

文章编号: 0258-7025(2005)03-0341-05

谱色散均匀化的计算研究

周申蕾¹, 林尊琪¹, 朱 俭², 华 能¹, 戴亚平¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)
² 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 利用光传输理论对 ICF 驱动器中使用的光谱色散平滑(SSD)技术作了理论分析,并结合典型的随机相位板(RPP)技术,用计算机模拟了使用光谱色散平滑技术前后激光靶面辐照不均匀性的变化及其技术中不同带宽和调制频率下激光靶面辐照不均匀性的变化。

关键词 激光物理;激光辐照均匀性;光谱色散平滑;模拟计算;色循环

中图分类号 TN 241 **文献标识码** A

Computation and Study of Smoothing by Spectral Dispersion

ZHOU Shen-lei¹, LIN Zun-qi¹, ZHU Jian², HUA Neng¹, DAI Ya-ping¹

(¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Shanghai Institute of Laser and Plasma, Shanghai 201800, China)

Abstract Irradiation uniformity of laser on target is very important for inertial confinement fusion (ICF). The theory of smoothing by spectral dispersion (SSD) in ICF is studied by translation theory of optic, and with whether using of SSD and different parameters of SSD, the variations of irradiation nonuniformity of the surface of target are numerically simulated combined with random phase plate (RPP). The results show that application of SSD can reduce the irradiation nonuniformity of the surface of target, the variations of irradiation nonuniformity with the time are oscillating at the beginning and drive to a constant in the end. When the number of color cycle is small, the broader of laser bandwidth and the better effect of SSD are obtained.

Key words laser physics; irradiation uniformity of laser; smoothing by spectral dispersion; analogy calculation; color cycle

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)实验中,为有效抑制高温等离子体的瑞利-泰勒不稳定性^[1],要求入射的激光对特定的靶面区域辐照的光强分布尽可能均匀,因此发展了多种均匀照明技术。目前,在神光Ⅱ装置中使用的均匀照明技术是属于空间光滑化技术的透镜列阵(LA)^[2,3],取得了较为满意的结果。美国在 20 世纪 80 年代提出了光谱色散平滑(SSD)方案,随后的时间得到了很大的发展并在 OMEGA 装置上得到了应用。日本也于 20 世纪 90 年代中期开

始在 GEKKO Ⅲ中逐步应用,实验结果证明光谱色散平滑技术对消除中小尺度的调制是有效和必要的。国内从 20 世纪末开始研究该项技术,但由于相关技术条件不够成熟^[4],没有在实验上深入探讨其物理机制和应用研究。本文从理论分析出发,通过数值模拟方法研究光谱色散平滑技术,为实现该项技术在神光Ⅱ中的应用提供参考。

2 理论分析

对于多光束叠加,接受面上的光强为^[5]

收稿日期:2003-11-05;收到修改稿日期:2004-03-08

基金项目:国家 863 计划(2003AA842070)资助项目。

作者简介:周申蕾(1977—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事高功率激光的束匀滑和放大器的研究。E-mail:slzhou@mail.shnc.ac.cn

$$I = \sum_i |E_i(r_i, t)|^2 + 2\sum_{i,j} |E_{i0}(r_1, t)E_{j0}(r_2, t)| \times \cos\{k_i \cdot r_i - k_j \cdot r_j - (\omega_i - \omega_j)t + [\varphi_i(t) - \varphi_j(t)]\}.$$

任一时刻,接收面上光强分布有可能存在较强的调制,但如果能使不同时刻光强分布随时间的变化而产生快速改变,在接收面可得到一个时间平均意义上的平滑光强分布包络。由于激光光束具有良好的相干性,多光束干涉后容易产生比较强的相干调制,若 $\varphi_i(t) - \varphi_j(t)$ 项随时间变化,破坏激光的时间相干性,在接收面上得到非相干叠加后的均匀光束辐照,应用光谱色散平滑技术正可以达到此目的^[6~8]。

光谱色散平滑的原理如图 1 所示,激光经电光晶体的相位调制后谱宽被展宽,形成时间上周期性调制,即时间上的“色循环”。设入射激光的电场为: $E(t) = E_0(t)e^{i\omega t}$, 经相位调制器后电场为

$$E_M(t) = E_0(t) \exp(i\omega t + i\delta \sin \omega_m t) = E_0(t) \sum_n J_n(\delta) e^{i(\omega + n\omega_m)t}, \quad (1)$$

