

文章编号: 0258-7025(2007)06-0781-05

与光谱色散匀滑技术联用的衍射光学器件 的优化设计

谭峭峰, 严瑛白, 金国藩

(清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 基于空间频谱,对光谱色散匀滑(SSD)技术与衍射光学器件(DOE)联用的焦面光强分布进行了严格的理论分析。与光谱色散匀滑技术联用前后,衍射光学器件焦面光强分布均可转化为一系列不同频率、不同复振幅的正余弦函数的叠加。光谱色散匀滑技术对衍射光学器件焦面光强分布空间频谱进行调制,该调制不仅与光谱色散匀滑参数,还与衍射光学器件相位分布有关。该技术使得衍射光学器件焦面光强分布变得更平缓,但要获得良好的联用性能,需根据光谱色散匀滑参数进行衍射光学器件的优化设计。在某一给定的光谱色散匀滑参数条件下,进行了衍射光学器件的优化设计。结果表明,与光谱色散匀滑技术联用后,衍射光学器件对入射波前畸变的宽容度有较大提高。

关键词 激光技术;束匀滑;空间频谱;光谱色散平滑

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A

Optimization of Diffractive Optical Element Used with Smoothing by Spectral Dispersion Technique

TAN Qiao-feng, YAN Ying-bai, JIN Guo-fan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The focal plane intensity distribution, realized by the diffractive optical element (DOE) and the smoothing by spectral dispersion (SSD) technique, is theoretically analyzed based on the spatial frequency spectra. The focal plane intensity distributions of the DOE can be expressed as the sum of a series of sine and cosine functions with different harmonic spatial-frequencies and complex amplitudes, no matter whether the SSD technique is adopted or not. Theoretical analysis shows that the spatial frequency spectra are modulated by the SSD technique, and the modulation is determined not only by parameters of the SSD technique, but also by phase distribution of the DOE. The SSD technique smoothes the focal plane intensity distribution of the DOE. But to obtain good beam smoothing performance, the DOE should be optimized considering the parameters of the SSD technique. Finally the DOE is optimized at a certain choice of SSD parameters. The simulated results show that the tolerance of the DOE to incident wave-front distortion is improved with the use of the SSD technique.

Key words laser technique; beam smoothing; spatial frequency spectrum; smoothing by spectral dispersion

1 引言

惯性约束聚变(ICF)对束匀滑光强分布提出了很高的要求,衍射光学器件(DOE)是实现束匀滑光强分布的一种行之有效的空域技术途径,但其存在对入射波前畸变敏感、对加工精度要求高等不足之

处,制约着衍射光学器件的实际使用。因此,除衍射光学器件外,需联合使用时域匀滑,例如光谱色散匀滑(SSD)技术等才有望满足惯性约束聚变对束匀滑的高要求。光谱色散匀滑改善衍射光学器件的焦面光强分布,已在理论上和实验上得以证实^[1~5],在空域分析了光谱色散匀滑与衍射光学器件联用时的焦

收稿日期:2006-10-24;收到修改稿日期:2007-01-04

基金项目:国家高技术计划(2005AA849027)资助项目。

作者简介:谭峭峰(1974—),江西人,副研究员,主要从事衍射光学、光场模拟和重构方面的研究。

E-mail: tanqf@mail. tsinghua. edu. cn

面光强分布,将其展开为一系列不同权重、不同频率光入射时的衍射光学器件焦面光强分布的非相干叠加,并对光谱色散平滑的调制频率、调制幅度、脉冲时间、空间色循环次数等参数的选取给出了指导性意见。谭峭峰等^[6,7]在空间频域内分析了联用时的焦面光强分布,模拟分析了光谱色散平滑各参数对束匀滑性能的影响,但只对光谱色散平滑与衍射光学器件的联用机制进行了简化,并未考虑空间上的色循环。简化模型可定性解释光谱色散平滑与衍射光学器件的联用效果,但定量分析以及进一步优化设计衍射光学器件,需基于严格的理论分析模型。严格的理论分析模型,可在空域中进行分析^[1,2,4],也可在空间频域内进行分析。

