

利用腔内可控自相位调制效应 压缩飞秒光脉冲*

柴 路 王清月 张伟力 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;
国家教育部光电子信息技术科学重点实验室 天津 300072

提要 报道了在掺钛蓝宝石环形激光器中加入非线性折射率 n_2 较大的 SF-57 玻璃形成腔内可控的 SPM 效应, 并引入适当的负 GVD, 将脉冲宽度从 30 fs 压缩至 16 fs, 相应的脉冲压缩率为 47%。

关键词 掺钛蓝宝石, 环形激光器, 自聚焦效应

1 引 言

在超快激光器中, 短脉冲的整形过程十分复杂。在掺钛蓝宝石飞秒激光器中, 对脉冲宽度带来影响的主要因素就有: 增益介质中的非线性效应——自相位调制效应(SPM)、腔内透明介质引入的正色散、棱镜对引入的色散、增益带宽、介质膜镜的带宽以及棱镜对的“光谱滤波器”效应对脉冲带宽的限制等等。根据类孤子脉冲整形原理^[1], 用负的群速度色散(GVD)去补偿腔内的 SPM 引起的正啁啾和材料的正色散, 是产生超短脉冲的关键。

SPM 效应使光脉冲产生频率啁啾, 导致在光脉冲的中心波长两侧不断有新的光谱成分生成, 使光脉冲的频谱展宽。如果这种展宽的频谱是线性的, 则经过适当的色散延迟线压缩, 可以得到更窄的光脉冲, 这是光纤-光栅压缩器^[2]的基本原理。将此原理始用于腔内是在 CPM 染料激光器中实现的^[3]。但是, 对于今天的固体飞秒激光器, 由于其锁模机制完全不同于 CPM 染料激光器, 前者为强烈依靠非线性自聚焦效应的克尔透镜锁模, 而后者是慢可饱和吸收体被动锁模。此外, 无论是激光器的工作效率、输出功率还是腔内功率方面, 固体飞秒激光器都远远超过 CPM 染料激光器。因此, 在固体飞秒激光器中引入展宽-压缩机制, 应该比 CPM 染料激光器更加有效。然而, 人们对此类研究的重点仅仅集中在自锁模的自启动问题上^[4,5], 我们的研究则是在获得窄脉冲方面进行了有益的尝试。

2 实验方法

实验中采用六镜掺钛蓝宝石环形激光器, 结构如图 1 所示^[6]。 M_1, M_2, M_5 和 M_6 是曲率半径为 100 mm 的球面镜, 分别构成两个束腰。其中在由 M_1 和 M_2 构成的“Z”形折叠腔中, 放置长

* 国家攀登计划资助项目。

收稿日期: 1998-12-15; 收到修改稿日期: 1999-04-08

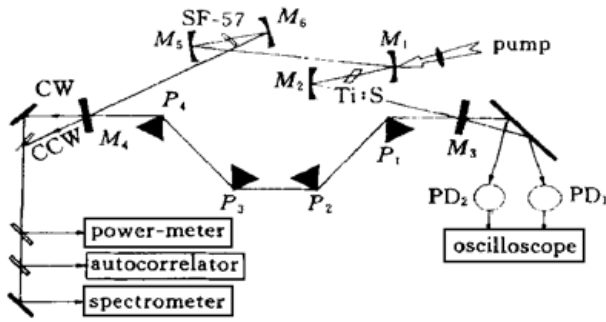


图1 六镜环形腔掺钛蓝宝石飞秒激光器

Fig. 1 Schematic of the Ti:sapphire laser ring cavity configuration

用一台单模全线输出的 Ar^+ 激光器抽运。从 M_3 透出的两路激光同时用两个快响应光电二极管接收,并输入到一台 400 MHz 的双线示波器,对锁模脉冲进行监测。从输出镜 M_4 出射的激光束被分成三束,分别用于激光功率、频谱和脉冲宽度的测量。频谱和脉冲宽度的测量分别采用了配有光电二极管列阵的单色仪和低色散的无背景实时相关器。