式中 ω_m 为调制角频率, δ 为调制幅度, J_n 为贝塞耳函数,表示第 n 阶谐波的相对振幅。频带有效宽度 $\Delta\nu = 2\delta\nu_m$ 。

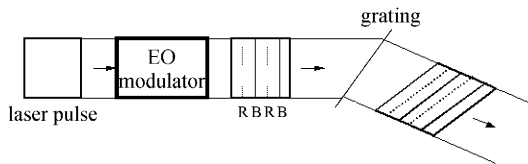


图 1 光谱色散平滑的原理示意图
Fig. 1 The schematic of SSD principle

经光栅色散(设色散方向沿 Y 方向)

$$E_D(t) = E_0(t) \sum_n J_n(\delta) e^{i(\omega + n\omega_m)t - ik_n \cdot R}, \quad (2)$$

式中 $k_n \cdot R = (1/c)(\omega + n\omega_m)Y \sin \theta_n$, $\theta_n = \frac{d\theta}{d\omega} n\omega_m = -\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{\omega} n\omega_m$ 对应于第 n 个谐波的光栅发散角。

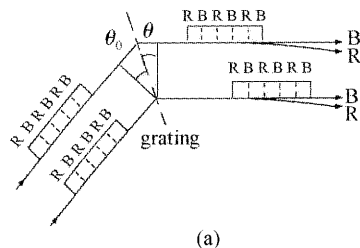


图 2 (a) 由于色散作用在光束截面引入一个时间延迟; (b) 第一块光栅预补偿第二块光栅所引起的振幅时间延迟

Fig. 2 (a) For dispersion of spectrum a time delay across the beam is introduced;
(b) Grating 1 compensates the time delay in beam amplitude produced by grating 2

$n\omega_m/\omega$ 很小时, $k_n \cdot R \approx -\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{c} n\omega_m Y$ 。则

$$E_D(t) = E_0(t) e^{i\omega t} \sum_n J_n(\delta) e^{i n\omega_m (t + \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} Y)} = E_0(t) \exp[i\omega t + i\delta \sin(\omega_m t + \alpha Y)], \quad (3)$$

其中 $\alpha = 2\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\omega_m}{\omega}$, 光场的瞬时频率 $\omega_t(t) = \omega + \delta\omega_m \sin(\omega_m t + \alpha Y)$ 。

瞬时频率 ω_t 在 Y 方向上周期性变化,周期为 $2\pi/\alpha$ 。在光栅作用下,时间上的周期调制转变为空间上的周期调制,时间上的“色循环”也转变为空间上的“色循环”。对于某个时刻,空间上的各点的频率不尽相同,存在周期性的变化;而同一个空间点上,不同时刻的频率也不相同。

频率在空间上的这种变化可以理解为光束在 Y 方向上受到光栅的时间延迟的作用(如图 2(a)),延迟时间 $t_D = D \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{c} = \beta D$ (D 为光束口径大小),激光光场变为

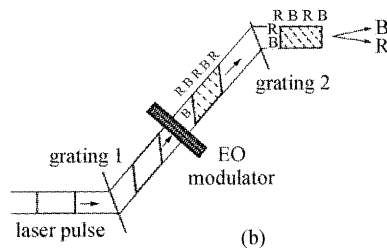
$$E_D(t) = E_M(t + \beta Y) = E_0(t + \beta Y) \times \exp\{i\omega(t + \beta Y) + i\delta \sin[\omega_m(t + \beta Y)]\}. \quad (4)$$

光束在 Y 方向上产生时间延迟后,脉冲被展宽,为不改变脉冲的形状,在相位调制器前再加一个相同的光栅(如图 2(b)),产生一个时间预延迟,方向与另一个光栅产生的时间延迟相反,以补偿后者振幅部分的时间延迟。

