

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0053-03

# 宽频带亚 10 fs 钛宝石激光器的特性研究\*

廖睿 文锦辉 刘智刚 邓莉 赖天树 林位株

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室/物理系, 广州 510275)

**提要** 依据克尔透镜锁模(KLM)激光器的“厚透镜”模型,选择钛宝石激光器工作在下稳区的上边界,采用抽运光腰略大于腔模光腰,使激光介质内腔模光斑会随腔内功率增大而增大的软光阑方式实现增益调制锁模,减弱了增益饱和效应和频率模尺寸效应的影响,获得了 144 nm 的宽带频谱飞秒激光,并在 710 nm 附近获得了 8.5 fs 的脉冲输出。

**关键词** Kerr 透镜锁模, 亚 10 飞秒脉冲, 自相位调制

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## Characterization of Sub-10-fs KLM Ti:Sapphire Laser

LIAO Rui WEN Jin-hui LIU Zhi-gang DENG Li LAI Tian-shu LIN Wei-zhu

(The State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy/Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

**Abstract** Base on the “thick-lens” model, the KLM Ti:sapphire laser operation point is selected near the upper edge of the HMS stable region, so that the effects of intracavity gain saturation and frequency dependent mode size are reduced. As a result, the pulse bandwidth broadening is enhanced significantly. Pulses with bandwidth of 144nm have been generated from this laser. As short as 8.5 fs pulses are obtained at wavelength centered at 710 nm.

**Key words** Kerr-lens mode-locking, sub-10 femtosecond, self phase modulation

## 1 引言

在克尔透镜锁模(KLM)钛宝石飞秒激光器中,群速度色散(GDD)和自相位调制(SPM)的相互作用是决定脉冲形状的主要因素。目前,国际上一般采用双啁啾镜结合棱镜对技术来补偿腔内群速度色散特别是三、四阶色散,产生短于 10 fs 的超短脉冲<sup>[1~3]</sup>。实际上,除了群速度色散以外,还有一种效应限制了脉冲频谱的展宽,这往往为人们所忽略。当脉冲通过钛宝石晶体时,克尔效应在脉冲的中央峰值附近最为显著,而自相位调制使脉冲频谱展宽的效应则主要出现在脉冲的前沿和后沿,这些频谱展宽成分的强度通常要比中央频率附近的成分弱,产生的调制幅度较小,从而使得脉冲的各个频谱成分的腔模光斑大小出现差异,称为频率模尺寸效应(Frequency Dependent Mode Size)<sup>[4]</sup>。这时锁模光阑将产生一个频谱滤波器的作用,会在一定程度上阻碍脉冲频谱进一步展宽,

其影响对短于 10 fs 的宽频谱光脉冲会更加明显。本文着重于论述当激光器工作在下稳区的上边界时在激光介质内腔模光斑随功率增大而增大的情况,采用抽运光腰略大于腔模光腰的软光阑方式实现增益调制锁模,可以减弱 FDMS 对带宽的限制作用,获得大于 100 nm 的宽带频谱和亚 10 fs 脉冲输出。

## 2 激光器的腔特性

KLM 钛宝石激光器采用了典型的非对称“X”型四镜双棱镜折叠腔结构,其结构及腔外色散补偿装置如图 1 所示。图中  $M_1, M_2$  是球面反射镜,  $M_3, M_4, M_5$  为平面镜,  $P_1, P_2, P_3, P_4$  为色散补偿棱镜。

我们取谐振腔内两长臂分别为  $l_3 = 930$  mm,  $l_4 = 540$  mm, 凹面镜曲率半径  $R = 102$  mm, 折叠角  $2\theta = 15^\circ$ 、亚腔内  $l_1 = 52.8$  mm,  $l_2 = 50$  mm、钛宝石棒长 5 mm, 使激光器工作在下稳定区的上边界附近。

依据先前发展的 KLM 激光器的“厚透镜”模型<sup>[5,6]</sup>,可以计算出腔内子午面腔模调制度  $\alpha$  的分布情况如图 2 所示。这里腔横模调制度  $\alpha$  的定义为

\* 国家自然科学基金(19874082, 69888005)和广东省自然科学基金(980368)资助课题。

$$\alpha = -2 \frac{dw}{w dP} \cdot P_c$$

其中  $w$  为腔模半径,  $P$  为腔内光束的平均功率,  $P_c$  是自聚焦的临界功率。 $\alpha$  越大, 调制效果越好, 越容

易锁模。通常人们选择  $\alpha > 0$  (即腔模光斑随功率增大而缩小) 的地方, 放置硬光阑实现损耗调制锁模或是在增益介质内利用抽运光斑小于初始腔模光斑的软光阑实现锁模。