本文基于衍射光学器件的空间频谱分析方法^[8],建立了与空域方法平行的一套严格的理论分析模型。分析结果表明,与光谱色散平滑联用后,衍射光学器件焦面光强分布的空间频谱被调制,而调制的幅度及相位由光谱色散平滑参数与衍射光学器件相位分布确定。联用性能能否改善,由光谱色散平滑参数和衍射光学器件相位共同确定。要获得良好的联用性能,需在给定光谱色散平滑参数条件下,对衍射光学器件进行优化设计。由于目前尚不能用迭代算法,只能用搜索算法设计与光谱色散平滑联用的衍射光学器件。

2 理论分析模型

基于光谱色散平滑的原理^[1,4],设入射理想平

面波为 $E(t) = E_0(t) \exp(i2\pi\nu t)$,其中 $E_0(t)$ 为初始平面波, ν 为初始平面波的频率,则经电光晶体相位调制后,光场为

$$E_m(t) = E_0(t) \exp(i2\pi\nu t + i\delta \sin 2\pi\nu_m t), \quad (1)$$

式中 ν_m 为电光晶体相位调制的频率, δ 为调制幅度。

经光栅色散(设色散沿 x 方向)后,光场为

$$E_m(t) = E_0(t) \exp[i2\pi\nu t + i\delta \sin(2\pi\nu_m t + \alpha x)], \quad (2)$$

式中 $\alpha = 2\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\nu_m}{\nu}$, $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ 为光栅的角色散。

空间色循环次数为

$$N_c = \alpha D / 2\pi = D \frac{\Delta\theta}{2\delta\lambda}, \quad (3)$$

式中 λ 为入射光波长, D 为衍射光学器件的口径。

光谱色散平滑展宽的带宽为

$$\Delta\lambda = 2\delta\nu_m\lambda^2/c, \quad (4)$$

式中 c 为真空中光速。

对于一维衍射光学器件,其透射率函数为

$$T(x) = \sum_{p=1}^K \exp(i\varphi_p) \text{rect}\left(\frac{x - pD/K}{D/K}\right), \quad (5)$$

式中 φ_p 为器件第 p 个单元的相位值, K 为衍射光学器件相位单元数,且

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}. \quad (6)$$

根据基尔霍夫衍射理论,忽略位相因子与 sinc 函数, t 时刻远场光强分布为

$$\begin{aligned} I(x') &= [E_0(t)]^2 \left| \sum_{p=1}^K \exp(i\varphi_p) \exp\left(-i2\pi \frac{pD}{K\lambda f} x'\right) \exp\left[i\delta \sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{pD}{K}\right)\right] \right|^2 = \\ & [E_0(t)]^2 \left| \sum_{p=1}^K \exp\left\{i\left[\varphi_p + \delta \sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{pD}{K}\right)\right]\right\} \exp\left(-i2\pi \frac{pD}{K\lambda f} x'\right) \right|^2 = \\ & [E_0(t)]^2 \left\{ \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K \exp[i(\varphi_p - \varphi_q)] \exp\left\{i\delta \left[\sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{pD}{K}\right) - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{qD}{K}\right)\right]\right\} \exp\left[-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x'\right] \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

式中 f 为透镜焦距, φ_q 为器件第 q 个单元的相位值。在积分时间段 ΔT 内,非相干叠加的焦面光强分布为

$$\begin{aligned} I_{\Delta T}(x') &= \frac{1}{\Delta T} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} [E_0(t)]^2 \left\{ \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K \exp[i(\varphi_p - \varphi_q)] \exp\left\{i\delta \left[\sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{pD}{K}\right) - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{qD}{K}\right)\right]\right\} \exp\left[-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x'\right] \right\} dt, \quad (8) \end{aligned}$$

令

$$G(p, m) = \frac{1}{\Delta T} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} [E_0(t)]^2 \exp\left\{i\delta \left[\sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{pD}{K}\right) - \sin\left(2\pi\nu_m t + \alpha \frac{(p-m)D}{K}\right)\right]\right\} dt, \quad (9)$$

则

$$I_{\Delta T}(x') = \sum_{m=0}^{K-1} \left\{ \sum_{p=m+1}^K \exp[i(\varphi_p - \varphi_{p-m})] G(p, m) \right\} \exp\left(-i2\pi \frac{mD}{K\lambda f} x'\right) + \sum_{m=1-K}^{-1} \left\{ \sum_{p=1}^{K+m} \exp[i(\varphi_p - \varphi_{p-m})] G(p, m) \right\} \exp\left(-i2\pi \frac{mD}{K\lambda f} x'\right), \quad (10)$$

