

文章编号: 0258-7025(2006)07-0895-04

高展宽量八通展宽器的设计制作

王 逍, 朱启华, 林东晖, 黄小军, 曾小明, 周凯南, 王 方,
蒋东斌, 徐 冰, 刘兰琴, 谢旭东, 王晓东, 郭 仪
(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 在啁啾脉冲放大(CPA)技术中,提高展宽器的展宽量能有效地提高激光器的输出能力,而展宽器的展宽量与其构型及参数设计紧密相关,因此可以通过构型的选取及参数的优化来提高展宽器的展宽量。用光线追迹法导出了单光栅单透镜展宽器构型的设计解析式,利用这些解析式可以进行展宽器参数的优化,在此基础上设计制作了高展宽量的八通展宽器,并利用所研制的展宽器,将中心波长为1053 nm的93 fs脉冲展宽到4.35 ns。在该构型展宽器中,通过控制焦平面反射镜处的光强分布可以较方便地进行光谱整形,在实验中得到了和声光色散滤波器整形后类似的中心凹陷的波形。

关键词 激光技术;展宽器;脉冲展宽;谱剪切;光谱整形;脉冲整形

中图分类号 TN 24 **文献标识码** A

Design and Experiment of 8-Pass Laser Pulse Stretcher

WANG Xiao, ZHU Qi-hua, LIN Dong-hui, HUANG Xiao-jun,
ZENG Xiao-ming, ZHOU Kai-nan, WANG Fang, JIANG Dong-bin,
XU Bing, LIU Lan-qin, XIE Xu-dong, WANG Xiao-dong, GUO Yi

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In a chirped pulse amplification (CPA) laser facility, the output capability can be increased if the pulse can be stretched wider. Adopting the design of "single-grating and single-lens", a 8-pass laser pulse stretcher is developed, and analytical formulae about the design are presented, with which the stretcher has been optimized to some extent. With the stretcher which has been developed, a pulse of 93 fs is stretched to 4.35 ns. Additionally, by controlling the reflection of the mirror in the focal plate (or controlling transmission of an optical component before the mirror), a shaped pulse can be obtained, which is similar to the pulse gotten from an acoustic-optic programmable dispersion filter (AOPDF).

Key words laser technique; stretcher; pulse stretching; spectrum clipping; spectrum shaping; pulse shaping

1 引 言

高能皮秒脉冲是激光领域的一个重要发展方向,已受到世界各国的重视。它并不侧重于追求极短的脉宽,而更关注的是脉冲要有足够高的能量(千焦耳至兆焦耳量级)。目前高能皮秒脉冲的总体技术路线是在钕玻璃系统中采用啁啾脉冲放大(CPA)技术,要求在1053 nm的中心波长附近将脉冲展宽到足够宽,放大至一定能量后再将其压缩至皮秒或

亚皮秒脉冲。所以展宽压缩系统是其中的一个关键组成部分,其展宽压缩量在一定程度上直接决定了整个系统的输出能力。光栅及各种色散补偿元件制造技术的不断发展^[1~3]使得光栅展宽压缩器的运用越来越成熟和广泛,到目前为止人们已经发展了许多构型的展宽器^[4~11]。本文采用单光栅单透镜多通构型以提高展宽器的展宽量,导出了设计解析式,利用这些解析式可以方便地进行参数优化。并据此

收稿日期:2005-12-02;收到修改稿日期:2006-01-16

基金项目:高温高密度等离子体物理国防重点实验室基金(51480040204JW0701)资助项目。

作者简介:王 逍(1970—),女,中国工程物理研究院助理研究员,主要从事高功率固体激光的研究。E-mail:wangxiaocn

设计制作了八通展宽器。

2 展宽器的设计

设计中主要遵循原则为：

1) 在保证光束全口径导入导出的前提下,尽可能工作在利特罗(Littrow)角附近,以提高衍射效率;2) 在光学元件口径有限的前提下使谱剪切尽可能小;3) 尽可能提高展宽量;4) 在保证展宽量的前提下,尽可能减小展宽器的总体尺寸;5) 尽可能降低加工难度。

