

26 fs 自锁模掺钛蓝宝石激光器*

魏志义 余振新 李荣基** 杨杰 李麒

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广州 510275)

提要 采用 4 mm 长的 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体及一对熔石英色散棱镜, 在腔内未加硬边光阑等元件的情况下, 获得了平均功率 560 W、中心波长 774 nm、宽度 26 fs、谱宽 28 nm 的锁模激光脉冲, 分析了锁模的条件和工作特性。

关键词 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光, 克尔透镜锁模, 飞秒脉冲, 色散补偿

1 引言

利用固体激光介质克尔效应的自锁模技术是目前热门的研究内容之一, 自从 Spence 等人于 1990 年在掺钛蓝宝石 ($\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$) 激光器中首次发现自锁模现象以来^[1], 人们已相继在 $\text{Cr} : \text{LiSAF}$ ^[2], $\text{Cr} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ^[3], $\text{Cr} : \text{LiCAF}$ ^[4], $\text{Cr} : \text{YAG}$ ^[5], $\text{Cr} : \text{LiSCAF}$ ^[6] 等多种可调谐固体激光器中实现了该锁模运转, 并通过二阶色散补偿产生了短于 100 fs 的光脉冲。但是, 进一步实现 50 fs 以下的脉宽结果, 就必须克服腔内三阶以上的高阶色散, 一个行之有效的方法是采用短尺寸、高掺杂浓度的增益介质, 由于晶体生长工艺的限制, 目前短尺寸晶体的锁模研究仍集中在 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 上, 最近 Zhou 等人采用 2 mm 的 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 薄片, 直接产生了 8.5 fs 的超短脉冲^[7], 国内天津大学等单位用上海光机所的 4 mm 长 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体^[8], 也得到了 31 fs 的结果。本文报道我们采用 4 mm 长晶体的自锁模实验及所观察到的一些现象, 在 5.6 W 全线 Ar^+ 激光泵浦下, 获得了脉宽小于 26 fs, 功率高于 500 mW 的锁模光脉冲。

2 实验

实验结果如图 1 所示, 系在 20 mm 长晶体自锁模研究的基础上改动而成^[9], 除 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体换用美国 Union Carbide 公司 $\phi 4 \times 4$ mm 的高浓度棒外, 其他元件未作变化, 腔的短臂仍维持在 60 cm, 长臂从原来 70 cm 延伸到 110 cm, 以便于插入石英棱镜组进行色散补偿, 考虑到像散补偿腔的要求, 激光通过凹面镜 M_2, M_3 的折叠角也从原来的 32° 减至 14° , 聚焦透镜的焦距为 10 cm, M_1, M_2, M_3 为中心波长在 790 nm 的全反膜片, M_4 为平面输出镜, 其透过率 $T = 4\%$, 凹面镜 M_2 和 M_3 的曲率半径均为 10 cm, 脉宽测量部分采用非共线的迈克尔逊相关仪, 经

* 广东省自然科学基金及国家攀登计划“飞秒脉冲与超快现象”部分资助项目。

** 香港中文大学物理系。

收稿日期: 1995年2月27日; 收到修改稿日期: 1995年7月5日

倍频的相关信号进入光电倍增管后,直接输入到 X-Y 记录仪进行记录。

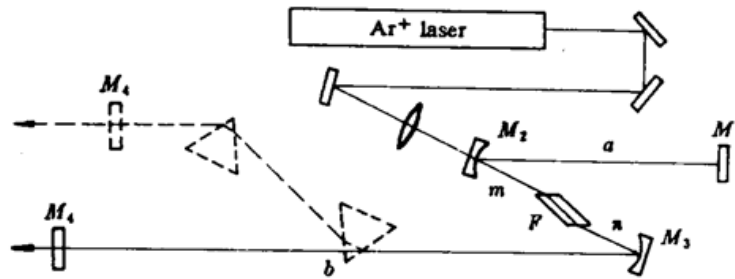


Fig. 1 Schematic diagrams of the self-mode-locked Ti : sapphire laser

3 结果及讨论

3.1 结构的优化

尽管我们采用的 Ti : Al₂O₃ 棒为高掺杂浓度晶体,但与 20 mm 长棒的实验结果相比,在同样的泵浦条件下,其有较强的 Ar⁺ 激光剩余吸收,当泵浦功率为 5.5 W 时,测得实际的吸收仅为 3 W,此外,Ti : Al₂O₃ 激光的连续输出功率也有所下降。我们在优化其功率的过程中发现:

(1) 凹面镜 M_2 (或 M_3) 与晶体表面之间的距离 m (或 n) 可在从约 53 mm 到 45 mm 的长范围内任意设置,在每个设置点上,通过移动另一凹面镜 M_2 (或 M_2),可以得到相应点的最大功率。实验中还发现,对于较小的 $m(n)$,在 n (或 m) 的变化范围内仅存在一个稳区,而当慢慢增大 m 时,改变 n 将开始出现第二个稳区,随着 m 的进一步增大,第二个稳区的宽度及其与第一个稳区的间隔也相应地增大,我们后来的腔型计算很好地解释了这一现象,有关该结果我们将另文介绍。而 m (或 n) 的允许移动量较大的事实也不难从像散补偿折叠角减小后,子午面与弧矢面的共同稳区增大的原理得到理解。在上述的调整

过程中,透过输出镜 M_4 的激光光斑也可从小于 0.5 mm 增大到 4 mm 以上,当输出光斑呈直径约为 2 mm 时的圆形时,对应的激光功率最佳;(2) 对调平面镜 M_1, M_4 时,凹面镜 M_2, M_3 上的 Ti : Al₂O₃ 激光光斑将在 Ar⁺ 激光光斑附近沿水平、上下方向移动,图 2 中以 a 表示 M_2 上 Ar⁺ 激光光斑的位置,实线圆内空间则基本反映着调节 M_1, M_4 时 Ti : Al₂O₃ 光斑的可变动区域,光斑在该区域内的不同点时,实验测得 Ti : Al₂O₃ 激光的连续振荡波长也有所不同,当其位于 c 点,即圆心附近时,连续输出功率最高,这时两激光光斑仅边缘有些重合,在上述凹面镜 $M_2(M_3)$ 到晶体表面之间距离及其两平面镜 M_1, M_4 的调节均最优化的情况下,用 5.6 W 的单模全线 Ar⁺ 激光泵浦时,Ti : Al₂O₃ 激光的连续输出功率大于 1 W。

3.2 锁模的启动

我们通过反复实验发现,调节平面镜 M_1, M_4 使连续 Ti : Al₂O₃ 激光功率最大时,并不能获得自锁模运转,这与 Asaki 等人的报道刚好相反^[9]。当进一步微调该反射镜,使凹面镜 $M_2(M_3)$ 上 Ti : Al₂O₃ 激光的光斑在水平方向上再靠近 Ar⁺ 激光光斑并部分重合,从输出镜 M_4 输出的光斑变为与图 3 所示的形状接近时,才能启动自锁模,这时 Ti : Al₂O₃ 激光的连续输出功率下

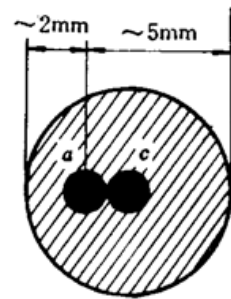


Fig. 2 The movable area for Ti : sapphire laser spots on the curve mirror M_2 , here c is the center of the area, and a is the Argon laser spot

降到 650 mW 左右,约为最佳时的三分之一。锁模的启动可以通过敲击腔镜架、扰动腔内棱镜、

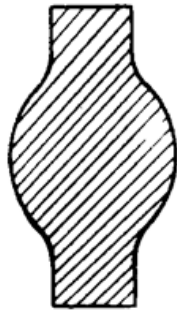


Fig. 3 The shape of the Ti : sapphire laser spot from output coupler M_4 before mode-locking

快速转动平面镜调节旋钮及顺光路推动平面镜等措施而实现。实验表明,在各种启动方式中,推动平面镜能最有效地激发自锁模。与我们以前采用 20 mm 长晶体的情况相比较,短晶体锁模的启动较困难些,目前我们也未从实验上找到可自启动的工作区域。

3.3 锁模输出功率

当 Ti : Al_2O_3 激光从连续运转进入锁模状态后,其输出功率进一步下降为 560 mW,而且输出光斑也从图 3 的形状变为圆形,锁模一旦停止后,功率又将恢复为 650 mW 左右,光斑也复原为图 3 的结构。这一锁模后激光平均功率的下降来自于腔型结构的改变,由于锁模时激光的峰值功率迅速提高,相应地增益介质中的克尔焦距变小,从而导致 Ti : Al_2O_3 激光的增益体积和光束输出特性,即输出光斑形状发生了变化。