令

$$A(m) = \begin{cases} \sum_{p=m+1}^K \exp[i(\varphi_p - \varphi_{p-m})] G(p, m) & m \geq 0 \\ \sum_{p=1}^{K+m} \exp[i(\varphi_p - \varphi_{p-m})] G(p, m) & m < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

则

$$I_{\Delta T}(x') = \sum_{m=1-K}^{K-1} A(m) \exp\left(-i2\pi \frac{mD}{K\lambda f} x'\right). \quad (12)$$

与光谱色散匀滑联用后,衍射光学器件焦面光强分布同样可转化为一系列不同频率、不同复振幅的余弦函数的叠加,只是复振幅由光谱色散匀滑参数、衍射光学器件相位共同确定。根据(12)式,可定义顶部不均匀性与光能利用率^[8]。

3 理论分析及优化设计

给出光谱色散匀滑参数为: $\nu_m = 8.5 \text{ GHz}$, $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$, $\lambda = 1.053 \text{ }\mu\text{m}$, 脉冲时间 $\Delta T = 500 \text{ ps}$, 空间色循环次数 $N_c = 1.2$, 并假设在 ΔT 内, $E_0(t)$

是均匀分布的。衍射光学器件设计参数为: 器件口径 $D = 100 \text{ mm}$, 透镜焦距 $f = 600 \text{ mm}$, 选取 $K = 256$, 所需束匀滑光斑大小约 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 。

首先进行联用效果的分析。为简单起见,考虑对称的衍射光学器件相位分布,此时 $G(p, m)$, $A(m)$ 是对称的实值分布。对于文献[8]给出的精细化设计结果,其相位分布如图 1(a)所示;计算出的 $G(p, m)$ 如图 1(b)所示;采用光谱色散匀滑前后, $A(m)$ 如图 1(c)所示;根据(12)式计算 $x' = m\lambda f/D/4(m = 0, 1, \dots)$ 的光强分布如图 1(d)所示

