

宽光束进入展宽器提高输出脉冲对比度分析*

杨庆伟, 郭爱林, 谢兴龙, 张福领, 高奇, 李美荣, 林尊琪

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

摘要:根据分析啁啾脉冲对比度模型, 通过光线追迹法详细分析了展宽器对输出脉冲对比度的影响. 发现当扩大进入展宽器的入射光束口径, 从 2 mm 扩大到 40 mm 时, 输出脉冲的对比度提高了近两个数量级; 同时发现在相同条件下, 当输入脉冲为双曲正割函数时, 其输出脉冲的对比度明显好于输入脉冲为高斯脉冲和矩形脉冲的情形.

关键词:啁啾脉冲放大; 对比度; 脉冲展宽器; 脉冲对比度

中图分类号: O436; TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)05-0891-5

0 引言

在高峰值功率激光脉冲与物质作用的领域内, 人们更关心本底前沿的强度, 通常称为预脉冲. “快点火”的理论研究表明, 来自 CPA 打靶光脉冲的焦斑光强高达 $10^{20} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$, 如果预脉冲的强度超过 10^{12} W/cm^2 , 就足以破坏微球靶^[1-3], 因此要求打靶光脉冲的对比度(定义为主脉冲峰值与达到微球靶破坏阈值的预脉冲强度之比)应大于 10^8 . 因而, 在(超)强激光系统中, 光脉冲的对比度是极为重要的指标^[4].

影响光脉冲对比度的因素很多, 例如: 在展宽器和压缩器中, 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, 非线性 B 积分等等, 都会影响到最终输出脉冲的对比度^[5-16]. 但是影响光脉冲对比度的主要因素还是由于在展宽器中尖锐的光谱剪切^[3].

文献[1]详细讨论了在压缩器中, 有限的光栅尺寸对输出脉冲对比度的影响. 本文重点讨论在展宽器中, 有限的光栅尺寸对输出脉冲对比度的影响, 通过计算发现如果扩大进入展宽器的光束口径, 能够减少展宽器的光谱剪切, 进而大大改善输出脉冲的对比度.

1 理论模型

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, 每一部分都可以看成一个光谱滤波器^[3]. 因此最终输出的光强表示为

$$I(t) = \int A_o(\lambda) T_{STR}(\lambda) T_{AMP}(\lambda) T_{COMP}(\lambda) \cdot$$

$$\exp \left[\frac{i2\pi Ct}{\lambda} + \phi(\lambda) \right] \left(\frac{-C}{\lambda^2} \right) d\lambda \quad (1)$$

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

文献[1]讨论了压缩器对激光光谱的影响, 以下讨论展宽器对激光光谱的影响^[5].

图 1 为展宽器“等效”光栅对光谱剪切原理. 其中 $\lambda_0 < \lambda_1$, $D(\lambda)$ 为光谱剪切函数, $W(\lambda)$ 为波长为 λ 的光谱在输出平面上的输出口径函数(以下简称输出口径函数), $P(\lambda)$ 为波长为 λ 的光谱在输出平面上中心光线的离轴位置函数(以下简称离轴位置函

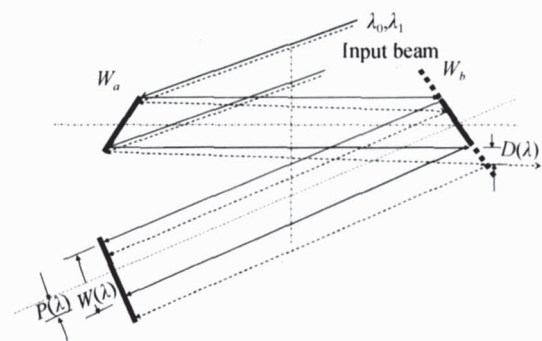


图 1 展宽器“等效”光栅对光谱剪切原理

Fig. 1 Grating geometry for pulse stretcher demonstrating the wavelength-dependent spectral clipping at the second grating that is due to the spectral shear

数), W_a 为输入光束在展宽器光栅上的投影长度, W_b 为展宽器中光栅的实际长度, 显然: $W_a < W_b$. 在这里定义光谱剪切函数

$$D(\lambda) = L \cos \beta(\lambda) [\tan \beta(\lambda) - \tan \beta(\lambda_0)]$$

