

文章编号: 0258-7025(2002)06-0481-04

# 20 MHz 自启动克尔透镜锁模飞秒 钛宝石激光器

郑 玮, 王清月, 赵江山, 柴 路, 孙敬华, 张志刚

(天津大学精仪学院超快激光实验室 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**提要** 报道了利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 实现自启动的低重复率锁模飞秒钛宝石激光器, 重复率为 20 MHz, 锁模脉宽 42 fs。

**关键词** 低重复率, 自启动, 半导体可饱和吸收镜, 飞秒激光, 多通长腔

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Self-starting Kerr-lens Mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Laser at Repetition Rates of 20 MHz

ZHENG Wei, WANG Ching-yue, ZHAO Jiang-shan,  
CHAI Lu, SUN Jing-hua, ZHANG Zhi-gang

(Ultrafast Laser Lab, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University,  
and Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072)

**Abstract** In this letter an approach to obtaining low repetition rate directly from a Kerr-lens mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser by using a multiple-pass cavity (MPC) is reported. A self-starting mode-locked laser (with a SESAM) generating pulses of 42-fs at a repetition rates of 20 MHz is obtained.

**Key words** low-repetition-rate, self-starting, SESAM, femtosecond laser, multiple-pass cavity (MPC)

### 1 引 言

高能量高峰值功率的激光脉冲一直是激光研究的重要课题。超短脉冲激光技术问世以来, 脉冲宽度的压缩得到了飞速的发展。传统的克尔透镜锁模激光器能产生脉宽窄峰值功率高的飞秒脉冲, 但它过高的重复率 (100 MHz) 使得在一定的平均输出功率情况下每一个脉冲的能量太低。在一些实验中需要高能量的脉冲, 而又不必使用飞秒激光放大的系统, 这就需要一种介于两者之间的技术。最近报道的低重复率锁模飞秒激光器能产生 15 MHz 的飞秒脉冲<sup>[1]</sup>。它不需要使用腔倒空技术, 也不用在腔内

加入布喇格衍射盒, 而是在腔中加入结构简单的多通长腔 (MPC)。MPC 由两个大曲率凹面镜组成, 构成类似一比一望远放大系统。光束在 MPC 中往返传输以增加脉冲间隔, 降低重复率, 从而使每个脉冲得到更大的增益, 提高单个脉冲的能量。仅仅使用平面镜折叠光路借以增加腔长, 不仅会使锁模非常困难, 甚至导致激光器无法振荡。引入 MPC 的钛宝石激光器可得到峰值功率为 0.7 MW, 脉冲宽度为 16.5 fs 的锁模脉冲<sup>[1]</sup>。本文报道了低重复率的钛宝石锁模激光器, 并用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 实现了锁模自启动。

收稿日期 2001-03-29; 收到修改稿日期 2001-06-13

基金项目 国家重大基础研究 ("973")、教育部重点基础研究基金资助项目。

作者简介 郑玮 (1977—), 女, 硕士, 主要从事超短脉冲及超快激光技术、非线性光学等方面的研究。E-mail: zhengmaomao

## 2 用 Ar<sup>+</sup> 激光器抽运的 MPC 钛宝石激光器

图 1 所示为激光器的基本结构图。采用棱镜对作色散补偿元件, 全线氩离子激光器作为抽运源。 $M_3, M_4$  为双色镜, 曲率半径为 100 mm,  $M_8$  为输出耦合镜,  $M_5$  为全反镜。 $M_6$  为曲率半径为 150 mm 的凹面镜。 $M_7$  为 SESAM。 $M_1$  和  $M_2$  曲率半径为 1799.91 mm, 相距 742 mm。钛宝石晶体棒长 4 mm, 位于  $M_3$  和  $M_4$  镜的中央。输出耦合镜对 740~860 nm 波段透过率为 2%。抽运镜是焦距为 110 mm 的平凸透镜。SESAM( $M_7$ ) 要放于折叠凹面镜( $M_6$ ) 的焦距处。棱镜对材料为熔融石英, 间距 60 cm, 布儒斯特角切割和放置。