实验中,首先优化未加入 SF-57 玻璃的六镜掺钛蓝宝石飞秒环形激光器,使其单向运转,在 CW 方向上获得尽可能短的光脉冲。然后保持腔形不变,插入 SF-57 玻璃,并配合调整腔内的光学元件,特别是要适当地增加四棱镜系统中棱镜 P_1 与 P_2 (P_3 与 P_4) 之间的距离,以增加腔内的负 GVD 来补偿 SF-57 玻璃所引入的正 GVD 和由于它的较高的 n_2 所增加的 SPM 效应而引起的啁啾。我们研究了 SF-57 玻璃相对于束腰的不同位置时的锁模状态,包括脉冲宽度和频谱形状。每个位置都尽量通过优化腔内参数,以得到尽可能稳定的最窄光脉冲。

3 实验结果与讨论

在未加入 SF-57 玻璃的情况下,当抽运功率为 5 W 时,我们在 CW 方向得到的最窄脉冲约为 30 fs,谱宽为 23 nm,脉宽-谱宽乘积 $\Delta\tau \cdot \Delta\nu = 0.32$,接近傅里叶变换极限。脉冲最大输出功率为 340 mW。棱镜对的间隔 (P_1, P_2 或 P_3, P_4) 在 40 cm 左右。

保持腔形和抽运功率不变,加入 SF-57 玻璃后,要获得稳定的锁模运转,棱镜对的间隔需从原来的 ~ 40 cm 增加到 ~ 50 cm。即腔内增加了更多的负 GVD,用于补偿材料引入的正 GVD 和 SPM 对脉冲中部引入的正线性啁啾。当使 SF-57 玻璃从远离束腰的位置向中心移动时,由于功率密度逐渐增加,SPM 效应也相应加强。这时候,要逐渐减少棱镜的插入量才能获得较窄的脉冲。但是,当 SF-57 玻璃进入到距离束腰位置大约 ± 1.5 mm 时,已不能实现稳定的锁模运转。这是由于过强的 SPM 效应,使脉冲含有较大的非线性啁啾。用棱镜对提供的负 GVD 已不能提供足够的补偿,从而形成不稳定状态。另外一个

度为 2 mm,掺杂浓度为 0.25% 的掺钛蓝宝石晶体作为增益介质。折叠角大约为 6° 。在第二个束腰内,以布儒斯特角放置一块厚度为 ~ 1 mm 的 SF-57 玻璃,并使其可沿光线轴的方向平移。通过连续改变 SF-57 玻璃相对于激光束腰的距离,可以实现对腔内的 SPM 效应强度的控制^[3]。第二束腰中的折叠角为 5° 左右。 M_3 和 M_4 是平面镜,其中 M_4 为透过率 3% 的输出镜, M_3 虽然为全反镜,但实测也有 $\leq 1\%$ 的输出。两对石英棱镜插在 M_3 与 M_4 之间,用于腔内色散补偿。腔长大约为 3 m 左右。该激光器

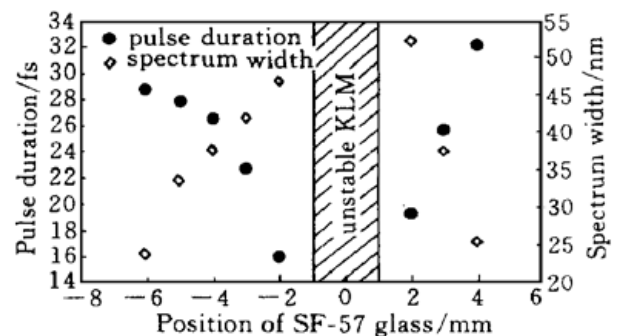


图2 脉冲宽度和对应谱宽与 SF-57 玻璃位置的关系

Fig. 2 The pulsedwidth and bandwidth versus the position of SF-57 glass related to the beam waist between M_5 and M_6