如果延迟时间 t_D 大于电光晶体的调制周期 $1/\nu_m$, 瞬时频率 $\omega(t)$ 在 Y 方向出现,那么在光束的截面上将出现空间上的“色循环”,并且此方向上的色循环的数目为

$$N_c = t_D \nu_m = D \Delta\theta / 2\lambda \delta. \quad (5)$$

实际应用中,光谱色散平滑技术通常和空间光



滑技术^[2,9,10](如随机相位板(RPP))结合使用(如图3),使具有一定角色散和谱宽的激光束入射到相位片阵列元上。理想条件下,每个相位片阵列元的入射频率不同,不同阵列元出射的子光束因频率不同且

相对相位随时间快速变化,每个子光束产生的散斑在远场非相干叠加,起到平滑焦斑的作用。根据菲涅耳积分,如果使用的是正方形的随机相位板相位元,焦面上的瞬时光场分布

$$U(x, y) = U_0 e^{i\alpha z} \sum_{KL} J_n(\delta) \frac{\sin(n\gamma + q)}{n\gamma + q} \frac{\sin p}{p} e^{i(\omega_m t - n\gamma L - Lq - Kp + \phi_{KL})}, \quad (6)$$

式中 $(p, q) = (x, y)kd/2f$, k 为光波的波数, d 为随机相位板基元的边长, ϕ_{KL} 为随机相位板的第 (K, L) 基元造成的相位变化, $\gamma = \alpha d/2 = d\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\omega_m}{\omega}$ 是由于光谱经调制器展宽后,不同的频率以不同角度入射引起的位移。

对时间积分后的光强为

$$I(x, y) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |U|^2 dt \xrightarrow{\Delta t \rightarrow \infty} U_0^2 \sum_n J_n^2(\delta) \frac{\sin^2(q + n\gamma)}{(q + n\gamma)^2} \frac{\sin^2 p}{p^2} \times \sum_{\substack{K, L \\ K', L'}} \cos[2(q + n\gamma)(L - L') + 2p(K - K') + \phi_{KL} - \phi_{K'L'}], \quad (7)$$

这也就是焦点处的光强分布,其中 K', L' 表示不同于第 (K, L) 基元的相片其他基元。从(7)可以看出,焦斑的基本形状由随机相位板决定,在仅使用随机相位板时焦斑的包络为 sinc^2 函数,其直径为 $2\lambda f/d$,但由于光谱色散平滑技术中的频谱展宽和光栅色散,使各频率的子光束产生的干涉散斑在色散方向上产生一个位移,因此实际光束的焦斑大小将比 $2\lambda f/d$ 大;不同的频率之间的相对振幅为 J_n^2 ,它们之间是非相干的强度叠加。

对于两个方向光谱色散平滑(在 x, y 方向都有相互独立的相位调制和光栅色散), (7)式可写为^[11]

$$I(x, y) = U_0^2 \sum_{n, m} J_n^2(\delta_1) J_m^2(\delta_2) \frac{\sin^2(q + n\gamma_1)}{(q + n\gamma_1)^2} \frac{\sin^2(p + m\gamma_2)}{(p + m\gamma_2)^2} \times \sum_{\substack{K, L \\ K', L'}} \cos[2(q + n\gamma_1)(L - L') + 2(p + m\gamma_2)(K - K') + \phi_{KL} - \phi_{K'L'}], \quad (8)$$

3 数值计算与分析

实际应用中,光谱色散平滑单元置于激光驱动器系统的前端部分,光束经逐级放大和扩束,通过靶场部分的随机相位板类衍射光学元件,最后在靶面实现时间和空间束匀滑的联合作用结果,如图3所示。数值模拟中,入射波长 λ 为 $1.053 \mu\text{m}$,以平面波入射,光束截面为圆形,采用的入射光束口径为 35 mm ,选用的光栅为 1600 1/mm ,光束扩束后入射在随机相位板和靶镜上的光束口径为 350 mm ,靶镜的 F 数为 4.5 。取随机相位板单元 256×256 个,每个相位元的边长为 1.367 mm ,选取适合的随机数种子,使其相移为 0 和 π 的两种相位元数相差

