

文章编号: 0258-7025(2007)11-1533-05

利用二维光谱色散和透镜列阵改善 靶面辐照均匀性

江秀娟, 周申蕾, 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 利用二维光谱色散平滑技术和透镜列阵(LA)来改善激光驱动器中靶面的辐照均匀性。通过消衍射透镜列阵可得到包络陡峭且中小空间尺度均匀性较好的焦斑。当在光路中加入二维光谱色散平滑单元后,光束在两个互相垂直的方向发生光谱色散,多光束干涉所引起的细密条纹也将在很大程度上被抹平,如果把横向热传导平滑效应也考虑在内,高空间频率的强度波动可进一步被消除。二维理论模拟结果表明采用该方案可获得顶部平坦边缘陡峭的焦斑,而且该方案无需仔细调整靶面的位置,实际应用较方便。

关键词 激光技术;激光驱动器;光谱色散平滑;透镜列阵;衍射;干涉

中图分类号 O 433.5⁺4 **文献标识码** A

Improved Target Irradiation Uniformity Using Two-Dimensional Spectral Dispersion and Lens Array

JIANG Xiu-juan, ZHOU Shen-lei, LIN Zun-qi

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

Abstract The target irradiation uniformity is improved by using two-dimensional smoothing by spectral dispersion and a lens array (LA). A pattern of steep edges and good middle-scale uniformity is obtained with a diffraction-weakened lens array. When two-dimensional spectral dispersion is employed in the laser chain, the beams experience spectral dispersion in two vertical directions, and the fine stripes caused by beamlets interference are smoothed out greatly. If the effect of lateral thermal conduction smoothing is taken into account, the high spatial-frequency intensity fluctuation can be eliminated further. Two-dimensional theoretic results indicate that a flat-topped and steep-edged target pattern can be achieved in this scheme. Because the position of the target does not require adjustment with high precision, the implement of this scheme is comparatively convenient.

Key words laser technique; laser driver; smoothing by spectral dispersion; lens array; diffraction; interference

1 引言

在惯性约束聚变及激光等离子体实验中,对靶面的辐照均匀性有相当高的要求,由此发展出了大量的光束匀滑技术^[1~12]。“神光II”装置中使用透镜列阵(LA)获得了较好的实验结果^[5,13,14]。为了进一步提高靶面辐照质量,正在开展光谱色散平

滑^[10]技术的研究。我们从理论和实验上对透镜列阵和光谱色散平滑配合使用的辐照均匀性进行了探索,发现两种技术结合的方案是可行的^[15,16]。但是在透镜列阵的使用中存在一个问题,就是为了消除衍射引起的中等空间尺度的强度调制,要使靶面适当地离开主聚焦透镜的焦面,但是离焦量难以精确

收稿日期:2006-11-01;收到修改稿日期:2007-03-19

基金项目:国家863计划(2003AA842070)资助项目。

作者简介:江秀娟(1974—),女,广东人,博士研究生,主要从事激光驱动器靶面均匀辐照技术的研究。

E-mail:jiang_x_j913@sohu.com

导师简介:林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,研究员,从事高功率激光技术和激光等离子体研究。

E-mail:zqlin@mail.shcnc.ac.cn

控制,而且实际操作起来比较困难。为此提出了消衍射透镜列阵的概念^[17,18]。由于涉及到二维光谱色散平滑传输的计算量非常大,先前的理论分析都基于一维数值模拟结果。目前“神光II”装置中已经搭建起一维光谱色散平滑的实验平台,进一步的工作将朝着二维光谱色散平滑的方向进行,为了给出更为接近实际情况的理论参考,必须进行二维数值模拟计算。

