

拼接光栅压缩器中光栅拼缝对脉冲信噪比的影响

曹华保 卢兴强 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 针对平行光栅对结构的压缩器和圆形入射光束,建立了光栅拼缝所引起的光谱剪切的数学模型,并模拟了该光谱剪切对压缩脉冲信噪比的影响。与双曲正割型脉冲相比,光栅拼缝对高斯型脉冲信噪比的影响较小。随着光栅拼缝宽度的减小与光束口径的增大,压缩脉冲信噪比得到提高。对于确定的拼接光栅压缩器和光束直径,当脉冲中心波长与光谱剪切中心波长(受到光谱剪切作用的波段的中心波长)相等时,可以得到最高的压缩脉冲信噪比。

关键词 光栅;拼接光栅;光谱剪切;信噪比

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1005004

Signal-to-Noise Ratio Degradation Due to the Tiled-Grating Gap

Cao Huabao Lu Xingqiang Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The model of spectral clipping due to the tiled-grating gap of parallel grating pair compressor is established for the circular input beam, and the signal-to-noise ratio caused by the spectral clipping is simulated. Compared with sech^2 pulse, the impact of tiled-grating gap on the signal-to-noise ratio of Gaussian pulse is less serious. With the tiled grating gap width decreasing and the beam diameter increasing, the signal-to-noise ratio of the compressed pulse can be improved. For a certain tiled-grating compressor and beam diameter, the highest signal-to-noise ratio is available with the central wavelength of the pulse equal to the central wavelength of the spectral clipping (the central wavelength of the wave band clipped by the tiled-grating gap).

Key words gratings; tiled-grating; spectral clipping; signal-to-noise ratio

OCIS codes 050.0050; 320.0320; 320.5520

1 引 言

随着拍瓦激光系统的发展,特别是惯性约束核聚变(ICF)驱动器的建设,米尺寸的多层介质膜(MLD)光栅的制造日益重要^[1,2]。但是制造大尺寸光栅受技术限制,目前能得到的多层介质膜光栅长度还小于 1 m,因此用拼接光栅的方法来得到米尺寸光栅成为解决问题的途径之一。例如美国 Omega-EP 装置^[3],日本 FIREX-1 装置^[4]和中国神光 II 拍瓦装置^[5]等系统的压缩器设计,都使用了拼接光栅来代替单块光栅以得到大尺寸的光栅。与传统光栅压缩器相对比,拼接光栅压缩器结构的设计和安装遇到了新的难题^[6~8]。在拼接光栅中,相邻

的光栅间有三维自由度,包括三维角度的旋转,沿光栅面法线方向和色散方向的平移。拼接光栅的安装偏差会导致激光束远场空间特性以及时域分布的退化^[9~11]。法国 LULI 在使用双程拼接光栅压缩器得到亚皮秒太瓦脉冲的实验中,注意到了光栅拼缝即拼接光栅在色散方向的平移对光谱的剪切作用和光谱剪切对脉宽的展宽作用^[12];而光栅拼缝对脉冲信噪比的影响也已有报导^[13],然而仅仅局限在对光束口径作用的探讨,且没有给出具体推导过程。主脉冲之前的较大强度的基底会导致靶丸物理特性的改变,从而影响物理实验的完成质量^[14,15],因此信噪比成为高功率激光装置的一个重要指标^[16,17]。

收稿日期: 2011-04-08; **收到修改稿日期**: 2011-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(60707019)资助课题。

作者简介: 曹华保(1984—),男,博士研究生,主要从事光脉冲放大和传输等方面的研究。E-mail: caohb@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 范滇元(1939—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率激光系统设计方面的研究。E-mail: fandy@cae.cn

(中国光学学会会员号: S040010626S)

