

低阈值掺钛蓝宝石激光器实验研究^{*}

令维军 魏志义[†] 孙敬华 王兆华 田金荣 贾玉磊 王 鹏 韩海年

(中国科学院物理研究所光物理重点实验室 北京 100080)

(2004 年 11 月 5 日收到, 2005 年 1 月 26 日收到修改稿)

结合特殊的谐振腔设计和半导体可饱和吸收镜, 建成了一台低阈值的自启动掺钛宝石激光器. 分别用 3% 和 12% 的输出耦合镜, 获得了阈值低至 390mW 和 600mW 的稳定锁模脉冲输出. 采用 12% 输出耦合镜, 在 1.2W 抽运时, 输出平均功率为 114mW, 对应的典型脉宽为 17fs, 谱宽为 47nm. 相对于以往的低阈值克尔透镜锁模激光器, 锁模工作的范围区域加宽, 减小了操作难度, 提高了稳定性.

关键词: 低阈值, 半导体可饱和吸收镜, 克尔透镜锁模, 掺钛蓝宝石激光器

PACC: 4280W, 4260D

1. 引言

随着超快激光技术的快速发展, 克尔透镜锁模(KLM)掺钛蓝宝石激光器已成为标准的飞秒光源, 在频标计量学, 高速光通讯, 生物医学成像及时间分辨光谱学等诸多方面已取得了广泛的应用^[1]. 特别是结合啁啾脉冲放大技术(CPA), 人们已能在普通实验室规模的光学平台上获得高至 10^{21} W/cm² 的光功率密度^[2]. 但是, 由于飞秒钛宝石激光器昂贵的价格, 极大地限制其进一步应用. 在通常情况下, 典型的 KLM 钛宝石激光器在 5W 的抽运功率下, 可输出平均功率约 500mW 的锁模脉冲. 目前这种普遍使用的 5W 抽运源是采用二极管抽运的全固化倍频的 Nd:YVO₄ 激光器, 在掺钛蓝宝石飞秒激光系统中占据了绝大部分的成本. 事实上, 在许多应用中飞秒激光的输出功率并不是关键的因素, 比如作为再生结构的啁啾脉冲放大系统的种子脉冲, 其往往仅需要数十毫瓦的种子. 因此, 发展低抽运功率要求的飞秒钛宝石激光器, 是许多飞秒激光应用研究感兴趣的内容.

低功率抽运的飞秒钛宝石激光器可极大地降低整体器件的成本, 比如采用 1W 的抽运源, 可使飞秒激光器的价格减少到原来的 1/5. 基于这一原因, 迄

今国际上已有多个小组进行过低阈值飞秒钛宝石激光器的实验研究^[3-7]. 最近, Kowalevich 等采用延长的谐振腔提高单脉冲能量及利用剩余抽运光二次双向抽运等技术, 用 1% 的输出耦合镜, 获得了抽运阈值低至 156 mW 的锁模运转^[6]. 一般来说, 在低功率抽运时, 启动和维持锁模运转将变得更加困难, 并明显影响锁模的长期稳定性. 本文在深入进行了 KLM 低阈值理论研究的基础之上^[8], 通过引入半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[9]作为锁模启动元件, 并结合改进的腔型设计实现的低阈值自启动 KLM 钛宝石激光器. 在已报道的低阈值飞秒钛宝石激光器中, 所用的折叠镜曲率半径均为 75mm, 这种腔有利于较低的输出耦合, 但在较高的输出耦合下, 如在 OC = 12% 时, 其阈值已大于 1.5W^[5]. 不同于以往的设计, 我们采用曲率半径为 50mm 的紧聚焦折叠镜, 使振荡光在钛宝石晶体中的光斑更小, 从而保证了在较低的抽运功率下就可获得足够强的克尔效应, 以降低启动锁模所需要的抽运功率. 此外由于 SESAM 的引入加宽了锁模工作的区域范围, 不仅使锁模具有自启动的特性, 而且也提高了锁模运行的稳定性, 极宽的抽运范围方便了对不同输出功率的需要. 据我们所知, 这是具有自启动特性的阈值低于 1W 的飞秒钛宝石激光结果. 这为降低飞秒钛宝石激光的成本, 减小操作难度, 提高稳定性提供了一条实用的技术途径.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60225005, 10227401 和 60490280), 国家重点基础研究专项经费(批准号: G1999075202)资助的课题.

