

文章编号: 0258-7025(2008)04-0534-05

时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析

李 平 马 驰 粟敬钦 张 锐 王 芳 程文雍

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 为改善焦斑的均匀性以应用于惯性约束聚变(ICF)的实验,从焦斑形态的控制出发,在随机相位板(RPP)和连续相位板(CPP)做空域整形下,用同样带宽和最大谱色散角,模拟了不同光谱形状的匀滑效果,通过焦斑强度的功率谱密度(PSD)和平顶的均方根(RMS)对获得的焦斑进行评价。结果表明,改善光谱形状可以提高匀滑效率,优化光谱相对主流的正弦调频光谱对匀滑效果的均方根值可提高43.7%。同时,设计相位板时考虑焦斑上不同空间频率的权重,有利于匀滑。

关键词 激光技术;相位板;光谱色散匀滑;光谱形状;焦斑形态

中图分类号 TN 241;O 433.5⁺4 **文献标识码** A

Analysis of Laser Optimized Spectrum for Smoothing the Focused Spot by Temporal and Special Method

Li Ping Ma Chi Su Jingqin Zhang Rui Wang Fang Cheng Wenyong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract For improving the uniformity of the focal spot in the inertial confinement fusion (ICF) experiments, we simulated the effects of the different spectral shapes of broadband light with the focused spot through phase plate, such as random phase plate (RPP) or continuous phase plate (CPP), and the uniform bandwidth and maximal dispersive angle. The power spectral density (PSD) and root mean square (RMS) of the focused spot intensity were used to evaluate smoothing effect. The results show that the optimized spectrum can improve smoothing efficiently, and the RMS can be improved by 43.7% compared with the sinusoidal phase modulated spectrum. Generally, the smoothing efficiency would be better if the weighting of the different spatial frequencies of the focused spot was considered to design phase plate.

Key words laser technique; phase plate; smoothing by spectral dispersion; spectral shape; focused spot

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。这些技术包含相位板匀滑^[2,3]、透镜阵列^[4]、光谱色散匀滑(SSD)^[5]以及极化匀滑(PS)^[6]。它们可以归纳为两大类:空间匀滑,控制焦斑轮廓的形状;时间匀滑,让轮廓内的强度分布随时间快速变化,在时间平均内抹平轮廓

内的强度调制。美国在 20 世纪 80 年代已经将两者在 OMEGA 装置上得到了应用,取得了不错的效果。日本也于 20 世纪 90 年代中期开展了这方面的研究,并在 GEKKO III 中逐步应用。国内近几年在神光 II 上进行了理论和实验的研究,取得了一些结论^[7,8]。

受激光装置的限制,宽带光的带宽和最大谱色散角都有上限,选择合适的光谱形状可以提高匀滑的效率。目前国际上应用于匀滑的宽带光主要是正

收稿日期:2007-09-03;收到修改稿日期:2007-11-02

基金项目:国家 863 计划(2007AA804211)资助项目。

作者简介:李 平(1984—),男,湖北人,硕士研究生,主要从事高功率固体激光传输方面的研究。

E-mail:liping1984@tsinghua.org.cn

导师简介:马 驰(1960—),男,贵州人,研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail:ma80136@yahoo.com.cn

弦相位调制产生的,它不可直接调整光谱形状。新的方法(如啁啾堆积脉冲^[9]、调整倍频晶体控制光谱参数等)为控制光谱形状提供可能。本文基于此研究了同时考虑时域和空域匀滑下,光谱形状对匀滑效果的影响。

2 相位板和光谱色散匀滑的工作原理

具有相位板整形作用的可以是透镜阵列、随机相位板(RPP)或连续相位板(CPP)等二元光学元件,它放在聚焦透镜前通过调整近场入射光的波前来控制焦斑轮廓,如图1所示。相位板的参数通过各种迭代运算算出。

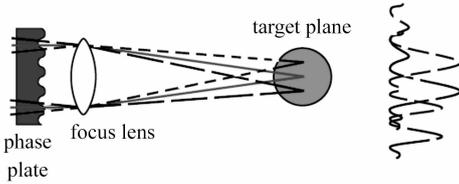


图1 光谱色散匀滑示意图(不同线条代表不同的光频率)