3.4 稳定性

实验中我们未采用任何硬边光阑,在不加防尘盖等措施的情况下,一次启动后锁模可以稳定地维持运转 1 h 以上(最好达 80 min)。大量研究表明,空气中的尘埃所引起的扰动是中止锁模最主要的原因^[10],采用防尘盖后,相信锁模稳定性可进一步提高。

3.5 锁模范围

锁模的工作范围与凹面镜 $M_2(M_3)$ 到晶体的距离密切相关,尽管我们在该距离从 45 ~ 53 mm 的长范围内通过移动另一凹面镜实现了 Ti : Al_2O_3 激光的连续振荡,但能锁模的区域却非常小,仅当 m, n 分别为 50 mm 和 52 μm 左右时,才容易获得锁模运转,此时继续微调两凹面镜与晶体间的距离,锁模可被进一步优化。在我们的实验结构下,可锁模的 n 的允许调节范围约为 0.3 mm

3.6 脉宽

合理地补偿激光腔内的二阶及三阶色散,是获得短脉冲最有效的途径。对于短增益介质,由于色散效应较小,因此采用高阶色散较低的熔石英棱镜对,在优化其间距的情况下,可以较

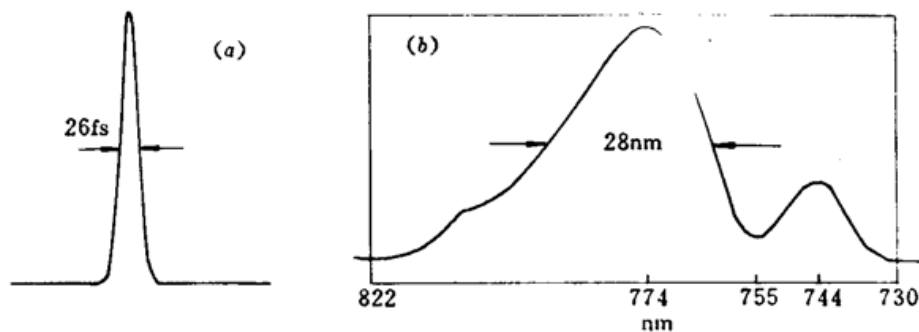


Fig. 4 (a) autocorrelation trace and (b) spectrum of mode-locking. The pulse width is 26 fs, assuming sech^2 ; the spectral bandwidth is 28 nm and the central wavelength is 774 nm

为充分地进行色散补偿,从而产生很短的光脉冲。根据 Ti : Al_2O_3 晶体及熔石英的色散参数,实验中我们将两棱镜顶角的距离调节为 53 cm,并使其与光路成布氏角。图 4 (a) 为 X-Y 记录仪记录下的相关曲线之一,测量中步进电机的速度为 0.258 mm/min,记录仪走纸速度为 30

cm/min, 图 4(b) 为对应的光谱曲线, 可以看出, 其不仅在短波方向有一次峰, 而且形状为非对称分布, 由于我们采用的膜片的反射带宽仅在 750 ~ 850 nm 之间, 因此这一现象除了可能伴随有连续光的振荡外^[11], 还与反射镜的带宽有关; 光谱曲线的非对称分布说明, 锁模脉冲不是严格的双曲正割形状, 精确的宽度应该通过光谱曲线的傅氏变换得出。这里我们不妨仍设激光脉冲为 sech^2 形状, 由图 4(a) 相关曲线的半宽长度, 算得其脉宽为 26 fs, 结合光谱曲线主峰 774 nm 的中心波长和 280 nm 的带宽, 相应的 $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0.365$, 未达到 0.314 的转换极限, 进一步考虑到脉冲通过输出镜及相关仪中的展宽, 我们产生的实际脉宽应小于 26 fs。

4 结 论

我们采用 4 mm 长的 Ti : Al₂O₃ 晶体, 在 5.6 W 单模全线 Ar⁺ 激光泵浦下, 结合腔内熔石英棱镜对的色散补偿, 获得了平均功率 560 mW, 宽度 26 fs 的锁模激光脉冲, 实验中我们发现: (1) 在激光连续振荡最佳的情况下, 并不能获得锁模运行, 只有通过调节两平面端镜使 Ti : Al₂O₃ 激光与泵浦光成特定的耦合时, 才有可能实现锁模; (2) 与长增益介质的研究结果相比较, 锁模的启动相对困难, 可见泵浦光与振荡光的耦合作用长度对于锁模的实现有着重要的作用; (3) 无论泵浦功率提高或降低, 腔内引入硬边光阑对锁模并没有明显的帮助, 相反在不采用光阑的情况下, 更能方便容易地调节激光进入锁模状态。