式中 $\sin \alpha + \sin \beta(\lambda) = \lambda N$, α 为入射角; $\beta(\lambda)$ 为波长为 λ 处的衍射角; $\beta(\lambda_0)$ 为中心波长 λ_0 处的衍射角; N 为光栅的刻线密度; L 为等效光栅对之间的轴线距离. 根据几何关系, 可以得出以下关系

$$1) |D(\lambda)| < (W_b - W_a) / 2 \text{ 时}$$

*国家 863 高技术研究发展计划(2005AA842090)资助
Tel: 021-69918294 Email: yqwphy@163.com
收稿日期: 2006-11-29

$$W(\lambda) = W_a \cos \alpha; P(\lambda) = D(\lambda) \cos \alpha;$$

$$2) (W_b - W_a) / 2 < |D(\lambda)| < (W_b + W_a) / 2 \text{ 时}$$

$$W(\lambda) = [(W_b + W_a) / 2 - |D(\lambda)|] \cos \alpha;$$

$$P(\lambda) = [k(W_b - W_a) / 4 + D(\lambda) / 2] \cos \alpha;$$

式中: $D(\lambda) > 0, k = 1; D(\lambda) < 0, k = -1;$

3) 当 $|D(\lambda)| > (W_b + W_a) / 2$ 时

$$W(\lambda) = 0, P(\lambda) = \infty;$$

对于轴线上的光束来说

$$T_{STR}(\lambda) = \frac{W(\lambda)}{W(\lambda_0)} \times \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (2)$$

2 数值模拟

以下讨论仅考虑展宽器单独作用时的情况,即入射光束通过展宽器展宽后,不考虑放大器,直接通过理想的压缩器压缩回去 ($T_{AMP}(\lambda) = 1, T_{COMP} = 1$). 此时输出的光谱为

$$A(\lambda) = A_0(\lambda) [W(\lambda) / W(\lambda_0)] [\lambda_0 / \lambda] \quad (3)$$

将方程(3)代入方程(1),进行以下讨论.

2.1 输出光谱的口径以及偏离情况

讨论过程中所采用的参量均为某激光装置中将要采用的参量,其中展宽器的等效光栅对的距离为 5 452 mm,光栅的长度为 250 × 100 mm,种子激光的时间脉冲宽度为 200 fs,中心波长为 1 053 nm,光谱的半高全宽为 8 nm;入射角采用 48°角入射,光栅的刻线密度为 1480 线/mm.

图 2 和图 3 分别为 2 mm 和 40 mm 的入射光束进入展宽器后,输出口径函数 $W(\lambda) / W(\lambda_0)$ 和离轴位置函数 $P(\lambda)$ 随波长的变化情况.

从图 2 可以看出,入射光束口径为 2 mm 时,长度为 250 × 100 mm 的光栅允许通过的光谱底宽为 10.5 nm;当入射光束口径扩大到 40 mm 时,长度为 250 × 100 mm 的光栅允许通过的光谱底宽为 12.8 nm,此时允许通过的光谱底宽增加了 2.3 nm.

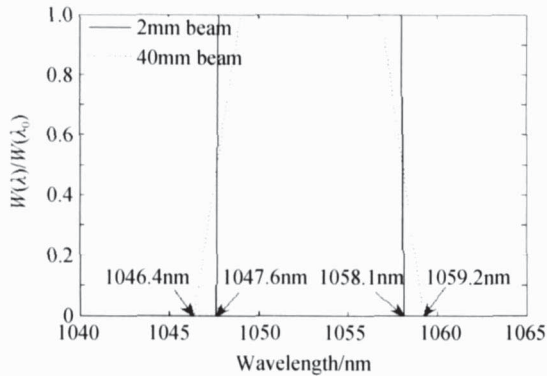


图 2 入射光束口径分别为 2 mm 和 40 mm 时,展宽器的光谱滤波函数

Fig. 2 Effective aperture size $W(\lambda) / W(\lambda_0)$ as a function of wavelength for 2 mm and 40 mm beam in stretcher gratings