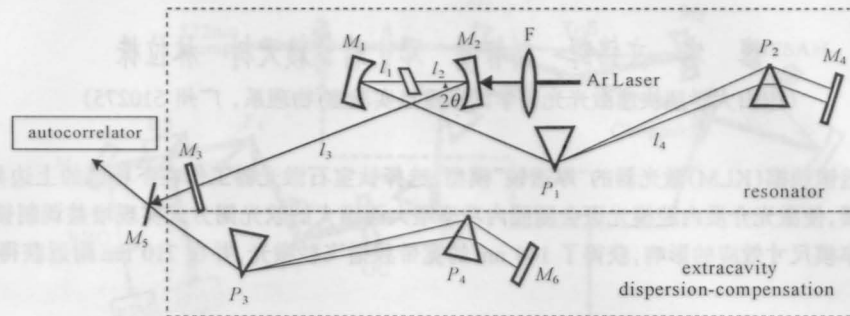


图1 自锁模钛宝石飞秒激光器的结构示意图

Fig. 1 Schematic of KLM Ti:sapphire laser

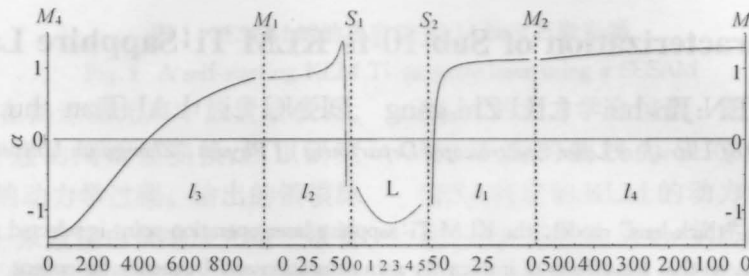


图2 激光器谐振腔子午面上  $\alpha$  值在腔内的分布情况

Fig. 2 Distribution of  $\alpha$  in the tangential plane of the cavity

由图2可以看出, 腔内有多段  $\alpha > 0$  的地方可以利用硬光阑实现损耗调制锁模, 其中以  $M_3$  附近调制度最大。但由于 FDMS 效应的影响, 硬光阑对不同频谱成分所对应的腔模产生的附加损耗不同, 会起频谱过滤作用, 限制脉冲频谱的展宽。因此, 目前通常利用硬光阑锁模产生高功率的飞秒脉冲, 而在亚 10 fs 激光器中基本不采用硬光阑锁模方式<sup>[1-3]</sup>。

在钛宝石晶体内部有  $\alpha < 0$ , 表示激光棒内的腔模光斑随功率增大而增大, 如果使晶体内部抽运光束略大于初始腔模光斑, 则会因脉冲功率的增大而使腔模光斑与抽运光逐渐达到最佳耦合而实现增益调制锁模。这实际上是由连续运转过渡至自锁模时, 光脉冲强度增大, 厚透镜参数由于 Kerr 效应而发生改变, 为满足腔内自洽条件, 腔模光腰由介质中部向介质后表面(远离抽运光之表面)移动的结果。我们采用的便是这种增益调制锁模方案。

这种增益调制的优点是: 在钛宝石晶体内部  $\alpha < 0$ , 脉冲的增益饱和程度会由于腔模光斑半径的增加而减弱, 这样容易得到大的增益, 使腔内功率迅速提升, 有利于实现低抽运阈值的自启动锁模<sup>[7]</sup>, 亦

有利于增强自相位调制使频谱展宽。同时由于在晶体内部采用略大于初始腔模光斑的抽运光束, 整个频谱成分的光斑都小于或接近抽运光束, 各自获得增益的差别相对较小。而且, 对于频谱的高、低频展宽成分而言, 一方面, 在光脉冲腔模的光腰位置附近, 脉冲的增益饱和程度会因腔模光斑半径的增加而减弱, 容易得到大的增益; 另一方面, 由于抽运光和腔模光束的共焦参数较大, 可以在晶体内部沿光轴方向的较长一段距离获得较高的增益; 这样总的效果是有利于因 SPM 效应而产生的频谱展宽成分在腔内的振荡过程中获得足够的净增益放大, 容易形成宽频带的锁模脉冲。

国际上普遍采用的软光阑锁模方式是在上稳区的下边界, 利用晶体内部  $\alpha > 0$ , 采用抽运光斑小于初始腔模光斑的调制作用实现锁模。此时由于 FDMS 效应的影响, 光脉冲通过晶体内部时, 由于 Kerr 效应, 中心频率部分对应的腔模因强度大而相应的光斑尺寸接近甚至小于软光阑(抽运光束), 达到较佳耦合从而获得较高增益; 而频谱的展宽成分对应的光斑尺寸则大于软光阑, 获得增益较小而受到抑制。因此, 当其他限制脉冲压缩的因素得

到控制时,FDMS 效应就成为产生亚 10 fs 脉冲的主要障碍。

### 3 实验结果

激光器用氩离子激光器 5 W 全线抽运。为了尽可能减少腔内色散尤其是高阶色散,采用了较短的高掺钛蓝宝石激光晶体 ( $L = 5$  mm、掺杂浓度为 0.15%、品质因子  $FOM > 250$ ) 并利用三阶色散系数小的熔融石英棱镜对进行色散补偿。介质膜反射端镜  $M_3, M_4$  在 650 nm~850 nm 范围内有较平坦的反射特性,其带宽能够支持小于 10 fs 的脉冲输出。

