

文章编号: 0253-2239(2007)02-0275-5

谱色散平滑与透镜列阵联用实现均匀照明*

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: 为满足激光惯性约束聚变中靶面激光辐照不均匀性低于 5% 的要求, 在目前使用透镜列阵基础上, 提出了谱色散平滑与透镜列阵联用方案, 对其进行数值计算并分析其平滑效果和应用可行性。结果表明: 焦斑的不均匀性从单独使用透镜列阵时的 14% 降低到与谱色散平滑结合后的 3%; 对焦斑点功率谱的分析表明谱色散平滑通过抑制焦斑中高频的频谱强度达到平滑效果。该方案可以进一步提高焦斑平滑效果, 计算结果对实际应用有着重要的参考意义。

关键词: 激光物理; 辐照不均匀性; 光谱色散平滑; 透镜列阵; 相位调制; 色循环

中图分类号: TN241 文献标识码: A

Irradiation Uniformity by Combining Smoothing by Spectral Dispersion and Lens Array

Zhou Shenlei Lin Zunqi

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

Abstract: The laser irradiation non-uniformity of target is required below 5% in inertial confinement fusion (ICF). The scheme of combining smoothing by spectral dispersion (SSD) and lens array (LA) is introduced to meet the above demand, based on the present application LA. The feasibility of the scheme is analyzed by numerical simulation. It shows that the irradiation non-uniformity of focal spot falls down from 14% with LA to 3% with SSD and LA. The result power spectrum analyses of focal spot show that the smoothing effect is caused by middle and high frequency intensity suppression. The scheme can improve the ability of beam smoothing. The results are useful for practical application.

Key words: laser physics; irradiation non-uniformity; smoothing by spectral dispersion; lens array; phase modulation; color cycle

1 引 言

激光驱动惯性约束聚变(ICF)中要求靶面激光辐照均匀以避免靶面激光等离子体的不稳定性^[1], 如瑞利-泰勒不稳定性、成丝和受激散射。然而, 入射激光近场存在的不同程度的调制以及激光的相干特性等因素, 影响聚焦后靶面焦斑均匀性, 因此需采取光束均匀化措施。常用的光束均匀化方案分为两大类型: 空间域平滑技术和时间域平滑技术。空间域平滑技术包括透镜列阵^[2~4] (Lens array, LA)、随机相位板^[5]

(Random phase plate, RPP)和连续分布相位板^[6~8] (Distributed phase plate, DPP)等技术。时间域平滑技术包括感应空间非相干^[9] (Induced spatial incoherence, ISI)、谱色散平滑^[10] (Smoothing by spectral dispersion, SSD)等技术。这两类方式的合理结合应用可达到更好的焦斑平滑效果。国外文献的报道中^[10,11], 谱色散平滑技术都是和用于远场或准远场辐照的衍射光学元件结合使用的, 而对于采用准近场辐照的透镜列阵技术则并未考虑。由于目前

* 国家 863 惯性约束聚变领域(2004AA842070)资助课题。

作者简介: 周申蕾(1977-), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光的束匀滑和放大器方面的研究。

E-mail: slzhou@mail.shenc.ac.cn

导师简介: 林尊琪(1942-), 男, 广东潮阳人, 中国科学院院士, 研究员, 主要从事高功率激光技术和激光等离子体方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

收稿日期: 2006-03-29; 收到修改稿日期: 2006-08-10

神光系列装置中使用的透镜阵列技术获得大焦斑并取得了良好的实验效果,但靶面焦斑仍存在中小尺度空间(20~50 μm)的调制,影响焦斑的辐照均匀性^[2~4]。为进一步改善焦斑质量,我们提出谱色散平滑加透镜阵列(SSD+LA)的均匀化方案,本文理论分析和模拟计算了这一方案,并讨论谱色散平滑中参量对辐照均匀性的影响。

2 理论分析

2.1 透镜阵列^[2]