本文以二维数值计算为基础,分析了采用二维光谱色散平滑及消衍射透镜列阵后焦斑均匀性的改善情况,并且用空间滤波算法模拟了横向热传导平滑效应。

2 基本原理

在一维光谱色散平滑系统中^[10],激光束经过一个电光调制器后,频谱被展宽。当电光调制器的调制频率为 ν , 调制幅度为 δ 时,展开的频谱宽度可近似表示成 $\Delta\nu = 2\delta\nu$ 。此光束再通过一个光栅产生光谱色散,为了纠正该光栅引起的时间延迟,在调制器前放置了一个预补偿光栅。二维光谱色散平滑使用两套上述的光栅和调制器结构,其中两个调制器具有不同的调制频率,两对光栅使先后被展宽的频谱向两个互相垂直的方向产生光谱色散。二维光谱色散平滑的结构如图 1^[11] 所示,其中所有光栅的色散系数 $\Delta\theta/\Delta\lambda$ ($\Delta\theta$ 为光束发散角, $\Delta\lambda$ 为调制带宽) 都取相同值。若入射激光的角频率为 ω_0 , 空间强度分布为 $A(x, y)$, 则它经过二维光谱色散平滑后的光场分布可表示为^[11]

$$E(x, y, t) = A(x, y) \sum_{n_1, n_2} J_{n_1}(\delta_1) J_{n_2}(\delta_2) \times \exp(in_1\alpha_1 x + in_2\alpha_2 y) \times \exp[i(\omega_0 + n_1\omega_1 + n_2\omega_2)t], \quad (1)$$

式中 J_{n_1} 和 J_{n_2} 为第一类贝塞耳函数, n_1, n_2 均为整数, $\omega_{1,2}$ 和 $\delta_{1,2}$ 分别为两电光调制器的调制角频率和调制幅度, $\alpha_{1,2} = 2\pi \cdot (\Delta\theta/\Delta\lambda) \cdot (\omega_{1,2}/\omega_0)$, 表示空间色散的程度。

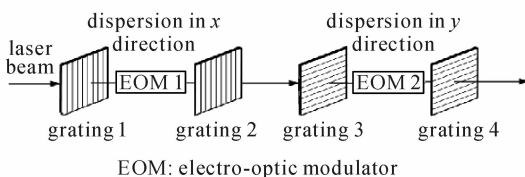


图 1 二维光谱色散平滑示意图

Fig. 1 Schematic of two-dimensional smoothing by spectral dispersion

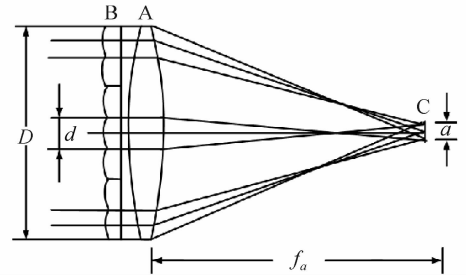


图 2 透镜列阵系统结构图

Fig. 2 Configuration of a lens array system

透镜列阵系统的构成如图 2 所示^[5],其中 B 为透镜列阵, A 为主聚焦透镜,其口径和焦距分别为 D 和 f_a , C 为靶面, a 为焦斑大小。当透镜元的个数为 $M \times M$ (取 M 为奇数), 透镜元口径为 d , 焦距为 f_e 时,透镜列阵的复透过率函数可写为^[19]

$$t(x, y) = \sum_{m_1, m_2} P(x - m_1 d, y - m_2 d) \times \exp\left\{-i \frac{k}{2f_e} [(x - m_1 d)^2 + (y - m_2 d)^2]\right\}, \quad (2)$$

式中 k 为入射光波数, m_1, m_2 均为整数,且有一 $(M - 1)/2 \leq m_1 (m_2) \leq (M - 1)/2$, 位于第 m_1 行第 m_2 列的透镜元的中心坐标为 $(m_1 d, m_2 d)$ 。 P 为透镜元的振幅透过率函数,当采用振幅型边缘软化方法来消除透镜元的衍射效应时,有^[17]

$$P(x, y) = \exp\left[-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d/2}\right)^p\right], \quad (3)$$

式中 p 为超高斯指数。振幅型边缘软化透镜列阵可用镀变透射率膜或磨砂等方法实现。当 $p \rightarrow \infty$ 时,透镜元变为一般的硬边透镜元,即孔径内的振幅透过率均为 1,孔径外为 0。

