

分布式相位板联合二维谱色散匀滑的实验研究

冯伟¹ 李菁辉² 周申蕾² 张琥杰² 邬融² 姜有恩² 朱俭¹ 马伟新¹

(¹ 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)
(² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 在神光 II 九路装置上, 利用谱色散匀滑(SSD)技术结合分布式相位板(DPP)技术, 研究了激光焦斑在一维、二维谱色散匀滑下的分布。结果表明, 一维谱色散匀滑使焦斑的焦斑通量对比度由 0.7634[均方根(RMS)]下降到 0.3685(RMS), 结合二维匀滑下降到 0.2638(RMS); 并结合各种评价方法对焦斑进行分析。实验为谱色散匀滑技术在神光 II 在线应用提供了参考。

关键词 激光技术; 谱色散匀滑; 分布式相位板; 激光辐照均匀性

中图分类号 O433.5⁺4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.053001

Experimental Study of Two-Dimensional Smoothing by Spectral Dispersion with Distributed Phase Plates

Feng Wei¹ Li Jinghui² Zhou Shenlei² Zhang Hujie²
Wu Rong² Jiang Youen² Zhu Jian¹ Ma Weixin¹

¹ Shanghai Institute of Laser and Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China
² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Two-dimensional performance of uniform irradiation with the smoothing by spectral dispersion (SSD) and distributed phase plates (DPP) is researched on the SG II laser facility. The results of experiments in free space show that 1D-SSD makes the root mean square (RMS) focus drop to 0.3685 from 0.7634 (without SSD), and 2D-SSD supplied RMS is 0.2638. Other appraising methods of focus verify the conclusion. This experiment is especially meaningful for on-line 2D-SSD experiment.

Key words laser technique; smoothing by spectral dispersion; distributed phase plate; laser irradiation uniformity

OCIS codes 300.6170; 050.1950; 030.6600

1 引言

在激光驱动惯性约束聚变(ICF)中, 为了抑制激光等离子体的不稳定性, 要求靶面的辐照尽可能均匀^[1], 为此发展了多种平滑技术^[2~5], 主要分成两类: 空间域平滑技术和时间域平滑技术。在实际应用中, 一般都使用空域和时域匀滑相结合以达到焦斑的更好的平滑效果。20 个世纪 80 年代末, 国外提出了谱色散匀滑(SSD)技术方案, 它作为一种时间域的平滑技术, 适合于高功率钕玻璃激光器, 在惯性约束聚变装置上取得了良好的实验结果^[6], 且在国内也很多科研单位进行过谱色散匀滑的研究^[7~10], 并取得了一定的结果。本文在理论分析二维谱色散匀滑的基础上, 开展相关实验研究, 并结合空间域匀滑技术——分布式相位板(DPP)获得了理想的实验效果, 并综合分析了焦斑的各项评价指标。

2 理论分析

如图 1 所示, 入射光场 $E_0(t)$ 经预延迟光栅后:

收稿日期: 2011-12-20; 收到修改稿日期: 2012-01-10; 网络出版日期: 2012-04-01

作者简介: 冯伟(1979—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事焦斑技术控制方面的研究。E-mail: fwnpu@163.com

$$E_1(t, x) = E_0(t - \beta x) \exp[i\omega(t - \beta x)], \quad (1)$$

式中 $\beta = \frac{2\pi}{\omega} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \right)$ 。经过电光调制器后,光场可以写成

$$E_2(t, x) = E_0(t - \beta x) \exp\{i[\omega(t - \beta x) + \delta_1 \sin(\omega_1 t)]\}. \quad (2)$$