透镜阵列系统是利用相干光准近场辐照获得焦斑光强均匀分布的技术方案,如图 1 所示,其中透镜阵列(透镜阵列)由多个相同的六角形或方形透镜组合而成,置于靶镜之前。入射到透镜阵列上的激光

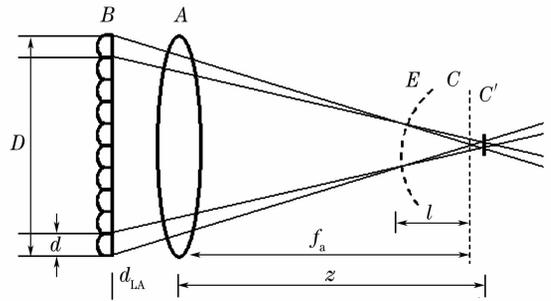


图 1 透镜阵列系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser array (LA) system

束被分成多个子束,在系统的组合焦点E聚焦后对准近场(聚焦透镜后焦面)的靶面C实现均匀辐照。对于图 1 所示的透镜阵列,从透镜阵列输出面至靶面的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - z/f_a & d_{LA}(1 - z/f_a) + z \\ -1/f_a & 1 - l/f_a \end{bmatrix}, \quad (1)$$

该单元对应的光学程函数为^[12]

$$L(x, y; x_t, y_t) = L_0 + \frac{1}{2B} [A(x^2 + y^2) - 2(xx_t + yy_t) + D(x_t^2 + y_t^2)], \quad (2)$$

$$\text{靶面光场分布为} \quad E_t(x_t, y_t) = -\frac{j}{\lambda B} \iint E_0(x, y) T(x, y) \exp[jkL(x, y; x_t, y_t)] dx dy, \quad (3)$$

其中 x, y 和 x_t, y_t 分别为输入面和输出面的坐标, E_0 为入射光场, $k = 2\pi/\lambda$, f_a 为靶镜焦距。假设透镜阵列由 $N \times N$ 个方形、边长为 d 、焦距为 f_c 的阵列元组成,则其复透射率函数为

$$T(x, y) = \sum_{m=-M/2}^{M/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \text{rect}\left(\frac{x-x_{mm}}{d}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_{mm}}{d}\right) \exp\left\{-j\frac{k}{2f_c} [(x-x_{mm})^2 + (y-y_{mm})^2]\right\}, \quad (4)$$

式中 x_{mm}, y_{mm} 为位于第 m 行、 n 列子透镜的中心坐标。靶面 $z = f_a$ 处的光强分布 $I_t(x_t, y_t) \propto E_t(x_t, y_t) E_t^*(x_t, y_t)$, 为单元菲涅耳衍射包络内的多光束干涉花样。

2.2 光谱色散平滑^[10]

谱色散平滑的原理如图 2 所示,入射光场为 $E(x, y, t) = E_0(x, y, t) \exp(i\omega t)$ 的激光经电光晶体的相位调制后光谱展宽,并产生时间周期性调制,在被光栅色散(设色散方向沿 y 方向)后输出光场为

$$E_D(x, y, t) = E_0(x, y, t) \exp(i\omega t) \sum_n J_n(\delta) \exp\left[in\omega_m \left(t + \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{c} y\right)\right] = E_0(x, y, t) \exp[i\omega t + i\delta \sin(\omega_m t + \alpha y)], \quad (5)$$

ω_m 为调制角频率, δ 为相位调制器调制幅度,光场频谱有效宽度 $\Delta\nu = 2\delta\nu_m$, $\alpha = 2\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\omega_m}{\omega}$, 光栅色散常数 $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$,