我们采用自制的计算机控制高精度自相关仪<sup>[8]</sup>测量光脉冲的相干自相关曲线。光脉冲的频谱采用 WDP500-2A 型自动扫描光栅单色仪获得。为了补偿输出镜及测量系统中的色散,我们在腔外也采用了棱镜对色散补偿系统。

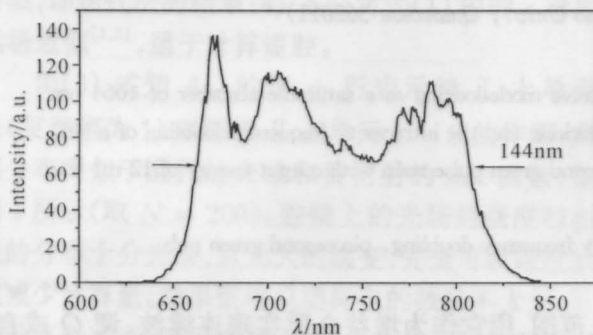


图 3 测量到的功率频谱

Fig. 3 Measured intensity spectrum of the laser pulses

图 3 所示为实验测得的 KLM 钛宝石激光器输出功率频谱,全半宽度(FWHM)为 144 nm,接近腔镜的通光带宽,说明在我们的激光器中 FDMS 效应的影响较小。其中心波长 735 nm,输出功率 280 mW,频谱呈现明显的三峰结构,这是光脉冲通过钛宝石晶体时,在脉冲不同时间部分的同一频率成分相干结果<sup>[3]</sup>。由于此时棱镜的插入量较大,腔内三阶色散较大且难于补偿,阻碍了脉冲压缩。

在实验中,当功率频谱的全半宽度在 90 nm 左右时,腔内三阶色散量比较小,可以得到小于 10 fs 的超短脉冲输出。图 4 是我们获得的 8.5 fs 脉冲的干涉自相关曲线及其脉冲功率频谱。虚线部分是根据全半宽度为 8.5 fs 的双曲正割型光脉冲所计算得到的相干自相关曲线。实验结果与理论曲线基本吻合。脉冲重复率 95 MHz、平均功率 220 mW;图中右上角附图为测得的对脉冲功率频谱,其中心波长 712 nm,全半宽度为 92 nm,呈现多峰结构。

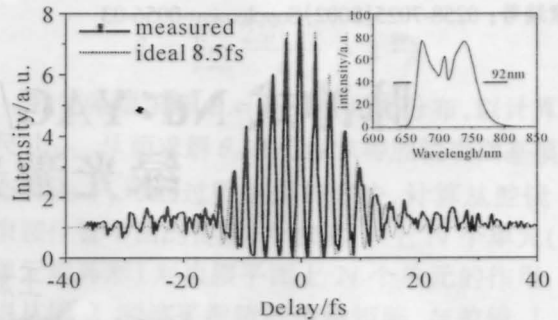


图 4 8.5 fs 光脉冲相干自相关测量曲线(实线)和计算曲线(虚线).内插图脉冲功率频谱

Fig. 4 Measured (solid line) and calculated (dashed) interferometric autocorrelation curves of 8.5 fs pulses, the inset shows the power spectrum of the pulses

### 4 结 论

基于先前提出的“厚透镜”模型,在未采用啁啾镜技术的情况下,使激光器工作在下稳区的上边界,有利于减弱 FDMS 效应以及增益饱和效应对脉冲的限制作用,获得宽带频谱和 8.5 fs 脉冲输出。若采用进一步的色散补偿技术,有可能获得更短的光脉冲输出。

### 参 考 文 献

- 1 N. Matuschek, F. X. Kärtner, U. Keller. Theory of Double-chirped mirrors. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE)*, 1998, 4:197~208
- 2 R. Ell, U. Morgner, F. X. Krtner *et al.*. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 2001, 26(10):373~375
- 3 U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho *et al.*. Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1999, 24(6):411~413
- 4 S. T. Cundiff, W. H. Knox, E. P. Ippen *et al.*. Frequency-dependent mode size in broadband Kerr-lens mode locking. *Opt. Lett.*, 1996, 21(10):662~664
- 5 Y. C. Chen, W. Z. Lin. Thick lens model for self-focusing in Kerr medium. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(4):429~431
- 6 W. Z. Lin, Y. C. Chen, J. H. Wen. A novel modeling for KLM solid-state laser resonator. *Laser Physics*, 1999, 9(1):324~327
- 7 J. H. Wen, B. Guo, H. C. Zhang *et al.*. Low pump power self-starting KLM Ti:sapphire femtosecond laser. *J. Zhongshan Univ.* (中山大学学报), 2000, 39(3):133~134 (in Chinese)
- 8 W. B. Zhong, R. Liao, Z. G. Liu *et al.*. Measurement and diagnosis of shorter femtosecond pulses. *J. Zhongshan Univ.* (中山大学学报), 2001, 40(5): to be published