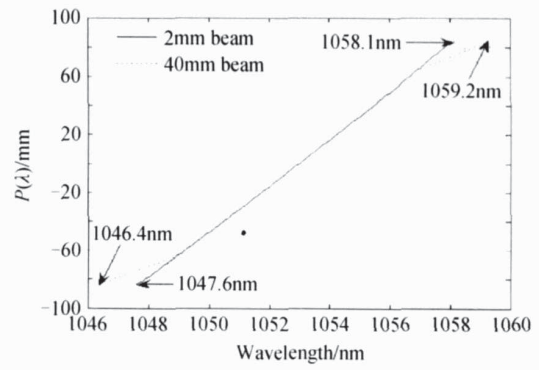


图 3 入射光束口径分别为 2 mm 和 40 mm 时,中心光线的离轴位置 $P(\lambda)$ 随波长的变化

Fig. 3 Off-axis position of the center ray $P(\lambda)$ as a function of wavelength for 2 mm and 40 mm beam in stretcher gratings

从图 3 可以看出,离轴位置函数 $P(\lambda)$ 在入射光束扩束前后变化很小.

2.2 进入展宽器的光谱底宽对输出脉冲对比度的影响

理想情况下,考虑通过展宽器的光束为细光束,通过改变展宽器中光栅的长度,即可改变通过展宽器的光谱的多少,来确定输出脉冲的对比度.所采用的参量同上.假定入射脉冲为高斯型,通过改变进入展宽器的光谱底宽,以观察输出脉冲对比度的改变.

从图 4 可以看出,随着进入展宽器的光谱底宽的增加,输出脉冲的对比度也相应的增加.当进入展宽器的光谱为 10 nm 时,输出脉冲的对比度约为 10^4 ,此时需要的展宽器光栅长度为 242 mm;当进入展宽器的光谱为 17 nm 时,输出脉冲的对比度增加到 10^6 ,此时需要的展宽器光栅的长度也增加到 410 mm;要达到输出脉冲 10^8 的对比度,需要通过展宽器的光谱底宽为 23 nm,此时需要的展宽器光栅长度为 553 mm.具体的光栅长度与底宽的关系见图 5.

从图 5 可以看出,通过增加光栅的长度来减少展宽器的光谱剪切,达到提高输出脉冲对比度的方

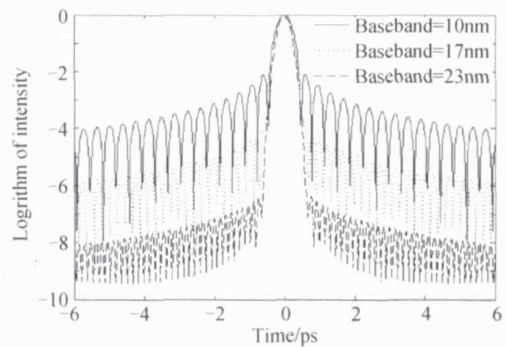


图 4 理想情况下,进入展宽器的光谱底宽对脉冲对比度的影响

Fig. 4 Effects of the base bandwidth into stretcher on pulse contrast under ideal circumstances

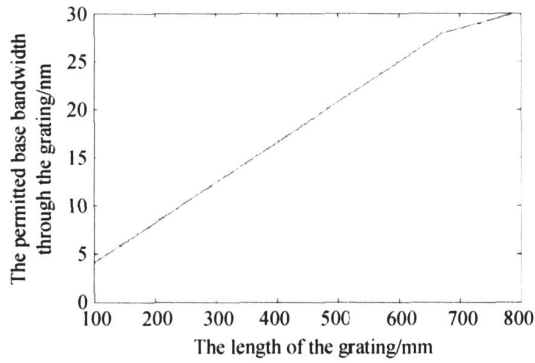


图5 在展宽器中,通过的光谱底宽与光栅长度的关系
Fig.5 The relationship between grating length and spectrum base bandwidth in stretcher

法,付出的代价是非常高的,需要成倍地增加光栅的长度.而实际中,要获得这么长的光栅,是很困难的,因此这种依靠增大光栅的长度来增加通过展宽器的光谱,从而提高输出脉冲对比度的方法也是有一定局限的.