由于高能皮秒系统要求脉冲展宽量大,为了尽可能地减小空间占用,同时考虑到大口径、高质量的凹凸反射镜制作难度很大,展宽器设计为单光栅、单透镜多通构型。即在 Martinez 型展宽器(图 1)的共焦平面上置一平面反射镜,在入射光的方向上(竖直方向上错开)置一对折返镜,使光束八次打到光栅上(等效于双光栅四通结构,见图 2)。光束由一对折返镜(R_1, R_2)中间入射,经光栅 G 衍射后不同波长的光在空间上色散展开,经透镜聚焦后到达焦平面反射镜 M_1 ,反射回来的光经透镜及光栅进入折返镜

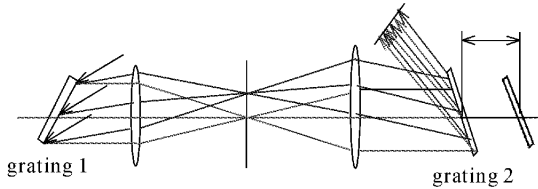


图 1 最基本的 Martinez 型展宽器构型
Fig. 1 Fundamental Martinez stretcher

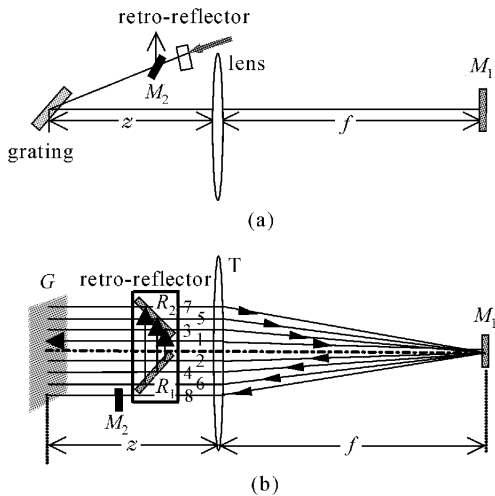


图 2 单光栅单透镜八通展宽器
(a) 俯视图; (b) 侧视图

Fig. 2 Single grating single lens 8-pass stretcher
(a) planform; (b) side elevation

(R_1), 再由 R_2 以原入射光的方向将光导向光栅进行又一程的展宽,这样四个来回,光束在光栅及透镜上经过八次,最后由 M_2 将展宽后的光导出。即入射光按以下顺序依次到达各元件: ($G \rightarrow T \rightarrow M_1 \rightarrow T \rightarrow G \rightarrow R_1 \rightarrow R_2$) \rightarrow ($G \rightarrow T \rightarrow M_1 \rightarrow T \rightarrow G \rightarrow R_1 \rightarrow R_2$) \rightarrow ($G \rightarrow T \rightarrow M_1 \rightarrow T \rightarrow G \rightarrow R_1 \rightarrow R_2$) \rightarrow ($G \rightarrow T \rightarrow M_1 \rightarrow T \rightarrow G \rightarrow R_1 \rightarrow R_2$) \rightarrow ($G \rightarrow T \rightarrow M_1 \rightarrow T \rightarrow G \rightarrow M_2$)。图中已用序号 1~8 及箭头标出了光束行走的路线。

由于光脉冲谱宽远小于其中心频率,则不同频率 ω 的相移可表示为

$$\phi(\omega) = \phi_0 + \phi_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\phi_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\phi_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots, \quad (1)$$

式中 ω_0 为脉冲的中心频率。依据光栅方程

$$\sin\theta_i + \sin\theta_r = \lambda/d \quad (2)$$

可推得光束通过单光栅单透镜八通展宽器时的群速度色散为

$$\text{GVD} = \frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{-32\pi^2 c(f-z)}{\omega_0^3 d^2 \cos^2(\theta_{r0})} = \frac{-4\lambda_0^3(f-z)}{\pi c^2 d^2 \cos^2\theta_{r0}}, \quad (3)$$

式中 f 为透镜的焦距, z 为光栅中心至透镜的距离, d 为光栅常数(刻线周期), θ_i 为入射角, θ_{r0} 为脉冲中心频率在光栅上的一级衍射角, λ_0 为脉冲的中心波长, c 为光速。

