

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

2中国科学院西安光学精密机械研究所 18西安 710068 14.

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 19采用四镜折叠像散补偿腔 18对于连续波运转 18泵浦阈值功率为 5.8 W 18其调谐范围为 0.9~0.97 μm 19在腔内加入棱镜对后 18其阈值提高至 8.9 W 20当氩离子全线泵浦功率为 14.5 W 时 18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 19.

关键词 钛宝石激光器 18. 自锁模 18. 飞秒 19.

1 引 言

近年来 18随着新型激光晶体的出现及自锁模技术的发展 18固体激光器已逐渐成为飞秒激光技术的主体 19其中钛宝石晶体以其热传导好、荧光光谱宽 260~1100 nm 14、上能级寿命长 23.2 μs 14等优点而成为固体激光晶体中的佼佼者^[1] 19其荧光光谱线及增益曲线如图 1 所示 19. 利用钛宝石晶体作为激活介质 18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] 19国内 18天津大学的王清月教授等人采用自调 Q 加自锁模的方法 18实现了输出脉冲宽度为 4.8 fs 的新突破^[3] 19同时由于该晶体具有高的饱和通量 18使其作为激光放大介质 18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] 19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] 19然而在一些实际应用中 18例如红外条纹相机的标定、半导体材料的研究等方面急需 0.95 μm 的红外飞秒光源 19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 19事实上 18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] 19从图 1 中可以看出 18其增益峰值位于 800 nm 附近 18在波长约为 0.95 μm 附近其增益很快下降 18约为峰值处的 1/3 19. 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 18然而泵浦功率最终要受到晶体破坏阈值的限制 19另外 18随着泵浦功率的提高 18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 19例如(3)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 19这些因素最终会造成腔内激光量子效率的降低 18泵浦阈值的提高和输出激光功率的减弱^[7] 19因此 18必须设法抑制其强谱线的振荡 18增强弱谱线在腔内的反射率 20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 18方可获

^{*} 国家 1攀登计划 13基金和中科院 1百人计划 13资助课题 19.

得激光在低增益区的稳定自锁模运转¹⁹.

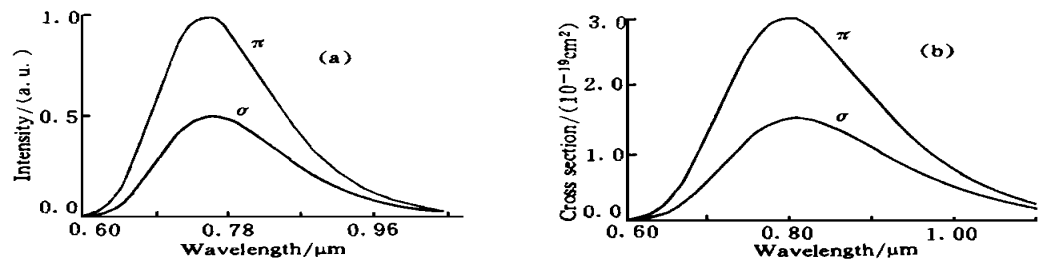


Fig. 1 Fluorescence spectra and calculated gain shape for $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ crystal

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¹⁹.

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¹⁹其中钛宝石棒的大小为 $6 \times 10 \text{ mm}$ 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 $\text{FOM} = \alpha_{60}/\alpha_{80} > 200$ (¹²)其中 α_{60} 和 α_{80} 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¹⁸棒的两端切成布儒斯特角 26.0° ¹⁹ $n_o = 1.75$ 对激光振荡波长为 0.95 μm 棒用 100 μm 厚的铜皮包裹¹⁸装在铜制的冷却管中¹⁸用一制冷装置将温度冷却至 10℃ 左右¹⁹采用氩离子多线泵浦¹⁹图中 M_1 、 M_2 为 $R = 100 \text{ mm}$ 的全反射球面镜¹⁸ M_3 、 M_5 为全反射平面镜¹⁸ M_4 是透过率为 1% 的输出镜¹⁹为使激光能在 0.9~1 μm 之间高效能运转¹⁸在镀膜设计中要求波长在 0.9 μm 以下的高增益区膜的反射率迅速衰减¹⁸以使其不能形成振荡¹⁸提高波长在 0.9~1 μm 之间的输出效率¹⁹由于采用了折叠腔¹⁸又为小曲率半径¹⁸因此¹⁸对振荡光