2.3 进入展宽器的光束扩束与非扩束对输出脉冲对比度的影响

以下模拟采用的参量均为某激光装置中将要采用的参量.考虑当不同的入射脉冲进入展宽器时,入射光束扩束与非扩束对输出脉冲对比度的影响.采用的参量为:扩束前入射光束口径为 2 mm,扩束后入射光束口径为 40 mm.则对于 250 × 100 mm 的光栅来说,根据 2.1 节的计算可知,入射光束口径为 2 mm 时,允许通过的光谱底宽为 10.5 nm;当入射光束口径扩大到 40 mm 时,允许通过的光谱底宽为 12.8 nm,此时允许通过的光谱底宽增加了 2.3 nm.另外光束口径扩大后,将同时影响到入射光谱的强度分布,从而当入射光束口径扩大后,将从两个方面影响输出脉冲的对比度.1)增加了进入展宽器的光谱底宽;2)影响到入射光谱的强度分布.图 6 为入射脉冲为高斯脉冲的情况.图 7 为入射脉冲为双曲正割函数的情况.图 8 入射脉冲的光谱为矩形时的

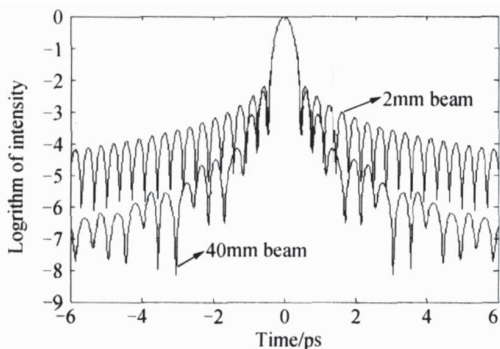


图6 入射脉冲为高斯脉冲时,扩束前后对输出脉冲对比度的影响
Fig.6 The output pulse contrast is effected when the beam of the input pulse of gaussian is expanded

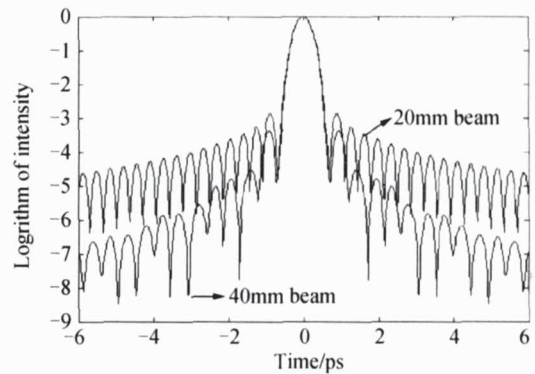


图7 入射脉冲为双曲正割函数时,扩束前后的对输出脉冲对比度的影响
Fig.7 The output pulse contrast is effected when the beam of the input pulse of sech² is expanded

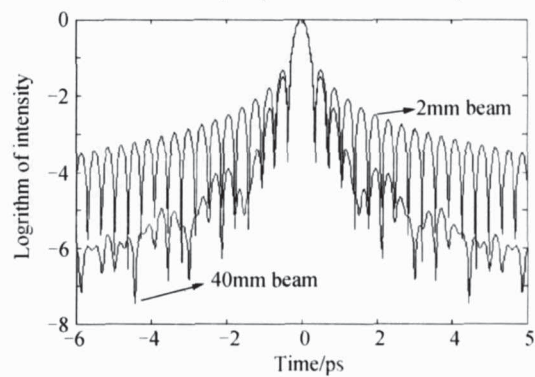


图8 入射脉冲的光谱为矩形函数时,扩束前后的对输出脉冲对比度的影响
Fig.8 The output pulse contrast is effected when the beam of the input pulse of retangular is expanded

情况.对于入射脉冲为高斯脉冲的情况,从图 6 可以看出扩束前对比度约为 $10^{-4.2}$,扩束后对比度约为 $10^{-6.2}$,提高了近两个数量级;对于入射脉冲为双曲正割函数的情况,从图 7 可以看出扩束前对比度约为 $10^{-4.6}$,扩束后对比度约为 $10^{-6.6}$,也提高了近两个数量级;对于入射脉冲的光谱为矩形时的情况,从图 8 可以看出,扩束前对比度约为 $10^{-3.5}$,扩束后对比度约为 $10^{-5.5}$,同样也提高了两个数量级.

