

37 fs、0.94 μm 钛宝石自锁模激光器的研究*

杨建军 毛艳丽 阮双琛 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 报道了低增益区 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 红外飞秒激光器的连续及自锁模运转情况. 采用四镜折叠像散补偿腔, 对于连续波运转, 泵浦阈值功率为 5.8 W, 其调谐范围为 0.9~0.97 μm . 在腔内加入棱镜对后, 其阈值提高至 8.9 W; 当氩离子全线泵浦功率为 14.5 W 时, 实现了中心波长为 0.944 μm 、脉宽为 37 fs、光谱半宽为 33 nm、平均功率为 80 mW 的自锁模飞秒激光输出.

关键词 钛宝石激光器, 自锁模, 飞秒.

1 引 言

近年来, 随着新型激光晶体的出现及自锁模技术的发展, 固体激光器已逐渐成为飞秒激光技术的主体. 其中钛宝石晶体以其热传导好、荧光光谱宽(660~1100 nm)、上能级寿命长(3.2 μs)等优点而成为固体激光晶体中的佼佼者^[1]. 其荧光光谱线及增益曲线如图 1 所示. 利用钛宝石晶体作为激活介质, 国外已成功地从振荡器直接产生了脉宽为 6.5 fs 的光脉冲^[2]. 国内, 天津大学的王清月教授等人采用自调 Q 加自锁模的方法, 实现了输出脉冲宽度为 4.8 fs 的新突破^[3]. 同时由于该晶体具有高的饱和通量, 使其作为激光放大介质, 目前已实现了峰值功率为几十 TW、脉冲持续时间 < 20 fs 的高强度激光脉冲^[4]. 通常这些钛宝石自锁模激光脉冲的工作波段大都集中在波长约为 800 nm 附近的晶体的高增益区^[5]. 然而在一些实际应用中, 例如红外条纹相机的标定、半导体材料的研究等方面急需用 0.95 μm 的红外飞秒光源. 这就要求进一步去开拓 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 光谱范围并实现短的光脉冲运转. 事实上, 在 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体的低增益区内实现其飞秒激光运转是较为困难的^[6]. 从图 1 中可以看出, 其增益峰值位于 800 nm 附近, 在波长约为 0.95 μm 附近其增益很快下降, 约为峰值处的 1/3. 如此低的增益截面只能通过增加泵浦功率来得到部分补偿, 然而泵浦功率最终要受到晶体破坏阈值的限制. 另外, 随着泵浦功率的提高, 对于系统运转在 750~850 nm 之间时原可以忽略的一些问题在此却显得尤为重要. 例如: 800 nm 处自发辐射的增强、由于晶体温度升高而导致的热透镜现象以及其上能级寿命的减小等. 这些因素最终会造成腔内激光量子效率的降低, 泵浦阈值的提高和输出激光功率的减弱^[7]. 因此, 必须设法抑制其强谱线的振荡, 增强弱谱线在腔内的反射率; 降低晶体吸收泵浦光而产生的热量并控制其为一恒定温度, 方可获

* 国家“攀登计划”基金和中科院“百人计划”资助课题.

收稿日期: 1997-07-10; 收到修改稿日期: 1998-03-02

得激光在低增益区的稳定自锁模运转.