所以,单位频谱宽度上的脉冲展宽量为

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \cdot \frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{8\lambda_0(f-z)}{cd^2 \cos^2\theta_{r0}}. \quad (4)$$

光束第一次打在光栅上时的长度(均指水平方向的尺寸,竖直方向上光斑尺寸基本不变)

$$G_1 = D_0 \cdot \sec\theta_1, \quad (5)$$

其中 D_0 为入射光斑直径。

光束第二次通过透镜时的尺寸(半长 R') 为

$$R' = 2f \cdot \tan(\theta_{rup} - \theta_{r0}) + \frac{G_1}{2} \cos\theta_{r0} - \left(z + \frac{G_1}{2} \sin\theta_{r0}\right) \tan(\theta_{rup} - \theta_{r0}), \quad (6)$$

其中 θ_{rup} 为谱剪切之后的上限波长对应的衍射角。当 $(\theta_{rup} - \theta_{r0})$ 较小时

$$R' = 2f \cdot (\theta_{rup} - \theta_{r0}) + \frac{G_1}{2} \cos\theta_{r0} - \left(z + \frac{G_1}{2} \sin\theta_{r0}\right) \tan(\theta_{rup} - \theta_{r0}), \quad (7)$$

所以透镜的最小半径 R_0 为

$$R_0 = \sqrt{\left[\frac{(N-1)D_0}{2}\right]^2 + R'^2}, \quad (8)$$

其中 N 为光束在透镜上通过的次数, 对于所设计的八通展宽器来说 N 等于 8。

光束第二次打在光栅上时的长度(以此来确定光栅尺寸, 光束在水平方向上衍射, 竖直方向上尺寸可认为不变)

$$G_2 = \frac{2z \tan(\theta_{rup} - \theta_{ro}) - R_0}{\sin\theta_{ro} \cdot \tan(\theta_{rup} - \theta_{ro}) - \cos\theta_{ro}} \quad (9)$$

要使入射光和衍射光分开(以便全口径导光), 光栅中心距透镜的距离还需满足

$$z > \frac{(G_1 + G_2) \cos\theta_{rup} \cos(\theta_{rup} - \theta_{ro})}{2 \sin(\theta_i - \theta_{rup})} - \frac{G_1}{2} \sin\theta_{ro}, \quad (10)$$

由(4)~(10)式可确定展宽器的设计参数。事实上实际工作中往往有许多限制, 比如所能获得的光栅尺寸、空间排布限制等。通过优化以后, 设计的展宽器主要参数为: 入射角 $\theta_i = 58^\circ$, 中心波长衍射角 $\theta_r = 45.27^\circ$, 光栅 1480 g/mm , $220 \text{ mm} \times 165 \text{ mm}$, 透镜焦距 $f = 3.9 \text{ m}$, $\phi 300 \text{ mm}$, 透镜距光栅的距离 $z = 1.81 \text{ m}$ 。

3 实验

将光参量放大器(OPA)产生的中心波长为 1053 nm 的超短脉冲激光(半峰全宽(FWHM) 93 fs)导入所制作的展宽器中进行展宽, 得到了 4.35 ns 的长脉冲, 图 3(a)为由单次自相关仪测得的自相关曲线(93 fs 是按高斯线型修正系数修正后的脉宽数), 图 3(b)则是直接用 6 GHz 的示波器

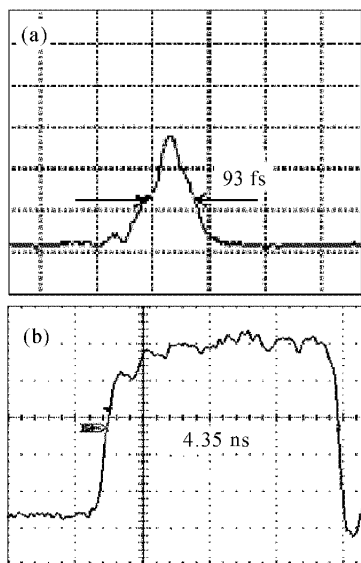


图 3 展宽前(a)后(b)的脉宽

Fig. 3 Pulse duration before (a) and after (b) stretching

(TDS6604B 20 GS/s)测得的时间波形。

在啁啾脉冲放大系统中为了避免放大过程中的增益窄化效应, 往往需要在前级进行光谱整形。目前常用的方法是放大前用声光色散滤波器在光谱中心挖孔^[9], 进行预整形, 但声光色散滤波器造价高, 使用场合有限。事实上在八通展宽器中可以看到, 在焦平面反射镜 M_1 处, 光谱在空间上是分开的, 如果控制 M_1 处的空间光强分布, 则可以控制展宽后的输出波形。