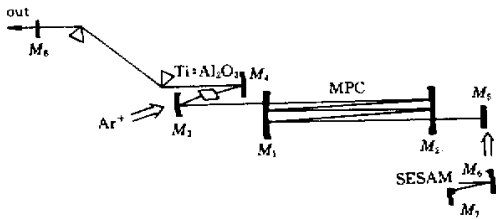


图 1 MPC 钛宝石激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser with a multiple-pass cavity

由理论计算给出, 当 MPC 两镜间距  $d$ , MPC 焦距  $f$  往返一次的传输矩阵  $ABCD'$  为

$$ABCD' = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - d/f & d \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$$

可以看出光线经过多次反射, 在 MPC 中往返传输, 整个腔内的总传输矩阵改变, 而不是简单的拉长一臂, 使两臂长相差很大, 或拉长两臂, 使整个激光腔的物理长度加长。单程光线在 MPC 中传输  $v$  次,  $M_3$  和  $M_5$  间距离为  $L_0$ ,  $M_2$  和  $M_5$  间距离为  $x$  ( $x$  可调) 经过由 MPC 组成的一比一望远系统, 插有 MPC 的一臂的传输矩阵为

$$T_0'' = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} ABCD'^v \begin{bmatrix} 1 & L_0 - x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_0 - d - x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} ABCD'^v \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2L_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

实验中取 MPC 间距为 742 mm,  $L_0$  为 126 cm, 单程光线在 MPC 中传输 8 次, 每个 MPC 镜面上有 4 个光点(可观察到 3 个, 另外一个从切口处射出)。

加入 SESAM 以前, 5 W 抽运, CW 输出为 170 mW, 锁模输出 80~90 mW。由于腔长很长, 两相邻脉冲时间间隔很长, 这就使得增益介质在第一个脉冲作用之后第二个脉冲到来之前积累了足够的反转粒子数, 以支持另外一个附加脉冲, 从而形成双脉冲或多脉冲运转。为了抑制这一效应, 通常采用较低的抽运功率, 例如 5 W 以下, 锁模脉冲序列如图 2 所示。4.8 W 抽运, CW 输出为 150 mW, 锁模输出 80 mW。

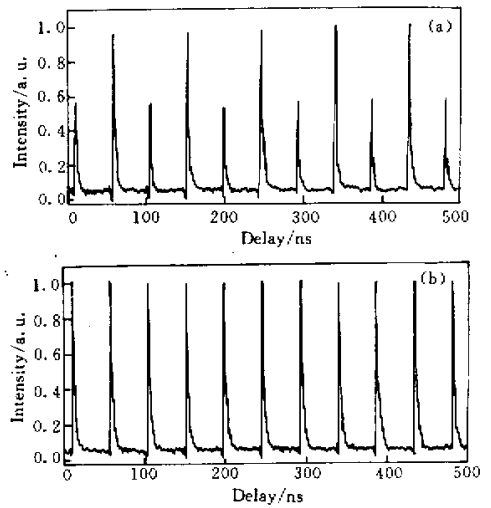


图 2 双脉冲序列(a)和锁模脉冲序列(b)

Fig. 2 Mode-locked laser double pulses train (a) and mode-locked laser pulse train with 20-MHz repetition rate (b)

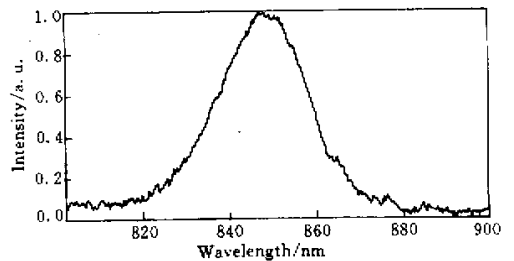


图 3 光谱曲线(带宽为 25 nm)

