

文章编号: 0258-7025(2008)12-1970-05

展宽器中非对称光谱剪切对输出脉冲对比度的影响

杨庆伟 郭爱林 谢兴龙 张福领 孙美智 高 奇 李美荣 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所国家高功率激光物理实验室, 上海 201800)

摘要 在展宽器中,光谱的剪切情况非常重要,它直接影响输出脉冲的质量。以 Öffner 展宽器为例,参照以往建立的光线追迹模型,建立了分析展宽器中光谱剪切的模型。发现当展宽器的参数确定好后,光栅放置的位置对激光脉冲光谱剪切有非常重要的影响。当光栅相对于光轴中心对称放置时,展宽器容许通过的光谱相对于激光中心波长将是非对称分布的,即此时在展宽器中发生的光谱剪切为非对称光谱剪切,在神光 II 第 9 路拍瓦激光装置中,这种非对称光谱剪切将使输出脉冲对比度下降一个数量级。为了使展宽器中通过的光谱相对于激光中心波长对称分布,需要将光栅相对于光轴非中心对称放置。

关键词 超快光学;啁啾脉冲放大;脉冲对比度;展宽器;光谱剪切;

中图分类号 O436;TN 249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20083512.1970

Effects of Asymmetric Spectral Clipping in the Stretcher on the Output Pulse Contrast

Yang Qingwei Guo Ailin Xie Xinglong Zhang Fuling
Sun Meizhi Gao Qi Li Meirong Lin Zunqi

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In a stretcher, it is important of spectral clipping. It has a direct impact on the quality of the output pulse. Base on the ray-tracing, an analytical spectral clipping model is present in the Öffner stretcher. When the stretcher parameters is determined, the location of the grating placed has a very important influence on the pulse spectral clipping. When the grating placed on the symmetric center about optical axis, the spectral distribution through stretcher will be asymmetric about center wavelength of the laser, that is to say, the spectral clipping will be asymmetric spectral clipping. Therefore, the output pulse contrast will be dropped approximately one magnitude in the SGII ninth beam petawatt upgrade laser facility. In order to keeping the spectral symmetry distribution about center wavelength of the laser through the stretcher, the grating must be placed on the asymmetrical position about optical axis.

Key words ultrafast optics; chirped pulse amplification; pulse contrast ratio; pulse stretcher; spectral clipping

1 引 言

在展宽器^[1~14]的设计过程中,有很多因素影响最终输出脉冲的质量,例如:在展宽器中,由于光谱剪切以及调节误差而引起的光谱相位和幅度的失常等等,都会影响到最终输出脉冲的对比度^[5~10]。

当展宽器中各器件都相对于光轴中心对称放置时,通过展宽器的光谱相对于激光中心波长将是非对称分布的,此时在展宽器中发生的光谱剪切为非对称光谱剪切,这种非对称光谱剪切对输出脉冲的对比度产生很大的影响。本文以 Öffner 展宽器为例参照文献[3, 4, 10]建立的光线追迹模型,建立了

收稿日期:2007-11-16; 收到修改稿日期:2008-04-21

基金项目:国家 863 计划(2007AA804306, 2007AA804801), 中日韩激光聚变高能量密度物理合作研究资助项目。

作者简介:杨庆伟(1977-),男,湖南人,博士研究生,主要从事超强超短激光技术研究。E-mail: yqwphy@163.com

导师简介:林尊琪(1942-),男,广东人,中国科学院院士,博士生导师,主要从事激光惯性约束核聚变各单元技术研究。

E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

分析展宽器中光谱剪切的模型。发现当展宽器的参量确定好后,光栅放置的位置对激光脉冲光谱有非常重要的影响。

2 理论分析

2.1 Öffner 展宽器结构

Öffner 展宽器^[3,4,10]由一块反射式衍射光栅,一块凹面反射镜 M_1 和一块凸面反射镜 M_2 组成,凹面反射镜的曲率半径为 R ,凸面反射镜的曲率半径为凹面反射镜曲率半径的一半,光栅与凹面反射镜的距离为 S_1 。入射光线 PB 经过衍射光栅衍射后,其衍射光线依次经过凹面反射镜、凸面反射镜、凹面反射镜的反射后,反射光线再次进入光栅,经过光栅衍射后,输出光线为 IQ 。

