

光谱色散和分布式相位板联用对靶面辐照均匀性的改善

曹国威¹ 石鹏¹ 张晓波² 郇融³ 周申蕾³ 李永平¹

¹中国科技大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026
²中国科技大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230026
³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 通过对分布式相位板和光谱色散匀滑技术联用的模拟计算, 分析了联用实验中焦斑的变化, 论证了非设计采样点光强的不可控性对焦斑匀滑质量的损害。模拟结果证实了光谱色散匀滑技术对色散方向上的焦斑均匀性的改善, 焦斑不均匀性由 58.30% 降为 19.50%。通过分析焦斑不均匀性与光谱色散匀滑积分时间的关系, 发现 5~6 个光谱色散匀滑调制周期时得到最优匀滑效果。对焦斑频谱的分析显示, 光谱色散匀滑技术可以有效抑制由非设计采样点光强引入的高频成分, 26.3 μm 内的光强调制被平滑, 同时很好地保持了由分布式相位板决定的焦斑低频包络, 在实验与模拟中均得到很好验证。为进一步的分布式相位板与光谱色散匀滑技术联用设计提供了理论依据。

关键词 衍射; 分布式相位板; 光谱色散匀滑; 激光辐照均匀性; 焦斑频谱分析

中图分类号 O433.5⁺4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1002006

Improvement of Target Irradiation Uniformity Using Spectral Dispersion and Distributed Phase Plate

Cao Guowei¹ Shi Peng¹ Zhang Xiaobo² Wu Rong³ Zhou Shenlei³ Li Yongping¹

¹Department of Optics & Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China
²National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China
³Joint Laboratory for High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The uniformity of focal-spot pattern is analyzed by the simulation employing spectral dispersion and distributed phase plate in the laser chain. The uncontrollability of intensity at non-sampling points in the distributed phase plate design causes the loss of uniformity. The simulation confirms the improvement of target irradiation by spectral dispersion; the nonuniformity of focal spot decreases from 58.30% to 19.50%. The relation between nonuniformity and integration time shows that the optimal integration time is 5~6 modulation periods of spectral dispersion. The high spatial frequency of focal spot caused by intensity at non-sampling points is reduced by spectral dispersion smoothing; the intensity fluctuation within 26.3 μm can be eliminated. The results above are confirmed by simulation and experiments, providing theoretical guidance for the next design of distributed phase plate combining with spectral dispersion.

Key words diffraction; distributed phase plate; spectral dispersion smoothing; laser irradiation uniformity; power spectral density of focal spot

OCIS codes 140.3300; 050.1940; 050.1950

收稿日期: 2011-05-17; **收到修改稿日期**: 2011-06-24

作者简介: 曹国威(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事衍射光学元件方面的研究。E-mail: cgw2003@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 李永平(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算物理在凝聚态材料和衍射光学器件中的应用等方面的研究。E-mail: liyp@ustc.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)及激光等离子体实验中,对焦面的辐照均匀度有相当高的要求,由此发展出了一系列的束匀滑技术^[1~4],分为空间域匀滑技术和时间域匀滑技术。其中空间域匀滑技术有透镜阵列(LA)^[5]、衍射光学元件(DOE)^[6,7]等,时间域匀滑技术有光谱色散匀滑(SSD)^[4]。随着 DOE 技术的深入研究,用于束匀滑的 DOE 性能得到不断提高^[8,9],但是与 ICF 中对靶面光束均匀性的苛刻要求相比较,仅仅以 DOE 单一器件实现束匀滑是十分困难的,所以在实际应用中,可将 DOE 与 SSD 两种方式结合以达到更好的焦斑匀滑。本文通过对二者联用的情形进行数值模拟,焦斑不均匀性由 58.30% 降为 19.50%,在模拟与实验中均得到很好验证。分析了焦斑不均匀度与 SSD 积分时间的关系以及 SSD 对焦斑频谱的作用,对进一步的 DOE 设计和 SSD 参数的选取提供理论支持。

2 理论分析

用于 ICF 束匀滑系统的 DOE 如图 1 所示,其中 D_i 代表输入光束的口径, D_o 代表出射到靶场的光束口径, f 代表系统聚焦透镜的焦距。在这里 DOE 的光学作用被简化为纯相位调制器,其靶面光场可以简化为傅里叶变换:

$$U_o(x_o, y_o) = \mathcal{F}\{U_i(x_i, y_i) \exp[i\phi_i(x_i, y_i)]\}. \quad (1)$$