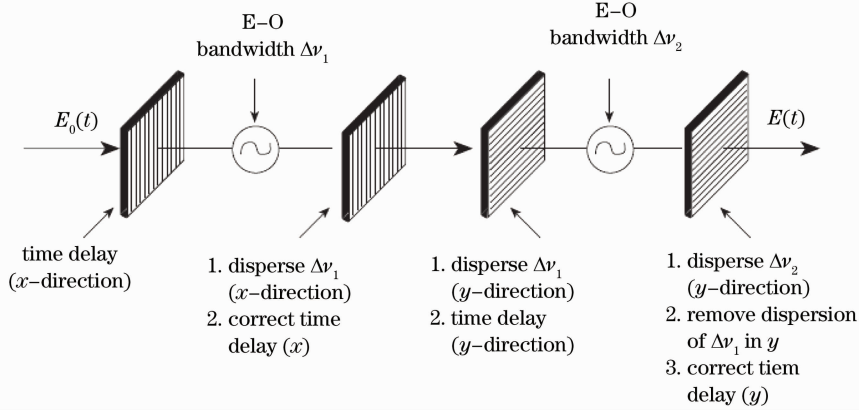


图 1 二维谱色散匀滑示意图

Fig. 1 Two-dimensional smoothing by spectral dispersion

经过色分离光栅、第二维的预补偿光栅及第二个电光调制器后:

$$E_3(t, x, y) = E_0(t - \beta y) \exp i[\omega(t - \beta y) + \delta_1 \sin \omega_1(t + \beta x - \beta y) + \delta_2 \sin(\omega_2 t)]. \quad (3)$$

经过第二维色分离光栅后,光场可以写成

$$E = E_0(t) \exp i[\omega t + \delta_1 \sin \omega_1(t + \beta x) + \delta_2 \sin \omega_2(t + \beta y)]. \quad (4)$$

激光光强 I 在焦平面上分布为

$$I = I_0(t) \sum_{\substack{mm' \\ mm'}} J_m(3\delta_1) J_{m'}(3\delta_1) J_n(3\delta_2) J_{n'}(3\delta_2) \exp[i(m\omega_1 + n\omega_2 - m'\omega_1 - n'\omega_2)t] \times \\ \text{sinc}(m\gamma + q) \text{sinc}(m'\gamma + q) \text{sinc}(n\gamma + p) \text{sinc}(n'\gamma + p) \sum_{\substack{KK' \\ LL'}} \exp[-i2(L' - L)q + i2(K' - K)p] \times \\ \{ \exp[i2\gamma(m'L' - mL + n'K' - nK) + i(\Phi_{K'L'} - \Phi_{KL})] \}. \quad (5)$$

由时间平均效应,焦平面上在 t 时刻分布:

$$\langle I(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} I(t') dt'. \quad (6)$$

3 实验与分析

实验光路排布图如图 2 所示,在神光 II 九路主激光的单模光纤 SF1 后插入反射镜 M1,把已经加入 3 GHz 调制的主激光引出至偏振反射镜 PM1,经法拉第旋转器(FR)、 $\lambda/2$ 波片,由 $\Phi 5.5$ mm 激光扩束为 $\Phi 22$ mm 到达第一级色散光栅 G1,经光栅一级衍射后原路返回;经 M2、M3 后耦合进入电光调制器(EOM) (10 GHz 调制器),再经过道威棱镜后进入第二级色散光栅 G2;然后经过 10 倍扩束后到达分布式相位板及聚焦透镜,使用科学 CCD 在焦点处记录焦斑分布。实验中,G1 及 G2 均为 1740 line/mm 的介质膜光栅;CCD 的像素为 1024 pixel \times 1024 pixel,尺寸为 7.6 μm 。

实验中,记录的焦斑分布如图 3 所示。

利用焦斑通量对比度(RMS)公式为

$$C_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{I(x_i, y_j) - \bar{I}}{\bar{I}} \right)^2}. \quad (7)$$

对图 3 的结果进行计算,在加入一维调制时,在加入的方向上有了明显的平滑效果,RMS 有了明显的改善,从未加调制时的 0.7634 下降到 0.3685(10 GHz)及 0.4180(3 GHz),改善度分别达到 51.7% 及 45.2%;