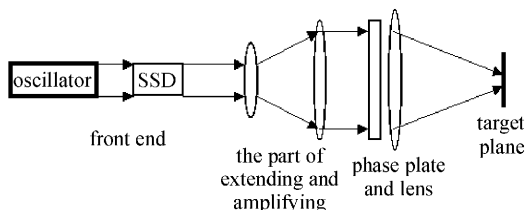


图3 光谱色散平滑在激光系统中的位置

Fig. 3 Location of SSD in laser system

最小。

以(8)式为基础作了数值模拟。假定入射激光为平面波,图4给出数值模拟得到的2-D光谱色散平滑+随机相位板联合作用产生的靶面焦斑图像, X, Y 方向的调制频率分别为 9 GHz 和 6 GHz ,展宽的带宽都为 0.1 nm 。为对比仅使用随机相位板情况下的焦面光强分布,分别给出了二维光强分布和水平方向上的一维光强分布(图中的光强已作了归一化处理)。光谱色散平滑技术的应用可以大幅度地减小焦斑的光强调制度,辐照不均匀性从 18.4% 下降到 10.7% 左右。

从(7)式可知焦斑光强也是时间的函数,辐照不均匀性的均方根(rms)曲线随时间变化。利用数值计算调制频率为 3 GHz ,带宽分别为 0.1 nm 和 0.3 nm 条件下的均方根与时间的关系。为减少计算量,取一维计算,图5给出了辐照不均匀性随时间的变化曲线。模拟计算表明:1)均方根随平均时间的增大而逐渐减小,最后趋于常数;2)带宽增加,均方根总体减小。激光脉冲的初始阶段焦斑不均匀性较高,快速变化的各子束随时间发展在远场产生的散

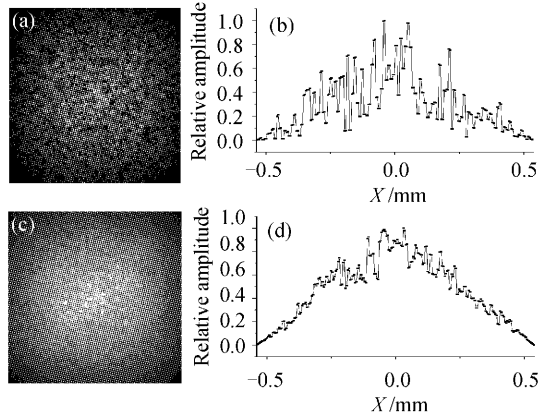


图 4 模拟计算的焦斑振幅分布

(a) 仅使用随机相位板;(b) 对应通过(a)图中心的水平方向一维振幅分布, $\sigma_{rms} = 18.4\%$;(c) 联合使用 2-D 光谱色散平滑+随机相位板, $\Delta\nu = 54$ GHz;(d) 对应通过(c)图中心的水平方向一维图, $\sigma_{rms} = 10.7\%$

Fig. 4 Amplitude distributions of focal-spot pattern of analog computation

(a) 2-D pattern by RPP; (b) a horizontal direction distribution through the center of (a), and $\sigma_{rms} = 18.4\%$; (c) 2-D pattern by a combination of 2-D SSD and RPP, and $\Delta\nu = 54$ GHz; (d) a horizontal direction distribution through the center of (c), and $\sigma_{rms} = 10.7\%$

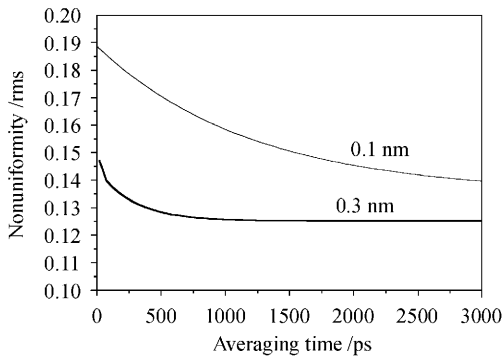


图 5 辐照不均匀性随时间的变化

Fig. 5 Irradiation nonuniformity versus averaging time
斑相互叠加,光斑的光强调制逐渐降低,不均匀性减小,最后达到一个稳定状态;激光的带宽增加,对应频谱宽度 ($\Delta\nu = c \cdot \Delta\lambda/\lambda^2$) 也相应增加,因此焦面上因不同频率产生的散斑也增多,表现为(7),(8)式中频率相对振幅项 J_n^2 的变化,产生的非相干散斑越多,叠加后焦斑越平滑.相位调制后的激光在经过三倍频后,激光光场从 $E_\omega(t) = E_0(t)\exp(i\omega t + i\delta\sin\omega_m t)$ 变化为 $E_{3\omega}(t) = E'_0(t)\exp(i3\omega t + i3\delta\sin\omega_m t)$,光束的频谱宽度增大为原先的三倍,这也表明在经过三倍频之后,光束辐照不均匀性将减小.同时谱宽增加导致产生的散斑增多,也有助于加快散斑在焦面上的变化^[12],均方根随时间减小更