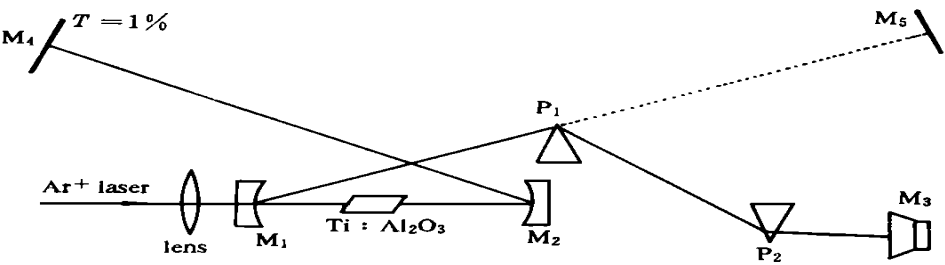


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

束将产生严重的像散¹⁹根据像散补偿原理和下面的公式^[8] ¹⁸.

$$2f \sin \theta \tan \theta = \frac{L}{n^4} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}$$

7(6)

可以精确地计算出腔的折叠角为 ¹² ¹⁹ P_1 、 P_2 为 ZF₄ 棱镜对¹⁸用于腔内色散补偿¹⁸压缩脉宽¹⁹. 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¹⁸一般应用振动镜、量子阱、染料等方法来启动和维持锁模¹⁹在本工作中则采用喇叭振动激光腔的一端镜¹⁸获得了低增益区的红外激光飞秒锁模脉冲运转¹⁹.

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¹⁸对于四镜腔结构和采用透过率为 1% 的输出耦合镜¹⁸该激光器在连续运转时的泵浦阈值为 5.8 W¹⁹随着泵浦功率的增加¹⁸输出功率也相应增大¹⁹当泵浦功率为 15.5 W 时¹⁸可获得 200 mW 的连续波输出¹⁹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¹⁹.

3.2 波长调谐特性

在四镜腔内加入单个棱镜¹⁸当氩离子激光器泵浦功率为 13 W 时¹⁸调节输出端镜¹⁸以改变腔内激光运转波长¹⁹使用光栅单色仪和功率计¹⁸测得连续波运转情况下该激光器的波长调谐特性曲线¹⁸如图 4 所示¹⁹其调谐范围为 0.90~0.97 μm¹⁸在试验中发现激光的波长调谐特性与泵浦功率也有关系¹⁹.

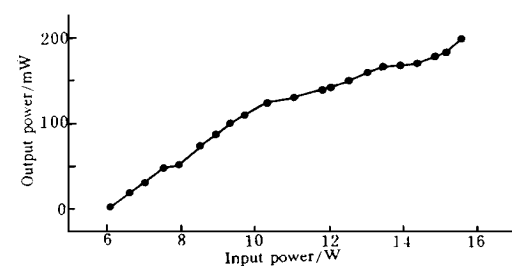


Fig. 3 CW output power vs pump power

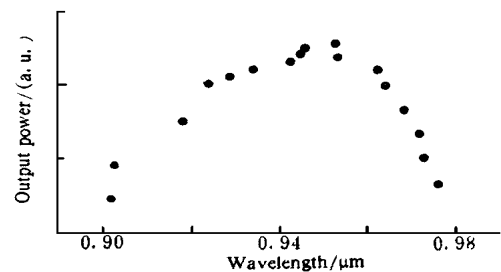
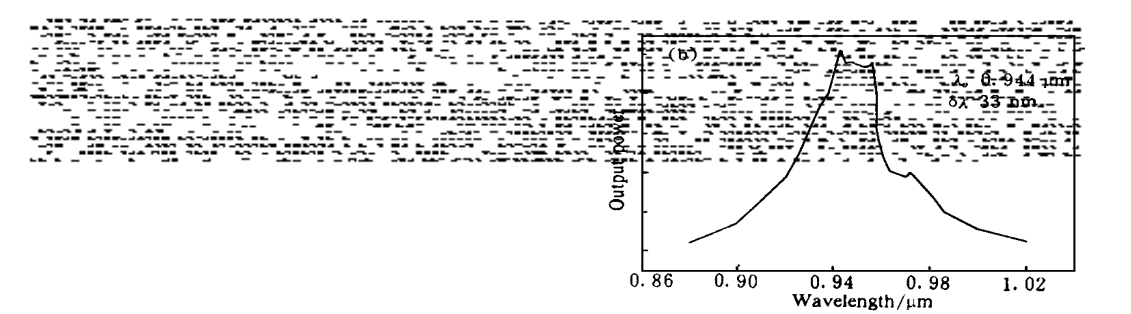


