

# 宽带扩展腔产生 15 飞秒光脉冲实验研究\*

王屹山 陈国夫 赵尚弘 刘东峰 王贤华 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

**摘 要** 用 3 mm 长的钛宝石短棒和改进的非对称 Z 型折叠腔结构进行自锁模实验, 以石英棱镜对作为腔内色散补偿元件, 在 5 W 氩离子激光泵浦下, 实现低阈值泵浦自锁模运转。在腔内不加任何调制元件的情况下实现软光阑锁模, 获得最短脉冲宽度为 15 fs, 光谱宽度为 80 nm, 输出平均功率 400 mW。

**关键词** 克尔透镜锁模, 色散补偿, 钛宝石激光器, 飞秒脉冲。

## 1 引 言

近年来自锁模钛宝石激光器已成为近红外波段一种重要的飞秒超短脉冲光源, 由于其吸收和发射频谱宽、易于泵浦、易于产生超短脉冲、可调谐、输出功率高、工作稳定而获得广泛的重视和应用。目前国际上已应用此技术获得 8.5 fs 的脉冲<sup>[1, 3]</sup>, 国内的报道为 19 fs<sup>[2]</sup>, 作者采用中国科学院上海光学精密机械研究所生产的高浓度钛宝石及相干公司的氩离子激光器进行自锁模钛宝石激光器的实验研究, 获得了 15 fs 的脉冲。本文主要报道实验过程及结果, 并进行理论上的简单分析。

## 2 实验装置及腔内结构参数

实验对标准的四腔镜像散补偿 Z 形折叠腔<sup>[4, 5]</sup>加以改进, 如图 1 所示。总腔长为 1.664 m, 非对称分布,  $M_1M_4 > M_2M_3$ , 长臂 0.94 m, 短臂 0.63 m,  $M_3$ 、 $M_4$  是曲率半径为 10 cm 的凹面镜, 镀对 750~940 nm 全反宽带介质膜 ( $R > 99\%$ ), 对氩离子光高透 ( $T = 98\%$ )。  $M_1$ 、 $M_2$  为平面高反腔镜, 是对 750~940 nm 全反的宽带介质膜 ( $R > 99\%$ )。由于镀膜技术的限制, 采用较低透过率输出镜 ( $< 3\%$ ) 才可使输出镜的带宽较宽。为获得极短光脉冲, 应尽可能克服部分反射膜的带

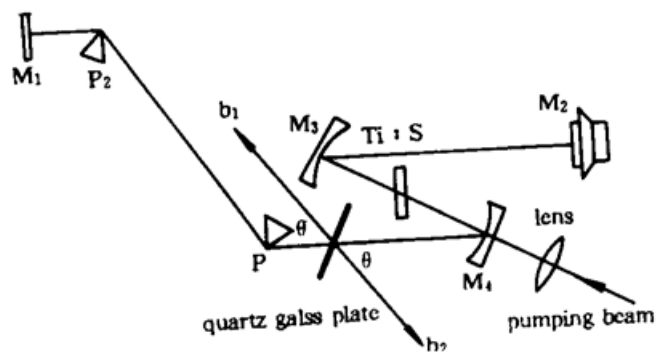


Fig. 1 The Ti:Sapphire self-mode-locking laser diagram

\* 国家攀登计划资助项目。

宽限制, 因此使用平面高反腔镜  $M_1$  代替低输出耦合腔镜。这样激光腔便成为带宽达 190 nm 的宽带激光腔。为获得激光输出, 在腔内插入 1 mm 厚的石英玻璃片, 使其法线与入射光线成一小角度  $\theta$ , 由于此薄片的一面镀有增透膜, 最终可由此薄片的另一面反射耦合出方向相反的两路钛宝石激光器的激光。这一技术简单地解决了蒸镀宽带部分发射膜的技术难题, 给极短的光脉冲产生创造了条件。  $P_1$  和  $P_2$  为一对布儒斯特角切割的石英色散补偿棱镜。激光棒是高浓度钛宝石短棒, 长为 3 mm, 布儒斯特角切割, 对全线氩离子泵浦光吸收率为 70%, 采用的泵浦源是相干公司生产的 INNOVA 300 系列的 308 氩离子激光器, 泵浦功率为 5 W。采用的聚焦透镜焦距为 70 mm, 棱镜间距为 45 cm, 钛宝石激光像散补偿角为  $13^\circ$ , 泵浦光对钛宝石、钛宝石激光对两个棱镜均以布儒斯特角入射。