拼接光栅压缩器的光栅拼缝所导致的信噪比下降问题,值得高功率激光装置设计者的关注。

本文推导了光栅拼缝对光谱的剪切公式的影响,模拟了压缩脉冲信噪比与该光谱剪切的关系,对拍瓦激光系统的拼接光栅设计具有参考作用。

2 模型推导

压缩器结构参考法国 LULI 亚皮秒太瓦拼接光栅激光系统的压缩器设计^[12],为图 1 所示的单程平行光栅对。该压缩器由 3 个光栅组成,其中光栅 G2 由两块光栅拼接而成。光栅参数取自神光II第九路拍瓦装置压缩器设计^[18],刻线密度为 1740 line/mm,入射角为 70°,脉冲中心波长为 1053 nm。图 2 为光栅拼缝对入射光束的光谱剪切图示,所讨论的入射光束的截面为圆形。光栅拼缝经过光栅 G1 沿衍射路径反向投射在入射光束截面上,对于不同的波长,其投射位置不同。与光束截面重合面积越大,则该波长光谱能量损失越大。假设 G2 光栅拼缝在 λ_{\min} 波长处投射位置的圆心恰好在光束截面的圆心,其能量传输率最小,把 λ_{\min} 称为传输率极小波长。对于圆形入射光

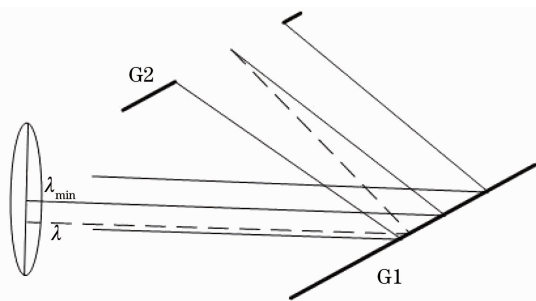


图 2 光栅拼缝剪切图示

Fig. 2 Illustration of the spectral clipping due to the tiled grating gap

束,随着波长逐渐偏离 λ_{\min} ,被剪切区域向光束截面边缘移动,光谱能量损失随之减小。

图 3 给出了光谱剪切的两种光谱情况,图中平行虚线对之间的区域即为投射到光束截面上的光栅拼缝。这里把光栅拼缝投射的中心位置称为剪切位置,那么在 λ_{\min} 波长处剪切位置与圆心重合。以光束截面圆心为原点,让 X 轴正方向对应着波长增大时的剪切位置移动的方向,设剪切位置的坐标为 $x(\lambda)$ 。图 3(a) 为 $|x(\lambda)| < \frac{\Phi - \Delta l \cos \gamma}{2}$ 的情况,此时光栅拼缝全部投射在光束截面以内;而图 3(b) 为 $\frac{\Phi - \Delta l \cos \gamma}{2} < |x(\lambda)| < \frac{\Phi + \Delta l \cos \gamma}{2}$ 的情况,此时光栅拼缝部分投射在光束截面以内。其中 Φ 为光束直径, Δl 为光栅拼缝宽度,而 γ 为入射角。假设光束截面上各波长光强分布均匀,那么某个波长的光谱能量的传输率与剪切后的面积成正比。使用传输函数 $T(\lambda)$ 表示入射激光经过拼接光栅压缩器后的谱能量传输情况, $T(\lambda)$ 由(1)式给出

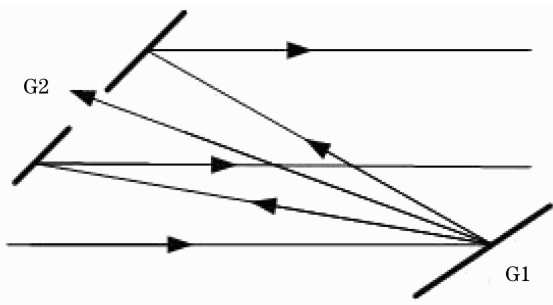


图 1 单程拼接光栅压缩器

Fig. 1 Geometry of the single-pass tiled-grating compressor

$$T(\lambda) = \begin{cases} 1, & |x(\lambda)| > \frac{\Phi + \Delta l \cos \gamma}{2} \\ 1 - \frac{\beta_2 - \beta_1 - \sin \beta_2 \cos \beta_2 + \sin \beta_1 \cos \beta_1}{\pi}, & \frac{\Phi - \Delta l \cos \gamma}{2} < |x(\lambda)| < \frac{\Phi + \Delta l \cos \gamma}{2} \\ 1 - \frac{\beta_2 - \sin \beta_2 \cos \beta_2}{\pi}, & |x(\lambda)| < \frac{\Phi - \Delta l \cos \gamma}{2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\cos \beta_1 = 2 \left[x(\lambda) + \frac{\Delta l \cos \gamma}{2} \right] / \Phi$, $\cos \beta_2 = 2 \left[x(\lambda) - \frac{\Delta l \cos \gamma}{2} \right] / \Phi$ 。剪切位置为

$$x(\lambda) = [\tan \alpha(\lambda) - \tan \alpha(\lambda_{\min})] G \cos \gamma, \quad (2)$$