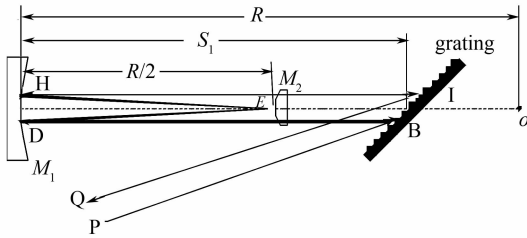


图 1 Öffner 展宽器

Fig. 1 Sketch of the Öffner stretcher

2.2 展宽器光线追迹模型

图 2 为 Öffner 展宽器的光线追迹图,从图中可以看出

$$\overline{IB} = \frac{\left[(R - S_1) + R \frac{\sin \phi_6}{\sin \theta_6} \right] \sin \theta_6}{\sin(\theta_6 + \beta)}, \quad (1)$$

$$\overline{CE} = \frac{R}{2} \sin(\theta_4 - \phi_3), \quad (2)$$

$$\overline{AH} = R \sin(\theta_4 - \phi_5), \quad (3)$$

式中 $\theta_{0\sim6}$ 为入射光线与光轴之间的夹角, $\phi_{1\sim5}$ 为光线与曲面镜曲率半径方向的夹角, β 为光栅与光轴之间的夹角,各角度满足关系

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{d} - \sin \gamma\right);$$

$$\theta_0 = \gamma - \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{d} - \sin \gamma\right);$$

$$\theta_1 = \gamma - \theta_0 - \arcsin\left(\frac{\lambda}{d} - \sin \gamma\right);$$

$$\phi_1 = \arcsin\left[\frac{(R - S_1) \sin \theta_1}{R}\right];$$

$$\phi_2 = \phi_1; \theta_2 = \theta_1 - 2\phi_1; \theta_3 = \theta_2;$$

$$\phi_3 = \arcsin(2\sin \phi_2); \phi_4 = \phi_3;$$

$$\theta_4 = \theta_3 + 2\phi_3; \theta_5 = \theta_4;$$

$$\phi_5 = \arcsin\left[\frac{\sin \phi_3}{2}\right]; \theta_6 = \theta_5 - 2\phi_5 \quad (4)$$

式中 d 为光栅常数, γ 为光脉冲在光栅上的入射角, λ 为激光脉冲的波长, λ_0 为激光脉冲的中心波长。

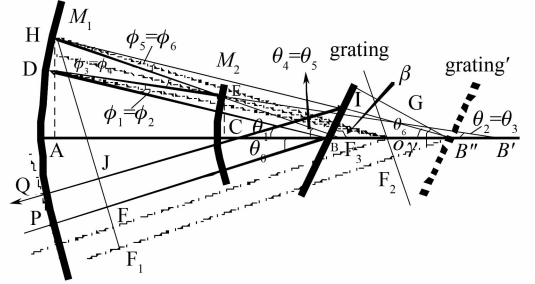


图 2 Öffner 展宽器光线追迹图

Fig. 2 Sketch of ray tracing of Öffner stretcher

2.3 展宽器光谱剪切模型

图 3 为通过 Öffner 展宽器的光谱解析图。图中 AB 为展宽器中的光轴,如果把入射光线看成理想的线光源,那么入射光线入射到光栅上一点—— B 点,在 B 点处发生衍射,不同波长的光线由于衍射角不同而沿着不同的路线前进。根据展宽器中各器件的最大尺寸,画出了容许通过的最长波长和最短波长的光线情况。如果知道了展宽器中光栅、凸面反射镜和凹面反射镜的尺寸,就可以算出展宽器容许通过的光谱带宽 ($\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$)。反过来如果确定好了要求通过展宽器的光谱宽度,也可以很迅速地计算出所要求的光栅、凸面反射镜和凹面反射镜的尺寸。

展宽器中各器件在光轴的上半部分(光栅为 \overline{IB} ,凹面反射镜为 \overline{AH} ,凸面反射镜为 \overline{CE})决定展宽器容许通过的最短波长;展宽器中各器件在光轴的下半部分(光栅为 $\overline{I'B'}$,凹面反射镜为 $\overline{AH'}$,凸面反射镜为 $\overline{CE'}$)决定展宽器容许通过的最长波长。

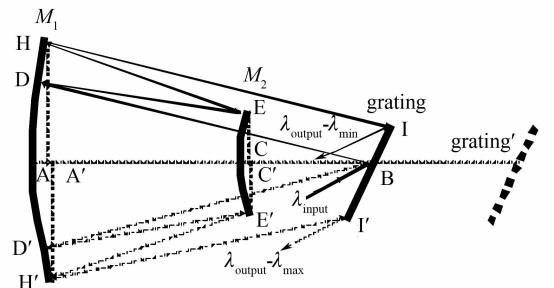


图 3 通过 Öffner 展宽器的光谱解析图

Fig. 3 Analytic map of spectrum through Öffner stretcher

展宽器中各器件的具体尺寸与容许通过的最宽的光谱带宽之间的关系有

光栅的长度为

$$D_{\text{grating}} = \overline{IB}|_{\lambda_{\min}} + \overline{IB}|_{\lambda_{\max}}, \quad (5)$$