Fig. 1 Schematic of SSD principle (different lines stand for the different frequencies of the laser)

以一维为例,说明相位板的参数情况。设相位板的透射率函数为

$$T(x) = \sum_{p=1}^K \exp(i\phi_p) \text{rect}\left(\frac{x - pD/K}{D/K}\right), \quad (1)$$

式中 D 为相位板的口径; ϕ_p 为第 p 个单元的相位值; K 为相位板的单元数,rect为矩形函数符号。焦面的光强是每一小块衍射焦斑的叠加,从而从所需的焦斑要求出发,可以得到每小块相位板的 ϕ_p 值。其中随机相位板的 ϕ_p 为0或 π ,连续相位板的 ϕ_p 可在 $0 \sim 2\pi$ 中取任意值。

光谱色散匀滑的原理是激光系统的前端产生宽带光,因为光栅色散使宽带光的不同频率有不同的谱色散角,这使得光束在焦斑面形成动态干涉图案,考虑时间平均效应,焦面的光强得到了匀滑。图1很清楚地表示了这种过程,光在焦面上的时间平均内的叠加表现为非相干叠加,相当于光束的扫动过程,从而可以匀滑轮廓内的高频调制。

在传统的正弦相位调制的宽带光入射下,经光栅色散和三倍频后,光场的形式变为^[10]

$$E(t) = E_{3\omega}^0(t) \exp(i3\omega t) \exp\{i3\delta \sin[(\omega_m t + \beta x)]\} = E_{3\omega}^0(t) \exp(i3\omega t) \sum_n J_n(3\delta) \exp(in\omega_m t + \beta x), \quad (2)$$

式中 J_n 为 n 阶贝塞耳函数, $E_{3\omega}^0(t)$ 为初始输入的时间缓变光场, ω 为基频光中心频率, δ 为调制深度, ω_m 为调制频率, β 为色散系数。为简单起见,随机相位板作用下,焦斑光场为

$$U(x) = U_0 e^{i3\omega t} \sum_n J_n(3\delta) \frac{\sin(n\gamma + q)}{n\gamma + q} \times e^{i(n\omega_m t - n\gamma K - Kp + \Phi_K)}, \quad (3)$$

式中 $q = xkD/2fK$, $\gamma = \beta D/2k$, Φ_K 为第 K 个单元的相位, f 为透镜焦距, k 为光的波矢量大小, U_0 为光束远场轮廓波形幅度。

对时间积分后光强变为

$$I(x) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |U|^2 dt \xrightarrow{\Delta t \rightarrow \infty} U_0^2 \sum_n J_n^2(3\delta) \frac{\sin^2(n\gamma + q)}{(n\gamma + q)^2} \times \sum_{K, K'} \cos[2(q + n\gamma)(K - K') + \Phi_K + \Phi_{K'}], \quad (4)$$