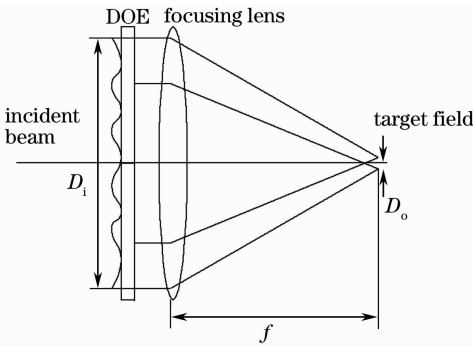


图 1 均匀照明系统装置示意图

Fig. 1 Schematic of uniform illumination system

研究中所采用的 DOE 为分布式相位片(DPP),其相位为 16 台阶分布,一般采用基于线性变换的迭代方法进行设计^[10~14]。限于傅里叶变换和抽样定律对靶面光场采样间隔的限制

$$\Delta_{out} = \frac{\lambda f}{r_{in}}, \quad (2)$$

式中 λ 为入射光波长, r_{in} 为输入窗口口径,设计时一般选取为 $r_{in} \approx D_i$ 。由此可能造成靶面的设计分辨

率比数据采集用 CCD 的分辨率低,那么受 DPP 控制较弱的非设计采样点光场会大大降低 DPP 的束匀滑效能。

SSD 技术的基本出发点是子光束的远场非相干叠加,在靶面形成时间平均意义上的平滑光强分布包络,其原理如图 2 所示,其中 R 为红, B 为蓝。SSD 使得周期性相位调制的光束在时间和空间上产生周期性频率变化,即“色循环”,这是实现光谱色散平滑效应最重要的因素^[15]。

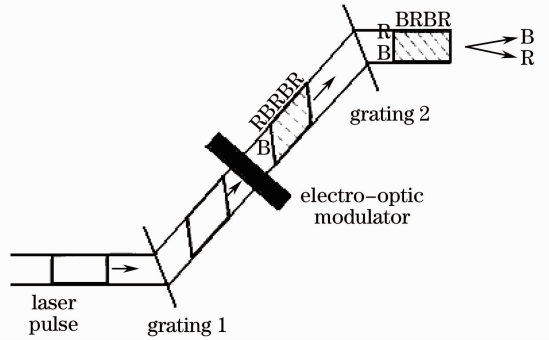


图 2 SSD 原理示意图

Fig. 2 Schematic of SSD principle

将 SSD 与 DPP 联用,则可以使 DPP 在靶面产生的散斑随时间变化,在靶面非相干叠加,对方形单元的 DPP 来讲,其瞬时靶面光场分布为^[15]

$$U_o(t, x_o, y_o) = U_i \exp(i\omega t) \sum_{kl} \sum_n J_n(\delta) \frac{\sin(n\gamma + q)}{n\gamma + q} \frac{\sin p}{p} \times \exp\{i[n\omega_m t - n\gamma L - Lq - kp + \phi_i(k, L)]\}, \quad (3)$$

式中 $(p, q) = (x_o, y_o)kd/(2f)$; ω, k 为入射光角频率和波数; d 为相位片基元边长; δ 为相位调制器调制深度; ω_m 为相位调制器的调制角频率; $\gamma = d\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ $\frac{\omega_m}{\omega}$ 为由光谱经调制器展宽后,不同频率以不同角度入射引起的位移, $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ 为光栅色散常数。

两块色散方向相同(y 方向)的 SSD 与 DPP 联用,其靶面光场分布则为

$$U_o(t, x_o, y_o) = U_i \exp(i\omega t) \sum_{kl} \sum_{nm} J_m(\delta_1) J_n(\delta_2) \times \frac{\sin(m\gamma_1 + n\gamma_2 + q)}{m\gamma_1 + n\gamma_2 + q} \frac{\sin p}{p} \exp\{i[(m\omega_{m1} + n\omega_{m2})t - (m\gamma_1 + n\gamma_2)L - Lq - kp + \phi_i(\kappa, L)]\}. \quad (4)$$

