

文章编号: 0258-7025(2006)03-0321-05

光谱色散平滑的实验研究

周申蕾¹, 朱 俭², 李学春¹, 林尊琪¹, 戴亚平²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)
² 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 为提高国内惯性约束聚变(ICF)装置的焦斑平滑能力,在对光谱色散平滑(SSD)技术理论分析的基础上,开展相关实验并研究其平滑机制。实验结合另一种焦斑平滑技术——分布式相位板(DPP)比较分析光谱色散平滑技术应用下的焦斑均匀性的变化。实验表明,利用光谱色散平滑技术中的正弦相位调制对光谱展宽并色散后,在色散方向上的焦斑均匀性有明显改善,120 μm 内的光强调制被平滑,其平滑能力依赖于光谱色散平滑技术参量的选择;焦斑的低频光谱强度变化很小,但中高频光谱强度下降,焦斑质量有良好的改善,焦斑的不均匀性从 40%降低到 12.5%。结果还表明,光谱色散平滑技术中的关键是色循环的产生,光谱本身加宽产生的平滑作用非常有限。

关键词 激光技术;光谱色散平滑;激光辐照均匀性;色循环

中图分类号 O 433.5⁺4 **文献标识码** A

Experimental Study of Smoothing by Spectral Dispersion

ZHOU Shen-lei¹, ZHU Jian², LI Xue-chun¹, LIN Zun-qi¹, DAI Ya-ping²

(¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Shanghai Institute of Laser and Plasma, Shanghai 201800, China)

Abstract To improve the ability of beam smoothing in the device of inertial confinement fusion (ICF) in China, the theory of smoothing by spectral dispersion (SSD) is studied, and some experiments are carried out to analyze the mechanism of SSD in contrast with another technology of smoothing—distributed phase plane (DPP). It is found that the uniformity of focal spot in direction of dispersion is improved markedly using sinusoidal phase modulation (PM) and dispersion in SSD. And the intensity modulation of focal spot in this direction is smoothed by SSD. According to the experiments results, the changes of spectral intensity of spatial frequency at low-mode are very limited, and at high-mode are obviously; the nonuniformity varies from 40% to 12.5%. The ability of smoothing depends on the parameter of SSD. It also shows that the color cycle is very important in the process of smoothing, although the smoothing by broaden of laser spectral width for PM is poor.

Key words laser technique; smoothing by spectral dispersion; laser irradiation uniformity; color cycle

1 引 言

在激光驱动惯性约束聚变(ICF)中,要求靶面的激光辐照尽可能均匀,以抑制激光等离子体的不稳定性^[1],并由此发展了多种焦斑平滑技术^[2~5]。所有这些技术分为两类方式:空间域平滑技术和时间域平滑技术。实际应用中,这两类方式结合使用以达到更好的焦斑均平滑效果。目前,在神光 II 装

置中使用的是属于空间域平滑的透镜列阵(LA)技术^[6,7],并在实验中获得了较为满意的结果^[8],但焦斑仍存在中小尺度的空间调制,影响靶面激光辐照均匀性,为此在透镜列阵技术的基础上开展了其他相关技术的研究。上个世纪 80 年代末,国外提出了光谱色散平滑(SSD)技术方案^[5],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,在国外

收稿日期:2005-07-19;收到修改稿日期:2005-09-29

基金项目:国家 863 计划(2004AA842070)资助项目。

作者简介:周申蕾(1977—),男,江苏兴化人,助理研究员,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事高功率激光的束匀滑和放大器的研究。E-mail:slzhou@mail.shcnc.ac.cn

同类惯性约束聚变装置上取得了良好的实验结果^[8];国内由于相关器件水平的限制,开展此项技术的研究相对较晚,部分研究仅局限于理论方面^[9,10]。本文在理论分析的基础上,建立光谱色散平滑技术测试实验装置,开展相关实验,并把实验结果与理论对比,分析其物理作用机制,为进一步的工程应用提供支持。

2 理论分析

一维光谱色散平滑原理如图 1 所示^[5,10],在一般的应用中,脉冲激光由相位调制器展宽后,经光栅色散,输出激光场为

$$E_D(t) = E_0(t) e^{i\omega t} \sum_n J_n(\delta) e^{i\omega_m (t + \frac{\omega}{\Delta\lambda} Y)},$$

