

Öffner 展宽器曲面镜误差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 Öffner 展宽器的设计研究中,对曲面镜曲率半径的误差研究非常重要,它直接影响输出脉冲的质量。因此有必要分析 Öffner 展宽器中曲面镜曲率半径的误差对输出脉冲对比度的影响。参考 Öffner 展宽器的光线追迹模型,建立了 Öffner 展宽器中曲面镜曲率半径存在误差时的光线追迹模型;根据建立的模型,详细分析了曲面镜曲率半径的误差对输出脉冲质量的影响;发现在目前曲面镜曲率半径的加工误差在 0.2%~0.5% 的情况下,完全可以满足神光 II 拍瓦激光装置中对展宽器的要求;同时发现如果曲面镜曲率半径存在误差时,应该尽量使两曲面镜之间的距离保持为凹面反射镜曲率半径的一半,而不是使两曲面镜保持同心。

关键词 非线性光学;啁啾脉冲放大;展宽器;光线追迹;脉冲对比度;加工误差

中图分类号 O436; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1584

Influence of Mirror Curvature Radius Manufacture Errors in Öffner Stretcher on Output Pulse Contrast

Yang Qingwei Guo Ailin Xie Xinglong Zhang Fuling Sun Meizhi

Gao Qi Li Meirong Lin Zunqi

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

Abstract In the design of the Öffner stretcher, it is very important to investigate the mirror curvature radius errors, which has a direct impact on the quality of the output pulse. So it is necessary to analyse the effect on the output pulse contrast due to the mirror curvature radius manufacture errors in the Öffner stretcher. A ray-tracing model for Öffner stretcher with these errors is established. Based on the model, effects on output pulse contrast through the stretcher is analyzed. When the mirror curvature radius error is between 0.2%~0.5%, it can fully meet the requirements for the SHENGUANG II petawatt laser facility. Also, when there is error for the mirror curvature radius, keeping the distance between concave mirror and convex mirror half of curvature radius of the concave mirror is better than keeping the two curve mirrors in the same center.

Key words nonlinear optics; chirped pulse amplification; pulse stretcher; ray tracing; pulse contrast; manufacture error

1 引 言

Öffner 展宽器^[1~13]中凹面反射镜和凸面反射镜的共心设计使得系统无像差,并能获得较大的展宽量,所以在很多高能拍瓦激光装置被采用。但是,Öffner 展宽器的消像差特性是有条件的,必须严格保证凸面反射镜的曲率半径为凹面反射镜曲率半径

的一半。如果存在误差,共心设计将被打破,带来像差而影响输出脉冲的质量。事实上,凹面反射镜和凸面反射镜在加工过程中,它们的曲率半径总是存在一定的误差的,因此有必要研究这种误差带来的影响。

本文重点讨论 Öffner 展宽器中曲面镜曲率半

收稿日期: 2007-10-25; 收到修改稿日期: 2008-01-22

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804306)资助课题。

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

导师简介: 林尊琪(1942-),男,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等方面的研究。

径存在误差时的情况,参考文献^[3,4,9]建立的理想情况下的光线追迹模型,建立了 Öffner 展宽器中曲面镜曲率半径存在误差时的光线追迹模型;详细分析了曲面镜曲率半径的误差对输出脉冲质量的影响。

2 展宽器结构和光线追迹模型

该展宽器由一块反射式的衍射光栅,一块柱形或者球形凹面反射镜 M_1 和一块柱形或者球形凸面反射镜 M_2 组成(图 1)。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