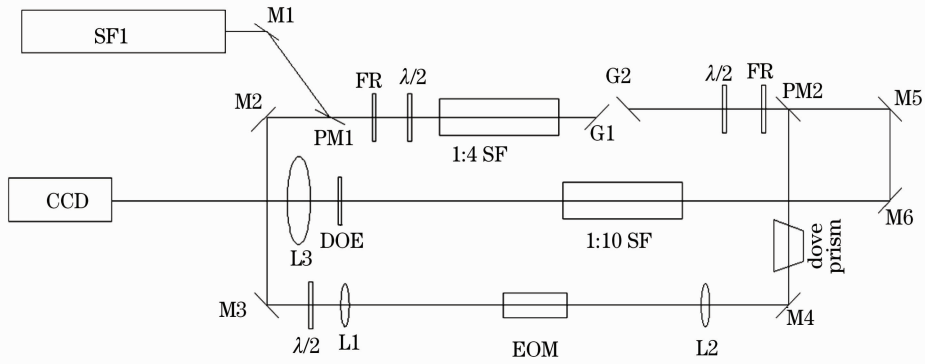


图 2 2D SSD 联合分布式相位板实验光路排布图

Fig. 2 Experimental setup of 2D-SSD with distributed phase plates

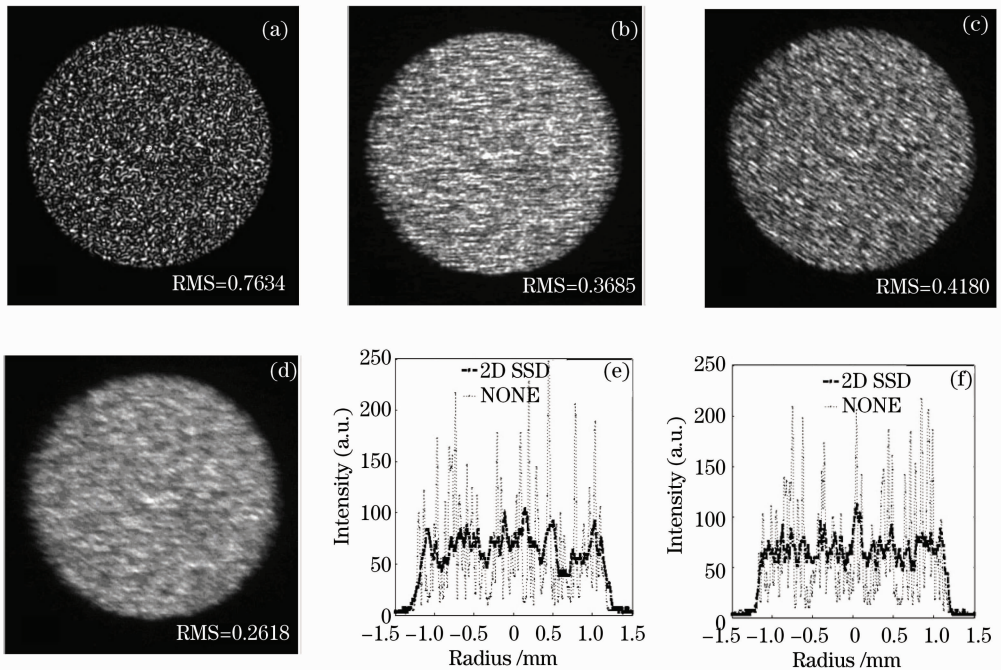


图 3 焦斑分布图。(a)未加入调制的焦斑分布；(b)加入 10 GHz 调制，带宽为 80 GHz；(c)加入 3 GHz 调制，带宽为 40 GHz；(d)加入二维调制；(e)焦斑的横向一维分布；(f)焦斑的纵向一维分布

Fig. 3 Figure of focus distribution. (a) Focus distribution without modulation, (b) with 10 GHz modulation, 80 GHz bandwidth, (c) with 3 GHz modulation, 40 GHz bandwidth; (d) with 2D-SSD modulation; (e) horizontal distribution of focus; (f) vertical distribution of focus

在加入二维调制后，RMS 下降到 0.2618，改善度达到 65.7%。

能量分布函数(FOPAI)的计算公式为

$$f_{\text{FOPAI}}(I_0) = \frac{\int_{\text{beam area where } I(x,y) \geq I_0} I(x,y) dx dy}{\int_{\text{beam area}} I(x,y) dx dy}. \quad (8)$$

由(8)式对图 3 的结果进行了计算，图 4 给出了各焦斑的 FOPAI 曲线分布，图中可以看出，在未加入调制时，FOPAI 曲线相对缓慢，在加入一维调制后，下降趋势变快，加入二维调制后，拐点像大能量方向移动，