式中 $E_0(t)$ 为初始入射光场的时间缓变项, ω, λ 为入射激光的角频率和波长, δ 为相位调制器的调制深度, ω_m 为相位调制器的调制角频率, Y 为色散方向空间坐标,光栅色散常数 $s = \Delta\theta/\Delta\lambda$, 激光束因光栅色散引起的附加光束发散角 $\Delta\theta = s \cdot \Delta\lambda$ 。由于光栅的作用,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”,其在色散方向最大数 $N_c = D\Delta\theta/2\lambda\delta$, 表示相同频率重复出现的次数。 D 为入射到光栅前的光束最大口径。

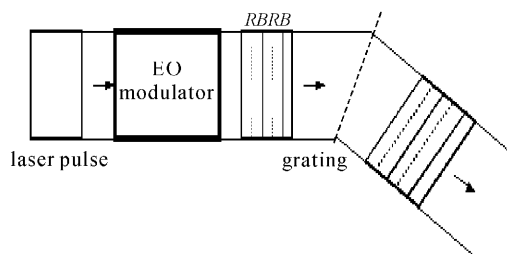


图 1 光谱色散平滑的原理示意图

Fig. 1 Schematic of SSD principle

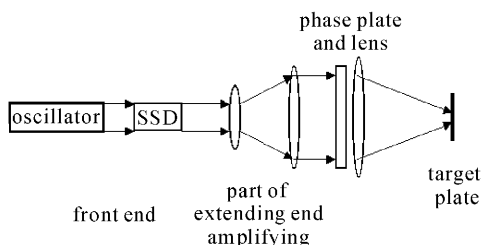


图 2 光谱色散平滑在激光系统中的应用方式

Fig. 2 Application of SSD in laser system

实际应用中,光谱色散平滑技术常和空间域平滑技术(如某些光学衍射元件、相位板之类)^[6,11~13]结合使用(图 2),使具有一定角色散和谱宽的激光

束入射到相位片阵列元上。理想条件下,每个相位阵列元的入射频率不同,不同阵列元出射的子光束因频率不同且相对相位随时间快速变化,产生的散斑在远场随时间变化非相干叠加,达到平滑焦斑的目的。根据菲涅耳积分,对于一般正方形的相位元,焦面上瞬时光场分布为

$$E(x, y) = E_0 e^{i\omega t} \sum_{KL} J_n(\delta) \frac{\sin(n\gamma + q)}{n\gamma + q} \times \frac{\sin p}{p} e^{i(n\omega_m t - n\gamma L - Lq - Kp + \phi_{KL})},$$

式中, $(p, q) = (x, y)kd/2f$, f 为透镜焦距, k 为光波的波数, d 为相位基元的边长, $\phi(K, L)$ 为相位板的第 (K, L) 基元造成的相位变化, $\gamma = d\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\omega_m}{\omega}$ 为由于光谱经调制器展宽后,不同的频率以不同角度入射引起的位移。

对光脉冲时间 Δt 积分后的光强可表示为

$$I = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E(x, y)|^2 dt,$$

由于角色散以及色循环的作用,每个相位元所产生的子斑在焦面上 $\Delta l = \Delta\theta \cdot f$ 的范围内随时间周期循环运动变化,宏观体现为最后焦斑内空间尺度为 Δl 以下的调制度将降低,达到平滑焦斑的目的;平滑的程度依赖于叠加的子斑数目和色循环数。

3 实验与分析

实验装置如图 3 所示,激光从神光 II 主振荡器输出,经过脉冲整形处理后经波导相位调制器,调制频率 3 GHz;在放大输出后,光束口径扩束至 $\phi 40$ mm,以近似闪烁角入射到 1200 1/mm 的光栅上,反射后经分布式相位板(DPP)(通光口径 $\phi 60$ mm)和透镜(焦距 1 m),最后在焦面位置用 CCD 采集焦斑图像。CCD 面每个像素大小为 $24 \mu\text{m}$ 。在调制频率为 3 GHz 的相位调制器作用下激光光谱宽度从 0.03 nm 增大到 0.1 nm,激光脉冲宽度 2 ns,在透镜焦距 $f = 1$ m 情况下分布式相位板设

