

文章编号 : 0253-2239(2001)08-1019-03

半导体可饱和吸收镜启动的高功率飞秒 掺钛蓝宝石激光器*

孙敬华 章若冰 王清月 张志刚 柴 路 庞冬青 戴建明

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072)
(教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要: 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 启动的高功率飞秒掺钛蓝宝石激光器, 在 Ar^+ 激光器 10 W 全线抽运下, 其平均输出功率达到 1.7 W, 脉冲宽度小于 16 fs, 斜率效率为 22%。文中对半导体可饱和吸收镜自启动的动力学过程进行了实验研究。这种自启动、高功率、窄脉宽的飞秒激光器将具有广泛的应用前景。

关键词: 高功率飞秒激光器; 自启动; 半导体可饱和吸收镜

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

飞秒激光器以其极窄的脉冲宽度、极高的峰值功率在各方面得到了广泛的应用, 而利用克尔透镜效应实现自锁模的掺钛蓝宝石激光器更是以其简单的结构、较宽的调谐范围以及可以获得极窄的脉冲宽度而倍受青睐。但是以克尔透镜效应自锁模的钛宝石激光器通常是不能自启动的, 并且对谐振腔的调整要求非常严格。因此自锁模固体激光器的自启动一直是超快激光领域的前沿课题。此外, 有很多研究领域既要求有很窄的脉冲宽度, 又要求有较高的输出功率。为了得到一种稳定、实用、应用范围广泛的飞秒激光光源, 前人作过多方面的探索。1995 年 Keller^[1]首次使用半导体可饱和吸收镜作为钛宝石自锁模激光器的自启动装置, 实现了该激光器的自启动, 并大大加宽了自锁模的范围和降低了对谐振腔调整的要求。随后人们又在减小损耗、增加带宽和运转波长方面进行多方面的研究, 现已在多种固体自锁模激光器中实现自启动、窄脉宽运转^[2,3]。但是由于可饱和吸收镜的饱和吸收光强和破坏阈值的影响, 到目前为止, 利用这种自启动装置的自锁模钛宝石激光器的平均输出功率都是在几百毫瓦量级。本文利用一种新型的低损耗半导体可饱和吸收镜^[3]作为自启动装置, 通过合理的谐振腔设计和调

整, 用氩离子激光器全线抽运, 在 10 W 的抽运功率下, 从钛宝石激光器中获得了高达 1.7 W 的平均锁模输出。输出脉冲宽度小于 16 fs, 重复频率 77 MHz。据作者所知, 如此高功率半导体可饱和吸收镜自启动自锁模钛宝石激光器, 目前在国内外还未见报道。

2 实验及其结果

本实验采用的腔结构如图 1 所示。它由传统的 X 型四镜腔改变而来。即将四镜腔的输出端由一个凹面镜和半导体可饱和吸收镜的组合代替, 而将输出耦合镜放置于有色散补偿棱镜的一端。在该系统中, 钛宝石棒的长度为 9 mm, 以 Ar^+ 激光器全线抽运, 吸收率达 85%。用传统的水冷系统对钛宝石进行冷却。抽运光束的聚焦透镜 F 的焦距为 90 mm。 M_1 、 M_2 皆为传统的 $R = 100$ mm 双色镜。 M_3 的作用是使腔内光束在半导体可饱和吸收镜上形成一个束腰, 提高半导体可饱和吸收镜上的光功率密度, 从而使可饱和吸收体达到饱和。为了能高功率运转, M_3 的曲率半径较大, 为 150 mm。在该系统中, 采

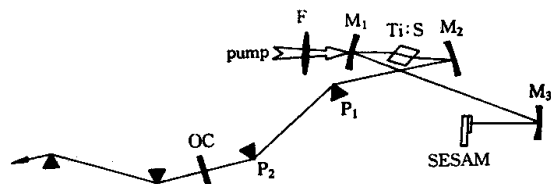


Fig. 1 Schematic of the Ti:sapphire laser with a SESAM

* 教育部重点基金、国家攀登计划和国家重大基础项目基金资助课题。

用了一个输出耦合率高达 22% 的输出耦合镜 (OC)。P₁、P₂ 为熔石英棱镜,用以补偿腔内色散。由于钛宝石棒较长,而半导体可饱和吸收镜的引入也带来了更多的色散,所以棱镜顶端的间距长达 950 mm,从而使整个腔长增加到 3.9 m。