实验证明, 连续钛宝石激光器的泵浦阈值为 1 W, 当泵浦光功率为 5 W 时, 钛宝石激光器连续输出为 400 mW, 玻璃片每一面反射输出 200 mW。仔细调节腔内各元件, 当获得连续输出最大时, 通过加在  $M_2$  上的扬声器起振, 轻微调节  $M_3$  到钛宝石棒的距离和棱镜  $P_2$  的位置, 即可实现锁模, 锁模时输出功率基本保持不变, 为 400 mW。锁模脉冲可稳定工作数小时。当锁模稳定时,  $M_3$  到钛宝石棒面的距离为 49 mm,  $M_4$  到钛宝石棒面的距离为 50 mm, 锁模脉冲的重复频率为 90.14 MHz。

### 3 实验结果及分析

用自制的干涉自相关仪测量脉宽。在此测量系统中, 用金属银镜作为角锥反射镜, 因而几乎不产生色散。聚焦透镜为石英透镜, 中心厚度为 3 mm, 倍频晶体是厚为  $100 \mu\text{m}$  的 BBO 晶体, 所产生的色散非常小。可以认为测量系统的色散对于脉冲的测量影响非常小。图 2(a) 为最短脉冲的干涉自相关曲线, 图 2(b) 为同时测量的最短脉冲的光谱曲线。由图可知最短脉宽 15 fs, 中心波长 800 nm, 谱宽 80 nm, 时间带宽乘积  $\Delta\nu\Delta t = 0.563$ , 大于双曲正割脉冲的变换极限 0.315, 说明补偿尚未达到最佳化, 实际这样的谱宽可产生 8.4 fs 的脉冲。实验还证明, 锁模阈值为 2 W。

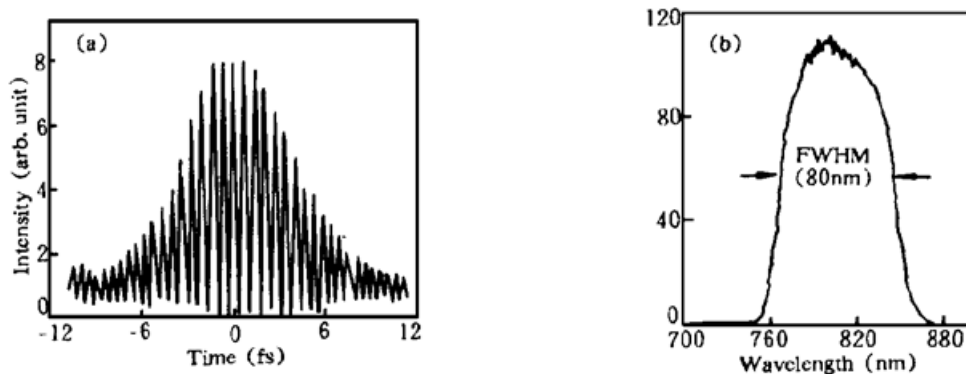


Fig. 2 (a) Interferometric autocorrelation traces of the 15 fs pulse from the Kerr lens modelocking Ti:sapphire laser, (b) Wavelength spectrum of the 15 fs pulse from the Kerr lens modelocking Ti:sapphire laser

理论分析可知<sup>[6]</sup>, 短脉冲的产生源于自相位调制(SPM)和群速色散(GVD)补偿的作用。由钛宝石晶体的光克尔效应产生的自相位调制使激光频谱展宽, 产生正啁啾脉冲。由自相位调制产生的附加频率为:

$$\delta\omega(t) = -\frac{\delta\Phi(t)}{\delta t} = \frac{L}{2} n_2 k_0 \frac{\partial |E(t)|^2}{\partial t}$$