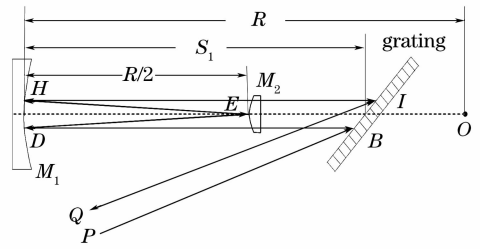


图 1 Öffner 展宽器

Fig. 1 Sketch of Öffner stretcher

线再次进入光栅,经过光栅衍射后,输出光线为 IQ 。

图 2(a)为 Öffner 展宽器中曲面镜曲率半径存在误差时保持凹面反射镜和凸面反射镜同心放置情况下的光线追迹模型。通过分析知道,经过展宽器后的光程为

$$\begin{aligned}
 P &= PB + BD + DE + EH + HI + IJ + JQ, \\
 PB &= R_1 - (R_1 - S_1)\cos\theta_0, \\
 BD &= \frac{R_1 \sin(\theta_1 - \phi_1)}{\sin\theta_1}, \\
 DE &= \frac{R_1 \sin(\theta_1 - \phi_1)}{\sin\theta_2} - \frac{R_2 \sin(\theta_3 + \phi_3)}{\sin\theta_3}, \\
 EH &= \frac{R_1 \sin(\theta_5 - \phi_5)}{\sin\theta_5} - \frac{R_2 \sin(\theta_3 + \phi_3)}{\sin\theta_4}, \\
 HI &= \frac{R_1 \sin(\theta_5 - \phi_5)}{\sin\theta_6} - \left(R_1 + \frac{R_1 \sin\phi_6}{\sin\theta_6} - S_1\right) \frac{\cos(\gamma - \theta_0)}{\cos(\gamma - \theta_0 - \theta_6)}, \\
 IJ &= HI \cos(\theta_0 + \theta_6), \\
 JQ &= R_1 - \frac{R_1 \sin(\theta_5 - \phi_5) \cos(\theta_0 + \theta_6)}{\sin\theta_6} + \frac{R_1 \sin\phi_6 \cos\theta_0}{\sin\theta_6},
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中 R_1 为凹面反射镜的曲率半径, R_2 为凸面反射镜的曲率半径, S_1 为光栅与凹面反射镜之间的距离, $\theta_0 \sim \theta_6$ 为入射光线与光轴之间的夹角, $\phi_1 \sim \phi_5$ 为光线与曲面镜曲率半径方向的夹角,各角度满足下列关系:

$$\begin{aligned}
 \theta_0 &= \gamma - \arcsin(\lambda_0/d - \sin\gamma), \\
 \theta_1 &= \gamma - \theta_0 - \arcsin(\lambda/d - \sin\gamma), \\
 \phi_1 &= \arcsin[(R_1 - S_1)\sin\theta_1/R_1], \\
 \phi_2 &= \phi_1; \theta_2 = \theta_1 - 2\phi_1; \theta_3 = \theta_2;
 \end{aligned}$$

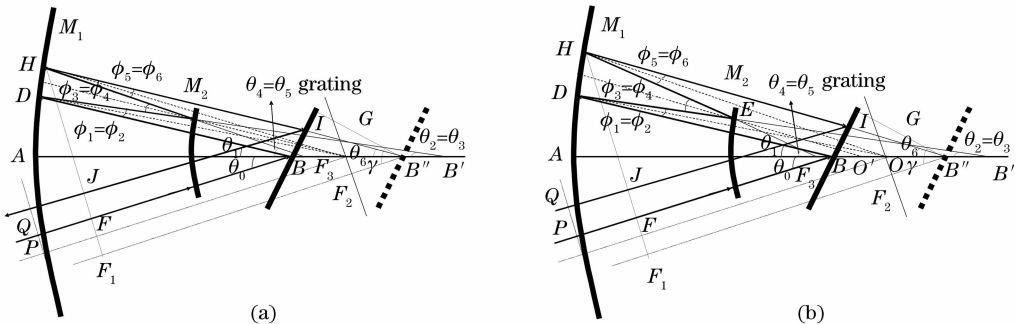


图 2 Öffner 展宽器曲面镜曲率半径存在误差的情况下,保持同心(a),不同心(b)时的光线追迹

Fig. 2 The sketch of ray tracing in the same center (a), different center (b) when the mirror curvature radius of Öffner stretcher includes error

$$\begin{aligned}\phi_3 &= \arcsin(R_1 \sin \phi_2 / R_2); \phi_4 = \phi_3; \\ \theta_4 &= \theta_3 + 2\phi_3; \theta_5 = \theta_4; \\ \phi_5 &= \arcsin\left(\frac{R_2 \sin \phi_3}{R_1}\right); \theta_6 = \theta_5 - 2\phi_5\end{aligned}$$