在实验的初始阶段,首先用一个平面全反镜 A 代替半导体可饱和吸收镜来调整激光器谐振腔,利用传统的调节手段,使激光器在无半导体可饱和吸收镜的情况下实现自锁模。当 Ar⁺ 激光器抽运功率为 10 W 时得到了 2 W 以上的锁模输出。改变全反镜 A 的纵向位置,得到两个锁模区域。这是由于谐振腔两臂不等长造成稳区分裂的缘故。因为谐振腔长较大,所以两个稳区的宽度较窄,而两个自锁模区域更窄,均不足 0.2 mm。再以半导体可饱和吸收镜取代平面全反镜 A,则实验结果发生了较大的变化。首先,由于半导体可饱和吸收镜的引入,使之更容易实现自锁模运转,并降低了对谐振腔调整精度的要求。此外,实验还发现加入半导体可饱和吸收镜后的钛宝石激光器的自锁模区域仍旧在原来的自锁模区附近,但是它的加入大大加宽了锁模区的范围。本实验中的两个锁模区均被扩展到 0.5 mm 左右,两个区域之间的间隔约 1 mm。在加入半导体可饱和吸收镜后,比自锁模更容易出现的是孤子锁模和被动锁模。孤子锁模时的光谱宽度较之自锁模时要窄了许多,但脉冲宽度仍旧在百飞秒量级。单纯由半导体可饱和吸收镜造成的纯被动锁模是在皮秒量级,光谱宽度非常小,并且在激光器的绝大部分状态下都能出现。这与本实验室前期的一些实验结果基本相同^[4]。图 2 为自锁模平均功率随抽运功率的变化曲线。图中(a)为未加入半导体可饱和吸收镜时的变化曲线,而(b)为加入半导体可饱和吸收镜后的变化曲线。由图可看出,在未加入半导体可饱

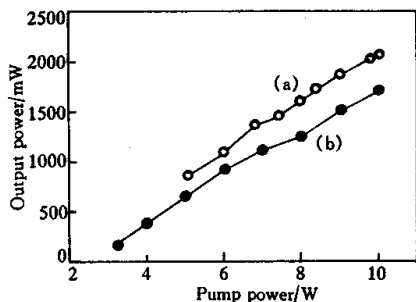


Fig. 2 The mode-locked output power of the Ti:sapphire laser with different pump powers. (a) Without a SESAM. (b) With a SESAM

和吸收镜时,激光器的斜率效率为 25%,在氩离子激光器全线 10W 抽运时锁模输出 2.06 W。加入半导体可饱和吸收镜后,激光器的斜率效率有所降低,为 22%,但在 10W 抽运时仍旧得到了高达 1.7 W 的锁模输出。随着抽运功率继续提高,半导体可饱和吸收镜处的功率密度过大,使半导体可饱和吸收镜在短时间内烧坏。增加输出耦合器的透过率和 M₃ 的曲率半径,其锁模功率会提高到 2 W 以上。

图 3、图 4 为该激光器在 800 mW 输出时所测得的脉冲自相关曲线和对应的光谱曲线。改变激光器的输出功率对这两项指标的影响很小。由图可知,锁模脉冲的宽度小于 16 fs(假设脉冲形状是 Sech² 函数),谱宽 42 nm,时间带宽积为 0.33,接近傅里叶变换极限。

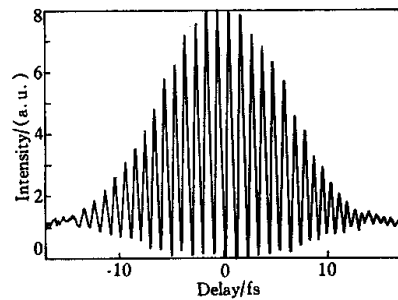


Fig. 3 The interferometric autocorrelation trace of the Ti:sapphire laser with a SESAM

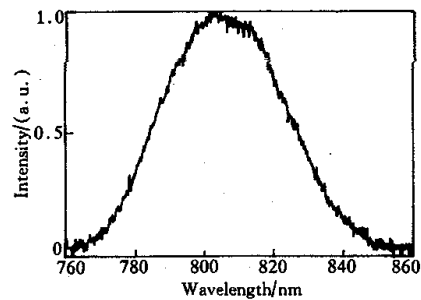


Fig. 4 The spectrum of mode-locked pulses in the Ti:sapphire laser with a SESAM

在激光器谐振腔中加入一个斩波器,可以观测到半导体可饱和吸收镜自启动锁模的启动过程^[5]。图 5 为以数字示波器 (Tektronix TDS-380, 400 MHz) 来记录的一系列图形。振荡的脉冲波形 (实线) 为快速光电二极管 (响应时间为皮秒量级) 接收的锁模序列。由于数字示波器的采样问题 (采样数据点仅为 1 k, 采样间隔远大于实际的锁模脉冲间隔), 所以图形中的脉冲间隔并不代表实际锁模脉冲间隔,但该曲线仍旧可以作为判断激光器是否工作