而且下降更加陡峭,由此可以直观的得出各不同强度分量的散斑在总焦斑中所占的比重分布。

频率权重分布(PSD)可以由下式进行计算:

$$F_{\text{PSD}}(K) = \left\langle \frac{|I(K)|^2}{L} \right\rangle, \quad (9)$$

式中 L 为光束口径, $I(K)$ 为光强各空间频率分量傅里叶振幅。

对图 3 结果进行各个方向的 PSD 分析,如图 5 所示,未加调制时,低频所占的比重明显低于加入二维谱色散匀滑的焦斑,高频所占的比重高于加入二维谱色散匀滑时的焦斑。由此可以得出焦斑的低频成分增加,高频成分降低,焦斑高频信息得到平滑。

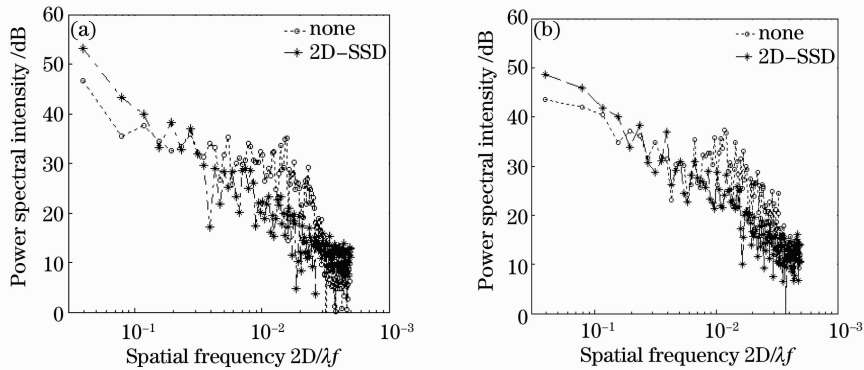


图 5 焦斑的频率权重分布图。(a)横向 PSD; (b)纵向 PSD

Fig. 5 Power spectral density of focus. (a) Horizontal distribution; (b) vertical distribution

4 结 论

实验研究了一维、二维谱色散匀滑情况下,分布式相位板焦斑的分布及不同的匀滑效果。结果表明,在加入一维谱色散匀滑时,焦斑的 RMS 在一维方向有了明显的改善,采用二维谱色散匀滑技术后,能够在二维分布上有效的改善焦斑的均匀性。通过能量分布函数、焦斑均匀性及频率权重分布三种焦斑评价方法也可以得出相同的结论。

本实验是离线进行,通过离线实验验证了二维谱色散匀滑的效果,为二维谱色散匀滑在神光 II 上应用提供了实验支持。

参 考 文 献

- 1 M. Desselberger, T. Afsharrad, F. Khattak *et al.*. Nonuniformity imprint on the ablation surface of laser-irradiated targets [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(10): 1539~1542
- 2 R. H. Lehemberg, S. P. Obenschain. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets [J]. *Opt. Commun.*, 1983, **46**: 27~30
- 3 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
- 4 D. Véron, H. Ayrat, C. Gouedard *et al.*. Optical spatial smoothing of Nd-glass laser beam [J]. *Opt. Commun.*, 1988, **65**: 42~45
- 5 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**: 3456~3462
- 6 T. R. Boehly, V. N. Goncharov. Optical and plasma smoothing of laser imprinting in targets driven by lasers with SSD bandwidths up to 1 THz [J]. *Phys. Plasma*, 2001, **8**: 2331~2337
- 7 Li Ping, Su Jingqin, Ma Chi *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion on the spatial spectrum of focal spot [J]. *Acta Physics Sinica*, 2009, **58**(9): 6210~6215
- 李平, 粟敬钦, 马驰等. 光谱色散匀滑对焦斑光强频谱的影响 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6210~6215
- 8 Zhou Shenlei, Zhu Jian, Li Xuechuan *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
- 9 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
- 10 Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi *et al.*. Improving of the irradiation uniformity on targets with a diffraction-weakened lens array and spectral dispersion smoothing [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