式中 G 为光栅对垂直距离。 α 为衍射角度,可由衍射公式求得。结合(1)和(2)式,当 $\tan \alpha(\lambda)$ 满足

$$\tan \alpha(\lambda_{\min}) - \left(\frac{\Phi}{2G \cos \gamma} + \frac{\Delta l}{2G} \right) < \tan \alpha(\lambda) < \tan \alpha(\lambda_{\min}) + \left(\frac{\Phi}{2G \cos \gamma} + \frac{\Delta l}{2G} \right), \quad (3)$$

光栅拼缝全部或部分投射在光束截面以内,光谱能量受到剪切作用。可见光栅拼缝只对 λ_{\min} 波长附近一定波段内的光谱成分有剪切作用,把这部分受到光栅拼缝剪切的波段宽度称作光谱剪切宽度。由(3)式可以看

出当 $\Delta l/\Phi$ 较小时, 光谱剪切宽度近似与光栅拼缝宽度无关。光谱能量最小传输率为

$$T(\lambda_{\min}) = 2(\beta_0 - \sin \beta_0 \cos \beta_0)/\pi, \quad (4)$$

$$\text{式中 } \beta_0 = \frac{\Delta l \cos \gamma}{\Phi}.$$

计算了光栅拼接间隙所导致的光谱剪切宽度与 Φ/G 之间的关系, 因为实际拼接光栅压缩器中光栅拼缝宽度远小于光束口径, 所以在计算中忽略了光栅拼缝宽度对光谱剪切宽度的影响, 计算结果如图 4(a) 所示。对于相同的传输率极小波长, 光谱剪切宽度与 Φ/G 成近似线性的关系。 λ_{\min} 越小, 光谱剪切宽度越大, 且随 Φ/G 增大的速度越快。图 4(b) 给出了 λ_{\min} 处光谱传输率与 $\Delta l/\Phi$ 之间的关系, 由于入射角度较大, 光栅拼缝在光束截面上的投射宽度只有拼缝宽度的 1/3 左右, 即使光栅拼缝宽度与光束直径相等, $T(\lambda_{\min})$ 仍然大于 0.5。

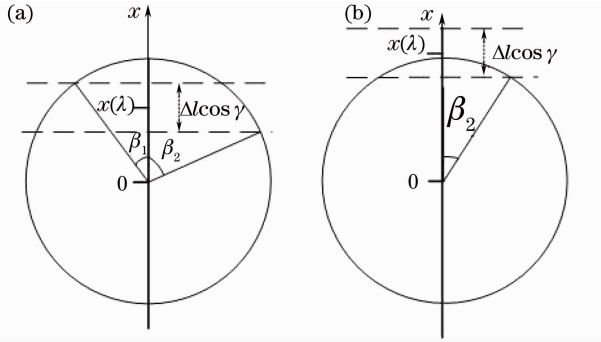


图 3 光栅拼缝导致的光谱剪切在光束截面上的位置
Fig. 3 Position of the spectral clipping on the cross section of the beam due to the tiled grating gap

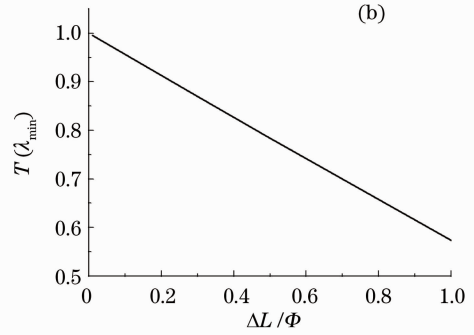
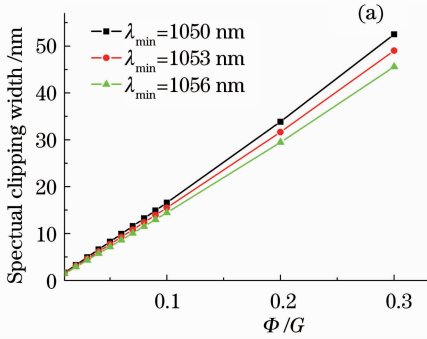


