

# 15 fs 低功率泵浦的自锁模掺钛 蓝宝石激光器 \*

王清月 戴建明 张伟力 梁宏业 章若冰 邢歧荣

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室 天津 300072)

张悦珊

(中国科学院电子所 北京 100080)

**提要** 在掺钛蓝宝石激光器中,采用小曲率半径球面镜组成的谐振腔,得到了自锁模泵浦阈值为 710 mW,最窄脉宽为 15 fs,输出平均功率为 42 mW 的稳定的自锁模运转。

**关键词** 泵浦阈值,自锁模,自聚焦,掺钛蓝宝石激光器

## 1 引 言

自 1991 年第一台飞秒固体锁模激光器问世以来,以掺钛蓝宝石自锁模激光器为代表的飞秒固体激光器在理论和实验上都已有了长足的发展。作为飞秒光源的振荡级,其主要发展方向:一是向窄脉冲宽调谐方面发展,到目前为止,从激光器直接输出的脉冲已可窄至 10 fs 以下<sup>[1,2]</sup>;二是朝全固体化激光器的方向发展,至今已实现了用红光半导体激光器泵浦的 Cr:LiSAF 锁模激光器的全固化<sup>[3,4]</sup>,而对于掺钛蓝宝石自锁模激光器,由于目前还没有合适波长的二极管直接进行泵浦,所以需要加入中间一级的激光器并通过倍频转化为绿光再对掺钛蓝宝石激光器进行泵浦。这样要实现其全固化飞秒运转,对二极管就有很高的要求。因此,有效地降低掺钛蓝宝石自锁模激光器的泵浦阈值<sup>[5]</sup>,对实现其全固化非常关键。

本文在全部采用国产元件的情况下,通过改变腔结构参数,实现了泵浦阈值低于 1 W(通常为 4 W 左右),最窄脉冲宽度为 15 fs 的掺钛蓝宝石激光器的自锁模运转,为实现其全固化创造了更为有利的条件。

## 2 实验研究

### 2.1 低功率泵浦的掺钛蓝宝石激光器的腔结构参数选择及实验装置

在传统的“Z”型像散补偿腔的基础上,改变有关的腔镜参数,得到的腔结构如图 1 所示。将泵镜 L 的直径由原来的 100 mm 左右减小为 60 mm,以减小泵浦光束的束腰来增加在相同

\* 国家攀登计划资助项目,国家教委光电子信息工程开放实验室部分资助项目。

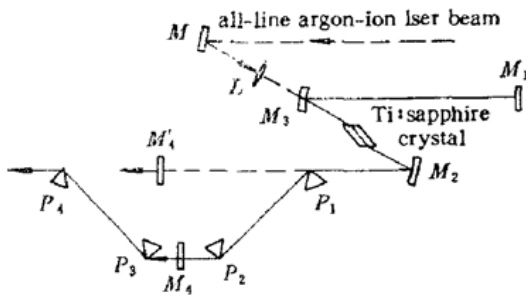


图1 低功率泵浦的 Ti:sapphire 自锁模激光器的腔结构图

Fig. 1 Schematic of the cavity configuration for self-mode-locked Ti:sapphire laser with low pump power

运转所需要的腔内光功率,进而大大减小自锁模的泵浦阈值。

实验中采用的具体参数及实验装置如下(对应图1):掺钛蓝宝石晶体由中国科学院上海光机所提供,两端面以布儒斯特角切割,光轴位于水平面内并与棒轴垂直,通光方向上的长度为5 mm,吸收系数  $\alpha_{400} = 4.0 \text{ cm}^{-1}$  左右。以中国科学院电子所生产的氩离子激光器全线泵浦,泵浦光由焦距为60 mm的透镜L会聚后经双色镜  $M_3$  入射到 Ti:sapphire 晶体,  $M_2, M_3$  为球面反射镜,曲率半径为  $R_2 = R_3 = 75 \text{ mm}$ ,  $M_1, M_4'$  均为平面输出镜,在其中心波长800 nm处的透过率为3.5%左右,  $M_1$  为平面全反镜,用  $P_1$  和  $P_2$  构成的熔石英棱镜对对腔内色散进行补偿,压缩脉宽,棱镜对的间距在实验中根据实际情况而定。总的谐振腔长为1500 mm左右,像散补偿角为  $18^\circ$ 。  $P_3, P_4$  为一对与  $P_1, P_2$  相对应的石英棱镜,作用有两个,其一是克服从输出镜  $M_4$  出射的光的空间色散;其二是为获得最窄脉冲,对输出镜  $M_4$  造成的色散进行补偿。在激光器自锁模运转后,用天津大学自己研制的 Ultra AC-01 型实时相关器(既用来观测8:1干涉相关曲线,又用来观测3:1强度相关曲线)监视激光器的输出脉冲宽度及啁啾情况。