对脉冲时间积分后光强为

$$\langle I(t, x_o, y_o) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} |U_o(t', x_o, y_o)|^2 dt'. \quad (5)$$

由于 SSD 的作用, 焦斑会在焦面上 $\Delta l = \Delta\theta \cdot f$ 范围内随时间周期循环运动, 以光栅的一级衍射来计算, 则

$$\Delta l = \frac{\delta\omega_m \lambda^2 f}{\pi c \sqrt{d_g^2 - \lambda^2}}, \quad (6)$$

式中 d_g 为光栅常数, 这样使得时间积分后的焦斑内空间尺度为 Δl 以下的调制降低, 达到平滑焦斑的目的。

3 DPP 与 SSD 联用实验

实验中采用的激光波长 $\lambda = 526.5 \text{ nm}$, 脉冲宽度 3 ns , 透镜焦距 $f = 1575 \text{ mm}$, 通光口径 $D_i = 322.56 \text{ mm}$, DPP 的子单元数为 $N \times N$, 其中 $N = 2048$, 其设计的靶面光场不均匀度均方根(RMS)值 $R = 9.14\%$ 。根据(1)式可知, 靶面采样间隔为 $2.57 \mu\text{m}$, 而靶面光场数据采集 CCD 的子单元大小为 $1.2 \mu\text{m}$, 约为设计采样间隔的 $1/2$, 由此可知约

有 $3/4$ 的测量点为非设计采样点。SSD 使用的光栅为 1480 l/mm , 调制器采用了两组不同的参数: 调制频率 3 GHz , 调制深度 8 rad ; 调制频率 10 GHz , 调制深度 1 rad 。

1) 未加入 SSD, 只使用 DPP

将靶面的采样间隔减小为设计的一半, 分析靶面中采样点与非采样点光强分布。此时实验光路可以简化为如图 1 所示。只有 DPP 起到束匀滑作用, 并在靶面使用 CCD 采集光场分布。根据(2)式, 将输入光束 D_i 外进行补零, 使得输入窗口大小 $r_m = 2D_i$, 则此时靶面采样间隔减小为设计时的 $1/2$, 与 CCD 子单元大小相当, 可以有效模拟 CCD 采集所得光场分布, 获得设计采样点与非采样点的光强分布。进一步的分析表明其采样点光强保持了设计时的匀滑性, 而非采样点光场 $R = 58.30\%$, 如图 3 所示。实验测量所得到的靶面光场 $R = 60.85\%$, 由此可知非采样点光强导致了靶面光场匀滑性的变差。

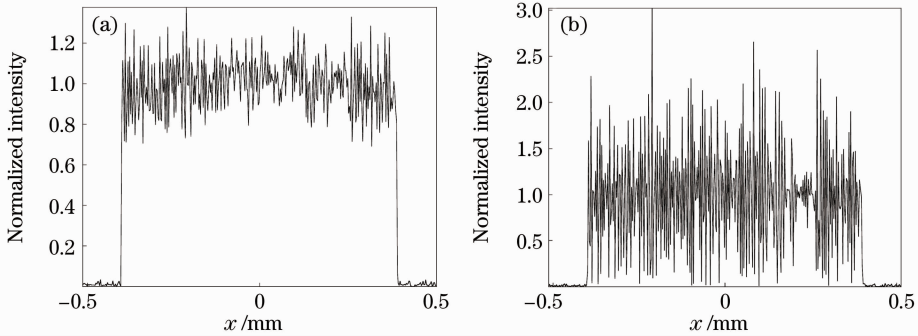


图 3 只使用 DPP 时靶面焦斑的光强分布。(a) 采样点光强分布; (b) 非采样点光强分布

Fig. 3 Intensity distributions of focal-spot pattern only with DPP. (a) Sampling points; (b) non-sampling points

2) 加入 3 GHz 的 SSD

通过 SSD 调制后的靶面光场匀滑性(x 方向)有明显改善, 如图 4 所示。由图 4 可知, RMS 不均匀度随积分时间递减, 但并不是积分时间越长越好, 在 $t = 1.98 \text{ ns}$ 时, 得到最优的束匀滑效果 $R = 19.50\%$, 与实验测得的 23.31% 很接近。