图 4 光栅拼缝导致的光谱剪切。(a) 剪切宽度与 Φ/G 的关系; (b) 光谱传输率极小值与 $\Delta l/\Phi$ 的关系

Fig. 4 Spectral clipping due to the tiled grating gap. (a) Influence of Φ/G on the clipping width; (b) influence of $\Delta l/\Phi$ on the minimal transmission rate

当 Φ/G 为 0.1, 传输率极小波长为 1053 nm 时, 光栅拼缝引起的光谱剪切曲线如图 5 所示。光束的一定宽度使光谱剪切曲线呈现出类似于抛物线的平滑形状, 但是剪切曲线并不完全对称。受到光谱剪切作用的波段的中心波长为 1052 nm, 与 λ_{\min} 并不相等, 将其称作光谱剪切中心波长。

3 模拟结果

把输入脉冲光谱振幅记做 $A(\lambda)$, 不考虑波前畸变并且假设残余色散得到了补偿, 剪切后的光束经过聚焦后在焦点位置处的压缩脉冲时间分布可表示为^[19]

$$I(t) \propto \left| \mathcal{F}_t^{-1} \left[\frac{A(\lambda) T(\lambda)}{\lambda} \right] \right|^2. \quad (5)$$

比较了光栅拼缝分别对高斯型和双曲正割型脉冲的剪切效果如图 6 所示, 谱宽 $\Delta\lambda$ 分别为 4.02 nm 和 2.92 nm, 其极限脉宽均为 400 fs^[19]。 λ_{\min} 与脉冲中心波长均为 1053 nm, 谱传输率极小值约为 0.9, 剪切宽度约为 16 nm。从图 6 中可以看出, 光栅拼缝

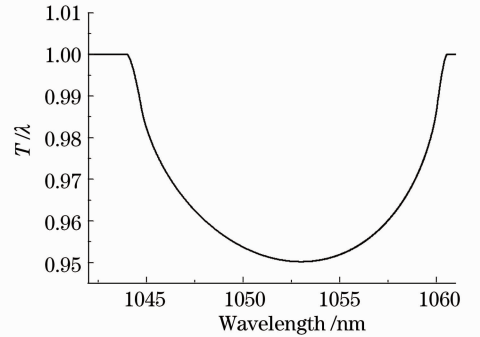


图 5 光谱剪切曲线(剪切宽度为 16 nm, 传输率极小波长为 1053 nm)

Fig. 5 Plot of spectral clipping (16 nm clipping width with minimal spectral transmission rate at 1053 nm)

所引起的光谱剪切对两种光谱形状造成类似的整形, 在中心波长附近影响较大, 而在两翼影响很小, 总体来说对谱宽影响不大。图 7 比较了该剪切对两种脉冲信噪比的影响。光栅拼缝导致的光谱剪切引起了信噪比的下降, 且对于相同剪切, 高斯型脉冲的信噪比优于双曲正割型。

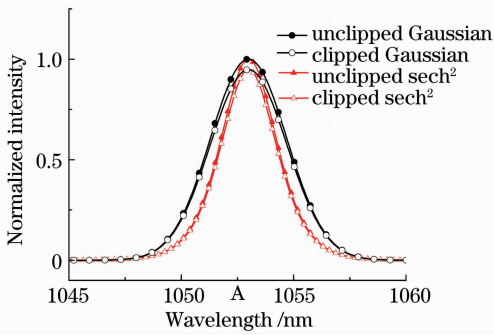


图 6 高斯型和双曲正割型脉冲被光栅拼缝剪切后的光谱比较

Fig. 6 Comparison of the clipped spectral profile between Gaussian pulse and sech^2 pulse

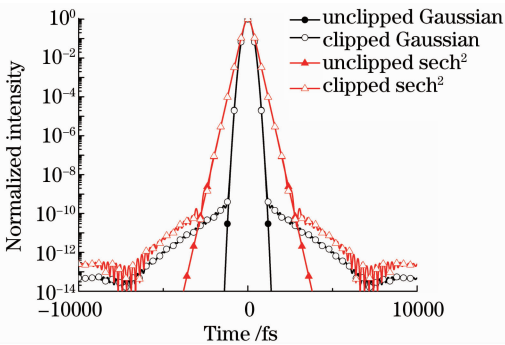


图 7 光栅拼缝导致的光谱剪切对高斯型和双曲正割型信噪比的影响

Fig. 7 Influence of spectral clipping due to the tiled grating gap on the signal-to-noise ratio of Gaussian pulse and sech^2 pulse