输出光场的瞬时频率 $\omega_i(t) = \omega + \delta\omega_m \sin(\omega_m t + \alpha y)$ 。

2.3 谱色散平滑加透镜阵列方案

实际应用中,谱色散平滑处于整个激光系统的前端部分,经过传输放大到达靶场终端系统(图 3),具有一定角色散和谱宽的激光束入射到透镜阵列阵列元上。在谱色散平滑与透镜阵列作用下,焦面的光场分布为

$$E_t(x_t, y_t, t) = -\frac{j}{\lambda B} \iint E'_D(x, y, t) T(x, y) \exp[jkL(x, y; x_t, y_t)] dx dy, \quad (6)$$

在对光脉冲时间 τ 积分后,光强分布为

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau |E_t(x_t, y_t, t)|^2 dt. \quad (7)$$

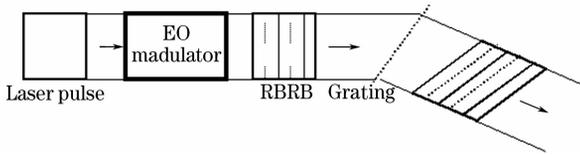


图 2 谱色散平滑的原理示意图

Fig. 2 Scheme of SSD principle

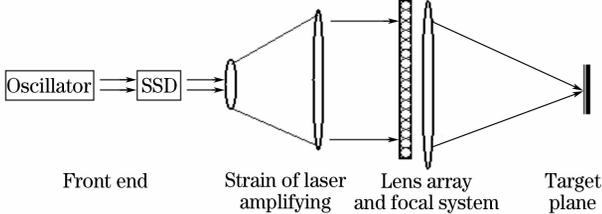


图 3 谱色散平滑与透镜列阵技术在激光系统中的应用

Fig. 3 Implement of beam smoothing with SSD+LA in laser system

由于谱色散平滑单元中光栅的作用是产生空间周期调制,瞬时频率 $\omega_r(t)$ 在 y 方向作周期为 $2\pi/\alpha$ 的变化,即空间“色循环”,其在色散方向最大数 $N_c = D_0 \Delta\theta / 2\lambda\delta$, D_0 为入射到光栅时光束截面最大口径。因此,传输至透镜列阵时的光束在空间和时间都包含一系列不同频率分量的光场,并存在空间周期为 $2\pi/\alpha$ 、时间周期为 $2\pi/\omega_m$ 的变化。

透镜列阵的焦斑为单元菲涅耳衍射包络内多光束干涉花样,存在着各种空间尺度的干涉条纹,其小

尺度的强度起伏可以通过横向热传导效应消除^[1],而透镜列阵单元透镜的边缘硬边衍射所产生的大尺度调制依然存在,制约着焦斑的均匀性。当光束经过谱色散平滑系统后,光场频率在时间和空间上的周期性变化,一方面使入射到透镜列阵列元上的光束近场频率和振幅的分布不同,列阵元所产生的子斑在焦面分布也不尽相同,多光束叠加后可降低焦斑的强度调制;另一方面,某一瞬时靶面上的光强分布是具有某个空间强度调制的干涉图样,而某一时间内的光强平均效果将在一定程度上抹平干涉结构,得到小尺度均匀性较好的焦斑。子斑随时间在焦面 $\Delta l \approx \Delta\theta \cdot f_a$ 的范围内运动变化且快速非相干叠加,宏观体现为焦斑中空间尺度小于 Δl 的调制将降低,达到平滑焦斑的目的。

3 数值模拟计算与分析

下面就这种焦斑平滑技术的方式基于(1)式、(3)式、(4)式进行数值计算分析(只考虑一维情况)。参考神光-II实际使用,计算中采用:入射光场为近似平面波,时间波形为 1 ns 的方波,波长 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$,设计入射到光栅上最大光束口径 $D_0 = 35 \text{ mm}$,理想情况下扩束传输后到达透镜列阵时光束口径为 350 mm,聚焦透镜的焦距 $f_a = 750 \text{ mm}$,透镜列阵单元透镜数目 $N = 13$,选取合适的 f_c 和靶面位置 z ,使焦斑