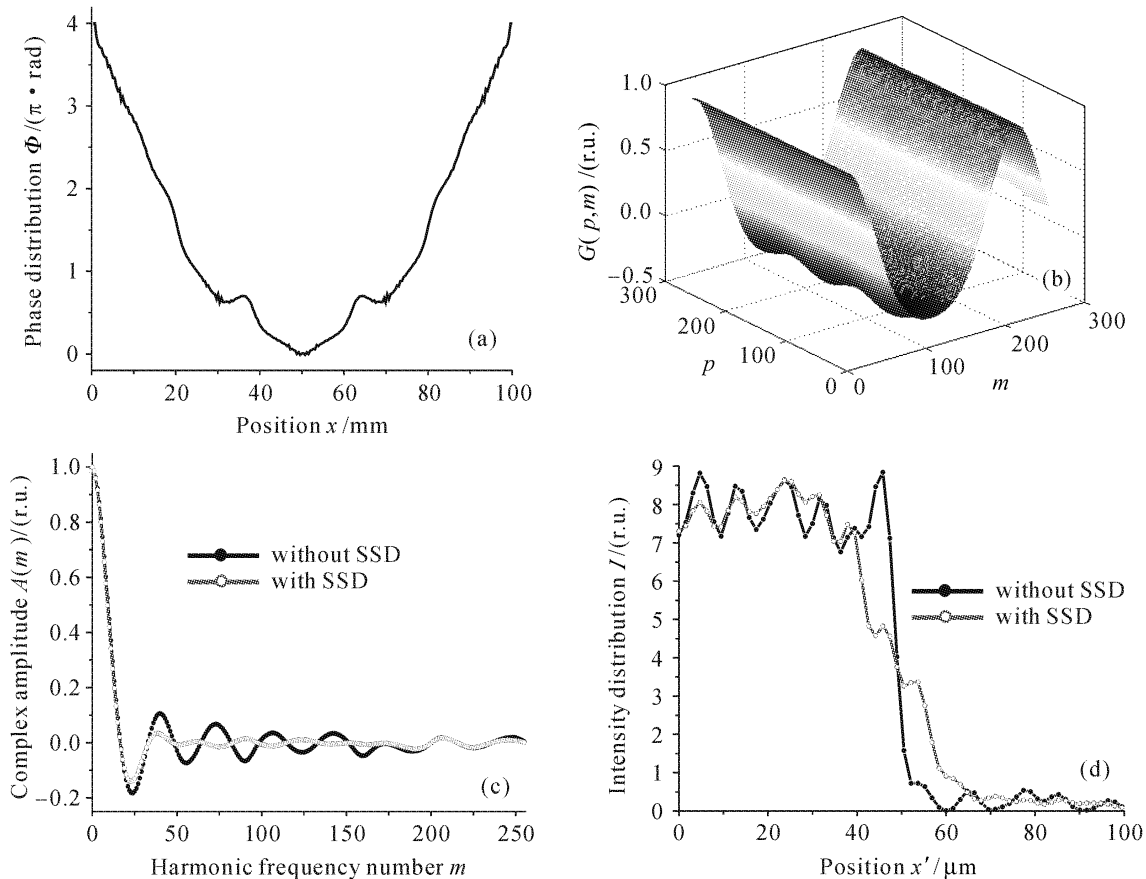


图 1 光谱色散匀滑与衍射光学器件联用效果分析

(a) 相位分布; (b) $G(p, m)$; (c) 空间频域复振幅分布; (d) 焦面光强分布

Fig. 1 Effect of SSD and DOE

(a) phase distribution; (b) $G(p, m)$; (c) complex amplitude distribution in spatial frequency domain; (d) intensity distribution

(计算离散采样点的目的是为了后续优化,只要输出面采样间隔小于 $\lambda f/D$ 的 $1/2$,根据离散点计算得到的光能利用率 η 和顶部不均匀性均方根(RMS)与根据(12)式计算得到的非常接近),利用这些采样点计算出的 η 和均方根分别为93.0%,7.5%(无光谱色散匀滑),88.0%,15.9%(与光谱色散匀滑联用)。可见采用光谱色散匀滑后,束匀滑性能反而下降,这是因为光强分布的边缘变得平缓而引起的。因此,要获得良好的束匀滑性能,需在衍射光学器件优化时,考虑光谱色散匀滑的影响。

根据图 1(c),可计算出采用光谱色散匀滑后,衍射光学器件焦面光强分布的空间频谱调制情形如图 2 所示,并不是一个简单的低通滤波。对相同的衍射光学器件,不同的光谱色散匀滑参数引起的调制是不同的,图 2 给出了另外两组计算结果,只改变调制频率 ν_m 和色循环次数 N_c 。根据(9)式可知,在 $\nu_m \Delta T$ 为整数时,光谱色散匀滑对衍射光学器件焦面光强分布空间频谱的调制与衍射光学器件相位无关。同样根据式(9),光谱色散匀滑对衍射光学器件

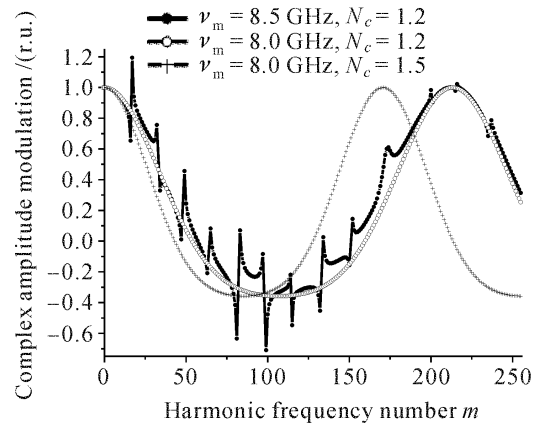


图 2 光谱色散匀滑对衍射光学器件焦面光强分布空间频谱的调制

Fig. 2 Modulation of the SSD on the spatial frequency spectra of the focal plane intensity distribution of the DOE