对比图 4 和图 6,输入脉冲同为高斯脉冲.从图 4 可以看出,当进入展宽器的光束为细光束的情况下,要达到输出脉冲为 10^{-6} 的对比度输出,需要的光谱底宽为 17 nm,但是当进入展宽器的入射光束口径扩大到 40mm 时,从图 6 可以看出,此时要达到 10^{-6} 的对比度输出,需要的光谱底宽仅为 12.8 nm.

当然,扩大进入展宽器的输入光束口径将会使光栅的纵向尺寸有所增加,但在该激光装置中,当光束口径扩大到 40 mm 时,250 × 100 mm 的光栅完全可以满足要求.

2.4 优化

从以上讨论可以看出,当进入展宽器的入射光谱不同时,即使在相同底宽的情况下,输出脉冲的对比

度也是不同的. 图9为进入展宽器的各种不同的输入光谱图,图10为不同的输入光谱在细光束输入的情况下,输出脉冲的对比度. 从图10的图线可以看出,不同的入射光谱,其输出脉冲的对比度不同,对于展宽器来说,存在一个最优化的光谱. 通过比较以上几种入射光谱,从图10中可以看出,当入射光谱为双曲正割函数时,输出脉冲的对比度是最好的.

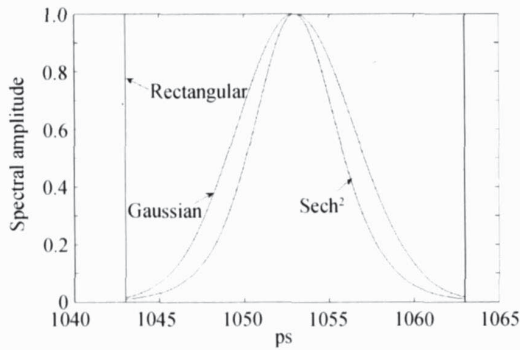


图9 不同的输入脉冲的光谱图

Fig. 9 The different spectrum of the input pulse

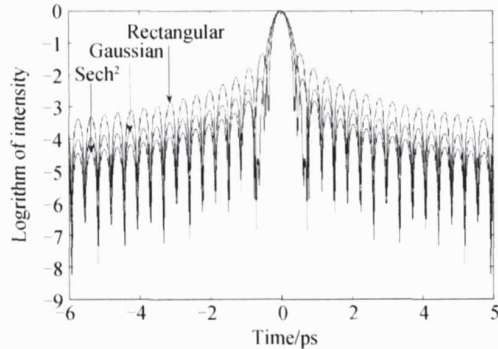


图10 不同输入光谱的情况下,输出脉冲的对比度

Fig. 10 The output pulse contrast in different input spectrum circumstance

3 结论

通过以上分析得出以下几个结论:

1) 通过扩大进入展宽器的光束口径,可以减少光谱剪切,同时影响输入光谱的强度分布,从而提高输出脉冲的对比度;当进入展宽器的光束口径从 2 mm 增加到 40 mm 时,输出脉冲的对比度可以提高近两个数量级.

2) 对于展宽器来说,存在一个最优的入射光谱,当以此光谱入射时,能得到最好的对比度输出. 单独考虑展宽器的情况下,对比输入脉冲光谱为高斯函数、双曲正割函数以及矩形函数的情况,双曲正割函数能取得更好的效果.

3) 对于整个系统来说,因为可以把展宽器、放大器和压缩器分别看成光谱滤波器,所以同样存在一个最优的入射光谱,当以此光谱入射时,能得到最好的对比度输出.