致谢 周建英教授在本工作中提出了许多有益的建议, 李伟良博士在脉冲测量过程中给予了大力协助, 在此谨表衷心感谢。一部分研究由香港大学及理工资助委员会的经费(CUHK No: 76/92F)资助。

参 考 文 献

- 1 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60 fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti : sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, 16(1) : 42
- 2 N. H. Rizvi, P. M. W. French, J. R. Taylor. Generation of 33 fs pulse from a passively mode-locked Cr³⁺ : LiSrAlF₆ laser. *Opt. Lett.*, 1992, 17(22) : 1605
- 3 V. Yanovsky, Y. Pang, F. Wise *et al.*. Generation of 25 fs pulses from a self-mode-locked Cr : forsterite laser with optimized group-delay dispersion. *Opt. Lett.*, 1993, 18(18) : 1541
- 4 P. LiKamWa, B. H. T. Chai, A. Miller. Self-mode-locked Cr³⁺ : LiCaAlF₆ laser. *Opt. Lett.*, 1992, 17(20) : 1438
- 5 P. J. Conlon, Y. P. Tong, P. M. W. French *et al.*. Sub-100 fs Kerr lens mode-locked Cr⁴⁺ : YAG laser. *Electr. Lett.*, 1994, 30(9) : 709
- 6 H. S. Wang, P. LiKamWa, J. L. Lefaucheur *et al.*. CW and self-mode-locking performance of a red pumped Cr³⁺ : LiSr_{0.8}Ca_{0.2}AlF₆ laser. *Opt. Commun.*, 1994, 110(2) : 609
- 7 J. Zhou, G. Taft, C. P. Huang *et al.*. Pulse evolution in a broad-bandwidth Ti : sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(15) : 1149
- 8 张 强, 龔建明, 衷庆华等. 自锁模掺钛蓝宝石激光超短脉冲宽度小于 31 fs. *中国激光*, 1994, A21(12) : 987
- 9 Wei Zhiyi, Lee Wingkee, Wong Saipeng *et al.*. Investigation of self-starting of self-mode-locking Ti : sapphire laser. *J. of Chinese Laser B.*, 1995, 16(1) : 1
- 10 M. T. Asaki, C. P. Huang, D. Darvey *et al.*. Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti : sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1993, 18(12) : 977
- 11 B. Proctor, F. Wise. Generation of 13-fs pulses from a mode-locked Ti : Al₂O₃ laser with reduced third-order dispersion. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(5) : 470

Generation of a 26 fs Self-mode-locked Ti : sapphire Laser

Wei Zhiyi Yu Zhenxin Lee Wingkee* Yang Jie Li Qi

(Ultrafast Laser Spectroscopy Laboratory, Zhongshan University, Guangzhou 510275;

* Physics Department, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong)

Abstract Stable pulses as short as 26 fs with a bandwidth of 28 nm and the wavelength centred at 774 nm are generated from a self-mode-locked Ti : sapphire laser. Neither apertures nor silts are used in the cavity, the average output power of 560 mW is obtained under a 5.6 W TEM₀₀ Ar⁺ laser pumping. The condition and characteristics for mode-locking are also discussed.

Key words Ti : Al₂O₃ laser, self-mode-locking (Kerr-lens mode-locking), femtosecond pulse, dispersion compensation

输出功率大于 700 W 的高功率板状激光器

板条状的激光介质,在宽度和长度方向被闪光灯以面泵浦方式从两面均匀照明,理想情况下,只剩下厚度方向的热梯度。激光束以“之”字形光路在板内按全内反射传输,从而补偿热畸变,改善光束波面,获得高平均功率下的高亮度激光。本文报道三板串接的板状激光器,由一级振荡器和二级放大器组成。研制了高稳定性高功率的激光电源,输出功率大于 30 kW。板状激光器输出功率大于 700 W。在 350 W 时连续运转大于 6 h,输出功率不稳定性±3.1%,两个方向的光束发散角分别是 7.1 mrad 和 7.8 mrad。

这种大功率脉冲激光器具有高重复率、高功率、高亮度和脉宽可调的优点,在激光切割、焊接和热处理等方面具有广泛的应用前景。

(中国科学院上海光机所 激光技术实验室

何慧娟 李永春 顾圣如 钱林兴 赵隆兴)