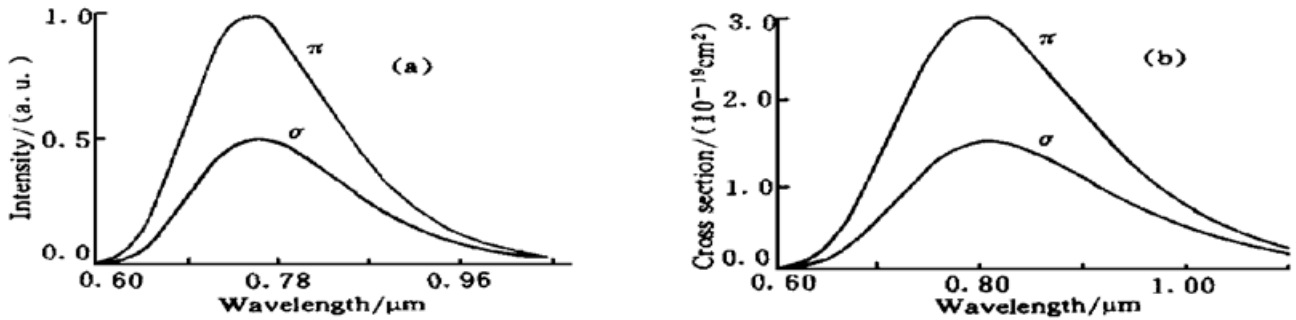


Fig. 1 Fluorescence spectra (a) and calculated gain shape (b) for $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ crystal
本文研究了 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体在低增益区内实现连续波及自锁模脉冲运转的情况.

2 试验装置

低增益区 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 红外自锁模飞秒激光器的试验装置如图 2 所示. 其中钛宝石棒的大小为 $\phi 6 \times 10$ mm(此晶体由上海光学精密机械研究所提供) Ti^{3+} 的质量浓度约为 0.2%, 品质因素 $\text{FOM} = \alpha_{490}/\alpha_{780} > 200$, 其中 α_{490} 和 α_{780} 分别表示在 490 nm 处的主吸收系数和 780 nm 处的红外吸收系数, 棒的两端切成布儒斯特角($60^\circ 19'$); $n = 1.75$ (对激光振荡波长为 $0.95 \mu\text{m}$). 棒用 $100 \mu\text{m}$ 厚的铜皮包裹, 装在铜制的冷却管中, 用一制冷装置将温度冷却至 10°C 左右. 采用氩离子多线泵浦. 图中 M_1 、 M_2 为 $R = 100$ mm 的全反射球面镜, M_3 、 M_5 为全反射平面镜, M_4 是透过率为 1% 的输出镜. 为使激光能在 $0.9 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间高效能运转, 在镀膜设计中要求波长在 $0.9 \mu\text{m}$ 以下的高增益区膜的反射率迅速衰减, 以使其不能形成振荡, 提高波长在 $0.9 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间的输出效率. 由于采用了折叠腔, 又为小曲率半径, 因此, 对振荡光

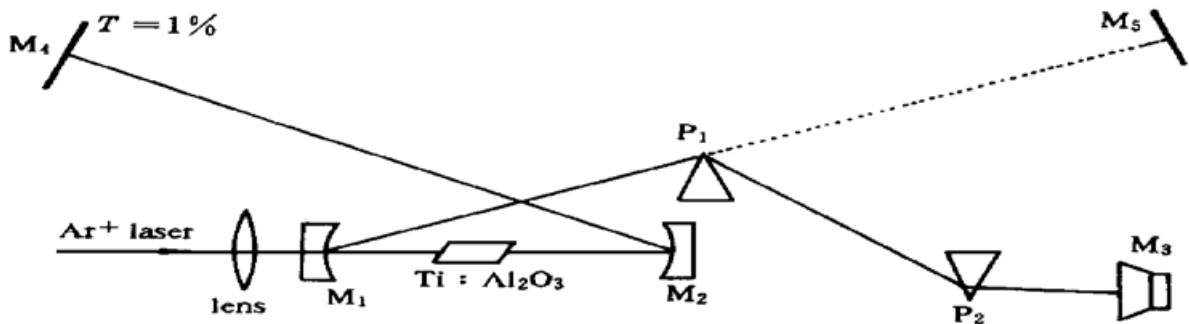


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

束将产生严重的像散. 根据像散补偿原理和下面的公式^[8],

$$2f \sin \theta \tan \theta = \frac{l(n^2 - 1)\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} \quad (1)$$

可以精确地计算出腔的折叠角为 12° . P_1 、 P_2 为 ZF_4 棱镜对, 用于腔内色散补偿, 压缩脉宽. 对于通常的工作于高增益区的 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器, 一般应用振动镜、量子阱、染料等方法来启动和维持锁模. 在本工作中则采用喇叭振动激光腔的一端镜, 获得了低增益区的红外激光飞秒锁模脉冲运转.