式中  $\delta\Phi(t)$  为激光棒的折射率变化产生的附加相移,  $k_0$  为波数,  $L$  为激光棒长度。由于工作频谱  $\Delta\nu$  越宽, 脉宽  $\Delta t$  越窄, 但同时腔内元件引起的群速色散又会使脉冲变宽。因而在腔内加入棱镜对产生负群速色散而使正啁啾脉冲得到色散补偿, 从而获得短脉冲。但棱镜对主要是补偿二阶色散, 对于三阶色散无法补偿, 从而限制了脉冲的压缩。因而激光腔设计应使三阶色散最小, 这是获得极短脉冲的关键。选择石英棱镜就是因为它具有小的三阶色散。通过计算, 对于 3 mm 钛宝石棒

$$\Phi = 360 \text{ fs}^2, \quad \Phi'' = -127 \text{ fs}^3$$

对于石英棱镜,  $\lambda = 800 \text{ nm}$  时,

$$n = 1.454, \quad dn/d\lambda = 0.1855 \mu\text{m}^{-1}, \quad d^2n/d\lambda^2 = 0.03754 \mu\text{m}^{-2}, \\ d^3n/d\lambda^3 = -0.1426 \mu\text{m}^{-3}, \quad \Phi'' = -887.54 \text{ fs}^3$$

对于 SF<sub>10</sub>,

$$n = 1.71125, \quad dn/d\lambda = -0.04958 \mu\text{m}^{-1}, \quad d^2n/d\lambda^2 = 0.1755 \mu\text{m}^{-2}, \\ d^3n/d\lambda^3 = -0.9972 \mu\text{m}^{-3}, \quad \Phi'' = -7552 \text{ fs}^3$$

SF<sub>10</sub> 的三阶色散  $\Phi''$  是石英的 8.5 倍。

计算所得的棱镜间距  $l = 40 \text{ cm}$ , 由于腔内的其它光学元件存在色散, 实际的补偿长度  $l = 45 \text{ cm}$ 。

钛宝石激光器自锁模实验表明:

1) 对于短的激光介质, 锁模启动比较困难, 因为短的激光介质的自聚焦效应较弱。在实验中采用 50 Hz 交流源加在扬声器上以增大噪声振荡幅度, 当锁模位置合适时, 即可锁模。

2) 对于作为泵浦源的氙离子激光器, 要求其模式好, 稳定性高。模式好可提高泵浦效率, 稳定性好可维持锁模状态。在实验中发现, 当氙离子激光器输出功率随时间下降时, 锁模脉冲稳定性变坏。

3) 灰尘是影响锁模脉冲稳定性的重要因素, 由于灰尘对激光介质及各个腔镜的影响, 造成腔内功率下降, 达不到锁模脉冲所需的激光功率, 从而造成失锁。为此, 把整个激光腔置于一防尘罩下, 并通以氮气。

4) 锁模脉冲的幅度调制主要是由于腔内功率不够而造成, 另外棱镜、M<sub>3</sub>、狭缝等元件的位置不对, 也会造成幅度调制。

5) 实验发现, M<sub>3</sub> 的位置对于锁模至关重要, 当 M<sub>3</sub> 位于离钛宝石棒较远的一个稳定区边缘时, 才能锁模<sup>[4]</sup>。

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所提供晶体。

## 参 考 文 献

- [1] J. Zhou, G. Taft, C. P. Huang *et al.*, Sub-10 fs pulse generation in Ti:sapphire capabilities and ultimate limits, *Springer Series in Chemical Phys.*, 1994, 60, *Ultrafast Phenomena IX*: 39~40
- [2] 林位株, 赖天树, 陈毓川等, 由自锁模钛宝石激光器产生 19 fs 脉冲. *光学学报*, 1995, 15(8): 1151~1152
- [3] R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker *et al.*, Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation. *Opt. Lett.*, 1987, 12(7): 483~485

- [4] T. Brabec, Ch. Spielmann, P. F. Curley *et al.*, Kerr lens mode-locking. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(18) : 1292~ 1294
- [5] 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~ 44
- [6] G. Cerullo, S. De Silvestri, V. Magni, Self-starting Kerr-lens mode locking of Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(14) : 1040~ 1042

## Generation of 15 Femtosecond Ti:Sapphire Pulse

Wang Yishan      Chen Guofu      Zhao Shanghong      Liu Dongfeng  
Wang Xianhua      Hou Xun

(State Key Lab of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 26 June 1996; revised 16 September 1996)

**Abstract** Making self mode locking experiment using the 3 mm Ti:sapphire short rod and the improved asymmetric Z shape folding configuration, with quartz prisms as dispersion compensation element, we achieve low threshold self mode locking operation with 5 W pumping power of Argon laser and soft-aperture mode Locking without any modulating element. The pulse duration is 15 fs with 80 nm spectrum bandwidth. The 400 mW average power is obtained.

**Key words** Kerr lens modelocking, Ti:sapphire, dispersion compensation, femtosecond pulse.