实际应用时,激光驱动器的前端振荡器产生准单色激光,该激光通过二维光谱色散平滑单元后频谱被展宽,并在横向两个互相垂直的方向上产生空间光谱色散。宽带激光束再经过多级能量放大和空间滤波,在靶场照射到透镜列阵系统。经过二维光谱色散平滑后的宽带激光包含一系列频率分立的光波分量。每一光波分量均通过透镜列阵及主聚焦透镜,然后按菲涅耳衍射规律传输到靶面^[20],形成大小约为几百微米的光斑。设 $E_{n_1 n_2}(x, y, z)$ 是频率为 $\omega_0 + n_1\omega_1 + n_2\omega_2$ 的光波分量在靶面的空间光场分布,靶面总的光场可表示为 $E(x, y, z, t) = \sum E_{n_1 n_2}(x, y, z) e^{i(\omega_0 + n_1\omega_1 + n_2\omega_2)t}$ 。在一段时间内平均光

强分布为 $I(x, y, z) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E(x, y, z, t)|^2 dt$ 。某一瞬时靶面上的总光强分布是具有高度空间强度调制

的干涉图样,但在一段时间内的平均光强将在某种程度上抹平干涉结构,得到小尺度均匀性较好的焦斑^[10]。

3 数值计算结果

用数值方法分析了靶面的二维光强分布。按照“神光 II”装置的现有运行参数,取入射到二维光谱色散平滑单元的激光波长为 1053 nm,具有六阶超高斯的横向空间分布。入射到透镜列阵的仍然是波长为 1053 nm 的基频光,光束口径 350 mm。透镜列阵由 7×7 个方形的透镜元组成,每个透镜元的口径为 50 mm,焦距为 62.5 m。光束通过 0.75 m 焦距的主透镜聚焦在靶面(位于主透镜焦面)上,形成大小约 600 μm 的焦斑。将光强在 1 ns 的激光脉冲宽度内取平均。

文献[18]中用焦斑不均匀度 σ_{rms} 和焦斑能量利用率 η 两个参量来定量描述焦斑的均匀性。设 $I(x, y)$ 和 \bar{I} 分别为焦斑各点的光强及其平均值,则 $\sigma_{rms} = [\langle (I(x, y) - \bar{I})^2 \rangle / \bar{I}^2]^{1/2}$, η 定义为光强大于 $0.9\bar{I}$ 的部分能量与焦斑总能量的比值。 σ_{rms} 和 η 分别表征了焦斑顶部的平坦程度和边缘的陡峭程度,均匀照明程度好的焦斑应该具有小的 σ_{rms} 和大的 η 。

图 3(a)是没有加入光谱色散平滑单元时单色激光通过硬边透镜列阵后的焦斑二维光强分布图。图 3(b)和(c)分别为经过该焦斑中心的 x 和 y 方向上的强度分布。可以发现,激光经过每个透镜元后都在靶面形成一个准近场衍射斑,所有衍射斑叠加起来得到一个总的焦斑,由于不同子光束之间存在干涉,焦斑上有非常细密的条纹。

在激光形成的等离子体中,热电子会从激光能量沉积的临界面向消融面传输,这两个面之间的距离一般有 50~100 μm,当激光强度的不均匀性尺度为 20 μm 左右时,这种细密的强度波动将在到达消融面前被横向热传导作用抹平^[21,22]。实验也证明了消融压所产生的冲击波具有相当平的波前^[13,14]。因此,当把热传导效应也考虑进去以后,靶面上空间频率非常高的强度不均匀就可以消去。本文用低滤波算法来近似模拟这种热传导平滑效应,截止空间周期取为 17 μm(在文中的参数条件下,只要选取此截止周期,就可以明显地区别有热传导平滑与没有热传导平滑的效果)。