快,也更快地达到稳定状态。

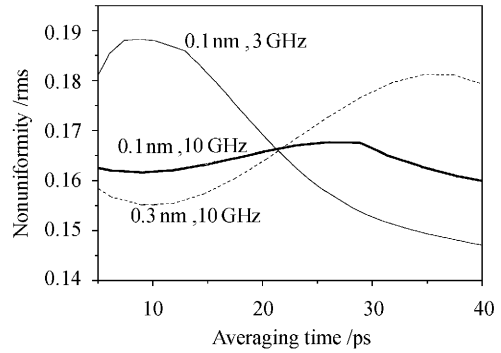


图 6 辐照不均匀性在激光脉冲的初始阶段随时间的变化

$\nu_m = 10$ GHz, $\Delta\lambda = 0.3$ nm 的曲线有一个明显增大

Fig. 6 Irradiation nonuniformity versus averaging time at the beginning of laser pulse

The trend of curve is up under $\nu_m = 10$ GHz, $\Delta\lambda = 0.3$ nm

另一方面,“色循环”的数目与辐照不均匀性也有很大的关系.在上述计算中,光栅产生的时间延迟量 $t_D = 365$ ps,根据式(7)可得在此方向上的色循环数 $N_c = 1.1$;保持 $\Delta\nu$ 不变,相位调制器的频率改变为 10 GHz,色循环将增大到 3.65 个,图 6 和表 1 给出在初始阶段不同带宽和调制频率时均方根与时间的关系曲线.0.3 nm 带宽,10 GHz 调制频率时均方根随时间有一个明显的起伏过程;而 0.1 nm 带宽,3 GHz 调制频率时均方根的增大并不显著.出现这种现象的原因主要是由于:

表 1 不同调制频率和带宽下的激光在脉冲初始期的辐照不均匀性 (rms) 值

Table 1 Irradiation nonuniformity (rms) values of different modulating phase and bandwidth at the beginning of laser pulse

Averaging time /ps	Irradiation nonuniformity (rms)		
	$\nu_m = 3$ GHz, $\Delta\lambda = 0.1$ nm	$\nu_m = 10$ GHz, $\Delta\lambda = 0.1$ nm	$\nu_m = 10$ GHz, $\Delta\lambda = 0.3$ nm
0.5	0.1822	0.1653	0.1678
3.5	0.1846	0.1632	0.1609
6	0.1854	0.1620	0.1568
10	0.1880	0.1610	0.1553
15	0.1821	0.1631	0.1574
30	0.1525	0.1663	0.1781
35	0.1493	0.1619	0.1812

1) 带宽(频宽)不变,调制频率增大,色循环数 N_c 也相应增大,焦面上散斑扫描速度加快,平滑效

应显著;调制频率较小的情况下,散斑扫描速度相对较慢,平滑效应弱,均方根的减小在时间上体现也相对滞后。

2) 调制频率不变,不改变光栅时,色循环数 N_c 也不变,增大激光的带宽(谱宽)能从整体降低均方根,但单个相位元子束频差的增大带来其远场存在较强调制;周期性正弦调制频率较高时,色循环数的增加也使光束截面上更多彼此相干的子束出现,产生明显的干涉。在这两种因素共同作用下的干涉效应将更加显著,它在初期一定时间范围内抑制了谱色散的平滑作用;但从总体来看,平滑效应作用下的均方根仍呈现一个下降趋势。