针对谱宽 4.02 nm 的高斯型脉冲进行计算。模拟了当 λ_{\min} 与脉冲中心波长相等时,压缩脉冲信噪比分别与剪切宽度和剪切率极小值的关系。图 8 为谱传输率极小值取 0.9 时,压缩脉冲信噪比与剪切宽度的关系。随着剪切宽度由 $0.25\Delta\lambda$ 增大到 $4\Delta\lambda$,信噪比随之增大,因此 Φ/G 越大,信噪比越高。如果将单程光栅改造为双程光栅,光栅对垂直距离

减半,可以将剪切宽度加倍,将大大提高信噪比。图 9 计算了剪切宽度为 4 倍谱宽的情况下,压缩脉冲信噪比与谱传输率极小值的关系。随着光栅拼缝与光束直径之比的增大,中心波长光谱能量损失增多,在一定的剪切宽度的情况下使剪切曲线更为尖锐,造成信噪比的降低。

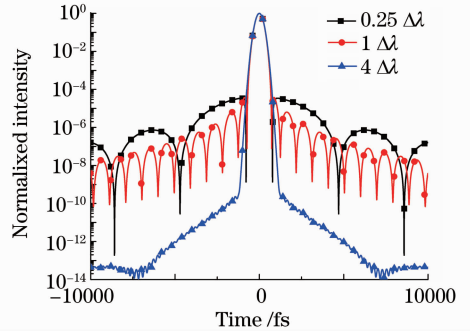


图 8 信噪比与剪切宽度的关系

Fig. 8 Influence of clipping width on the signal-to-noise ratio

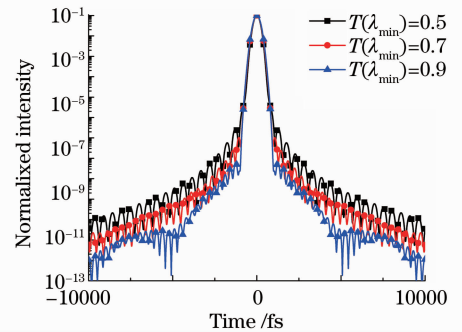


图 9 剪切率极小值对信噪比的影响

Fig. 9 Influence of minimal clipping rate on the signal-to-noise ratio

图 10(a)给出了 Φ/G 为 0.1, $\Delta l/\Phi$ 为 0.2 时,压缩脉冲信噪比与 λ_{\min} 的关系。此时光谱剪切宽度约为 16 nm,而最小谱传输率则在 0.9 左右。入射脉冲谱宽为 4.02 nm,中心波长为 1053 nm。模拟给出了 λ_{\min} 分别取 1051,1052,1053,1054 和 1055 nm 时,信

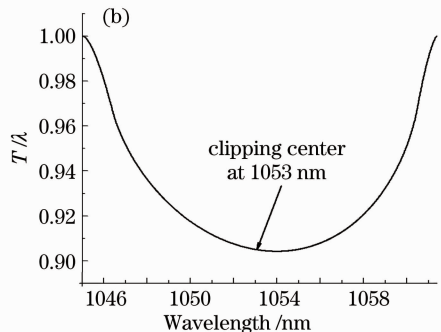
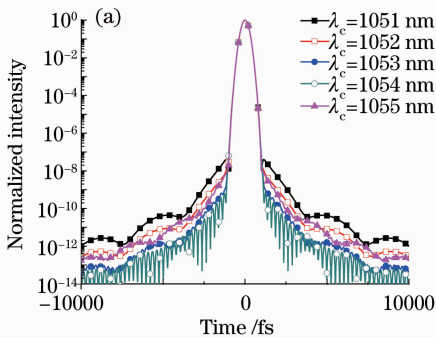


图 10 脉冲压缩信噪比与 λ_{\min} 的关系

Fig. 10 Relation between signal-to-noise ratio and λ_{\min}

噪比的变化情况。当 λ_{\min} 为 1054 nm, 而非脉冲中心波长时, 得到约为 4×10^{14} 的最高信噪比。图 10(b) 为传输率极小波长为 1054 nm 时的剪切曲线。由图中可以看出, 此时剪切中心波长与脉冲中心波长相同, 为 1053 nm。当剪切中心波长偏离 1053 nm 时, 剪切后的光谱不对称性加剧, 得到较低的信噪比。可见对于一个确定的拼接光栅压缩器和光束直径, 移动光束的入射位置以改变剪切中心波长, 当脉冲中心波长与光谱剪切中心波长重合时, 可以得到最高信噪比。