式中 K' , $\Phi_{K'}$ 分别为另外的相位板单元及其相位。

需要说明的是惯性约束聚变要求靶面光强在极短时间内平均效应的光强均匀,(4)式之所以把积分时间扩充到无穷大是为了公式推导的方便,从而对稳定的光斑有直观的认识。

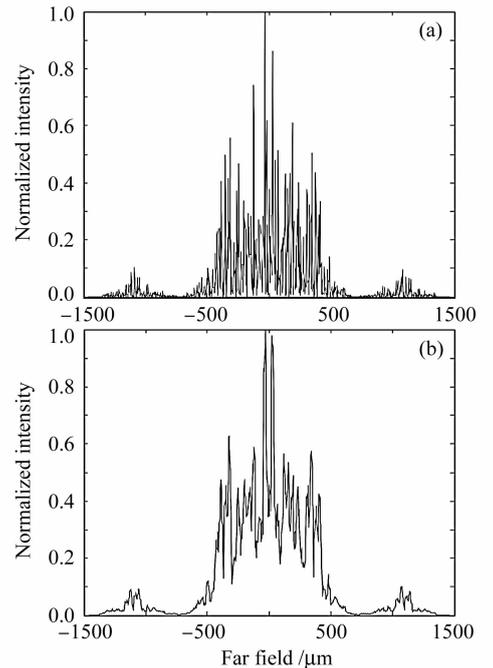


图2 利用随机相位板整形的焦斑峰值的一维强度 (a) 未加光谱色散匀滑;(b) 加光谱色散匀滑

Fig. 2 One-dimensional (1D) intensity of the focal spot using RPP in the near field. (a) without SSD; (b) with SSD

图 2(a), (b) 分别为未加光谱色散匀滑和加光谱色散匀滑的焦斑强度的模拟结果, 模拟参数为: 近场光束采用 SG-III 原型装置的测量数据, 其光束直径 27 cm; 透镜焦距 2.2 m, 波长 0.351 μm , 光谱色散匀滑用到的宽带光为正弦相位调制获得, 带宽 0.3 nm, 其扫描宽度 22.9 μm 。

评价匀滑效果之一方法是作焦斑的空间频谱分析^[11,12], 焦斑的空间频率 f 对应近场相距 Δx , 其与强度 a 关系为

$$a = E_{\text{NF}}^*(x + \Delta x, t) E_{\text{NF}}(x, t) = E^*(x + \Delta x, t) T^*(x + \Delta x) E(x, t) T(x), \quad (5)$$

式中 E_{NF} 为相位板后的近场光场, E 为相位板前的近场光场, $*$ 为复共轭符号, 只考虑相位时

$$E^*(x + \Delta x, t) E(x, t) = \exp[-i\phi(x + \Delta x, t)] \exp[i\phi(x, t)] = \exp\{-i[\phi(x + \Delta x, t) - \phi(x, t)]\} \xrightarrow{\Delta x \rightarrow 0} \exp\left\{-i\left[\frac{\partial\phi(x, t)}{\partial x} \cdot \Delta x\right]\right\}, \quad (6)$$

$\phi(x, t)$ 为相位板前的近场相位, 包含时域和空域, 它们之间耦合在一起, 需要考虑它们联合一起的影响来比较匀滑效果。一般地, 正弦相位调制,

$$\phi(x, t) = \beta \sin(k_x x - \omega t), \quad (7)$$

式中 k_x 为光的波矢量沿 x 方向的大小。更一般的光

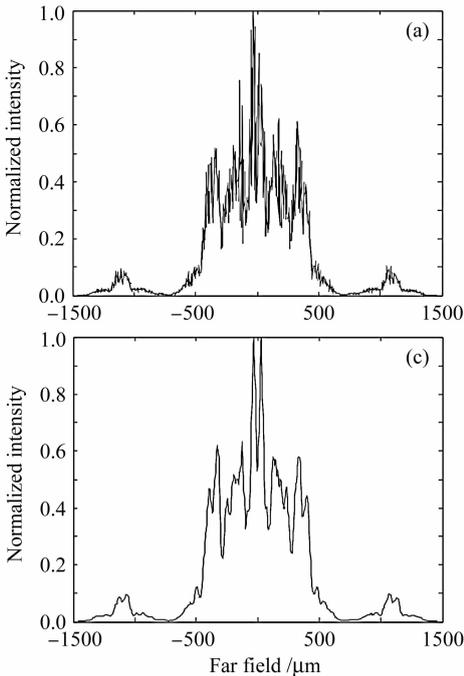


图 4 不同光谱匀滑随机相位板整形的焦斑。(a) 正弦相位调制光谱; (b) 矩形光谱; (c) 三角光谱; (d) 倒三角光谱
Fig. 4 Focal spots controlled by RPP and smoothed by different spectra. (a) the sinusoidal phase modulated spectrum; (b) rectangular spectrum; (c) triangle spectrum; (d) converse triangle spectrum