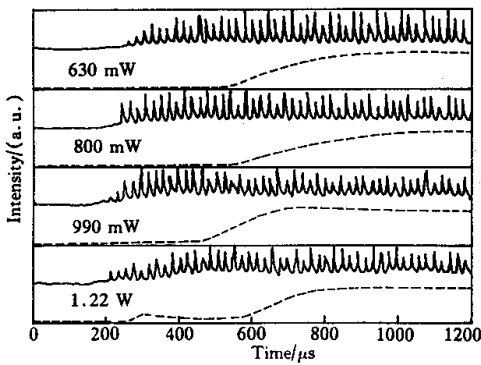


Fig. 5 The process of self-starting in the Ti:sapphire laser with different output powers

于锁模状态的依据。图中较为平滑的曲线(虚线)是钛宝石输出光抽运一块 BBO 晶体所产生的二次谐波,用光电倍增管接收(北京滨松 931A 阳极脉冲上升时间 2.6 ns)。示波器以斩波器输出的矩形脉冲触发。为了不增加额外的时间延迟,触发、二次谐波以及锁模序列信号均采用相同的传输线。从二次谐波的强度可以探知钛宝石激光器的锁模状态,因为只有锁模于飞秒量级其二次谐波才会较强,于是可以测得激光器从连续光到飞秒锁模的中间过程。从图中可以看出,在不同输出功率下,激光器从开始振荡到出现皮秒锁模脉冲的时间随着输出功率的升高而减小(图中无法确定激光器开始振荡的时间,但在同一触发电平下,锁模序列信号和二次谐波信号在时间轴上的相对位置是具有可比性的)。从锁模出现到飞秒锁模出现的时间间隔变化不大,约为 $250 \mu\text{s} \sim 300 \mu\text{s}$ 。而飞秒脉冲从开始出现到稳定的时间间隔的大致趋势是随着输出功率的增加而减小,

二次谐波曲线的上升速度加快,但从图中看出其有轻微的起伏。此外,在高功率下,二次谐波曲线在开始锁模的几十微秒后有一个小的升高,此时的脉冲宽度应为几百飞秒量级,这种脉冲能够持续 $250 \mu\text{s}$ 左右,并且它的出现稍稍延缓了克尔透镜锁模脉冲出现的时间。

结论 总之,我们首次报道了一种新型的高功率自启动飞秒钛宝石自锁模激光器,其平均输出功率可高达 1.7 W,脉冲宽度小于 16 fs。同时对其启动锁模的动力学过程进行了实验研究。相信通过一系列的改进措施,还可以进一步提高该激光器的平均输出功率和压缩脉冲宽度。这种飞秒激光光源的高功率、自启动、良好的稳定性和较窄的脉宽将具有非常广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Brovelli L R, Jung I D, Kopf D *et al.*. Self-starting soliton mode-locked Ti:sapphire laser using a thin semiconductor saturable absorber. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(4):287~288
- [2] Jung I D, Kartner F X, Matuschek N *et al.*. Self-starting 6.5-fs pulses from a Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):1009~1011
- [3] Zhang Zhigang, Torizuka K, Itatani T *et al.*. Broadband semiconductor saturable-absorber mirror for a self-starting mode-locked Cr:forsterite laser. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18):1465~1467
- [4] 柴路,王清月,张志刚等.采用半导体可饱和吸收体镜(SESAM)的自启动自锁模掺钛蓝宝石激光器. *光学学报*, 2000, **20**(3):431~432
- [5] Sarukura N, Ishida Y. Pulse evolution dynamics of a femtosecond passively mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1):61~63

High-Average-Power Self-Mode-Locked Ti:Sapphire Laser Self-Started by a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Sun Jinghua Zhang Ruobing Wang Qingyue Zhang Zhigang Chai Lu
Pang Dongqing Dai Jianming

(School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)
(Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory, Chinese Ministry of Education, Tianjin 300072)

(Received 27 March 2000; revised 10 July 2000)

Abstract: A novel high-power self-starting mode-locked Ti:sapphire laser with a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) as self-starting element is demonstrated. Its sloping efficiency is 22%, average power as high as 1.7 W and pulse width shorter than 16 fs. The starting dynamical process of the laser has been studied. This kind of laser will have a wide applications.

Key words: high power femtosecond laser; self-starting; semiconductor saturable absorber mirror