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

图 2(b) 为 Öffner 展宽器中曲面镜曲率半径存在误差时不保持两曲面镜同心放置, 而保持两曲面镜之间的距离为凹面反射镜曲率半径的一半时的光线追迹模型。其中凹面反射镜的曲率半径为 R_1 , 凸面反射镜的曲率半径为 R_2 , 光栅与凹面反射镜的距离为 S_1 , 通过分析知道, 经过展宽器后的光程为 $P = PB + BD + DE + EH + HI + IJ + JQ$, $\phi_3 = \arcsin[(R_1 \sin \phi_2 / \sin \theta_2 + \Delta S)(\sin \theta_3 / R_2)]$, $\phi_5 = \arcsin[(R_2 \sin \phi_3 / \sin \theta_4 + \Delta S)(\sin \theta_5 / R_1)]$, 式中 ΔS 为凹面反射镜与凸面反射镜曲率中心之间的距离。

在展宽器中, 由于入射光与反射光于光栅的不同点, 需要引入一个附加相位修正因子^[1]:

$$\phi_c(\lambda) = \frac{2\pi IB}{d} = \frac{2\pi[(R - S_1) + R \sin \phi_6 / \sin \theta_6] \sin \theta_6}{d \cos(\gamma - \theta_0 - \theta_6)}, \quad (2)$$

总的相移为

$$\phi(\lambda) = \frac{2\pi P}{\lambda} - \phi_c(\lambda). \quad (3)$$

根据此相移表达式, 利用数值计算的方法即可求得展宽器中各阶色散随系统参量的变化。

“等效”光栅对中群延迟色散、二阶色散(SOD)、三阶色散以及四阶色散的计算采用文献[9]中的表达式。

3 曲面镜曲率半径误差的影响

3.1 模型

模拟过程中采用神光II拍瓦激光装置中展宽器将要采用的参量, 1740 lines/mm 的光栅, 70°角入射, 中心波长 1053 nm, 展宽器中容许通过的光谱宽度为 17 nm, 主放大器输出的脉冲光谱宽度为 3.4 nm, 理想情况下, 凹面反射镜的曲率半径为 3.2 m, 凸面反射镜的曲率半径为 1.6 m, 采用的啁啾率为 3.2 ns/7 nm, 等效光栅对的距离为 2.1874 m, 凹面反射镜与光栅之间的距离 $S_1 = 2.1063$ m, 经过压缩器输出的脉冲时间宽度在 500 fs~1 ps 之间。在模拟输出脉冲强度和对比度的计算中, 以输出脉冲为

500 fs 的高斯脉冲来进行计算, 单独考虑展宽器中由于曲面镜曲率半径的加工误差对输出脉冲质量的影响。

假设经过压缩器之后的输出脉冲的光谱函数为

$$E(\omega) = \exp\left[-\frac{\tau^2(\omega - \omega_0)^2}{8 \ln 2} + i\phi(\omega)\right], \quad (4)$$

式中 $\tau = 500$ fs 为输出高斯脉冲的时间宽度, 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:

$$\begin{aligned}\phi(\omega) &= \phi(\omega_0) + \phi^{(1)}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \\ &\quad \frac{1}{2}\phi^{(2)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \\ &\quad \frac{1}{6}\phi^{(3)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3 + \\ &\quad \frac{1}{24}\phi^{(4)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^4 + \dots, \quad (5)\end{aligned}$$

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

$$E(T) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} E(\omega) \exp(i\omega T) d\omega, \quad (6)$$

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

3.2 对展宽器各阶剩余色散量的影响

图 3 分别为当 Öffner 展宽器中曲面镜的曲率半径存在误差时, 在中心波长处的剩余色散量随着误差量的变化关系。图中实线代表凹面反射镜和凸面反射镜保持同心放置时的情况, 虚线代表凹面反射镜和凸面反射镜不保持同心放置。但是使凹面反射镜和凸面反射镜之间的距离为凹面反射镜曲率半径的一半, 即 $\Delta S = R_1/2 - R_2$ 时的情况, 其中 R_1 和 R_2 分别代表凹面反射镜和凸面反射镜的实际曲率半径。

从图 3 可以看出, 当曲面镜曲率半径存在加工误差时, 不管是否保持同心放置, 各阶剩余色散量都随着误差量的增加而迅速的增加; 曲面镜曲率半径存在加工误差的情况下, 当保持同心放置时, 二阶剩余色散量明显小于不保持同心放置时的情况; 三阶剩余色散量稍大于不保持同心放置时的情况; 四阶剩余色散量明显大于不保持同心放置时的情况。