参考文献

- [1] TRENTELMAN M. Finite size compression gratings in a large aperture chirped pulse amplification laser system[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(33):8567-8573.
- [2] FAN D Y, ZHAO X M. Development and future of inertial confinement fusion laser system[R]. *Annual Reports of Inertial Confinement Fusion*, 2000:11-12.
- [3] ROSS I N, COLLIER J L. Improved contrast and power from a chirped pulse amplification laser system[R]. *Central Laser Facility Annual Report 1999/ 2000*:224-226.
- [4] XIE Xing-long, ZHU Jian-qiang, LIU Feng-qiao, *et al.* 20 TW sub-picosecond laser system (SPS) applied for the neutron experiment [J]. *Chinese 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.
- [5] YANG Xin, XIE Xing-long, LI Mei-rong, *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.
- [6] WANG Hong-ying, LIU Hong-jun, XIONG Hong-jun, *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.
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.
- [7] TREACY EB. Optical pulse compress with diffraction gratings[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1969, **QE-5**(9):454-458.
- [8] MARTINEZ O E. 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.
- [9] TIAN Jir-rong, SUN Jing-hua, WEI Zhi-yi, *et al.* Theoretical and experimental studies on large-ratio stretching of femto second pulse with Offner triplet stretcher[J]. *Acta Physics Sinica*, 2005, **54**(3):1200-1207.
田金荣,孙敬华,魏志义,等. Offner 展宽器高倍率展宽脉冲的理论及实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(3):1200-1207.
- [10] ZHAO Shang-hong, WANG Yi-shan, CHEN Guo-fu, *et al.* Study of laser pulse-stretching for chirped-pulse amplification of femtosecond pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(3):204-207.
赵尚弘,王屹山,陈国夫,等. 飞秒激光啁啾脉冲放大中脉冲展宽技术研究[J]. *光子学报*, 1997, **26**(3):204-207.
- [11] ZHANG Zhi-gang, TAKASHI Y, TAKASHI A. Ray-tracing model for stretcher dispersion calculation[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(15):3393-3399.
- [12] XIONG Hong-jun, ZHAO Wei, CHEN Guo-fu. The principle and optimized design of a stretcher in OPCPA system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1441-1444.
熊红军,赵卫,陈国夫. 用于 OPCPA 展宽器的原理和优化设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12):1441-1444.
- [13] ZHENG Zhen, L ÜBa-r-da. Far-field properties of ultrashort pulsed gaussian beams in a linear dispersive medium[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1404-1407.

- 郑振,吕百达.超短脉冲高斯光束在线性色散介质中的远场特性[J].光子学报,2006,35(9):1404-1407.
- [14] ZHANG Jie, HUANG Shang-lian, YAN Xu, *et al.* Optical performance analysis and simulation of reflector moving grating light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(6):824-827. 张洁,黄尚廉,闫许,等.反射镜平动式光栅调制器的光学特性分析[J].光子学报,2006,35(6):824-827.
- [15] ZOU Qi-hui, LÜ Bai-da. Propagation properties of ultrashort pulsed bessel-gauss beams with constant diffraction length[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(5):746-749. 邹其徽,吕百达.等衍射长度超短脉冲贝塞耳-高斯光束的传输特性[J].光子学报,2006,35(5):746-749.
- [16] WANG Chun-hua, YAN Ai-min, LIU Li-ren, *et al.* Ultrashort pulsed laser beam diffraction by one dimensional reflection volume holographic grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(12):1803-1807. 王春花,闫爱民,刘立人,等.超短脉冲激光光束在一维反射型体全息光栅中的衍射[J].光子学报,2006,35(12):1803-1807.

Analysis of Improved Contrast from a Chirped Pulse Amplification Laser System by Increasing the Beam Size in the Stretcher

YANG Qing-wei, GUO Ai-lin, XIE Xing-long, ZHANG Fu-ling, GAO Qi, LI Mei-rong, LIN Zun-qi

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

Received date: 2006-11-29

Abstract: The impact of the stretcher on the contrast ratio of the out pulse is analyzed making use of the ray-tracing method, which is based on the contrast ratio model of chirped pulse. When the beam size in the stretcher is increased from 2 mm to 40 mm, the contrast of the output pulse approximately increase two magnitude. When the input pulse is Sech^2 , the contrast of the output pulse is better than what the input pulse is Gaussian or Rectangular.

Key words: Chirped pulse amplification; Contrast; Pulse stretcher; Pulse contrast ratio



YANG Qing-wei was born in 1977. He received his B. S. from College of physics, Hunan Normal University in 2001. Currently he is studying for his Ph. D. candidate at National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences since 2004. His main research interests include ultra high power and ultra short pulse, dispersion compensation, pulse stretching, pulse compression, pulse contrast ratio and their related numerical stimulation.