原因,是由于在焦点附近,非线性介质中所形成的 Kerr-lens 的焦距明显变短,造成了整个腔参数的改变,从而影响了 KLM 锁模运转的稳定性。实验中得到脉冲宽度与 SF-57 玻璃位置的关系,如图 2 所示。当 SF-57 玻璃置于靠近 M_6 一侧,距束腰大约 2.5 mm 时,棱镜都退至顶尖附近,在 CW 方向上得到了最窄为 16 fs,输出功率大约为 100 mW 的脉冲。谱宽约为 47 nm,脉宽-谱宽乘积 $\Delta\tau \cdot \Delta\nu = 0.35$ 。对比没有加入 SF-57 玻璃时,得到最窄的大约为 30 fs 的脉冲,压缩率约为 47%。图 3 给出两个实验中所得到的脉冲强度相关曲线和对应的谱的比较。

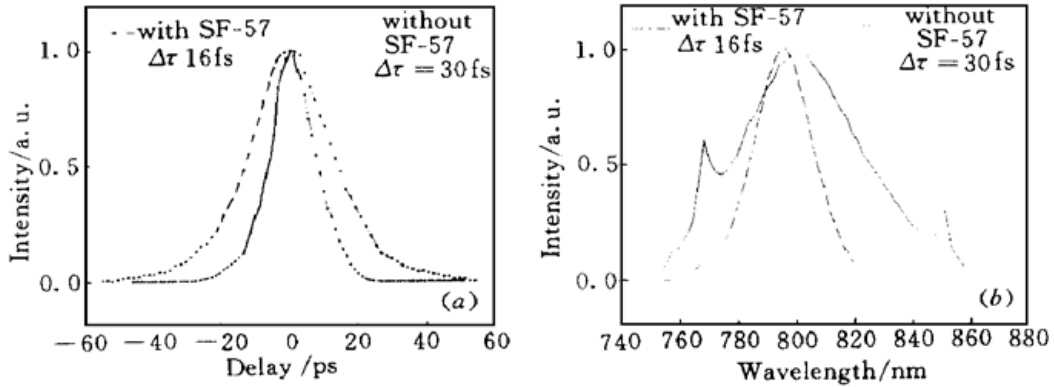


图 3 从插入与未插入 SF-57 玻璃的飞秒掺钛蓝宝石环形激光器中所得到的最窄光脉冲的比较
(a) 脉冲自相关曲线; (b) 脉冲光谱

Fig. 3 The autocorrelations (a) and relevant spectra (b) of the shortest pulses obtained from a Ti:sapphire ring laser with and without a SF-57 glass, respectively