3 实验及其结果

3.1 连续波运转

采用氩离子激光多线泵浦, 对于四镜腔结构和采用透过率为 1% 的输出耦合镜, 该激光器在连续运转时的泵浦阈值为 5.8 W. 随着泵浦功率的增加, 输出功率也相应增大. 当泵浦功率为 15.5 W 时, 可获得 200 mW 的连续波输出. 图 3 表示了连续波运转时所测得的输出与输入功率的关系.

3.2 波长调谐特性

在四镜腔内加入单个棱镜, 当氩离子激光器泵浦功率为 13 W 时, 调节输出端镜, 以改变腔内激光运转波长. 使用光栅单色仪和功率计, 测得连续波运转情况下该激光器的波长调谐特性曲线, 如图 4 所示. 其调谐范围为 0.90~ 0.97 μm , 在试验中发现激光的波长调谐特性与泵浦功率也有关系.

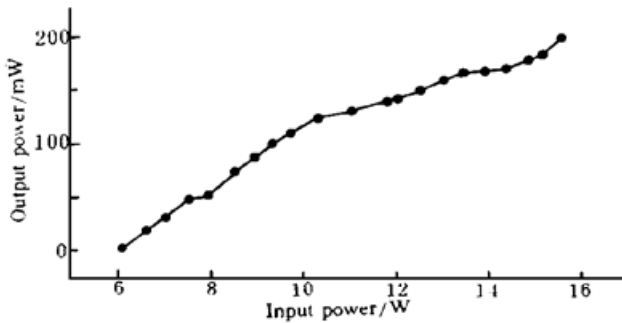


Fig. 3 CW output power vs pump power

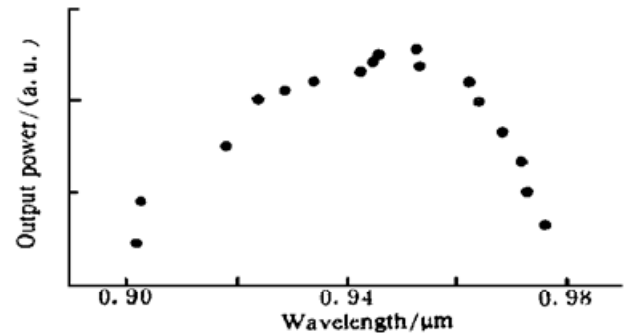


Fig. 4 Tunable range

3.3 锁模运转

为了实现激光器的锁模飞秒运转, 在光腔内插入一棱镜对 P_1 、 P_2 . 适当调节其间距, 使其所产生的负群速弥散量用来补偿腔内增益介质、腔镜和其它光学元件所产生的正的群速弥散量以及振荡光束在晶体内部产生的自相位调制量(SPM), 最终实现压缩腔内激光脉宽. 此时腔长为 1.85 m, 在全反镜情况下, 其泵浦阈值为 7.3 W. 当采用透过率为 1% 的输出镜时, 泵浦阈值提高为 8.9 W. 当泵浦功率为 14.5 W 时, 用探测器观察其输出信号, 调节棱镜插入的深度及凹面镜 M_2 与 $\text{Ti}^{3+} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 棒的距离, 使其拍频信号逐渐增大, 此时振动腔镜即可获得自锁模运转. 为了启动和维持自锁模运转, 将一端镜装在喇叭上使其振动, 获得持续的锁模运转.