凹面反射镜的长度为

$$D_{M_1} = \overline{AH}|_{\lambda_{\min}} + \overline{AH}|_{\lambda_{\max}}, \quad (6)$$

凸面反射镜的长度为

$$D_{M_2} = \overline{CE}|_{\lambda_{\min}} + \overline{CE}|_{\lambda_{\max}}, \quad (7)$$

3 数值模拟

3.1 光谱剪切情况

决定展宽器中最大光谱带宽的关键器件为光栅,一旦光栅的尺寸确定了,也就决定了展宽器中容许通过的最大光谱带宽。以光栅为基准,分析展宽器中光栅相对于光轴中心对称放置时,光轴上下两部分的光谱剪切情况。

模拟过程中采用神光 II 第 9 路拍瓦激光装置中展宽器将要采用的参量,即:1740 线/mm 的光栅,70°角入射,中心波长 1053 nm,凹面反射镜的曲率半径为 3.4 m,凸面反射镜的曲率半径为 1.7 m,采用的啁啾率为 3.2 ns/6.5 nm,等效光栅对的距离为 2.3557 m,凹面反射镜与光栅之间的距离 $S_1 = 2.222$ m,以 390 mm×190 mm 的光栅为基准。假定入射光束的口径为 3 mm,保持展宽器中光栅关于光轴中心对称放置,即光栅在光轴上下两部分的长度都为 195 mm。

模拟结果为,光轴上半部分容许通过的最短波长为 1041.9 nm,光谱带宽为 11.1 nm;光轴下半部分容许通过的最长波长为 1061.9 nm,光谱带宽为 8.9 nm,总的光谱带宽为 20 nm。很明显此时通过展宽器光轴上下两部分的光谱关于激光中心波长不对称,即在展宽器中发生了非对称光谱剪切,光轴上半部分容许通过的光谱带宽比光轴下半部分容许通过的光谱带宽多 2.2 nm。

3.2 器件的放置

当展宽器中光栅关于光轴中心对称放置时,通过展宽器的光谱关于激光中心波长是不对称的,这将严重影响输出脉冲的对比度,同时也会对光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)、主放大器、压缩器等造成影响。为了克服这些影响,需要尽量保证在展宽器中发生的光谱剪切为对称光谱剪切,从而使通过展宽器的光谱关于激光中心波长前后对称。

设展宽器中发生对称光谱剪切时,容许通过展

宽器的最大光谱带宽为 $\Delta\lambda$, 则 $\lambda_{\min} = \lambda_0 - \frac{1}{2}\Delta\lambda$,

$\lambda_{\max} = \lambda_0 + \frac{1}{2}\Delta\lambda$ 。将此数值代入 2.2 和 2.3 节的公

式中,即可求出展宽器中发生对称光谱剪切时,各器件在光轴上下部分的长度。

通过模拟知道,对于长度为 390 mm×190 mm 的光栅来说,采用 3.1 节的初始数据,在保证通过展宽器的光谱关于激光中心波长对称的情况下,容许通过的光谱带宽为 19.08 nm,即 1043.46~1062.54 nm 之间的光谱都可以通过。此时光轴上下两部分通过的光谱带宽相同,都为 9.54 nm,光栅、凹面反射镜、凸面反射镜在光轴上半部分和下半部分的长度如表 1 所示。

表 1 展宽器中保证对称光谱剪切时所需要的器件尺寸

Table 1 Size of the optical elements when the spectral clipping is symmetrical in the stretcher

	$D_{\text{grating}} / \text{mm}$	D_{M_1} / mm	D_{M_2} / mm
Up axis	216.4	175.2	65.1
Down axis	173.6	162.8	60.5
Total	390	338.0	125.6

从表 1 的数据可以看出,为了保证展宽器中通过的光谱关于中心波长对称分布。让光谱在展宽器中发生对称光谱剪切,相对于非对称光谱剪切的情况,发生了如下变化:1)在光栅尺寸相同的条件下,容许通过的光谱带宽变窄了。对称光谱剪切的情况下,容许通过的光谱带宽为 19.08 nm,非对称光谱剪切的情况下,容许通过的光谱带宽为 20 nm;2)对称光谱剪切的情况下,光栅在光轴上下两部分的长度是不一样的,两者相差 42.8 mm;3)对称光谱剪切的情况下,凹面反射镜和凸面反射镜在光轴上下两部分需要的长度几乎相同,两者差别不大。