考虑横向热传导平滑后,焦斑光强分布如图 3(d),(e),(f)所示。可以看出近场的硬边衍射效应

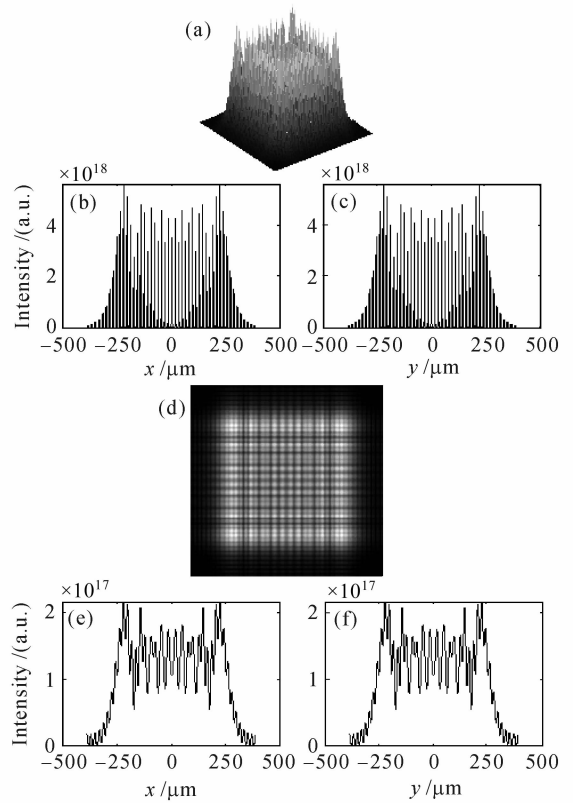


图 3 考虑热传导平滑效应前后,单色光通过硬边透镜列阵后的焦斑二维光强分布(a),(d),和经过该焦斑中心 x (b),(e)和 y (c),(f)方向的强度分布

Fig. 3 With or without considering the thermal conduction smoothing, the two-dimensional intensity distribution of the target pattern when the hard-edged laser array is irradiated by a monochromatic laser beam (a), (d), and the intensity distribution across the center of the pattern along x (b), (e) and y (c), (f) directions

非常明显,焦斑存在大幅度的中小空间尺度强度调制,此时的均方根不均匀度约为 36%。如果令各透镜元具有如(3)式所示的指数型振幅透过率,透镜元边缘附近的透过光强逐渐减弱,衍射效应将被大大压制,焦斑中小尺度均匀性得到明显的改善,如图 4 所示,此时焦斑不均匀度下降到 5%,能量利用率为 84%。

激光束经过二维光谱色散平滑后,其光谱被前后两个电光调制器展宽,并且在互相垂直的 x 和 y 两个方向发生色散。不同频率的光波分量产生的近场光斑有轻微的不同,它们叠加后会使得强度大和强度小的地方互补,从而改善焦斑中小空间尺度的均匀性。更为主要的是,当频率不同的光波分量叠加时,它们产生的干涉图样是不稳定的,会随时间变

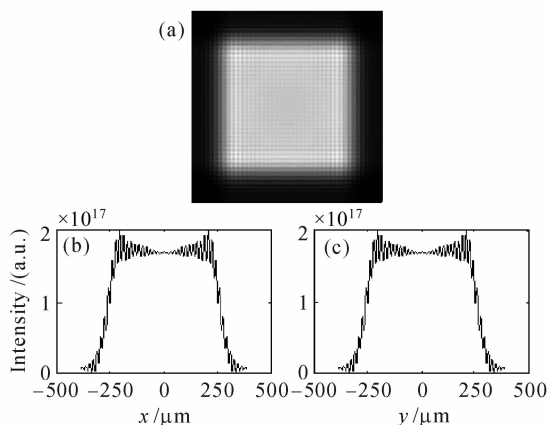


图 4

(a) 单色光通过消衍射透镜列阵后的焦斑二维光强分布; (b) 和 (c) 分别为经过该焦斑中心的 x 和 y 方向强度分布 (已经考虑了热传导平滑效应)。消衍射透镜列阵的超高斯指数 $p = 11$