4 结 论

研究了拼接光栅拼缝所引起的光谱剪切对脉冲信噪比的影响。对于圆形入射光束, 模拟表明光束半径与光栅对垂直距离的比值越大, 则光谱剪切曲线宽度越大; 光栅拼接间隙与光束半径之比越小, 则光谱传输率极小值越大。光栅拼缝导致 sech^2 型脉冲信噪比下降比高斯型脉冲严重。对于高斯型脉冲, 随着剪切宽度的和传输率极小值的增大, 压缩脉冲的信噪比增大。双程压缩机设计可以增大剪切宽度, 有助于提高信噪比。光谱剪切中心波长与入射脉冲中心波长的偏离会导致光谱不对称性的加剧, 当剪切中心波长与脉冲中心波长重合时, 可以得到最高信噪比。

参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, R. D. Boyd, J. A. Britten *et al.*. High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 940~942
- 2 B. W. Shore, M. D. Perry, J. A. Britten *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(5): 1124~1136
- 3 L. J. Waxer, D. N. Maywar, J. H. Kelly *et al.*. High-energy petawatt capability for the omega laser[J]. *Opt. Photon. News*, 2005, **16**(7): 30~36
- 4 N. Miyanaga, H. Azechi, K. A. Tanaka *et al.*. 10-kJ PW laser for the FIREX-I program[J]. *J. Phys. IV*, 2006, **133**: 81~87
- 5 Guang Xu, Tao Wang, Zhaoyang Li *et al.*. 1 kJ petawatt laser system for SG-II-U program[J]. *Rev. Laser Engng.*, 2008, **36**: 1172~1175
- 6 N. Blanchot, G. Marre, J. Néauport *et al.*. Synthetic aperture

- compression scheme for a multipetawatt high-energy laser[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 6013~6021
- 7 A. Cotel, M. Castaing, P. Pichon *et al.*. Phased-array grating compression for highenergy chirped pulse amplification lasers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2742~2752
- 8 Marco Hornung, Ragnar Bödefeld, Mathias Siebold *et al.*. Alignment of a tiled-grating compressor in a high-power chirped-pulse amplification laser system[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(30): 7432~7435
- 9 Yao Hu, Lijiang Zeng. Grating mosaic based on image processing of far-field diffraction intensity patterns in two wavelengths[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(28): 7019~7025
- 10 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Effect of tiling gratings errors on laser beam spatial distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 161~165
马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 161~165
- 11 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Temporal property of tiled grating compressor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 701~705
马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅压缩器的时域特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 701~705
- 12 Arnaud Cotel, Caroline Crotti, Patrick Audebert *et al.*. Tiled-grating compression of multiterawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1749~1751
- 13 M. Kalashnikov, A. Andreev, H. Schönngel. Limits of the temporal contrast for CPA lasers with beams of high aperture [C]. *SPIE*, 2009, **7501**: 750104
- 14 K. H. Hong, B. Hou, J. A. Nees *et al.*. Generation and measurement of $>10^8$ intensity contrast ratio in a relativistic kHz chirped-pulse amplified laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(4): 447~457
- 15 V. Chvykov, P. Rousseau, S. Reed *et al.*. Generation of 1011 contrast 50 TW laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1456~1458
- 16 Wang Ke, Qian Liejia. Signal to noise ratio of ultra short high-power pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1): 1~5
王 科, 钱列加. 高功率超短激光脉冲信噪比的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(1): 1~5
- 17 Wang Yanhai, Pan Xue, Wang Jiangfeng *et al.*. Restrictions of signal-to-noise ratio by amplified spontaneous emission noise of pump pulse in optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 980~985
王艳海, 潘 雪, 王江峰等. 抽运光中 ASE 噪声对 OPCPA 信噪比的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 980~985
- 18 Zhaoyang Li, Guang Xu, Tao Wang *et al.*. SGII-PW project pulse compressor design [C]. Shanghai: CLEO Pacific Rim, 2009, WA2_3
- 19 Mark 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