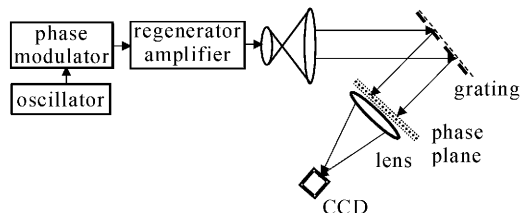


图 3 实验光路排布图

Fig. 3 Scheme of optic arrangement

计所产生的焦斑大小为2 mm,光谱色散平滑方向为 x 方向。

实验首先在没有光栅的情况下直接测试相位调制前后焦斑的变化。扩束后的光束直接经分布式相位板和透镜聚焦到 CCD 上,相位调制前后焦斑变化如图 4 所示。实验结果表明,尽管相位调制引起激光光谱宽增大,但其焦斑及一维 (x 方向)强度分布变化非常小,因激光光谱宽度增加所产生的平滑效应对焦斑均匀性影响非常有限。

将光栅放入光路,利用光栅的一级衍射光束入射到分布式相位板和透镜,构成一个完整的光谱色散平滑系统,测试相位调制前后焦斑特性,结果如图 5 所示。经相位调制和光栅衍射后,在 x 方向产生的光谱色散平滑技术效应显著改变了此方向上焦斑的强度调制分布;在 y 方向上未有明显改善,但对整个焦斑仍有较好的平滑作用,改善了焦斑的质量,焦斑的不均匀性从40%降低到12.5%;同时,光谱色

散平滑技术作用后焦斑的包络形态基本保持不变。

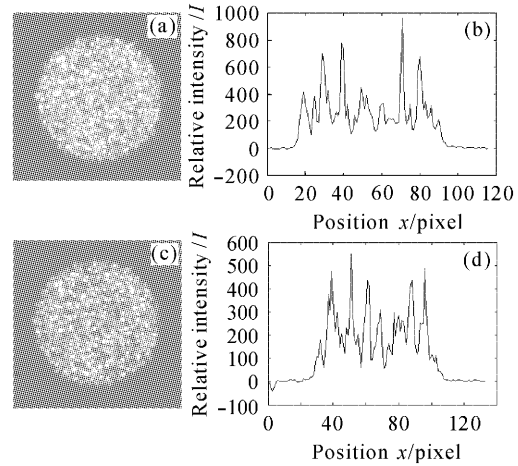


图 4 没有光栅时焦斑及一维 (x 方向)光强分布 (a),(b) 不加相位调制;(c),(d) 加相位调制

Fig. 4 Image of intensity distributions of focal-spot pattern and x -direction without grating

(a),(b) no phase-modulating; (c),(d) with phase-modulating

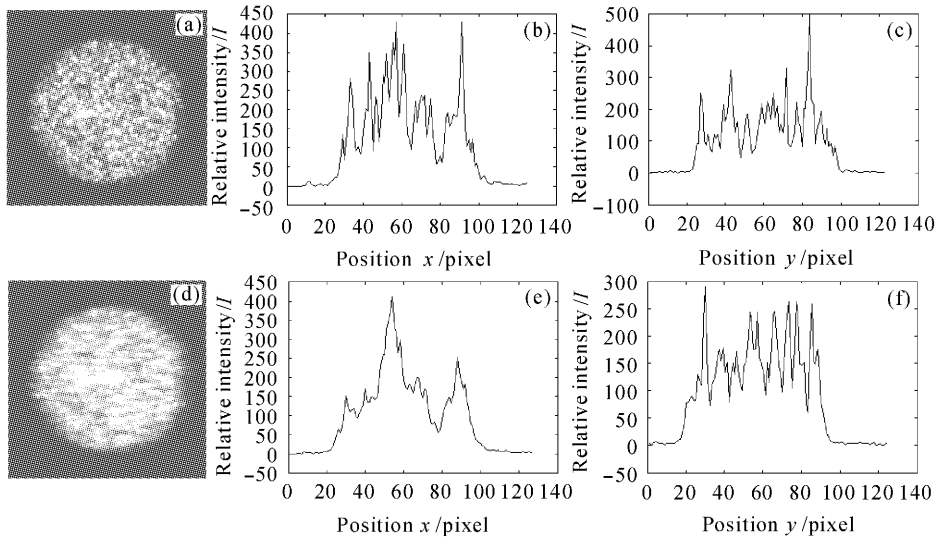


图 5 焦斑光强分布及一维光强分布

(a) 没有光谱色散平滑作用下的二维焦斑图及其(b) x 方向和(c) y 方向的强度分布;