Fig. 4

(a) two-dimensional intensity distribution of the target pattern in the case that an edge-softened LA is irradiated by a monochromatic laser beam; (b) and (c) are the intensity distribution across the center of the pattern along x and y direction, respectively (the thermal smoothing is included). The super-Gaussian order of the edge-softened LA is $p = 11$

化,所以在一定时间内取平均将在很大程度上消除细密的干涉条纹。图 5(a)~(c)给出了二维光谱色散平滑和消衍射透镜列阵结合起来后焦斑的光强分布,消衍射透镜列阵的超高斯指数 $p = 11$ 。光谱色散平滑的参数为 $\nu_1 = 3 \text{ GHz}$, $\Delta\lambda_1 = 0.089 \text{ nm}$, $\nu_2 = 2.9 \text{ GHz}$, $\Delta\lambda_2 = 0.11 \text{ nm}$, $\Delta\theta/\Delta\lambda = 80 \mu\text{rad}/0.1 \text{ nm}$ 。此时中等尺度及细密的强度调制都被抹平,焦斑具有相当理想的平顶及陡峭的边缘包络,不均匀性为 1.2%,能量利用率 83%。入射到透镜列阵的激光束通常都有一定程度的强度和相位畸变,但是由于透镜列阵将光束分割成了大量小口径的子光束,近场畸变对靶面光强分布的影响被削弱。例如,当入射到透镜列阵的光束强度畸变达到 58% (均方值),而相位畸变幅度为 1/4 波长时,得到的靶面光强分布如图 5(d)~(f)所示,这时 $\sigma_{\text{rms}} = 3.2\%$, $\eta = 80\%$ 。根据“神光 II”装置的设计指标,靶面均匀照明的不均匀度要求不大于 5%,能量利用率不小于 80%,因此,即使在上面给出的近场存在严重畸变的情况下,焦斑质量仍在可以接受的水平。

4 结 论

提出用二维光谱色散平滑和消衍射透镜列阵改

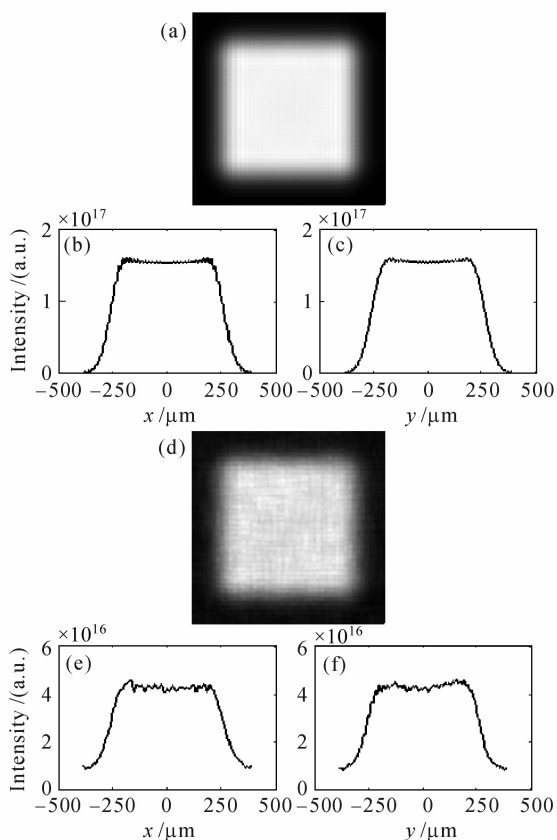


图 5 考虑入射光束强度和相位畸变前后,二维光谱色散后的激光通过硬边透镜列阵后焦斑的二维光强分布(a),(d),和经过该焦斑中心 x (b),(e) 和 y (c),(f) 方向的强度分布 (已经考虑了热传导平滑效应)

Fig. 5 With or without considering the intensity and phase aberrations of the incident laser beam, the two-dimensional intensity distribution of the target pattern in the case that an edge-softened lens array is irradiated by a laser beam passed through two-dimensional smoothing by spectral dispersion (a), (d), and the intensity distribution across the center of the pattern along x (b),(e) and y (c),(f) directions (the thermal conduction smoothing is included)