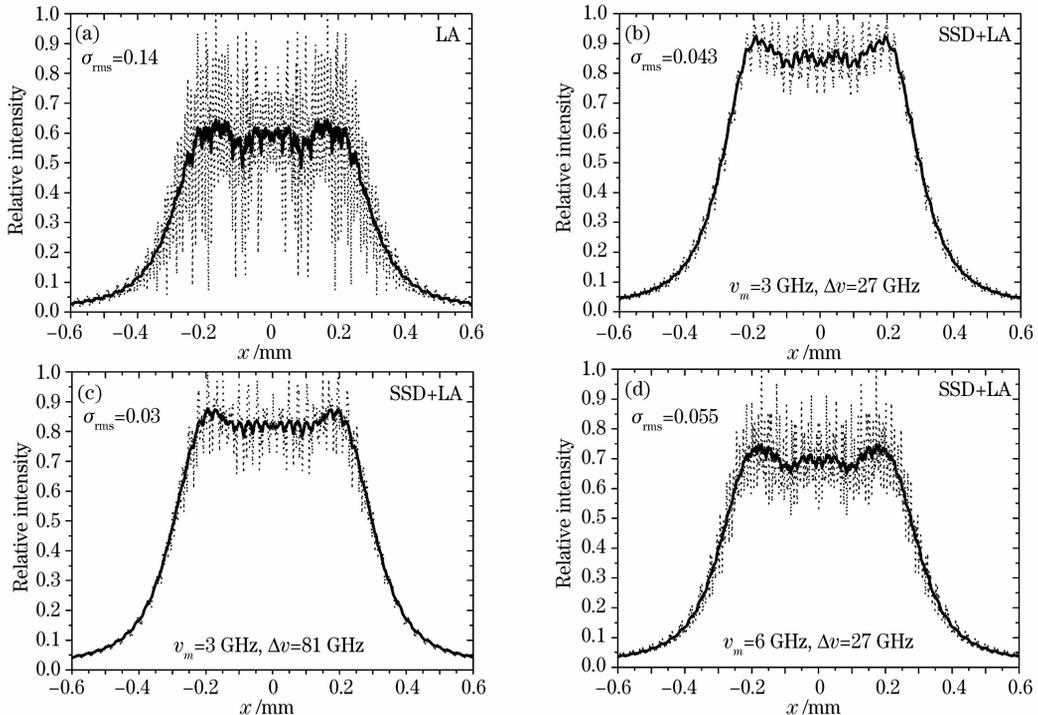


图 4 不同平滑方式下焦斑的一维光强分布图

Fig. 4 One-dimensional intensity distribution of simulation in target plane in different smoothing methods

大小为 0.6 mm。图 4 为不同条件作用下的焦斑计算结果,图 5 为入射光场有振幅调制和相位畸变时,有无谱色散平滑应用的焦斑光强分布。图中的虚线为直接计算结果,光强已归一化处理;实线为在虚线的基础上考虑靶面热传导效应对空间尺度 10 μm 内调制的平滑, σ_{rms} 表示光强不均匀性。

分析并比较图 4 中各图,可以得出以下结论:

1) 谱色散平滑的应用可以有效降低透镜列阵中焦斑的强度调制与辐照不均匀性,并保持透镜列阵平滑技术的特性,如较陡的焦斑边缘和平顶结构。尽管谱色散平滑技术通常应用于远场均匀辐照中,但对于和透镜列阵类的准近场均匀辐照结合使用仍然有明显的效果。

2) 比较图 4(b)、图 4(c),相同调制频率下获得的光谱宽度越宽,焦斑平滑效果就越明显,同时因透镜列阵单元衍射引起的强度调制也越低。光谱宽度的增加导致光束相干性减弱,降低了焦面上光束的

干涉和衍射效应;同时色散引起的光束发散角 $\Delta\theta$ 增大也导致子斑在焦面运动区域 Δl 相应增大,焦斑中可平滑的空间尺度更大。这些都有效降低了焦斑的不均匀性。