谱通过改变 $\phi(x, t)$ 形式可以得到。

3 不同光谱匀滑焦斑的模拟分析

正弦调频的频谱如图 3 所示, 由于其频谱不连续性, 以及边频强度的相对比例为贝塞耳各阶数, 使匀滑效果受到影响。

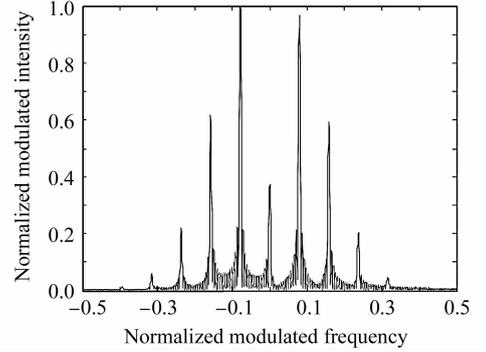


图 3 正弦调频的光谱强度

Fig. 3 Spectral intensity of sinusoidal modulated laser

随机相位板整形得到的焦斑, 在同样的带宽和最大光谱色散角下, 分别用正弦相位调制光谱和三种典型的光谱形状: 矩形光谱、三角光谱、倒三角光谱, 模拟了各自得到的焦斑图如图 4 所示。模拟参数为: 基频光带宽 0.3 nm, 光谱色散匀滑扫描宽度 39 μm , 近场光束采用 SG-III 原型装置测量数据, 口径 27 cm, 波长 0.351 μm , 采样点数 1024, 积分时间

无穷大。

积分时间采取无穷大是为了模拟方便。这与惯性约束聚变作用在极短时间内并不矛盾,因为惯性约束聚变作用时间的典型值约为几百皮秒,在该模拟参数情况下,焦斑的扫动周期是几个皮秒,所以相对焦斑扫动周期,惯性约束聚变作用时间是很长的。该时间内焦斑光强的时间平均效应与无穷大时间平均效应的相对差距在 3% 以内,所以积分时间采取无穷大是合理的。

连续相位板整形下模拟所用的连续相位板是以得到 $900 \mu\text{m}$ 大小焦斑为依据,按照盖斯贝格-撒克斯通(G-S)算法设计的。设计的连续相位板得到的焦斑一维强度波形如图 5(a) 所示,加入不同光谱的光谱色散匀滑后得到的焦斑图如图 5(b)~(e) 所示。光谱色散匀滑技术的参数保持与随机相位板联用时的光谱色散匀滑参数相同。比较正弦相位调制光谱、矩形光谱、三角光谱和倒三角光谱的焦斑的空间频谱图,如图 6 所示。

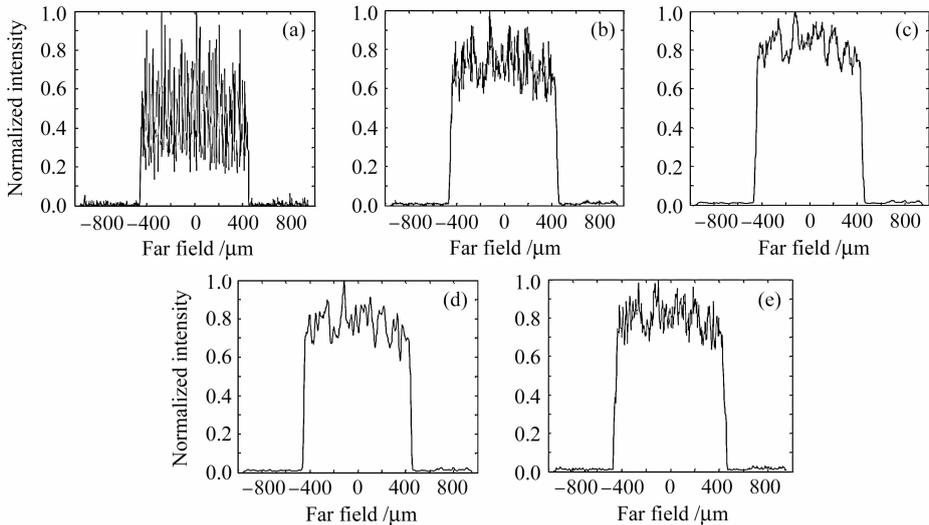


图 5 不同光谱匀滑连续相位板整形的焦斑。(a) 未加光谱色散匀滑;(b) 正弦相位调制谱;(c) 矩形谱;(d) 三角谱;(e) 倒三角谱

Fig. 5 Focal spots controlled by RPP and smoothed by different spectra. (a) without SSD smoothing; (b) the sinusoidal phase modulated spectrum; (c) rectangular spectrum; (d) triangle spectrum; (e) converse triangle spectrum