焦面光强分布空间频谱的调制基本上是周期性的,周期个数由 N_c 确定。

为获得良好的联用性能,在上述给出的光谱色散匀滑参数和衍射光学器件设计参数,利用爬山-模

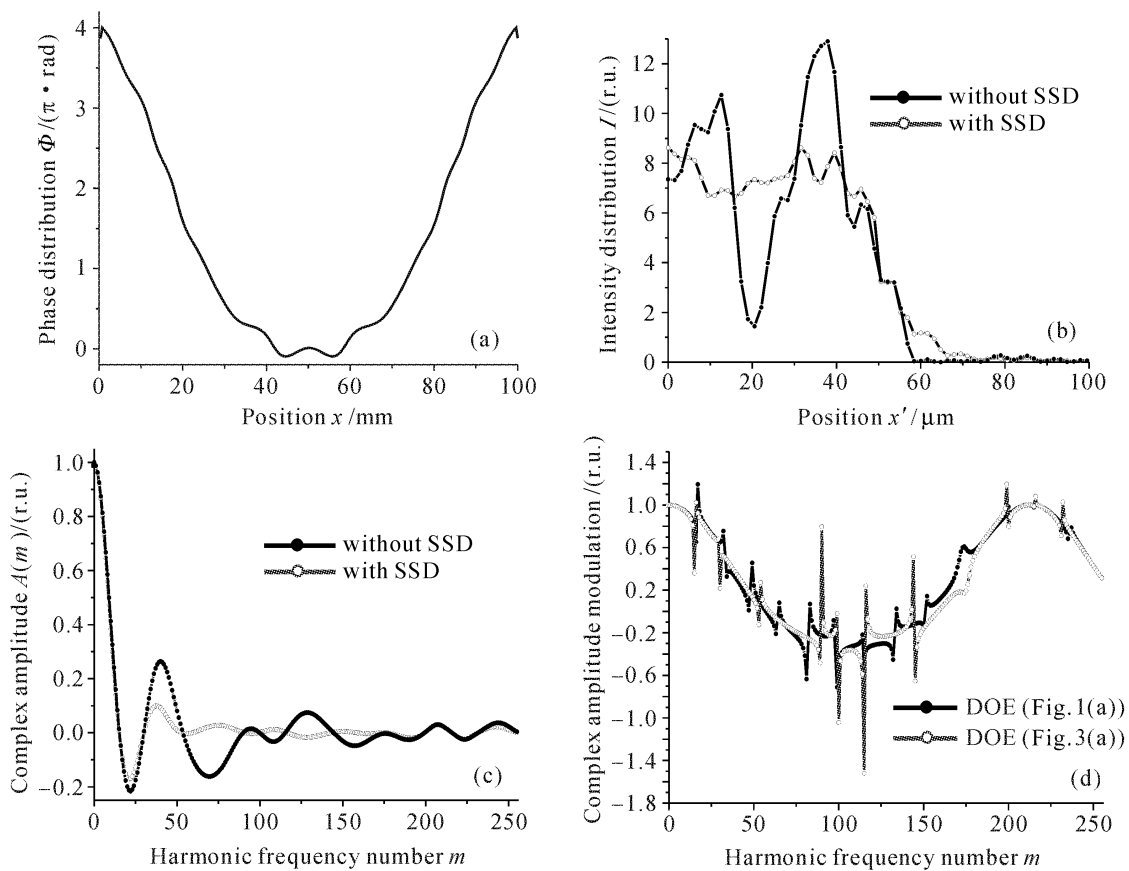


图 3 与光谱色散匀滑联用的衍射光学器件的设计结果

(a) 相位分布;(b) 焦面光强分布;(c) 空间频域复振幅分布;(d) 光谱色散匀滑对衍射光学器件焦面光强分布空间频谱的调制

Fig. 3 Performance of the DOE used with the SSD

(a) phase distribution; (b) focal plane intensity distribution; (c) complex amplitude distribution in the spatial frequency domain; (d) modulation of the SSD on the spatial frequency spectra of the focal plane intensity distribution of the DOE

拟退火混合优化算法,在图 1(a)设计结果的基础上,进一步优化设计得到的衍射光学器件如图 3 所示。使用光谱色散匀滑前后, η 和均方根分别为 91.4%, 40.8% (无光谱色散匀滑), 90.2%, 8.7% (与光谱色散匀滑联用)。可见,要获得良好的联用性能,并不简单地要求衍射光学器件的性能良好,而是要和光谱色散匀滑参数匹配起来。