Fig. 4 Tunable range

3.3 锁模运转

为了实现激光器的锁模飞秒运转¹⁸在光腔内插入一棱镜对 P₁、P₂¹⁹适当调节其间距¹⁸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所产生的自相位调制量²³SPM¹⁴⁸最终实现压缩腔内激光脉宽¹⁹此时腔长为 1.85 m¹⁸在全反镜情况下¹⁸其泵浦阈值为 7.3 W¹⁹当采用透过率为 1% 的输出镜时¹⁸泵浦阈值提高为 8.9 W¹⁹当泵浦功率为 14.5 W 时¹⁸用探测器观察其输出信号¹⁸调节棱镜插入的深度及凹面镜 M₂ 与 Ti³⁺ : Al₂O₃ 棒的距离¹⁸使其拍频信号逐渐增大¹⁸此时振动腔镜即可获得自锁模运转¹⁹为了启动和维持自锁模运转¹⁸将一端镜装在喇叭上使其振动¹⁸获得持续的锁模运转¹⁹.

用自相关仪测得其光脉冲宽度为 37 fs¹⁸如图 5 2_a 14 所示¹⁸并用光谱分析仪测得其光谱¹⁸其



中国知网 <https://www.cnki.net> Fig. 5 2_a 14 The real-time scanning intensity autocorrelation trace 20.2_a 14 The associated spectrum

中心波长为 $0.944\ \mu\text{m}$ 光谱半宽为 $33\ \text{nm}$ 如图 5 2, 14 所示 19 此时测得的脉冲平均功率为 $80\ \text{mW}$ 19 假设腔内脉冲形状近似为双曲正割型 18 则根据上述结果可知 $\Delta\lambda/\lambda = 0.41$ (12) 大于傅里叶变化极限值 20.315 149 这说明激光腔内的群速弥散补偿还没有达到最佳状态 18 进一步优化腔的设计 18 可望获得更短的光脉冲 19.

参 考 文 献

- [1] Moulton P F. Spectroscopic and laser characteristics of $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$. *J. Opt. Soc. Am.* 73(6) 1986 1832-14: 125~133
- [2] Jung I D, Kartner F X, Matuscher N *et al.*. Self-starting $6.5\ \text{fs}$ pulses from KLM $\text{Ti}:\text{sapphire}$ laser. *Opt. Lett.* (12) 1997 1822 213-14: 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* 18(1996) 1825 214: 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.* (12) 1996 1821 23-14: 219~221
- [5] D. E. Spence. $60\ \text{fs}$ pulses generation from a self-mode-locked $\text{Ti}:\text{sapphire}$ laser. *Opt. Lett.* (12) 1991 1816 214: 42~44
- [6] B. C. Stuart, S. Herman, M. D. Perry. Chirped-pulse amplification in $\text{Ti}:\text{sapphire}$ beyond $1\ \mu\text{m}$. *IEEE J. Quant. Electron.* (12) 1995 18QE-31 23-14: 528~538
- [7] A. Sanchez, A. J. Strauss, R. L. Aggarwal. Crystal growth, spectroscopy and laser characteristics of $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$. *IEEE J. Quant. Electron.* (12) 1988 18QE-24 23-14: 995~1002
- [8] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen. Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers. *IEEE. J. Quant. Electron.* (12) 1972 18QE-8 23-14: 373~379

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

Yang Jinajun Mao Yanli Ruan Shuangchen Hou Xun

Xi'an Institute of Optics and Precision Machnics (12) *The Chinese Academy of Sciences* (12) *Xi'an* 710068(6)

Received 10 July 1997 20, revised 2 March 1998 14.

Abstract The shortest pulse duration 18 to our knowledge 18 from a $\text{Ti}:\text{sapphire}$ laser in low gain region is reported. Pumped by $8.9\ \text{W}$ from the all-line of argon laser 18 a stable laser pulse train centred at $0.94\ \mu\text{m}$ 18 with pulse duration of $37\ \text{fs}$ 18. bandwidth of $33\ \text{nm}$ 18 average power of $80\ \text{mW}$ and a tuning range of $0.9\ \mu\text{m}$ to $0.976\ \mu\text{m}$ have been obtained.

Key words $\text{Ti}:\text{sapphire}$ laser 18. self-mode-locking 18. femto second.