

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0169-03

# 采用半导体饱和吸收反射镜的低阈值自启动飞秒掺钛蓝宝石激光器

令维军, 魏志义\*, 孙敬华, 王兆华

(中国科学院物理所光物理重点实验室, 北京 100080)

**摘要** 报道了采用紧聚焦的谐振腔设计并结合半导体可饱和吸收反射镜所研制的低阈值自启动克尔透镜掺钛蓝宝石激光器。在采用透过率为3%和12%输出耦合镜的情况下, 分别获得了阈值低至390 mW和600 mW的稳定锁模脉冲输出。结果表明: 对于12%的输出耦合, 在1.2 W抽运时能够产生17 fs的最短脉宽, 对应的光谱宽度为47 nm, 输出平均功率为114 mW。

**关键词** 掺钛蓝宝石激光器; 飞秒脉冲; 低阈值; 半导体饱和吸收反射镜

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

## Self-Starting Femtosecond Ti:Sapphire Laser with Low-Threshold Pump

LING Wei-jun, WEI Zhi-yi, SUN Jing-hua, WANG Zhaohua

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A low-threshold self-starting Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser was demonstrated by use of a tight focusing cavity design and a semiconductor saturable-absorber mirror (SESAM). With a 3% and a 12% output couplers, mode-locking thresholds as low as 390 mW and 600 mW were achieved, respectively. Stable femtosecond laser pulses with average power of 114 mW were generated for pump power at 1.2 W, which correspond to a typical duration of 17 fs and bandwidth of 47 nm.

**Key words** Ti:sapphire laser; femtosecond pulse; low threshold; SESAM

### 1 引言

自从 D. E. Spence 等<sup>[1]</sup>利用掺钛蓝宝石激光实现克尔透镜锁模以来, 经过多年的发展飞秒激光已成为目前人们开展科学研究最主要的工具之一。但是, 由于飞秒钛宝石激光器昂贵的价格, 极大地限制了其进一步的推广和应用。事实上, 在许多飞秒激光的应用中, 锁模输出功率并不是关键的因素, 比如抽运-探针实验和作为再生结构的啁啾脉冲放大系统的种子脉冲, 往往仅需要数十毫瓦的平均功率。因此, 发展低抽运功率的飞秒钛宝石激光器, 是飞秒激光应用感兴趣的研究内容。

由于低阈值的飞秒钛宝石激光器能够极大地减小飞秒激光的成本, 迄今国际上已有多个小组进行过这类工作的研究<sup>[2-4]</sup>。在现有的低阈值飞秒钛宝石激光器的研究报道中, 所用凹面聚焦镜的曲率半径多为 75 mm, 虽然其有利于锁模的获得, 但在采用较高透过率的输出镜时, 比如 12% 时, 其阈值已大于

1.5 W<sup>[3]</sup>。本文报道了通过引入半导体可饱和吸收反射镜 (SESAM) 作为锁模启动元件<sup>[5]</sup>, 并结合改进的紧聚焦腔设计所实现的低阈值自启动掺钛蓝宝石激光器。获得锁模阈值功率低于 1 W 的自启动飞秒钛宝石激光的结果。

### 2 实验装置及操作

本谐振腔设计类似于以往的四镜腔标准设计。图 1 所示为实验光路图, 其由传统的“Z”形腔转变

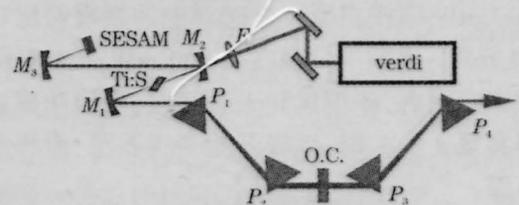


图 1 自启动低阈值掺钛蓝宝石激光器实验装置图  
Fig.1 Schematic diagram of the low-threshold self-starting femtosecond Ti:sapphire laser

基金项目: 国家自然科学基金(60225005 和 10227401)及国家重点基础研究专项经费(G1999075202)资助课题。

作者简介: 令维军(1968-), 男, 中国科学院物理研究所博士研究生, 主要从事全固态飞秒激光器及放大技术的研究。

E-mail: wjling@aphy.iphy.ac.cn.