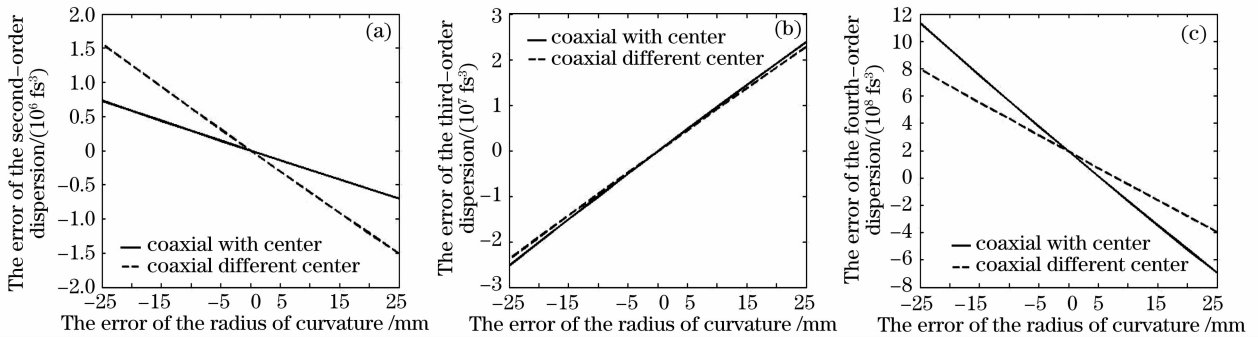


图 3 在中心波长处二阶(a),三阶(b),四阶(c)剩余色散量随着误差量的变化

Fig. 3 The second- (a), the third- (b), the fourth- (c) order remaining dispersion in the center wavelength as a function of the curvature radius errors

3.3 消除误差对二阶剩余色散量的影响

在考虑全系统的色散补偿的时候,先应该把二阶剩余色散补偿掉。在高对比度大能量拍瓦激光装置中,通常使展宽器和压缩器中光栅的刻线密度和入射角尽量保持一致。在这种情况下,要补偿二阶剩余色散,需要适当调整压缩器中光栅对的距离。在做理论计算时,需要适当改变展宽器中“等效”光栅对的距离,使得展宽器在中心波长处产生的二阶色散量的大小正好与修正后的“等效”光栅对产生的二阶色散量的大小相等、符号相反。

通过理论和数值模拟计算知道,在 Öffner 展宽器中,当凹面镜反射镜和凸面反射镜曲率半径的失调量为 $\Delta R (\Delta R = R_1/2 - R_2)$ 时,为了补偿这种失调量对二阶色散的影响,需要在等效光栅对中附加上

一项 $\xi \Delta R$ 。其中 ξ 是与 ΔR 相关的一个量,随着 ΔR 大小的不同而不同,修正之后的“等效”光栅对的距离为: $b = 2 \times (R - S_1 - \xi \Delta R)$ 。

3.4 补偿二阶剩余色散后,各阶剩余色散量随误差量的变化

图 4 分别为曲面镜曲率半径存在误差时,在凸面反射镜和凹面反射镜保持同心放置的情况下,中心波长处的三阶和四阶剩余色散量分别在二阶剩余色散补偿前后随着误差量的变化曲线。图中实线代表补偿二阶剩余色散后的效果,虚线代表未补偿二阶剩余色散时的效果。从图中可以看出,补偿二阶剩余色散后,三阶和四阶剩余色散量都明显小于二阶剩余色散补偿前的效果。

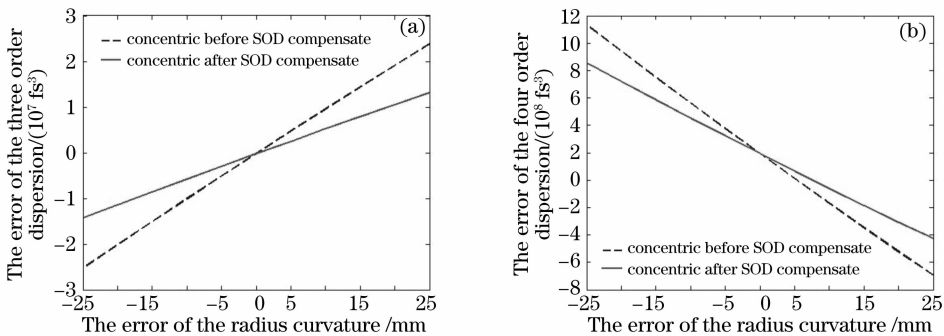


图 4 在保持同心时,二阶剩余色散补偿前后中心波长处三阶(a),四阶(b)剩余色散量随着误差量的变化

Fig. 4 The third-order (a), the fourth-order (b) remaining dispersion in the center wavelength as a function of the curvature radius errors before or after the second dispersion is compensated in the different center