用自相关仪测得其光脉冲宽度为 37 fs, 如图 5(a) 所示, 并用光谱分析仪测得其光谱, 其

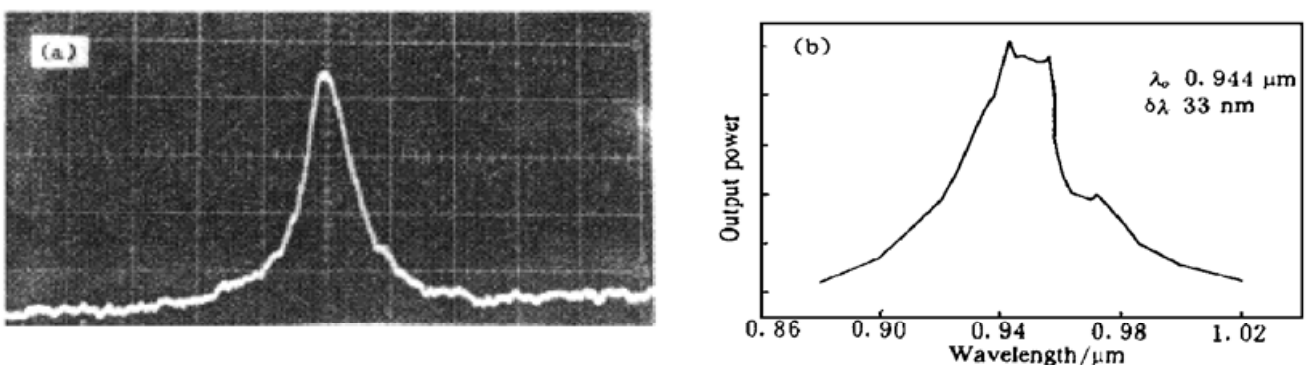


Fig. 5 (a) The real-time scanning intensity autocorrelation trace; (b) The associated spectrum

中心波长为 $0.944 \mu\text{m}$, 光谱半宽为 33 nm , 如图 5(b) 所示. 此时测得的脉冲平均功率为 80 mW . 假设腔内脉冲形状近似为双曲正割型, 则根据上述结果可知, $\Delta t \Delta \nu = 0.41$, 大于傅里叶变化极限值(0.315). 这说明激光腔内的群速弥散补偿还没有达到最佳状态, 进一步优化腔的设计, 可望获得更短的光脉冲.

参 考 文 献

- [1] Moulton P F. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(1) : 125~ 133
- [2] Jung I D, Kartner F X, Matuscher N *et al.*. Self-starting 6.5 fs pulses from KLM Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13) : 1009~ 1011
- [3] 刑歧荣, 张伟力, 王清月. 飞秒激光器的新突破. *光子学报*, 1996, **25**(1) : 96~ 97
- [4] C. P. J. Barty, G. Korn, F. Raksic *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultra-broadband optical pulses. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3) : 219~ 221
- [5] D. E. Spence. 60 fs pulses generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1) : 42~ 44
- [6] B. C. Stuart, S. Herman, M. D. Perry. Chirped-pulse amplification in Ti:sapphire beyond $1 \mu\text{m}$. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **QE-31**(3) : 528~ 538
- [7] A. Sanchez, A. J. Strauss, R. L. Aggarwal. Crystal growth, spectroscopy, and laser characteristics of Ti:Al₂O₃. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(6) : 995~ 1002
- [8] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen. Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1972, **QE-8**(3) : 373~ 379

37 fs Self-Mode-Locked Ti:Sapphire Laser at $0.94 \mu\text{m}$

Yang Jinajun Mao Yanli Ruan Shuangchen Hou Xun

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 10 July 1997; revised 2 March 1998)

Abstract The shortest pulse duration, to our knowledge, from a Ti:sapphire laser in low gain region is reported. Pumped by 8.9 W from the all-line of argon laser, a stable laser pulse train centred at $0.94 \mu\text{m}$, with pulse duration of 37 fs , bandwidth of 33 nm , average power of 80 mW and a tuning range of $0.9 \mu\text{m}$ to $0.976 \mu\text{m}$ have been obtained.

Key words Ti:sapphire laser, self-mode-locking, femto second.