Liu Xing    Wang Qingyue

(Department of Pricision Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 9 February 1996; revised 1 May 1996)

**Abstract** A self-mode-locked ring-cavty Ti:sapphire laser is demonstrated. Self-mode-locked operation is achieved in both bidirection and unidirection with pulse durations as short as 36 fs and 32 fs, respectively. The laser performance is discussed in detail.

**Key words** ring-cavity laser, Ti:sapphire laser, self-mode-locked