(d) 光谱色散平滑作用下的二维焦斑图及其(e) x 方向和(f) y 方向的强度分布

Fig. 5 Image of intensity distributions of focal-spot pattern and one-dimensional lineouts

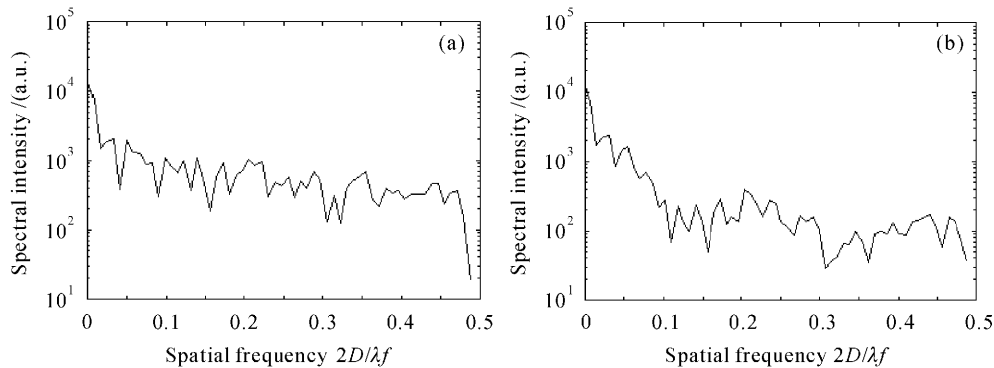
(a) two-dimensional image without SSD and (b) x -direction lineout and (c) y -direction lineout;

(d) two-dimensional image with SSD and (e) x -direction lineout and (f) y -direction lineout

从图 4 的 (a),(b)和图 5 的 (a),(b)可知,焦斑未经相位调制。光栅的引入对光束具有色散作用,但对焦斑的均匀特性并未有明显改变,焦斑的强度调制周期基本保持不变,表明光栅产生的色散作用本身在激光光谱宽较小的情况下对焦斑的平滑作用贡献很小。比较图 4 的 (c),(d)和图 5 的 (d),(e),焦

斑虽都经过相位调制,但光栅色散之后的焦斑特性完全不同,这正是由于周期性相位调制经过光栅色散之后产生的“色循环”和焦面上周期性快速运动变化的子斑对焦斑的平滑作用,这也是光谱色散平滑技术对焦斑平滑作用的首要因素。

进一步分析光谱色散平滑技术对焦斑的平滑作

图 6 光谱色散平滑 x 方向上功率谱强度的变化

(a) 没有平滑; (b) 有平滑

Fig. 6 Variation of power spectrum in direction of SSD (x -direction)

(a) without smoothing; (b) with smoothing

用,对比 x 方向光强的变化,测得光谱色散平滑技术应用后焦面上子斑在 x 方向循环运动的范围 $\Delta l \approx 120 \mu\text{m}$,即对在空间尺度 Δl 内的光强调制有平滑作用。理论计算 Δl 为 $135 \mu\text{m}$,两者符合较好;同时 x 方向上空间功率谱的变化如图 6 所示,从图中可以看出,较小空间尺度 Δl 内的光强调制在光谱色散平滑技术作用下被平滑,焦斑内的中高频成分的功率谱强度也相应降低;但是在低频部分的变化较小,这是由于光栅产生的总体色散效应较小,并未引起焦斑的分裂,焦斑功率谱的低频部分,即焦斑的包络形态主要是由空间衍射光学元件决定,这也从另一方面说明了光谱色散平滑技术作用并不改变焦斑的包络形态。