作为对比,我们进行了腔内色散量的估算。插入 1 mm 的 SF-57 玻璃而引入的正 GVD 为 $\sim 73 \text{ fs}^2$ ($\lambda = 800 \text{ nm}$, $n = 1.824$, $dn/d\lambda = -0.066$, $dn^2/d\lambda^2 = 0.243$, 入射为布儒斯特角 61.26°)。根据 Fork 等^[7]的四棱镜系统的色散公式,对石英棱镜,在 $\lambda = 800 \text{ nm}$, $n = 1.453$, $dn/d\lambda = -0.017$, $dn^2/d\lambda^2 = 0.040$, 取 $l \sin\beta \approx 2 \text{ mm}$, $\cos\beta \approx 1$, 则棱镜间隔 l 从 40 cm 增加大约 10 cm 所提供的负 GVD 约为 200 fs^2 , 因此这个负 GVD 能够补偿 SF-57 玻璃引入的正 GVD 和 SPM 造成的正啁啾,并维持 KLM 锁模所要求的负群速度色散腔条件。从频谱方面估算,考虑到平均输出功率为 100 mW, 腔镜透射率 $\sim 4\%$, 则腔内平均功率为 2.5 W; 取重复频率为 91 MHz 和脉冲宽度为 16 fs, 腔内脉冲峰值功率 P_0 约为 1.72 MW。则由 SPM 产生的最大相移 $\phi_{\max} = \kappa P_0$, 其中, $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 \frac{L}{A_{\text{eff}}}$ 为非线性系数; 假设脉冲为高斯型, 根据 SPM 所导致的最大频谱展宽 $\Delta\omega_{\max}$ 与初始频谱 $\Delta\omega_0$ 之间的关系 $\frac{\Delta\omega_{\max}}{\Delta\omega_0} = 0.86\phi_{\max}^{[8]}$, 取 $\lambda = 800 \text{ nm}$, SF-57 玻璃的非线性折射率 $n_2 = 1.824$, 厚度 $L = 1 \text{ mm}$, 有效激光光斑面积 $A_{\text{eff}} \approx 2.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$, 则 $\frac{\Delta\omega_{\max}}{\Delta\omega_0} \approx 3.78$ 。对照插入 SF-57 玻璃后与前的实测频谱宽度比大约为 2, 所以实验结果基本符合理论估算。

实验中还注意到,加入 SF-57 玻璃后,增加了两个运转方向上的不对称性。比如,当在 CW 方向为 19 fs 脉冲时,如果保持腔参数不变,只是设法使锁模在 CCW 方向上出现时,脉冲的宽度约为 45 fs, 而谱宽几乎是相同的。这时, $\Delta\tau \cdot \Delta\nu = 0.797$, 说明该方向上的脉冲含有很大的啁啾。这是由于从输出端测量脉冲宽度时,两个方向脉冲经历的展宽、压缩的顺序是不同的。在 CW 方向的脉冲是刚经过四棱镜系统的啁啾补偿而得到了压缩;而在 CCW 方向则正相反,脉

冲刚经过 SF-57 玻璃, 被 SPM 效应展宽。

参 考 文 献

- 1 T. Brabec, Ch. Spielmann, F. Krausz. Mode locking in solitary lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24): 1961~ 1963
- 2 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic Press, 1995. 207~ 213
- 3 C. Y. Wang, Y. Ishida, Y. Yamamoto. Self-phase-modulation-controlled passively mode-locked dye laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(17): 965~ 967
- 4 G. W. Pearson, C. Radzewicz, J. S. Krasinski. Analysis of self-focusing mode-locked lasers with additional highly nonlinear self-focusing elements. *Opt. Comm.*, 1992, **94**(4): 221~ 226
- 5 C. Radzewicz, G. W. Pearson, J. S. Krasinski. Use of ZnS as an additional highly nonlinear intracavity self-focusing element in a Ti:sapphire self-modelocked laser. *Opt. Comm.*, 1993, **102**(5, 6): 464~ 468
- 6 Chai Lu, Zhang Weili, Wang Chingyue *et al.*. Unidirectional and bidirectional operation mode-locked ring-cavity Ti:sapphire laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(8): 1080~ 1082 (in Chinese)
- 7 R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(5): 150~ 152
- 8 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic Press, 1995. 89~ 96

Pulse Shortened by Controlling the Self-phase-modulation in a Femtosecond Ti:sapphire Ring Laser

Chai Lu Wang Qingyue Zhang Weili Xing Qirong

*Ultrafast Laser Lab, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University;
The Optoelectronic Information Science and Technology Key Lab, MOE, Tianjin 300072*

Abstract It is found that additional insertion of a SF-57 glass with a high nonlinear refractive index in the Ti:sapphire ring laser cavity can create an adjustable SPM. Removing the chirp by an appropriate GVD, the mode-locking pulses can be shortened from 30 fs to 16 fs, corresponding to a compression ratio of 47%.

Key words Ti:sapphire, ring laser, SPM