图 5 分别为曲面镜曲率半径存在误差时,在凸面反射镜和凹面反射镜不保持同心放置但是保持它们之间的距离为凹面反射镜曲率半径一半的情况下,中心波长处三阶和四阶剩余色散量在二阶剩余色散补偿前后随着误差量的变化曲线。图中实线代表补偿二阶剩余色散后的效果,虚线代表未补偿二

阶剩余色散时的效果。从图中可以看出,二阶剩余色散补偿后,三阶和四阶剩余色散量都明显小于二阶剩余色散补偿前的效果,且补偿后的结果几乎不随误差量的变化而变化,其效果比保持同心时效果好。

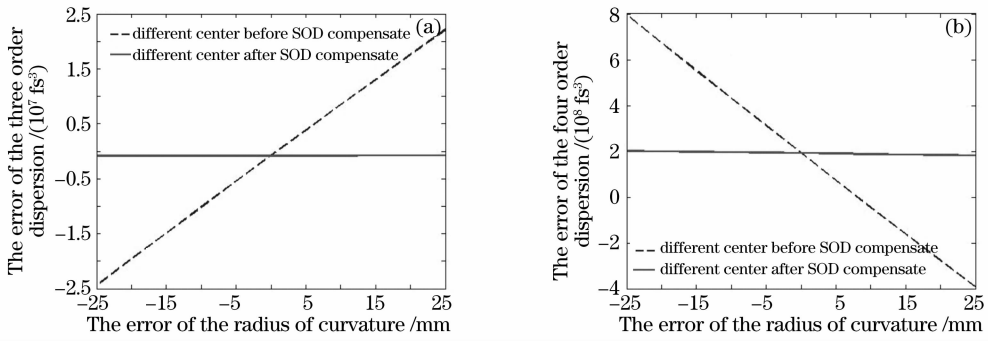


图 5 不保持同心时,二阶剩余色散补偿前后中心波长处三阶(a),四阶(b)剩余色散量随着误差量的变化

Fig. 5 The third-order (a), the fourth-order (b) remaining dispersion in the center wavelength as a function of the curvature radius errors before or after the second dispersion is compensated in the different center

3.5 半径误差对输出脉冲强度和对比度的影响

图 6 分别为 Öffner 展宽器中,曲面镜曲率半径存在误差,当凹面反射镜和凸面反射镜保持同心放置时,在二阶色散补偿后,三阶剩余色散量对输出脉冲强度和对比度的影响。从图 6(a)可以看出,三阶剩余色散量对输出脉冲强度的前后沿有一些影响,当 ΔR 为负值时,输出脉冲的强度曲线向后倾斜;当

ΔR 为正值时,输出脉冲的强度曲线向前倾斜。从图 6(b)可以看出,三阶剩余色散对输出脉冲对比度的前后沿有一些影响,当 ΔR 为负值时,对输出脉冲对比度的下降沿有影响;当 ΔR 为正值时,对输出脉冲对比度的上升沿有影响;但是在 ± 5 ps 的位置,输出脉冲对比度的大小几乎不变。

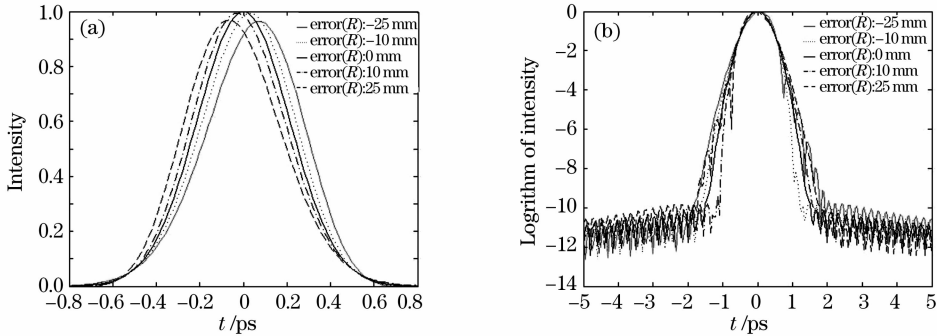


图 6 同心放置时,二阶色散补偿后,三阶剩余色散量对输出脉冲强度(a),输出脉冲对比度(b)的影响

Fig. 6 The third-order remaining dispersion impact on the intensity of the output pulse (a), contrast of the output pulse (b), after the second-order dispersion is compensated in the same center