3) 调制频率的增加,一方面可以使“色循环”数 N_c 增大,加快子斑在焦面上的运动变化,有利于改善焦斑质量;另一方面,同一时刻相同频率的光场增多导致光束相干性增强,使得子斑间相互干涉加强,反而不利于焦斑平滑。这是谱色散平滑技术平滑的重要特点之一,因此在设计中必须考虑 N_c 的影响。

4) 虽然透镜列阵技术较其他空间域平滑技术大大降低了对光束近场要求^[2],但图 5 中的计算结果表明,当入射光束的近场有严重的振幅调制和相位畸变时,焦斑的不均匀性显著增加;而谱色散平滑技术可以很好地弥补这点。因此,谱色散平滑与透镜列阵技术结合,降低了透镜列阵的设计和使用中对近场光束的要求。

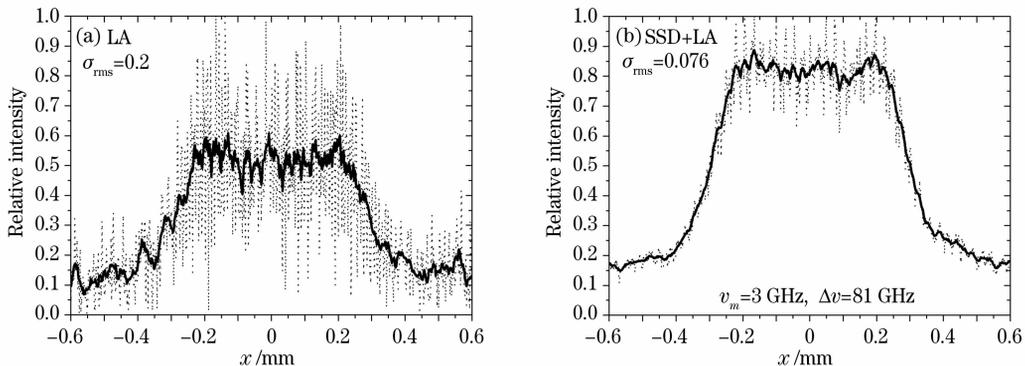


图 5 入射光束近场有振幅调制和相位畸变时,不同平滑方式下焦斑的一维光强分布图

Fig. 5 One-dimensional intensity distribution of simulation in target plane when amplitude modulations and phase aberrations in near-field incident beam are considered

为进一步考察谱色散平滑对焦斑中光强调制的平滑作用,引入频域上的功率谱密度(PSD)^[13]:

$$D_{\text{PS}}(\nu_i) = [A(\nu_i)]^2 / \Delta\nu, \quad (8)$$

其中 ν_i 为空间频率, $\Delta\nu$ 为频率间隔, $A(\nu_i)$ 为波前振幅的傅里叶变换:

$$A(\nu_i) = \int_0^L E(x) \exp(-i\nu x) dx, \quad (9)$$

功率谱密度表示了单位间隔频谱上的能量分布,图 6 为谱色散平滑应用前后焦斑一维功率谱密度分布。从图中可以看出,空间频率小于 10 mm^{-1} 的低频区域(对应空间尺度大于 $100 \mu\text{m}$)两种平滑方式的功率谱密度分布区别很小,即谱色散平滑的应用保持了透镜列阵的低频成分及焦斑包络基本形态;空间频率为 $10 \sim 100 \text{ mm}^{-1}$ 的中高频区域(对应空

间尺度 $10 \sim 100 \mu\text{m}$),谱色散平滑的作用使得相应频谱调制幅度较透镜列阵单独作用降低很多,即谱色散平滑的引入对抑制某些中高频的强度调制非常显著;而对于空间频率大于 100 mm^{-1} (对应空间尺