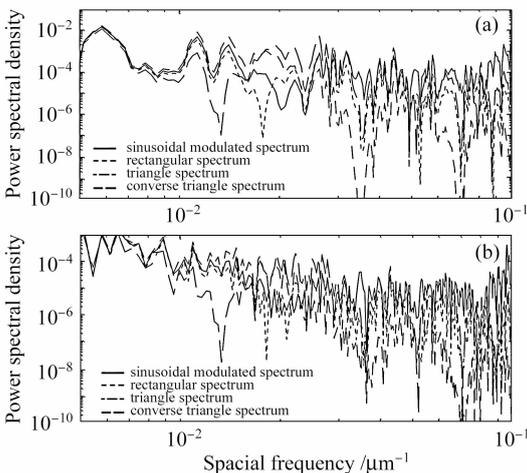


图 6 焦斑的空间归一化频谱。(a) 随机相位板整形;(b) 连续相位板整形

Fig. 6 Normalized spatial spectra of the focal spot (a) RPP smoothed; (b) CPP smoothed

由图 6 可知,对 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的空间频率匀滑,连续相位板比随机相位板效果要好;相同条件下,正

弦相位调制的光谱匀滑效果较差;边频强度大的光谱(如倒三角光谱)对 $100 \mu\text{m}$ 左右尺度匀滑效果好,而中间频率强度大(如三角光谱)对 $10 \mu\text{m}$ 左右尺度匀滑效果好。

对连续相位板和光谱色散匀滑的焦斑,计算了它们焦斑顶部的均方根(RMS),在归一化的强度下,图 5(a),(b),(c),(d),(e)的结果分别为 0.161, 0.106, 0.104, 0.0951, 0.101。这基本反应了频谱中心强度大的光谱对整体匀滑的控制更好。

4 优化光谱的研究分析

惯性约束聚变对匀滑的要求是焦斑的陡边和平顶。不同光谱匀滑的模拟显示中心频率强度大的光谱对保持平顶有优势;陡边,反应在空间频谱的中低频段,需要光谱边频强度大。优化地结合这两种形式的光谱(图 7)更有利于提高匀滑效果。按照这种特点,设计采用中心频率更强的高斯形状,并同时保持边频强度的光谱,并对其作匀滑模拟。

同样参数得到的焦斑图如图8所示。对优化光谱所得到的焦斑做空间频谱分析,结果显示它对 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的匀滑上相对图4,图5的光谱在整体上看,匀滑的效果更明显,但 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 范围内仍有某些空间频率的匀滑不够理想。图8(b)的均方根值为0.0906,比图5(a)~(e)光谱的均方根都小,相对传统的正弦调频光谱提高了43.7%。表明高斯光谱对平顶控制更好。