Fig. 3 Associated spectrum bandwidth of 25 nm from KLM Ti:sapphire laser

光谱曲线如图 3 所示。脉冲带宽为 25 nm。抽运功率进一步降低, 可以得到调 Q 脉冲。如图 4 所

示。

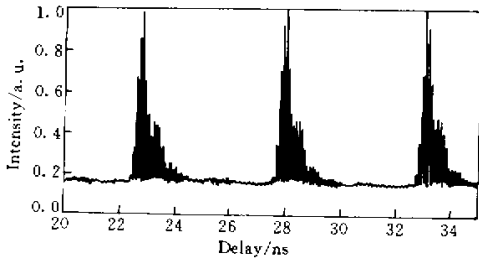


图 4 调 Q 脉冲序列

Fig. 4 Q-switch modulation pulse duration

低损耗宽带 SESAM 的引入,可以在没有外界扰动的情況下实现锁模的自启动。SESAM 是由金作为反射衬底的 AlGaAs 和 InGaAs 单量子阱构成的<sup>[2,3]</sup>。采用金作反射衬底是由于它能够支持的光谱宽度远远大于由半导体材料构成的布喇格反射衬底所能支持的光谱宽度,克服了反射带宽对脉冲宽度的限制。一般说来镀金镜的反射率远小于布喇格反射镜的反射率,其反射损耗很大。我们在实验中采用经过改进的低损耗宽带可饱和吸收镜,大大降低了反射损耗。其原理是在金膜上先镀一层 SiO<sub>2</sub>,再长一层四分之一波长 InAlAs,计算出的反射率可达 99.5%。这是因为 SiO<sub>2</sub> 隔离了金属与半导体,同时 SiO<sub>2</sub> 与 InAlAs 的折射率差很大,形成了一个高反射膜。我们选择聚焦镜 M<sub>6</sub> 焦距为 150 mm。SESAM 镜位置可调,光束经过聚焦在 SESAM 表面反射。如果光强足够强就会形成可饱和吸收,即 SESAM 的反射率随入射光强变化,反射率随光强的增加而增大。这样大量较小脉冲被有效地抑制,最终形成一高强度、窄脉宽的脉冲序列。这时候 SESAM 的位置对于锁模非常重要。当激光器工作在非锁模区时,CW 输出功率为 120 mW(SESAM 约损耗 1%)。调节 SESAM 的位置,其非线性可饱和吸收特性使之能从 CW 较大的起伏噪声中选出较大者进入纯被动锁模过程,脉冲宽度逐渐进入皮秒量级,一旦皮秒脉冲峰值功率达到增益介质的自聚焦阈值,这一过程马上进入 Kerr-lens 锁模过程,获得稳定的飞秒脉冲序列。皮秒锁模平均输出功率为 70 mW。为避免双脉冲产生带来的不稳定性,降低抽运功率至 4.6 W。当激光器运转在飞秒锁模时,平均输出功率为 53 mW。光谱曲线如图 5 所示,带宽为 23 nm。由于是棱镜端输出,锁模脉冲带有空间啁啾。调节棱镜插入量,脉冲中心波长可调

谐范围为 820~850 nm。使用标准自相关器测量脉冲宽度为 60 fs。时间带宽积大于变换极限脉冲时间带宽积( $\Delta\tau \cdot \Delta\nu \geq 0.315$ ),这说明脉冲带有啁啾。导致啁啾产生的原因是三阶色散没有得到完全补偿,这和理论计算的结果不同。理论计算中色散元件为钛宝石晶体和棱镜对。而在实际实验中组成 MPC 的两面大曲率半径凹面镜有一定的色散。光线在 MPC 中多次往返,材料色散以及空气色散就变得不可忽略。

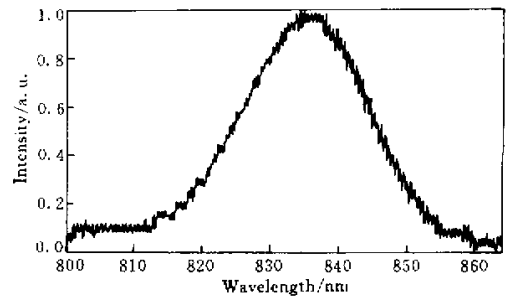


图 5 光谱曲线(带宽为 23 nm)