对于 0.1 nm, 3 GHz 的曲线,在开始阶段由于散斑扫描慢,平滑效应不能立即体现,干涉效应占据主要因素,均方根有一增大过程,随时间发展,散斑增多和扫描区域增大逐渐抹平干涉的影响,均方根逐渐减小,焦斑得到平滑;10 GHz 时的曲线,由于高调制频率下散斑扫描速度快,均方根迅速降低到一个极小值,但由于 0.3 nm, 10 GHz 的曲线存在宽带宽、高频率下的强干涉效应,导致初期均方根在降低后又增大,这种干涉的影响只有随时间发展,平滑效应的进一步体现才能逐渐抹平。而 0.1 nm, 10 GHz 时的曲线由于干涉效应相对较弱,初期均方根的变化幅度也相对较小。

由此可知,色循环的选择在光谱色散平滑中有着重要的影响:色循环数目的增加,能使光束在焦面上产生更快的运动变化,有利于焦斑的平滑;但色循环的增加也会使更多彼此相干的子束出现,造成激光脉冲的初始阶段由于强干涉效应引起新的调制,结果反而不利于消除辐照不均匀性,出现强烈的指纹效应,不利于抑制 $R-T$ 不稳定性。综合考虑两方面的影响,光谱色散平滑参数选择一般满足:1) 色循环 N_c 选择在 1~2 之间,避免出现更多的相干子束而引起干涉效应;2) 根据其他物理条件确定光束的色散角,并由此确定光栅和展宽带宽;3) 为获得展宽后的准连续的激光频谱,可以适当降低调制频率;4) 为减弱周期性正弦调制的影响,可以采用随机相位调制技术。

4 结 论

理论分析和数值模拟的结果表明:光谱色散平

滑技术的应用能有效地降低激光焦斑辐照的不均匀性。辐照不均匀性随时间变化总体呈现一个下降的趋势,最后趋于一个稳定值;在色循环不太大时,带宽越宽,最终的平滑效果越好。选择优化合适的调制频率和“色循环”数非常重要,兼顾多方面的因素,色循环数不宜太大,可以减小附加干涉效应的影响。由于光谱色散平滑属于时域的平滑技术,它和其他的空域平滑技术联合使用,结合衍射光学元件的设计^[3,9,10],才能达到更好的焦斑均匀化的效果。

参 考 文 献

- 1 M. Desselberger, T. Afshar-rad, F. Khattak *et al.*. Nonuniformity imprint on the ablation surface of laser-irradiated targets [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(10):1539~1542
- 2 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3):377~380
- 3 Wang Chen, Huang Guanlong, Wang Wei *et al.*. Uniform line-focus system used for special laser beam intensity distribution of Shenguang II [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):37~39
王琛,黄关龙,王伟等. 神光 II 特殊光束强度分布条件下的均匀线聚焦系统[J]. 中国激光, 2002, **A29**(1):37~39
- 4 Pu Hongtu, Xue Quan, Wu Jian *et al.*. Research of a resonant cavity phase modulator used in SSD [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(2):115~118
濮宏图,薛泉,吴健等. 用于光束时间匀滑的谐振腔式相位调制器研究[J]. 中国激光, 1998, **A25**(2):115~118
- 5 Mu Guoguang, Zhan Yuanlin. Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1978
母国光,战元林. 光学[M]. 北京:高等教育出版社,1978
- 6 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8):3456~3462
- 7 J. Garnier, L. Videau, C. Gouedard *et al.*. Statistical analysis for beam smoothing and some applications [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8):1928~1937
- 8 Joshua E. Rothenberg. Comparison of beam-smoothing methods for direct-drive inertial confinement fusion [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7):1664~1671
- 9 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Precise design of diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):29~32
谭峭峰,严瑛白,金国藩等. 衍射光学束匀滑器件的精细化设计[J]. 中国激光, 2002, **A29**(1):29~32
- 10 Wang Jingyu, Tan Qiaofeng, Yan Yingbai *et al.*. Precise design of circular-symmetrical diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3):206~210
王金玉,谭峭峰,严瑛白等. 圆对称衍射光学束匀滑器件的精细化设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(3):206~210
- 11 Two-Dimensional SSD on OMEGA [C]. *LLE Review*, 1996, **69**(Oct-Dec)
- 12 G. Miyagi, N. Miyanaga, A. Morimoto *et al.* State-of-The-Art SSD Technology At GEKKO system in ILE [R]. Japan-China collaboration program (中日合作交流会议), Japan, 2003