[†] E-mail: wzhy@aphy.iphy.ac.cn

2. 实验装置及运行

我们的谐振腔设计类似于以往的四镜腔设计，图 1 为实验结构图。它是由传统的 Z 形腔转变而来，只是将非棱镜端的平面全反镜用一短焦距的凹面全反镜和 SESAM 的组合来代替。抽运源采用全固态倍频的 Nd:YVO₄ 绿光激光器 (Verdi V5, Coherent Inc)，按照预先设计的腔型，算得最低阈值时的增益介质长度约在 4—5mm 之间，我们选用 4.5mm 长的钛宝石晶体，其吸收系数为 $\alpha = 4\text{cm}^{-1}$ (由上海光机所提供)。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 50mm 的双色介质腔镜 M_1 和 M_2 (CVI) 作为聚焦镜，其对 532nm 抽运光的透过率约为 95%，在 750—900nm 宽带范围内的反射率为 99.8%。抽运镜 F 采用焦距为 50mm 的短焦透镜。为了实现自启动锁模运转，在 SESAM 前插入凹面折叠反射镜 M_3 ，其曲率半径为 50mm，通过调节 M_3 和 SESAM 间的距离，可改变入射到 SESAM 上的光功率密度，使之达到饱和而启动锁模。在长臂端，放置一对熔石英棱镜 (P_1, P_2) 用以补偿腔内色散及自相位调制。输出镜被置于长臂端。在腔外对等的放置另一对棱镜 (P_3, P_4) 主要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，通过计算我们取 P_1 和 P_2 的间距为 62cm，整个腔长臂和短臂分别为 104cm 和 54cm，对应输出脉冲的重复率为 92MHz。

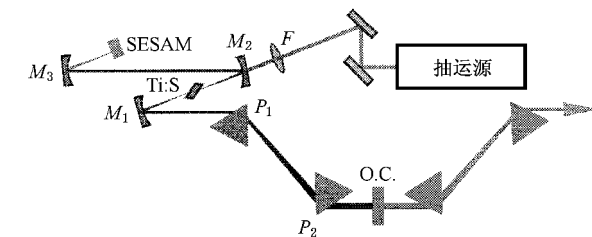


图 1 自启动低阈值掺钛蓝宝石激光器实验装置

所用 SESAM 的反射带宽约为 200nm，宽带范围内的反射率为 99.8%，并已经成功地应用于高平均功率自启动 KLM 钛宝石激光器中^[10]。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 焦平面内侧。首先，采用 3W 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^[11]，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。我们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变形和钛宝石晶体热透镜效应的变化，最终获得锁模阈值低至 600mW，对应锁模输出的功率为 24mW。锁模输出功率和抽运功率的关系如图 2 所示，图中省去了中间的数据，因为我们关注的是锁模范围两端的情况。在抽运功率为 4W 时，锁模运转十分稳定，但当功率进一步提高至 4.8W 时，锁模开始变得不稳，需再重新调控。从图可看到，稳定锁模的抽运范围从 0.6W 到 4.8W，如此宽的锁模范围可满足对不同功率的需要。

高的输出耦合会增加腔的损耗，为了进一步降低阈值，我们改用 3% 的输出耦合镜，重新调节腔后，锁模阈值低至 390mW，对应的输出功率为 18mW。在这种情况下，稳定锁模范围从 390mW 到 3.6W，这一结果明显优于以前的报道^[5]。

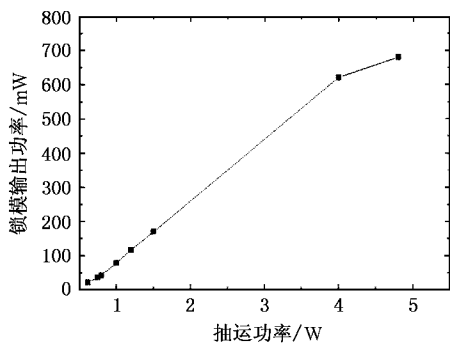


图 2 锁模输出功率与抽运功率的关系

与以往的典型设计不同，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。尤其是阈值附近自调 Q 运转发生时，只有将棱镜插入合适的色散点自调 Q 才会变为稳定的自锁模运转。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，1.2W 抽运时，锁模启动后的输出脉宽为 30fs，对应的谱宽为 35nm，通过改变棱镜插入优化色

散后,获得典型脉宽为 17fs,谱宽为 47nm,输出平均功率为 114mW.此时,对应的时谱积为 0.37(假设脉冲为 sech^2 形状).图 3 显示了典型的脉宽和谱宽.