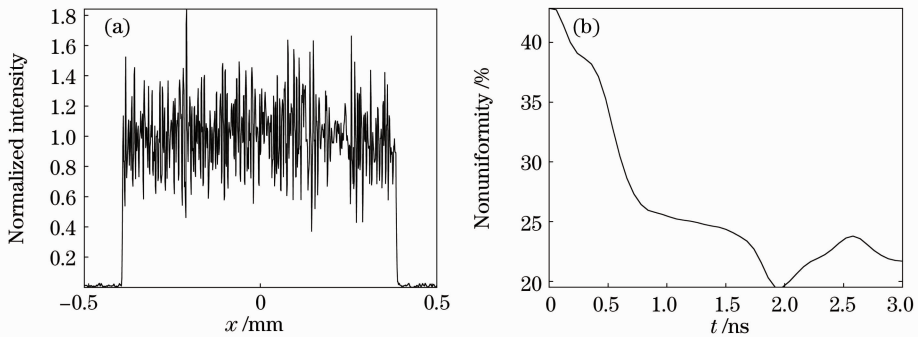


图 4 (a) DPP 与 3 GHz 的 SSD 联用时靶面光场分布; (b) 焦斑 RMS 不均匀度随积分时间的变化曲线

Fig. 4 (a) Intensity distribution of focal-spot with DPP and SSD (3 GHz); (b) relation between RMS nonuniformity and integration time

3) 加入 10 GHz 的 SSD

由(2)式中对 RMS 随积分时间变化的分析,10 GHz 的 SSD 的积分时间选为 1 ns,其结果如图 5 所示。在 $t=0.48$ ns 时取得最优束匀滑效果, $R=36.00\%$,其匀滑效果较 3 GHz 的 SSD 稍差。

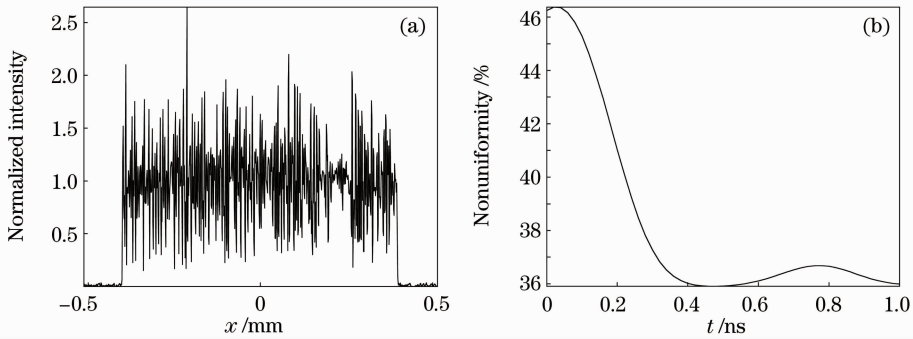


图 5 (a) DPP 与 10 GHz 的 SSD 联用时靶面光场分布;(b)焦斑 RMS 不均匀度随积分时间的变化曲线
Fig. 5 (a) Intensity distribution of focal-spot with DPP and SSD (10 GHz); (b) relation between RMS nonuniformity and integration time

4) 加入 3 和 10 GHz 的 SSD

如图 6 所示,3 和 10 GHz 的 SSD 联用,在 $t=1.98$ ns 时获得了最优匀滑效果 $R=19.8\%$,和 3 GHz 的 SSD 单独使用时匀滑效果相当。但是需要注意的是,限于计算能力,这里的 RMS 不均匀度仅统计了焦斑中心一维光强,在实验测试中显示 3 和 10 GHz 的 SSD 联用得到的焦斑光强分布要比单独使用 3 GHz 的 SSD 的焦斑更为均匀一些,如图 7 所示。