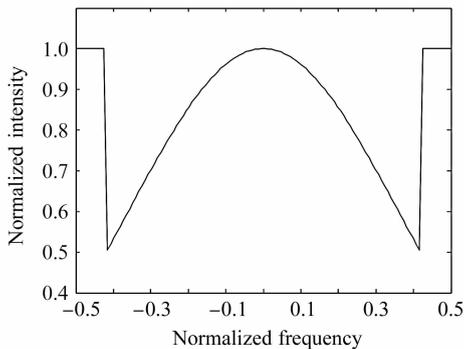


图7 优化的光谱强度

Fig. 7 Optimized spectrum intensity

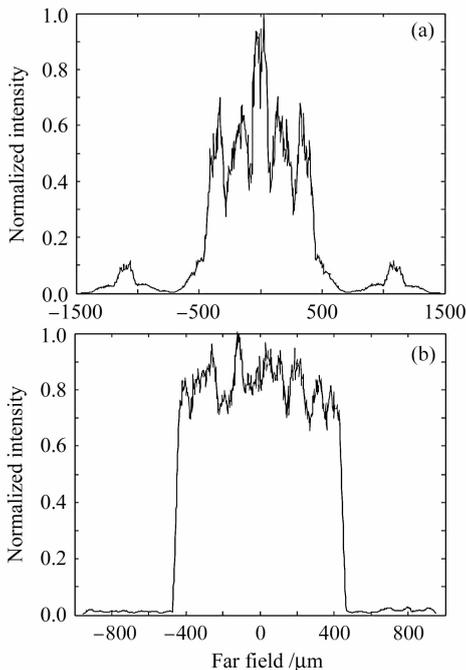


图8 优化光谱匀滑的焦斑

(a) 随机相位板;(b) 连续相位板

Fig. 8 Focal spot smoothed by optimized spectrum with

(a) RPP and (b) CPP

5 结论

分析了光谱色散匀滑和相位板结合实现焦斑的匀滑,模拟了光谱形状对焦斑的影响。结果显示,相同的带宽和最大谱色散角下,不同的光谱形状带来

的匀滑效果不同,且光谱形状直接和匀滑的空间频率相关。存在优化的光谱有最佳的匀滑效果,优化的光谱形状与仅用相位板得到的焦斑形态有关。这对相位板的设计提出了更有效的要求,其设计目标将控制焦斑的空间频谱,而不是传统地降低焦斑整体的均方根。因为这样可以将时域与空域的匀滑耦合起来,降低时域匀滑中光谱色散匀滑对光源的要求。

能否得到任意光谱的宽带光,这对光源提出了更高的要求,目前的啁啾堆积脉冲、特殊的倍频晶体以及连续滤波等方法为任意调整光谱提供了可能。

参考文献

- J. D. Kilkenny, S. G. Glendinning, S. W. Haan *et al.*. A review of the ablative stabilization of the Rayleigh - Taylor instability in regimes relevant to inertial confinement fusion [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5):1379~1389
- Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga *et al.*. Random phasing of high power-lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11):1057~1060
- Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(20):1703~1705
- Shenlei Zhou, Xiujian Jiang, Zunqi Lin *et al.*. Improving irradiation uniformity by lens array with beam spectral dispersion [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Suppl.):5~8
- 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
- Joshua E. Rothenberg. Polarization beam smoothing for inertial confinement fusion [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(8):3654~3662
- Zhou Shenlei, Lin Zunqi. Irradiation uniformity by combining smoothing by spectral dispersion and lens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):275~279
- 周申蕾,林尊琪. 谱色散平滑与透镜阵列联用实现均匀照明 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):275~279
- Zhou Shenlei, Zhu Jian, Li Xuechun *et al.*. Experimental study of smoothing by spectral dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):321~325
- 周申蕾,朱 俭,李学春等. 光谱色散平滑的实验研究 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(3):321~325
- Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Su Jingqin *et al.*. Temporal beam smoothing technique using chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1512~1516
- 张 锐,张小民,栗敬钦等. 采用啁啾脉冲堆积的时间束平滑技术 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1512~1516
- Zhou Shenlei, Lin Zunqi, Zhu Jian *et al.*. Computation and study of smoothing by spectral dispersion [J]. *Chinens J. Lasers*, 2005, **32**(3):341~345
- 周申蕾,林尊琪,朱 俭等. 谱色散均匀化的计算研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):341~345
- Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Spatial frequency spectrum analysis of the performance of the diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):699~702
- 谭峭峰,严瑛白,金国藩等. 衍射光学束匀滑器件性能的空间频谱分析 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):699~702
- Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion on performance of diffractive optical element for beam smoothing [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):749~754
- 谭峭峰,严瑛白,金国藩等. 光谱色散匀滑技术对衍射光学器件束匀滑性能的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6):749~754