3.3 非对称光谱剪切对输出脉冲对比度的影响

从 3.1 节的计算结果可以看出,当保持展宽器中各器件关于光轴中心对称放置时,通过展宽器光轴上下两部分的光谱带宽是不一样的,或者说在展宽器中发生了非对称光谱剪切。而这种非对称光谱剪切将对输出脉冲的质量造成很大的影响。

模拟过程中依然采用 3.1 节中采用的数据,以输出脉冲为 500 fs 的高斯脉冲为基准进行计算,单独考虑展宽器中由于非对称光谱剪切造成的对输出脉冲对比度的影响。

假设经过压缩器之后输出脉冲的光谱函数为

$$E(\omega) = \exp\left[-\frac{\tau^2(\omega - \omega_0)^2}{8\ln 2} + i\phi(\omega)\right], \quad (8)$$

式中 τ ($= 500$ fs) 为输出高斯脉冲的时间宽度 (FWHM), ω 为角频率, ω_0 为中心角频率, $\phi(\omega)$ 为经过压缩器之后剩余的相移量, 它可以写成其中心频率 ω_0 处的泰勒展开式

$$\begin{aligned} \phi(\omega) = & \phi(\omega_0) + \phi^{(1)}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \\ & \frac{1}{2}\phi^{(2)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \\ & \frac{1}{6}\phi^{(3)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3 + \\ & \frac{1}{24}\phi^{(4)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^4 + \dots, \quad (9) \end{aligned}$$

式中 $\phi^{(1)}(\omega_0)$ 、 $\phi^{(2)}(\omega_0)$ 、 $\phi^{(3)}(\omega_0)$ 、 $\phi^{(4)}(\omega_0)$ 分别为中心频率处系统的群延迟剩余色散量 (RGD)、二阶剩余色散量 (RSOD)、三阶剩余色散量 (RTOD) 和四阶剩余色散量 (RFOD), 将 $E(\omega)$ 进行反快速傅里叶变换 (FFT), 即可获得最终输出脉冲的强度和对比度为

$$E(T) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} E(\omega) \exp(i\omega T) d\omega, \quad (10)$$

式中 $\omega_1 = \frac{2\pi c}{\lambda_{\max}}$, $\omega_2 = \frac{2\pi c}{\lambda_{\min}}$, 其中 λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为展宽器中容许通过的最长波长和最短波长。

图 4 为展宽器中非对称光谱剪切对输出脉冲对比度的影响, 图中实线代表对称光谱剪切时, 单独考虑展宽器对输出脉冲对比度的影响; 虚线代表非对称光谱剪切时单独考虑展宽器对输出脉冲对比度的影响。很显然对称光谱剪切时的对比度明显优于非对称光谱剪切时的对比度, 两者相差约一个数量级。

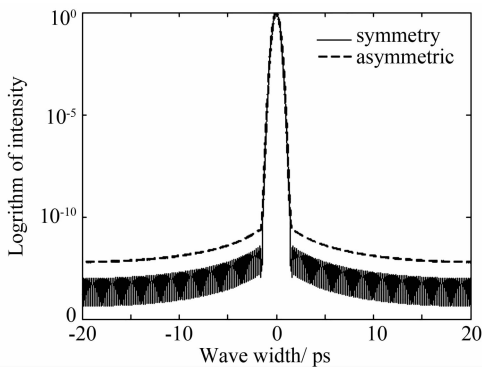


图 4 非对称光谱剪切对输出脉冲对比度的影响

Fig. 4 Asymmetric spectral clipping impact on the output pulse contrast

3.4 对称光谱剪切优于非对称光谱剪切的原因

在啁啾脉冲放大系统中, 展宽器、放大器、压缩器均会对激光脉冲光谱的传输产生影响。从频率域

来考虑, 每一部分都可以看成一个光谱滤波器^[5]。最终输出的激光脉冲强度可以为

$$I(t) = \left[\int A_0(\lambda) T_{\text{STR}}(\lambda) T_{\text{AMP}}(\lambda) T_{\text{COMP}}(\lambda) \times \exp\left[\frac{i2\pi ct}{\lambda} + \phi(\lambda)\right] \left(\frac{c}{\lambda^2}\right) d\lambda \right]^2 \quad (11)$$

式中, $A_0(\lambda)$ 为入射光的光谱函数; $T_{\text{STR}}(\lambda)$ 为展宽器对激光光谱的影响函数; $T_{\text{AMP}}(\lambda)$ 为放大器对激光光谱的影响函数; $T_{\text{COMP}}(\lambda)$ 为压缩器对激光光谱的影响函数; c 为光速; λ 为波长。