Fig. 5 Associated spectrum bandwidth of 23 nm from KLM Ti:sapphire laser

我们得到了重复频率为 20 MHz 的飞秒脉冲,抽运功率为 4.6 W 时,平均输出功率为 52 mW,脉冲宽为 60 fs,并实现了锁模的自启动。

### 3 用倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器抽运的 MPC 钛宝石激光器

改变抽运光源,用倍频 Nd:YVO<sub>4</sub>(钕酸钇)激光器(输出中心波长 532 nm)抽运增益介质为 2 mm 钛宝石晶体的 Z 型腔激光器。仍然采用熔融石英棱镜对进行色散补偿。理论计算得到棱镜间距在 400 mm 左右。其他元件结构参数不变。由于抽运源和晶体的改变,先对不插入 MPC 的钛宝石激光器进行了实验。当输出耦合仍旧为 2% 时,以 5 W 抽运,发现 CW 输出 300 mW。调节晶体位置、腔镜以及棱镜插入量,得到锁模脉冲平均输出功率为 120 mW。

当 5 W 抽运时,加入 MPC 和 SESAM,仍旧使用 2% 的输出镜,锁模脉冲平均输出功率为 42 mW。光谱曲线如图 6 所示。

在保证足够的腔内功率的情况下,可以适当增

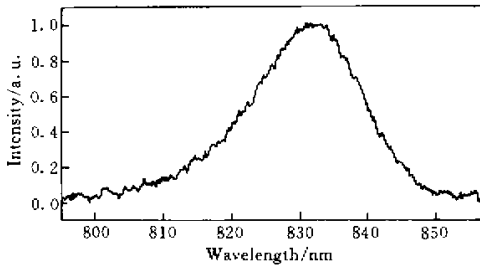


图 6 光谱曲线

Fig.6 Associated spectrum

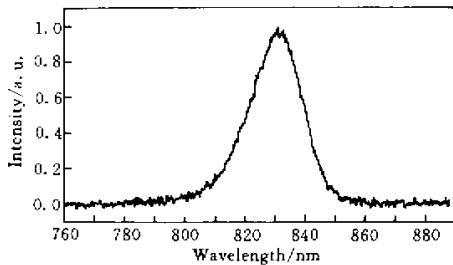


图 7 光谱曲线(带宽为 20 nm)

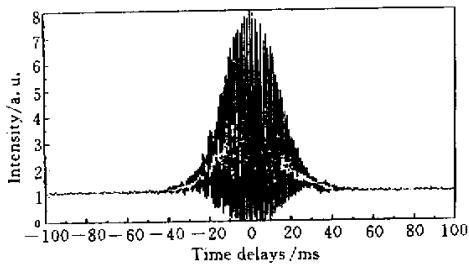
Fig.7 Associated spectrum bandwidth of 20 nm from the KLM Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser

图 8 自相关曲线

Fig.8 Interferometric autocorrelation trace showing a pulse duration of 42 fs

加输出耦合。采用 3.5% 的输出镜,锁模脉冲平均输出功率为 69 mW。这时候发现当 SESAM 位置在聚焦镜的焦点时,得到皮秒脉冲。当 SESAM 位于焦点以内可以得到飞秒脉冲。可见 SESAM 的位置相当重要。光谱曲线如图 7 所示,脉冲带宽为 20 nm。使用标准自相关器,可以得到如图 8 所示的自相关曲线,此时的锁模脉冲宽度为 42 fs。

## 4 结 论

本文报道了利用 SESAM 自启动低重复率飞秒钛宝石激光器的锁模运转情况。在 5 W 抽运下,实现了平均输出功率为 69 mW,重复率为 20 MHz 的低重复率锁模运转,带宽 20 nm,锁模脉冲宽度 42 fs。由于 MPC 反射镜反射率不够理想,从而大大增加了腔内损耗,限制了其输出的峰值功率。改善 MPC 反射镜的质量,定会得到更高的峰值功率输出。

## 参 考 文 献

- 1 S. H. Cho, B. E. Bouma, E. P. Ippen *et al.*. Low-repetition-rate high-peak-power Kerr-lens mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser with a multiple-pass cavity [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(6):417~419
- 2 Zhigang Zhang, Tadashi Nakagawa, Hideyuki Takada *et al.*. Low-loss broadband semiconductor saturable absorber mirror for mode-locked Ti:sapphire lasers [J]. *Opt. Comm.*, 2000, **176**(1 2 3):171~175
- 3 Ursula Keller, Kurt J. Weingarten, Franz X. Kartner *et al.*. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, **2**(3):435~453