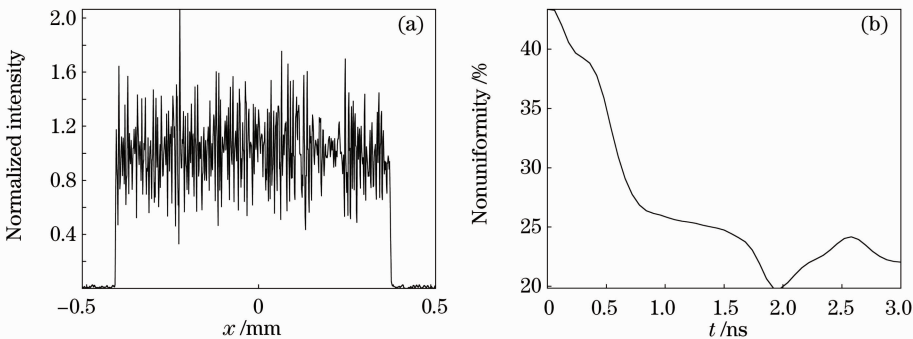


图 6 (a) DPP 与 3 和 10 GHz 的 SSD 联用时靶面光场分布;(b)焦斑 RMS 不均匀度随积分时间的变化曲线
Fig. 6 (a) Intensity distribution of focal-spot with DPP and SSDs (3 and 10 GHz); (b) relation between RMS nonuniformity and time

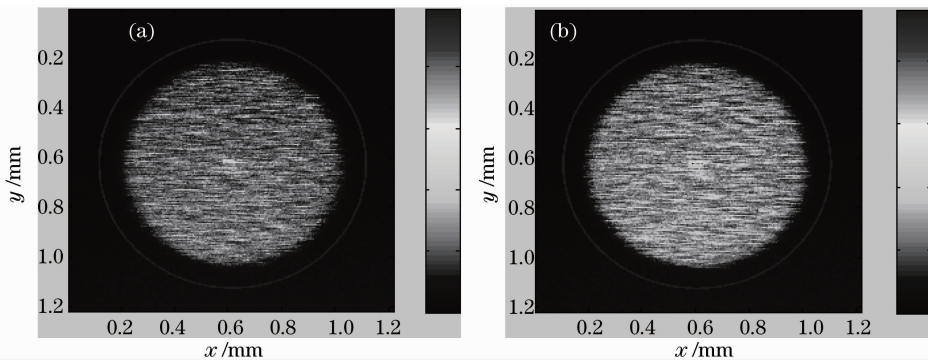


图 7 实验测量焦斑光强分布。(a)单独使用 3 GHz 的 SSD;(b)3 和 10 GHz 的 SSD 联用
Fig. 7 Experimental intensity distributions of focal-spot; (a) DPP with SSD (3 GHz); (b) DPP with SSDs (3 and 10 GHz)

将数值模拟与实验采集数据归纳为表 1。

表 1 数值模拟与实验测量数据对比

Table 1 Simulated and experimental data

	Without SSD / %	3 GHz SSD / %	10 GHz SSD / %	With 3 and 10 GHz SSDs / %
Numerical simulation	58.30	19.50	36.00	19.8
Experimental data	60.85	23.31	—	22.97

对比表 1 数据,数值模拟与实验测量均显示 DPP 与 SSD 联用可以有效改善焦斑质量,并且通过计算焦斑 RMS 不均匀度随积分时间的变化规律,在 5~6 个 SSD 周期时可以获得最优结果,对今后实验中积分时间的选取提供了依据。

5) 焦斑的空间频谱分析

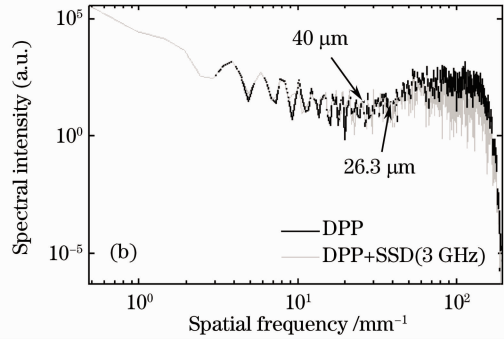
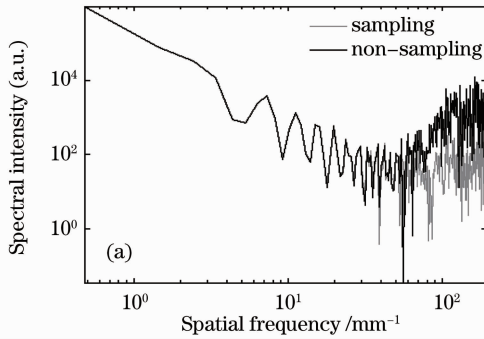