善焦斑辐照均匀性。消衍射透镜列阵将入射激光分割成很多子光束,它们的准近场衍射光斑在靶面叠加起来,焦斑具有比较陡峭的包络,而且没有一般远场焦斑的旁瓣,同时由于采用了透镜元边缘软化的方法来消除衍射,焦斑的中小尺度强度调制被大大降低。在光路中加入二维光谱色散平滑单元以后,光束在两个互相垂直的方向发生光谱色散,多光束干涉所引起的细密条纹在很大程度上被抹平,如果把横向热传导平滑效应也考虑在内,高空间频率的

强度波动可进一步消除。所以将二维光谱色散平滑和消衍射透镜列阵结合起来可以获得顶部平坦边缘陡峭的焦斑。与现有的移焦方案比较,采用消衍射透镜列阵无需精细调整靶面的位置以达到较佳的离焦效果,实际应用较方便。该结论为“神光 II”装置中靶面均匀辐照的实际方案设计提供了有用的参考。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6):417~419
- 3 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):764~766
- 4 Y. Arieli. A continuous phase plate for non-uniform illumination beam shaping using the inverse phase contrast method [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **180**:239~245
- 5 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3):377~381
- 6 S. P. Obenschain, J. Grun, M. J. Herbst *et al.*. Laser-target interaction with induced spatial incoherence [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(26):2807~2810
- 7 A. V. Deniz, T. Lehecka, R. H. Lehmborg *et al.*. Comparison between measured and calculated nonuniformities of Nike laser beams smoothed by induced spatial incoherence [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **147**:402~410
- 8 H. Nakano, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga *et al.*. Spectrally dispersed amplified spontaneous emission for improving irradiation uniformity into high power Nd:glass laser system [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(5):2122~2131
- 9 H. Nakano, N. Miyanaga, K. Yagi *et al.*. Partially coherent light generated by using single and multimode optical fibers in a high-power Nd:glass laser system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(5):580~582
- 10 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
- 11 S. Skupsky, R. S. Craxton. Irradiation uniformity for high-compression laser-fusion experiments [J]. *Phys. Plasmas*, 1999, **6**(5):2157~2163
- 12 Sean P. Regan, John A. Marozas, R. Stephen Craxton *et al.*. Performance of 1-THz-bandwidth, two-dimensional smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power, solid-state laser beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(5):998~1002
- 13 Fu Sizu, Huang Xiuguang, Wu Jiang *et al.*. Planarity and stability of shock driven directly by multi-beam laser from “Shengguang-II” laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6):570~574
傅思祖,黄秀光,吴江等. 利用“神光 II”激光装置多光束叠加直接驱动下的冲击波平面性及稳定性[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(6):570~574
- 14 Huang Xiuguang, Fu Sizu, Wu Jiang *et al.*. Experimental researchs on planarity of shock wave directly driven by 2ω laser beam of “Shengguang-II” facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5):811~814
黄秀光,傅思祖,吴江等. “神光 II”装置倍频激光直接驱动冲击波平面性的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(5):811~814
- 15 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
- 16 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
- 17 Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(1):27~31
邱 悦,钱列加,黄宏一等. 用消衍射方法改善透镜列阵的辐照均匀性[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(1):27~31
- 18 Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi *et al.*. Improving of the irradiation uniformity on targets with a diffraction-weakened lens array and spectral dispersion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11):5824~5828
江秀娟,周申蕾,林尊琪等. 利用消衍射透镜列阵及光谱色散平滑实现焦斑均匀辐照[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11):5824~5828
- 19 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. San Francisco: Mcgraw-Hill Book Company, 1968
- 20 A. E. Siegman. Lasers [M]. California: University Science Books, 1986
- 21 Mark H. Emery, Joseph H. Orens, John H. Gardner *et al.*. Influence of nonuniform laser intensities on ablatively accelerated targets [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**(4):253~256
- 22 V. N. Goncharov, S. Skupsky, T. R. Boehly *et al.*. A model of laser imprinting [J]. *Phys. Plasmas*, 2000, **7**(5):2062~2068