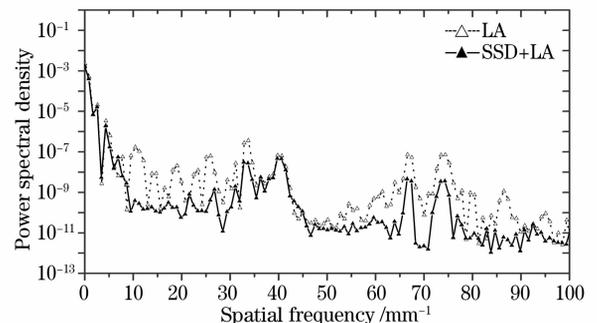


图 6 焦斑功率谱密度的对数坐标表示

Fig. 6 PSD distribution in logarithmic coordinates

度小于 $10\ \mu\text{m}$) 的高频区域, 横向热传导的效应对此有很好的平滑作用, 实际中其分布受谱色散平滑的影响很小, 因此未在图中表示。

4 结 论

本文提出了惯性约束聚变中靶面均匀辐照的一种新组合方式——谱色散平滑加透镜列阵技术, 并对其作理论分析和计算模拟。结果表明, 谱色散平滑技术和利用准近场辐照特性的透镜列阵技术结合使用后, 仍可进一步降低靶面激光焦斑的辐照不均匀性, 改善程度与谱色散平滑的相关参量有着重要联系, 如光谱宽度、色循环数目以及光栅色散系数和末级光束色散角的选择等, 其中关键是光谱宽度和色循环数; 选取适当的谱色散平滑参量, 可以明显改善透镜列阵单元衍射引起的硬边衍射, 这更有利于透镜列阵的设计和制作; 如果需要进一步消除透镜列阵的硬边衍射, 利用合适的技术可以实现消衍射透镜列阵的设计和制作^[14], 同时谱色散平滑的平滑作用仍然不变。利用直观的焦斑强度调制分布和功率谱分析的办法, 阐述了谱色散平滑在与透镜列阵应用中的平滑机制。鉴于目前国内惯性约束聚变驱动器主要是利用透镜列阵技术实现大焦斑均匀辐照, 谱色散平滑加透镜列阵技术方案有着重要的实际意义, 计算结果为即将开展的新型靶面均匀照明方式提供有力支持。

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 Shengguang-II[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 37~39 (in Chinese)

- 4 Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiuguang *et al.*. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of "Shengguang-II" facility[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 129~133 (in Chinese)
- 傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光等. "神光 II" 装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 129~133
- 5 Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga *et al.*. Random phasing of high-power laser for uniform target acceleration and plasma-instability suppression[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(10): 1057~1060
- 6 R. Epstein, S. Skupsky. Anticipated improvement in laser beam uniformity using distributed phase plates with quasirandom patterns[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **60**(3): 924~931
- 7 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Precise design of diffractive optical element for beam smoothing[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 29~32 (in Chinese)
- 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
- 8 Wang Jingyu, Tan Qiaofeng, Yan Yingbai *et al.*. Precise design of circular symmetrical diffractive optical element for beam smoothing[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(3): 206~210 (in Chinese)
- 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
- 9 R. H. Lehemberg, S. P. Obenschain. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Optics Commun.*, 1983, **46**(1): 27~31
- 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 Sean P. Regan, John A. Marozas, John H. Kelly *et al.*. Experimental investigation of smoothing by spectral dispersion[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(9): 1483~1489
- 12 Stuart A. Collins. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(9): 1168~1177
- 13 Ren Huan, Zhuo Zhiyun, Jiang Xiaodong *et al.*. Discussion of the power method of power spectral density[J]. *High Power Laser and Particle beams*, 2002, **14**(2): 279~282 (in Chinese)
- 任 寰, 卓志云, 蒋晓东等. 波前功率谱密度函数评价方法探讨[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2): 279~282
- 14 Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens-array[J]. *Chin. J. Lasers*, 1995, **A22**(1): 27~31 (in Chinese)
- 丘 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