图 4 为降低 M_1 中心的光强后得到的脉冲波形, 和文献^[12]中用声光色散滤波器得到的中心凹陷的脉冲波形类似。

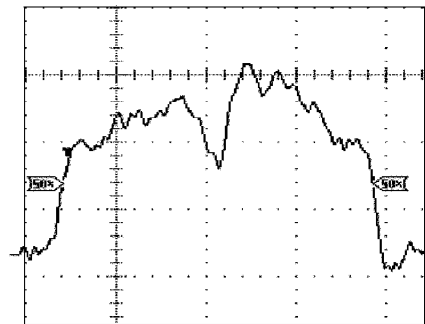


图 4 控制 M_1 处的光强分布后得到的脉冲波形

Fig. 4 Pulse shape after controlling the intensity distribution on mirror M_1

4 结论

设计制作了高展宽量的单光栅单透镜八通展宽器, 给出了设计原则及设计解析式, 在实验中将中心波长为 1053 nm 的低于百飞秒的脉冲展宽到了 4.35 ns 。该构型展宽器的特征是展宽量大, 只是在带通较大时, 透镜的色差会给光束的近场及远场带来一定的影响, 这一点会在以后的工作中作进一步的分析和研究。此外通过控制焦平面处的光强分布, 得到了和声光色散滤波器整形后类似的脉冲波形, 但这只是一个初步的尝试, 要做到任意整形还需要做更详细的工作。

参 考 文 献

- 1 Kong Weijin, Shao Jianda, Zhang Weili *et al.*. Design and character analysis of multi-layer dielectric film used in pulse compressed gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):701~706
孔伟金, 邵建达, 张伟丽 等. 脉宽压缩光栅用的多层膜设计和性能分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):701~706
- 2 Chunyan Liao, Jianda Shao, Jianbing Huang *et al.*. Newly designed multilayer thin film mirror for dispersion compensation in Ti:sapphire femtosecond lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*,

- 2005, **3**(2):122~124
- 3 Yang Xin, Xie Xinglong, Li Meirong *et al.*. Analysis of misalignment and spectrum bandpass of pulse stretcher [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):170~174
杨鑫, 谢兴龙, 李美荣等. 展宽器元件失调及带通分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):170~174
- 4 O. E. Martinez, J. P. Gordon, R. L. Fork. Negative group-velocity dispersion using refraction [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(10):1003~1007
- 5 E. B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9):454~458
- 6 O. E. Martinez. Grating and prism compression in strongly dispersive media [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(11):1575~1578
- 7 Wang Zhongyang, Xu Zhizhan. Study of grating pulse compression in the case of finite beam size [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2):151~159
王中阳, 徐至展. 有限束宽下光栅对压缩的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2):151~159
- 8 Ming Lai, Shui T. Lai, Casimir Swinger. Single-grating laser pulse stretcher and compressor [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **33**(30):6985~6987
- 9 G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin *et al.*. Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6):414~416
- 10 W. E. White, F. G. Patterson, R. L. Combs *et al.*. Compensation of higher-order frequency-dependent phase terms in chirped-pulse amplification systems [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1343~1348
- 11 B. E. Lemoff, C. P. J. Barty. Quintic-phase-limited, spatially uniform expansion and recompression of ultrashort optical pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(19):1651~1654
- 12 Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Compensation of gain narrowing by using AOPDF in high-power ultra-short pulse laser systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6):2764~2768
刘兰琴, 彭翰生, 魏晓峰等. 高功率超短脉冲激光系统中用 AOPDF 实现增益窄化补偿的实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6):2764~2768