\*通信联系人。E-mail: wzhy@aphy.iphy.ac.cn

而来,非棱镜的一端由曲率半径为 50 mm 的凹面全反镜  $M_3$  和 SESAM 组成。抽运源为全固态的倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 绿光激光器(Verdi,美国 Coherent 公司),增益介质为 4.5 mm 长的钛宝石晶体,其吸收系数为  $\alpha=4\text{ cm}^{-1}$ (由中国科学院上海光学精密机械研究所提供)。为了增加钛宝石晶体中的光功率密度,采用一对曲率半径为 50 mm 的双色介质腔镜  $M_1$  和  $M_2$ (CVI)作为聚焦镜,其对 532nm 抽运光的透过率达 95%,对 750~900 nm 波段的振荡光的反射率高达 99.8%,聚焦透镜  $F$  采用 50 mm 的短焦距。在谐振腔的长臂端放置了一对熔石英棱镜( $P_1, P_2$ )用以补偿腔内色散及自相位调制。输出镜 O.C.被置于长臂端。在腔外对等的放置另一对棱镜( $P_3, P_4$ ),用于补偿腔内棱镜对导致的空间色散。为了保证激光在零色散点附近运转,取  $P_1$  和  $P_2$  的间距为 62 cm,整个腔长臂和短臂分别为 104 cm 和 54 cm,对应输出脉冲的重复频率约为 92 MHz。

实验中所用 SESAM 反射带宽大于 100 nm,反射率高达 99%,并在高平均功率自启动钛宝石激光器中获得成功应用<sup>[6]</sup>。为了获得稳定的低阈值自启动锁模运转,将 SESAM 置于凹面镜  $M_3$  焦平面的内侧。首先,采用 3 W 抽运和 12%的输出耦合,仔细调节谐振腔使连续光达到最大,通过调节  $M_1$  和  $M_2$  的间距,使连续激光运转进入外稳区的内侧<sup>[7]</sup>,进而适当改变  $P_1$  和  $P_2$  的插入深度,将会获得稳定的锁模运转。发现使之锁模运转的连续模斑形为“蜘蛛”形,而非标准腔的垂直椭圆形。

### 3 结果及讨论

在 12%的高耦合输出下,连续降低抽运功率并微调各腔镜以弥补功率下降导致的腔镜热形变和钛宝石晶体内热透镜效应的变化,最终获得了低至 600 mW 锁模阈值,此时对应的锁模输出功率为 24 mW。实验中发现从 600 mW 至 4 W 的抽运功率范围内,锁模运转十分稳定,但当功率进一步提高至 4.8 W 时,锁模开始变得不稳,需再重新调节腔。

由于高的输出耦合镜增加了腔的损耗,因此限制了可实现锁模的抽运阈值的进一步降低。为此换用了 3%的输出耦合镜,通过重新优化调节腔后,实验发现产生稳定锁模输出的抽运阈值低达 390 mW,此时对应的输出功率为 18 mW。在这种情况下,稳定锁模范围从 390 mW 到 3.6 W。

与以往的典型结构不同,由于我们设计的这种

紧聚焦腔具有较小的腔模和较短的聚焦深度,所以锁模运转对腔内功率密度和色散点十分敏感。在实验中,当棱镜插入深度比优化脉宽对应的色散更负时,锁模才开始启动。尤其是自调 Q 运转发生时,只有将棱镜插入合适的色散点自调 Q 才会变为锁模运转。在锁模启动以后,将棱镜  $P_2$  慢慢插入接近零色散点以获得优化的脉宽和谱宽。在 12%的输出耦合下,1.2 W 抽运时,用干涉自相关法测得优化棱镜插入量后的最短脉宽为 17 fs (假设脉冲为 sech<sup>2</sup> 形状),对应的光谱宽度为 47 nm,输出平均功率为 114 mW,其对应的时间带宽积为 0.37,接近傅里叶变换极限,图 2 为实验测到的干涉相关曲线和对应的光谱曲线。