图 8 (a)设计采样点与非采样点光场的空间频谱;(b)加 3GHz 的 SSD 前后焦斑的空间频谱

Fig. 8 Spectral intensity of spatial frequency. (a) Sampling and nonsampling points; (b) DPP only and DPP with SSD (3GHz)

4 结 论

通过对 DPP 与 SSD 联用的理论与实验分析,论证了焦斑非采样点光强对焦斑质量的损害,同时证实了 SSD 对焦斑毛刺的抹平效果,有效地改善了焦斑质量。通过对焦斑 RMS 不均匀度随积分时间变化的分析,得出了最佳的积分时间,为 SSD 的参数优化提供了理论依据。通过对焦斑空间频谱的分析,SSD 在保持焦斑频谱低频成分的情况下,抑制了毛刺间距小于 Δl 的高频成分,在模拟和实验中均得到验证,为今后针对 SSD 的 DPP 设计和实验提供了指导。

参 考 文 献

- 1 R. H. Lehemberg, S. P. Obenschain. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Opt. Commun.*, 1983, **46**(1): 27~31
- 2 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

焦斑的空间频谱分析显示,由于非采样点光强带来了高频部分,从而导致焦斑质量变差。由图 8(a)可知,空间频率大于 25 mm^{-1} 的,即间距小于 $40 \mu\text{m}$ 的毛刺明显增多。

分析 SSD 所能匀滑的最大尺度,由(6)式可知 3 GHz 的 SSD 可以抹平间距小于 $26.3 \mu\text{m}$ 的毛刺,改善了焦斑的匀滑度。图 8(b)中标示了间距 $26.3 \mu\text{m}$ 与 $40 \mu\text{m}$ 毛刺对应的空间频率,可见 DPP 与 SSD 联用后,焦斑的高频成分得到抑制。同时 SSD 对焦斑中的低频成分影响较小,使得 DPP 所产生的焦斑的包络形态得到很好的保持。考虑等离子体的横向热传导作用,靶面光场会得到进一步的匀滑。

- 3 S. N. Dixit, I. M. Thomas, B. W. Woods *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser[C]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2543~2554
- 4 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**(6): 3456~3462
- 5 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~380
- 6 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for local plane irradiance profile central[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 417~419
- 7 T. H. Bett, R. M. Stevenson, M. R. Taghizadeh *et al.*. Diffractive optics development for application on high-power solid states lasers[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 129~140
- 8 Li Tao, Fu Shaojun, Wang Wei *et al.*. A hybrid algorithm applied to the design of diffractive optical elements used in uniform illumination[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2002, **19**(1): 76~80
- 李 涛,付绍军,王 炜等.一种用于均匀照明的衍射光学元件设计的混合算法[J]. *计算物理*, 2002, **19**(1): 76~80
- 9 Zhang Wei, Shu Fangjie, Zhang Xiaobo *et al.*. Spatial frequency spectrum optimization method for design of diffractive elements in uniform illumination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 张 巍,舒方杰,张晓波等.均匀照明用衍射光学器件的空间频

- 域优化设计方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 10 Wu Rong, Zhao Dongfeng, Dai Yaping. Optimize design of diffractive optics elements by parallel simulated annealing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2544~2548
 邬 融, 赵东峰, 戴亚平. 并行模拟退火算法优化衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2544~2548
- 11 Li Ke, Liu Qiang, Li Yongping. Influence of reflection of diffractive optical elements on high-power laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1371~1377
 李 珂, 刘 强, 李永平. 衍射光学元件表面反射对高功率激光系统的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1371~1377
- 12 Li Ke, Shi Peng, Zhang Xiaobo *et al.*. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1972~1977
 李 珂, 石 鹏, 张晓波 等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 1972~1977
- 13 Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua *et al.*. The ameliorated adaptive-additive method and its applying in the designing of diffractive optical element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2473~2477
 温昌礼, 季家镛, 窦文华 等. 改进的自适应加法算法及其在衍射光学元件设计中的应用 [J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2473~2477
- 14 Xue Changxi, Cui Qingfeng, Pan Chunyan *et al.*. Design of multi-layer diffractive optical element with bandwidth integral average diffraction efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3016~3020
 薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳 等. 基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 3016~3020
- 15 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