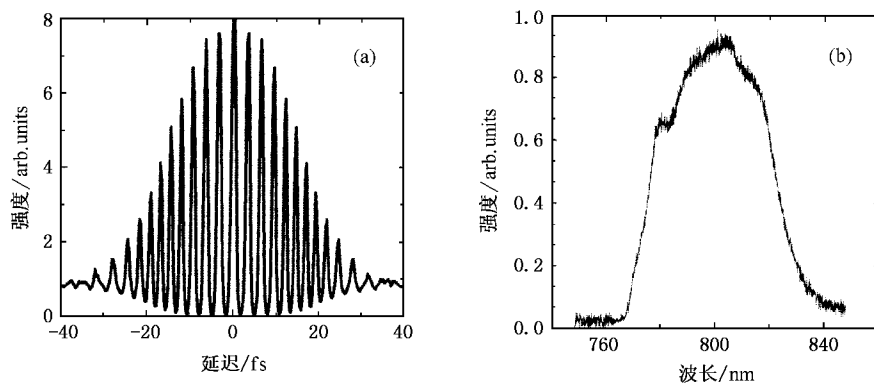


图 3 在 1.2W 抽运功率下,飞秒自相关曲线(左)和相应的光谱曲线

4. 结 论

综上所述,通过特殊的紧聚焦腔设计并结合 SESAM,我们成功实现一台低阈值的自启动 KLM 钛宝石激光器.相对于以前的研究,我们用曲率半径为 50mm 的折叠镜,这种谐振腔进一步地提高了增益介质内的功率密度,这样在较小的抽运功率下就可获得很强的克尔效应,并使之实现锁模运转.在 12% 的高耦合输出下,获得锁模阈值低至 600mW 的结果,使之兼具有高输出与低阈值的优点.在 1.2W 的抽运功率下,获得 17fs 的最窄的脉宽,对应的输

脉宽用物理所光物理实验室自己研制的飞秒自相关仪测量,其信号的产生和测量主要是基于 GaAsP 光电二极管的双光子效应^[12].

输出功率为 114mW.相对于以前的报道,这种腔更利于高输出耦合的锁模运转.换用 3% 的输出耦合镜后,获得的锁模阈值为 390mW.在两种输出耦合情况下,锁模的抽运范围大大宽于以前的报道,有效地降低了锁模对抽运光功率的限制.如果采用啁啾镜并利用剩余抽运光的双向抽运机理,可使脉宽和阈值进一步降低.这种成本低,实用性强,易于操作,稳定性好的飞秒钛宝石激光器可能得到广泛的应用.

感谢张杰教授的有益讨论,以及张志刚教授,小林洋平博士,乌家健二博士在 SESAM 制作中的支持和帮助.上海光机所徐军教授为我们提供了优质的钛宝石晶体,在此谨以致谢.

- [1] Spence D E, Kean P N and Sibbett W 1991 *Opt. Lett.* **16** 42
- [2] Yamakawa K *et al* 2002 *Rev. Laser Eng.* **30** 747
- [3] Wang Q Y *et al* 1997 *Chinese J. Lasers A* **24** 1057 (in Chinese)
[王清月等 1997 中国激光 **24** 1057]
- [4] Zhang R B *et al* 2000 *Acta. Phys. Sin.* **49** 756 (in Chinese) 章若冰等 2000 物理学报 **49** 756]
- [5] Read K *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 489
- [6] Kowalewicz A M *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 2037
- [7] Harrison James *et al* 1991 *Opt. Lett.* **16** 581

- [8] Ling W J, Zheng J A, Jia Y L, Wei Z Y 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 1619 (in Chinese) [令维军、郑家安、贾玉磊、魏志义 2005 物理学报 **54** 1619]
- [9] Zhang Z G *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 1456
- [10] Sun J H *et al* 2001 *Appl. Opt.* **40** 3539
- [11] Pshenichnikov M S, Boeij W P and Wiersma D A 1994 *Opt. Lett.* **19** 572
- [12] Ranka K *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 1344

Experimental study of femtosecond Ti :sapphire laser with low-threshold pump ^{*}

Ling Wei-Jun Wei Zhi-Yi[†] Sun Jing-Hua Wang Zhao-Hua Tian Jin-Rong Jia Yu-Lei Wang Peng Han Hai-Nian

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

(Received 5 November 2004 ; revised manuscript received 26 January 2005)

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 , we achieved mode-locking thresholds as low as 390 and 600mW , respectively . Stable femtosecond laser pulses with average power of 114mW were generated for pump power at 1.2W , which corresponds to a typical duration of 17fs and bandwidth of 47nm . The pump power range for mode-locking covers from 600 mW to 4.8W at a 12% output coupler , and the mode-locking stability is improved .

Keywords : low threshold , SESAM , Kerr-lens mode-locked , Ti :sapphire laser

PACC : 4280W , 4260D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60225005 , 10227401 and 60490280) and the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. G1999075202).

[†] E-mail : wzhy@aphy. iphy. ac. cn