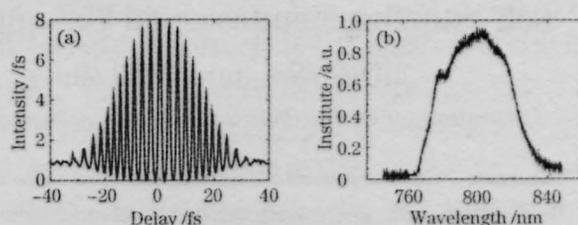


图 2 在 1.2 W 抽运功率下,飞秒自相关曲线(a)和相应的光谱曲线(b)

Fig.2 Interferometric autocorrelation trace (a) and the corresponding spectrum (b) under pump power of 1.2 W

为了了解在低抽运功率下,SESAM 对锁模稳定性的作用和影响,我们进一步比较了具有 SESAM 启动的锁模与无 SESAM 的纯克尔棱镜锁模的特性。发现在低阈值锁模运转时,具有 SESAM 的克尔透镜锁模运转要比单纯的克尔棱镜锁模稳定,尽管 SESAM 的引入同时带来了附加的损耗,但实验中并没有观察阈值的明显提高,这可能是由于 SESAM 放宽了对锁模抽运功率的限制,从而抵消了损耗可能引起的抽运功率的提高。另外还进一步发现,纯克尔棱镜锁模对应的锁模范围很小,如在 12%的输出镜下可实现锁模的抽运功率范围为 605mW~2.1W,而采用 SESAM 后的锁模抽运功率范围扩展至 600mW~4.8W。

### 4 结 论

通过特殊的紧聚焦腔设计并结合 SESAM,成功地实现了一台自启动的低阈值掺钛蓝宝石激光器。相对于以前的研究报道,由于采用了 50 mm 曲率半径的聚焦镜,从而极大地提高了增益介质内的功率密度,这样在较小的抽运功率就可获得极强的克尔效应,并使之实现锁模运转。在 12%的高耦合输

出下,获得抽运锁模阈值低至 600 mW,使之兼具高输出与低阈值的优点。在 1.2 W 的抽运功率下,获得 17 fs 的最窄的脉宽,所对应的输出功率为 114 mW。换用 3% 的输出耦合镜后,获得的抽运阈值为 390 mW。在两种输出耦合情况下,锁模的抽运范围均大大宽于以前的报道,极大地降低了锁模对抽运光功率的限制。

致谢:感谢张杰教授的有益讨论。感谢天津大学张志刚教授、日本产业综合技术研究所的小林洋平博士和鸟冢健二博士在 SESAM 制作中给予的支持和帮助,感谢中国科学院上海光机所徐军研究员和邓佩珍研究员为本研究提供了优质的钛宝石晶体。

### 参 考 文 献

- 1 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fs pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1):42-44
- 2 Q. Y. Wang, J. M. Dai, W. L. Zhang *et al.*. 15-fs self-mode-locked Ti:sapphire laser with low pump power[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(12):1057-1059  
王清月,戴建明,张伟力等. 15 fs 低功率抽运的自锁模掺钛蓝宝石激光器[J]. *中国激光*, **A24**(12):1057-1059
- 3 K. Read, F. Blonigen, N. Riccelli. Low-threshold operation of an ultrashort-pulse mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7):489-491
- 4 A. M. Kowalevich, Jr., T. R. Schibli, F. X. Kärtner. Ultralow-threshold kerr-lens mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22):2037-2039
- 5 Z. Zhang, T. Nakagawa, H. Takada. Low-loss broadband semiconductor saturable absorber mirror for mode-locked Ti:sapphire lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**:171-175
- 6 J. H. Sun, R. B. Zhang, Q. Y. Wang. High-Average-power self-starting mode-locked Ti:sapphire laser with a broadband semiconductor saturable-absorber mirror[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(21):3539-3541
- 7 M. S. Pshenichnikov, W. P. de Boeij, D.A. Wiersma. Generation of 13-fs, 5-MW pulses from a cavity-dumped Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8): 572-574