但是当不保持同心,而使凹面反射镜与凸面反射镜之间的距离等于凹面反射镜曲率半径一半的情况下,补偿二阶色散后,通过模拟计算可知,剩余的三阶色散量在 10^5 fs³ 量级,此时对于 500 fs 的输出脉冲来说,这种影响可以忽略。

通过模拟发现,当曲面镜曲率半径存在误差的情况下,不管是否保持同心放置,通过补偿二阶剩余色散后,四阶剩余色散量都在 10^8 fs⁴ 量级。此时对于 500 fs 的输出脉冲来说,该量级的四阶剩余色散量对输出脉冲的影响可以忽略。

目前曲面镜曲率半径的加工误差一般在 0.2%~0.5%之间,对于曲率半径为 3.2 m 的凹面反射镜和曲率半径为 1.6 m 的凸面反射镜来说,两曲面镜曲率半径的失调量在 $(\pm 9.6 \sim \pm 24)$ mm 之间,

而实际上,如果以凹面反射镜曲率半径为基准,则两者的失调量可表示为: $R_2 = R_1/2 - \Delta R$, 其中 $\Delta R = \Delta R_1 + \Delta(R_2/2)$, 即两曲面镜曲率半径的误差量在 $(\pm 6.4 \sim \pm 16)$ mm 之间,在这种情况下,不管是否保持同心放置,从模拟结果看,完全可以满足神光 II 拍瓦激光装置中对展宽器的要求。

4 结 论

采用光线追迹法为 Öffner 展宽器当曲面镜的曲率半径存在误差时,就保持同心与不保持同心(保持凹面反射镜与凸面反射镜之间的距离为凹面反射镜曲率半径的一半)两种情况下,分别建立了模型。利用建立的模型,分别分析了曲面镜曲率半径存在误差时对高阶色散以及输出脉冲强度和对比度的影

响,通过分析发现当曲面镜曲率半径存在误差时,不保持同心的情况下,其效果要比保持同心时的效果要好;同时也发现,在目前曲面镜曲率半径加工精度的条件下,完全可以满足神光 II 拍瓦激光装置中对展宽器的要求。

参 考 文 献

- 1 Edmond B. Treacy. Optical pulse compress with diffraction gratings[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, **QE-5**(9): 454~458
- 2 Oscar Eduardo Martinez. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: application to fiber compression in 1.3~1.6 μm region [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(1): 59~64
- 3] G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin *et al.*. Aberration-free stretcher design for ultra-short pulse amplification [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6): 414~416
- 4] Jie Jiang, Zhigang Zhang, Toshifumi Hasama. Evaluation of chirped-pulse-amplification systems with Öffner 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, 1999/2000. 224~226
- 6 Xie Xinglong, Zhu Jianqiang, Liu Fengqiao *et al.*. 20 TW subpicosecond laser system (SPS) applied for the neutron experiment [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(10): 865~872
谢兴龙,朱健强,刘凤翘等. 20 TW 亚皮秒激光系统 (SPS) 与中子产生实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 865~872
- 7 Yang Xin, Xie Xinglong, Li Meirong *et al.*. Analysis of misalignment and spectrum bandpass of pulse stretcher[J]. *Chin. 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
- 8 Wang Hongying, Liu Hongjun, Xiong Hongjun *et al.*. Experimental study of large-ratio Öffner stretcher for OPCPA laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1359~1364
王红英,刘红军,熊红军等. 用于 OPCPA 高展宽比的展宽器 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1359~1364
- 9 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
田金荣,孙敬华,魏志义等. Öffner 展宽器高倍率展宽脉冲的理论实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(3): 1200~1207
- 10 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
郭爱林,杨庆伟,谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
- 11 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing. Optical parametric amplification in periodically poled LiNbO₃ for high energy perawatt laser system front end[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1092~1095
高艳霞,赵改清. 用于高能拍瓦激光系统前端的周期极化 LiNbO₃ 光参量放大[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1092~1095
- 12 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 721~729
- 13 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
王红英,刘红军,李小莉等. 宽带光学参量啁啾脉冲放大系统的色散控制[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1338~1343