4 结 论

针对光谱色散平滑的复杂情况,通过理论和实验分析其平滑作用的物理机制,为在惯性约束聚变工程中的应用提供理论和实验基础。结果表明,1) 光谱色散平滑效应中最重要的因素是“色循环”的产生,使光束在时间和空间上产生快速的周期性运动变化,最后远场的非相干叠加使焦斑平滑。尽管光谱加宽能够对焦斑有平滑作用,但在谱宽比较小的情况下,其平滑效应非常微弱,在光谱色散平滑技术系统中起主导作用的仍然是“色循环”的作用。对于惯性约束聚变装置中要求激光谱宽都相对较窄,光谱色散平滑技术正是一种能够满足此要求的时间域平滑技术;2) 光谱色散平滑效应对某个空间周期范围内强度调制具有平滑作用,其决定于光谱色散平滑系统参量的选择,因此在设计时必须根据需求

来选择;在与衍射光学元件联用时,它并不明显改变焦斑的包络形态,只是改善其强度的均匀性,焦斑的形态仍然由衍射光学元件决定。

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 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
- 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**(1):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**(8):3456~3462
- 6 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
- 7 Wang Chen, Huang Guanlong, Wang Wei *et al.*. Uniform line-focus system used for special laser beam intensity distribution of Shengguang II [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):37~39
王琛,黄关龙,王伟等. 神光 II 特殊光束强度分布条件下的均匀线聚焦系统[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):37~39
- 8 Two-Dimensional SSD on OMEGA[C]. *LLE Review*, 1996, **69** (Oct.-Dec.)
- 9 Pu Hongtu, Xue Quan, Wu Jian *et al.*. Research of a resonant cavity phase modulator used in SSD [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(2):115~118
濮宏图,薛泉,吴健等. 用于光束时间平滑的谐振腔式相位调制器研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(2):115~118
- 10 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

- 11 Joshua E. Rothenberg. Comparison of beam-smoothing methods for direct-drive inertial confinement fusion [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7):1664~1671
- 12 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Precise design of diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):29~32
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
- 13 Wang Jingyu, Tan Qiaofeng, Yan Yingbai *et al.*. Precise design of circular-symmetrical diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3):206~210
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

中国光学学会 2006 年学术大会的通知

2006' General Congress of Chinese Optical Society

会议时间:2006 年 9 月 3~5 日

会议地点:中国·广州

主办单位:中国光学学会

承办单位:华南师范大学, 广东省光学学会

展馆地点:中国·深圳 (2006 年 9 月 6~9 日)

协办单位:清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 广州光学学会, 深圳光学学会, 中国光学学会国际会议展览工作委员会, 中国国际光电博览会(深圳), 广州光学光电子行业协会, 深圳光学光电子行业协会

会议宗旨:两年一次的中国光学学会年会, 将于 2006 年 9 月 3~5 日在广州举行。由华南师范大学和广东省光学学会具体承办。本次会议将总结交流我国光学、光子学和工程光学领域的最新成果, 展望 21 世纪的发展方向, 为新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议将与光学、光电子新技术和新产品大型国际展览会——中国国际光电博览会及中国光电产业高级论坛同期举行。

会议名誉主席:王大珩(中国科学院)

会议主席:母国光(南开大学)

节目委员会主席:金国藩(清华大学)

组织委员会主席:刘颂豪(华南师范大学)

大会秘书长:邢 达(华南师范大学)

大会安排 15 个专题会议(分会场):1) 量子光学与非线性光学, 2) 生物与医学光学, 3) 激光物理与技术, 4) 光学功能材料, 5) 集成光子学与光纤光学, 6) 光通信与光传感, 7) 光学存储与光全息, 8) 工程光学与光学制造, 9) 光电技术与系统, 10) 光学薄膜技术, 11) 超快光学, 12) 光学微系统与微纳米技术, 13) 颜色光学、眼(科)光学和仪器, 14) 激光加工技术, 15) 光学教学研究

会议论文提交截止时间:2006 年 6 月 15 日(论文提交请见会议网站及第二轮通知)

承办单位地址:广州市华南师范大学信息光电子科技学院, 邮政编码:510631

电话:+86-020-39310309, +86-020-85216848, **传真:**+86-020-39310311, **联系人:**崔红丽, 罗爱平

电子邮箱:guangd@scnu.edu.cn (崔红丽), luoaiping2003@126.com (罗爱平)

本会议建立了会议网页, 网址为: <http://laser.scnu.edu.cn/final/index2.htm>。敬请访问浏览, 了解会议细节和相关的最新信息。