## 2.2 实验结果及分析

### 2.2.1 阈值泵浦功率

首先对激光器的连续光运转情况进行了实验研究。在上述腔参数的条件下,在插入棱镜  $P_1$  之前,得到的连续光泵浦阈值为270 mW。插入棱镜后,泵浦阈值略有上升,为280 mW左右。

为实现自锁模运转,先将泵浦功率加到1.5 W左右,此时的连续光最大功率为120 mW。再细调各腔镜,使激光器更适用于脉冲锁模运转,连续光功率下降为90 mW左右,这时扰动激光器的一个腔镜便可启动自锁模,其平均输出功率为100 mW左右。然后慢慢降低泵浦功率,同时适当微调球面镜  $M_2$ ,以补偿由于泵浦功率的下降而带来的钛宝石晶体热透镜效应的变化。当泵浦功率下降到710 mW时,在示波器上看到的脉冲序列开始出现自调Q现象<sup>[6]</sup>,若继续降低泵浦功率,脉冲序列消失,再扰动任何一个腔镜也无法启动自锁模。所以激光器自锁模的泵浦阈值功率为710 mW左右。

### 2.2.2 泵浦功率对自锁模的影响

实验中发现,在自锁模的泵浦阈值附近,每增加10 mW的泵浦功率可以大大地增强自锁模脉冲序列的稳定性。当泵浦功率上升至750 mW左右时,脉冲序列已非常稳定,其峰值的起伏小于5%,维持时间大于2 h,此时的棱镜  $P_1, P_2$  的间距为65 cm。

泵浦功率下的掺钛蓝宝石晶体中增益区域的粒子反转数密度;相应地,将腔内的两个折叠镜  $M_2, M_3$  的曲率半径由通常的100 mm减小到75 mm,以减小腔内振荡光束在晶体中的束腰大小从而相对增加振荡光在晶体中的光功率密度。这样不仅可以相对提高增益区域的粒子反转数密度来降低连续光运转时的泵浦阈值,而且由于减小了腔内振荡的光束在晶体内的腰斑半径,激光器锁模运转时脉冲在晶体中的峰值功率密度得到增加,相应的自聚焦效应得到大大增强,因此,可以相对减小实现激光器自锁模

为详细了解泵浦功率对脉冲宽度的影响,我们对不同泵浦功率下可得到的激光器输出的最窄脉冲宽度作了系统的实验,图 2 是相应的实验曲线。在实验过程中,每改变一次泵浦功率都要对激光器中有关腔镜作相应的调节,同时改变色散量以得到该泵浦功率下的最窄脉宽。从图中可以看出,在一定的泵浦功率范围内(约 900 mW~2 W),激光器输出的最窄脉宽变化不大。图 3 是在泵浦功率为 1.0 W 左右(棱镜  $P_1, P_2$  间距为 65 cm)时得到的脉冲相干相关曲线及相应的光谱曲线,此时的脉宽为 15 fs,光谱宽度为 47.5 nm,  $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0.334$ ,接近傅里叶变换极限,对应的输出平均功率为 42 mW 左右,该结果也是整个实验中得到的最窄脉冲宽度。如果继续增加泵浦功率,脉冲的光谱覆盖范围会相应地展宽(有时会出现光脉冲分裂现象<sup>[7]</sup>),但无论如何改变色散量(即改变棱镜间距),脉冲宽度无法压窄,反而会相对增加,直到自锁模最后猝灭。其原因是,随着泵浦功率的提高,腔内的功率不断增加,自锁模脉冲在钛宝石晶体内的峰值功率密度随之增加,由此引起较强的非线性自相位调制导致了脉冲的非线性啁啾,无法用腔内的色散棱镜进行补偿,所以脉冲宽度反而会加宽。

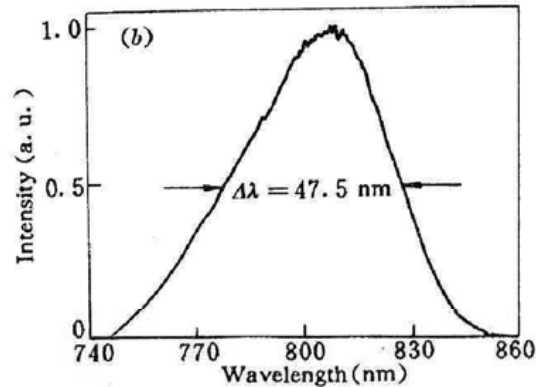
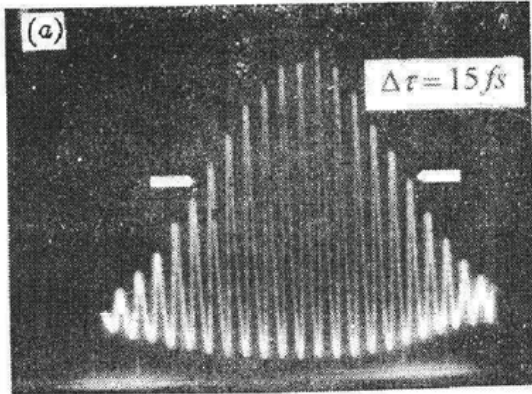