在啁啾脉冲放大系统中, 影响输出脉冲对比度最大的因素为展宽器中的光谱剪切^[5]。展宽器中的光谱剪切跟压缩器中的光谱剪切是不一样的。展宽器中的光谱剪切为矩形窗口剪切, 剪切窗口的边缘存在一个跃变, 窗口以内的光谱可以完全通过, 窗口以外的光谱完全不能通过; 而压缩器中的光谱剪切为非矩形窗口剪切, 剪切窗口的边缘对光谱的影响是平缓的、渐变的, 窗口以内的光谱可以完全通过, 窗口以外的光谱可以部分通过。

在展宽器中, 由于矩形窗口剪切, 将会对输出脉冲对比度产生非常大的影响。如果这种光谱剪切关于中心波长是非对称的, 即非对称光谱剪切, 将会更加破坏输出脉冲的对比度。从物理层面上是容易理解的, 展宽器中由于光谱剪切将使系统丢失大部分的高频成分, 从而引起输出脉冲失真, 即对比度下降。如果在展宽器中发生非对称光谱剪切, 相比于对称光谱剪切的情况下, 将使系统丢失部分低频成分, 而多保留部分高频成分。光谱的低频成分保持脉冲的形状, 高频成分保持脉冲的精细结构, 两者比较而言, 低频成分更为重要。因此如果在展宽器中发生非对称光谱剪切, 那么即使在保持相同带宽通过展宽器的情况下, 输出脉冲的对比度也将比对称光谱剪切时的情况差。

3.5 实际的解决方法

为了保证高对比度的激光脉冲输出, 在展宽器中需要保证光谱对称通过, 即保证展宽器中发生对称光谱剪切。在实际应用中, 由于光轴必须在凹面反射镜和凸面反射镜轴线的位置上, 所以实际上光轴是不能调整的, 因此只能调整光栅的位置, 使光栅关于光轴非中心对称放置, 以保证在展宽器中发生对称光谱剪切。

4 结 论

当展宽器中各器件的放置都相对于光轴中心对

称放置时,在展宽器中将发生非对称光谱剪切,而这种非对称光谱剪切将对输出脉冲的质量造成很大的影响。以 Öffner 展宽器为例,建立了分析展宽器中光谱剪切的模型,发现非对称光谱剪切将对输出脉冲质量造成很大的影响。为了保证高对比度的激光脉冲输出,在展宽器的设计中,应该尽量保证通过展宽器的光谱关于激光中心波长对称分布,即在展宽器中发生对称光谱剪切,而为了保证在展宽器中发生对称光谱剪切,需要适当调整展宽器中光栅的放置位置,使它相对于光轴非中心对称放置,以保证在展宽器中发生对称光谱剪切。

参 考 文 献

- 1 E. B. Treacy. Optical pulse compress with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9):454~458
- 2 O. E. Martinez. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion; application to fiber compression in 1.3~1.6 μm region[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(1):59~64
- 3 G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin *et al.*. Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification [J], *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6), 414~416
- 4 Jie Jiang, Zhigang Zhang, Toshifumi Hasama. Evaluation of chirped-pulse-amplification systems with Offner triplet telescope stretchers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4), 678~683
- 5 I. N. Ross, J. L. Collier. Improved contrast and power from a chirped pulse amplification laser system [R]. Central Laser Facility Annual Report-Vulcan Petawatt, 1999/2000, 224~226
- 6 M. Trentelman, Ian N. Ross, Colin N. Danson. Finite size compression gratings in a large aperture chirped pulse amplification laser system[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(33), 8567~8573
- 7 Xie Xinglong, Zhu Jianqiang, Liu Fengqiao *et al.*. 20 TW sub-picosecond laser system (SPS) applied for the neutron experiment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):865~872
- 8 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
- 9 Wang Hongying, Liu Hongjun, Xiong Hongjun *et al.*. Experimental study of large-ratio offner stretcher for OPCPA laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9):1359~1364
- 10 Tian Jinrong, Sun Jinghua, Wei Zhiyi *et al.*. Theoretical and experimental studies on large-ratio stretching of femto second pulse with Öffner triplet stretcher [J]. *Acta Physics Sinica*, 2005, **54**(3), 1200~1207
- 11 Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):272~274
- 12 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing. Optical parametric amplification in periodically poled LiNbO₃ for high energy perawatt laser system front end [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1092~1095
- 13 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):721~729
- 14 Wang Hongying, Liu Hongjun, Liu Xiaoli *et al.*. Dispersion control in broadband optical parametric chirped pulse amplification laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1338~1343