与光谱色散匀滑联用后,衍射光学器件对入射波前畸变的宽容度有较大提高,对于图 3 设计结果,在此仅以均值为 0,方差为 σ 的高斯型白噪声 $N(0, \sigma)$ 来进行模拟,如图 4 所示,对每个 σ , 计算了 30 个样本。对其他类型的波前畸变,有类似结论。

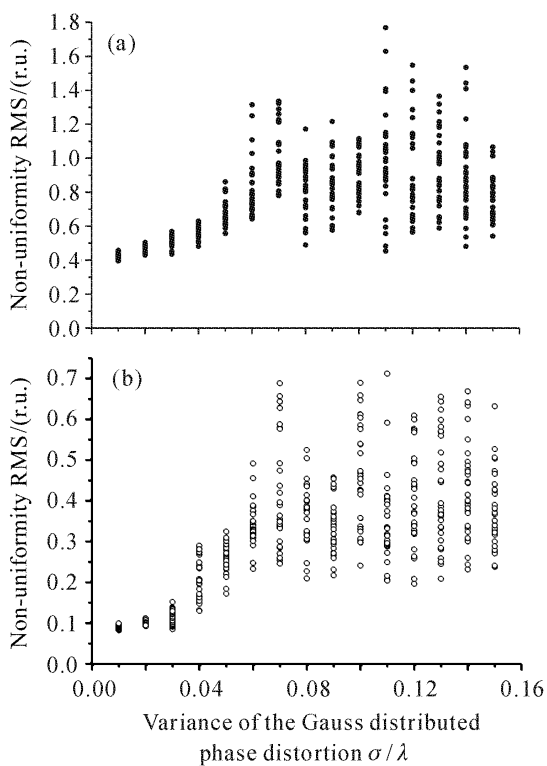


图 4 波前畸变对衍射光学器件顶部不均匀性的影响

(a) 未与光谱色散匀滑联用; (b) 与光谱色散匀滑联用

Fig. 4 Influence of wave front distortion on the non-uniformity of the DOE

(a) without SSD; (b) with SSD

4 结 论

通过对光谱色散匀滑与衍射光学器件联用的焦面光强分布式采取了交换时间上的积分和空间上的求和顺序,在空间频域上建立了联用性能的理论分析模型,与空域上的理论分析模型相互平行。光谱

色散匀滑对衍射光学器件焦面光强分布的影响,可用衍射光学器件焦面光强分布的空间频谱受到光谱色散匀滑的调制来解释,并且该调制是由光谱色散匀滑参数与衍射光学器件相位分布共同确定,并不是简单的低通滤波。

本文优化设计了与一维光谱色散匀滑联用的一维衍射光学器件,改善了联用性能。相关理论可简单延拓至二维衍射光学器件与二维、多维光谱色散匀滑,其中的关键问题不在于分析,而在于优化。如何改进优化算法,特别是能否采用迭代算法来设计与光谱色散匀滑联用的二维衍射光学器件,这是后续研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Two-dimensional SSD on OMEGA [C]. *LLE Review*, 1996, **69**: 1~10
- 2 Zhang Jiatai, Yang Guolin. Irradiation uniformity for laser driven fusion and computational study of kinoform phase plates [J]. *Chinese J. Computational Physics*, 1999, **16**(5): 543~551
张家泰,杨国林. 激光辐照均匀性与相息相位板计算研究[J]. *计算物理*, 1999, **16**(5): 543~551
- 3 G. Miyaji, N. Miyanaga, S. Urushihara *et al.*. Three-directional spectral dispersion for smoothing a laser irradiance profile [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 725~727
- 4 Zhou Shenlei, Lin Zunqi, Zhu Jian *et al.*. Computation and study of smoothing by spectral dispersion [J]. *Chinese 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
- 5 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. 光谱色散均匀化的实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 321~325
- 6 Qiaofeng Tan, Yingbai Yan, Guofan Jin. Influence of spectral dispersion parameters on the beam smoothing performance of a diffractive optical element [J]. *Optik*, 2006, **117**(3): 101~106
- 7 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Spatial frequency analysis of beam smoothing performance realized by the diffractive optical element and the smoothing by spectral dispersion technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1384~1387
谭峭峰,严瑛白,金国藩. 光谱色散匀滑技术与衍射光学器件联用性能的空间频谱分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1384~1387
- 8 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之空间频谱分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 699~702