图 3 脉冲序列的干涉相关曲线 (a) 及相应的光谱曲线 (b)

Fig. 3 Interferometric autocorrelation (a) and associated spectrum (b) of the pulse train

在泵浦功率为 1.5 W 左右时,如果将输出镜的输出比适当地提高,可以相对减小腔内功率密度,从而减小非线性啁啾。因此有可能得到更窄的脉宽,该工作正在进行之中。

致谢 本实验所用的高质量掺钛蓝宝石晶体是由中国科学院上海光机所邓佩珍教授领导的研究室提供的,特此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 J. D. Harvey, J. M. Dudley, P. F. Curley *et al.*. Coherent effects in a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(13): 972~974
- 2 Lin Xu, C. Spielmann, F. Krausz *et al.*. Ultrabroadband ring oscillator for sub-10-fs pulse. *Opt. Lett.*, 1996, 21(16): 1259~1261
- 3 J. R. Lincoln, M. J. P. Dymott, A. I. Ferguson. Femtosecond pulses from an all-solid-state Kerr-lens mode-

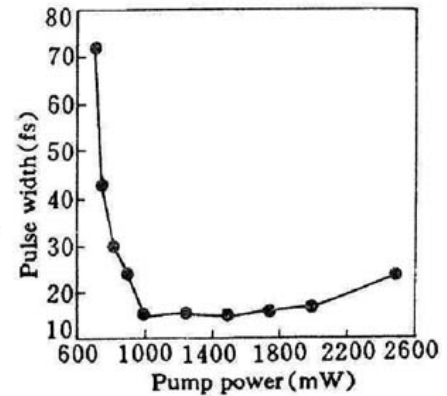


图 2 在输出比为 3.5% 的情况下,不同泵浦功率所对应的最窄脉宽的实验曲线

Fig. 2 Variation of the shortest pulse-width with pump power for the 3.5% output coupler

- locked Cr:LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(16): 1210~1212
- 4 Michael J. P. Dymott, Allister I. Ferguson. Self-mode-locked diode-pumped Cr:LiSAF laser producing 34-fs pulses at 42-mW average power. *Opt. Lett.*, 1995, 20(10): 1157~1159
- 5 K. Read, F. Blonigen, N. Riccelli *et al.*. Low-threshold operation of an ultrashort-pulse mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1996, 21(7): 489~491
- 6 Qirong Xing, Weili Zhang, K. M. Yoo. Self-Q switched self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Commun.* 1995, 119: 113~116
- 7 Chingyue Wang, Weili Zhang, K. F. Lee *et al.*. Pulse splitting in a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Commun.*, 1997, 137: 89~92

## 15 fs-pulse Generation from a Self-mode-locked Ti:sapphire Laser with Low Pump Power

Wang Qingyue Dai Jianming Zhang Weili

Liang Hongye Zhang Ruobing Xing Qirong

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

Zhang Yueshan

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

**Abstract** A low-pump-power self-mode-locked Ti:sapphire laser is demonstrated with a tight focusing geometry, and results as the shortest pulses of 15 fs and an average output power of 42 mW at a threshold pump power of 710 mW are obtained.

**Key words** pump threshold, self-mode-locked, self-focus, Ti:sapphire laser

\*\*\*\*\*

## LD 泵浦微片 Yb:YAG 晶体产生 300 mW 1.03 $\mu\text{m}$ 的脉冲激光

我们用提拉法(CZ)沿(111)方向生长了掺杂浓度高达 20 at.-%的 Yb:YAG 晶体,获得了无色心、低位错密度、高度完整性的高质量单晶。在激光实验中采用波长为 940 nm 左右的 InGaAs 半导体激光泵浦。激光腔为平-平折迭腔,腔长为 73 cm,折迭镜为凹面镜。泵浦光经过一个焦距为 3 cm 的透镜和一个平面反射镜,聚焦在尺寸为 8×8×1 (mm)的 Yb:YAG 晶体微片上。反射镜镀有 940 nm 的增透膜(HT)和 1030 nm 的高反膜(HR),在微片的输入面镀 1030 nm 和 940 nm 的增透膜(HT);另一面镀 1030 nm 和 940 nm 的高反膜(HR)。凹面镜的曲率半径为 30 cm,镀 1030 nm 和 940 nm 的高反膜(HR),输出耦合镜的反射率为 95%。当输入功率为 1.2 W 时,得到的脉冲激光输出为 300 mW,斜率效率为 30%,重复率为 14 Hz。

下一步我们将进行调 Q 和 CW 激光实验,有关工作正在进行中。

此项工作得到国家高技术 863-416 项目资助。

(中国科学院上海光机所 杨培志 徐 军 乔景文 邓佩珍)  
(美国密歇根大学 马国彬 刘新斌 1997 年 10 月 23 日收稿)