

# 单光栅下的光谱色散匀滑技术研究

周煜梁<sup>1,2</sup> 隋 展<sup>1</sup> 刘兰琴<sup>1</sup> 栗敬钦<sup>1</sup> 许立新<sup>2</sup> 王文义<sup>1</sup> 黄婉晴<sup>1</sup> 张 颖<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变中心, 四川 绵阳 621900)  
(<sup>2</sup> 中国科学技术大学光电子重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要** 光谱色散匀滑(SSD)技术已经广泛应用于国内外各大高功率激光驱动器。但是由于工程设计原因,美国国家点火装置(NIF)以及国内神光-III原型(TIL)装置都只采用了一块光栅,相较于传统 SSD 技术,焦斑匀滑效果有所不同。经模拟发现,在初始的 100 ps 以内,缺失色散光栅的 SSD 技术匀滑性能下降,可以通过优化调制频率来降低这种影响。通过对单光栅下的 SSD 技术分析研究,为 SSD 技术在大型激光装置上的优化应用提供理论基础。

**关键词** 激光光学;高功率激光驱动器;光束匀滑;光谱色散匀滑;调制频率

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s114007

## Research of Smoothing by Spectral Dispersion When Using One Grating

Zhou Yuliang<sup>1,2</sup> Sui Zhan<sup>1</sup> Liu Lanqin<sup>1</sup> Su Jingqin<sup>1</sup> Xu Lixin<sup>2</sup>  
Wang Wenyi<sup>1</sup> Huang Wanqing<sup>1</sup> Zhang Ying<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup> Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Smoothing by spectral dispersion (SSD) technology has been widely used for many high-power laser drivers. However, due to the engineering design reasons, national ignition facility (NIF) and technical integration experiment line (TIL) use only one grating. It will affect the smoothing efficiency, especially at the beginning time. But we can reduce it by the way of optimizing the modulation frequency. Finally we analyse the SSD technology with one grating and provide a theoretical basis for the optimization of high-power laser drivers.

**Key words** laser optics; high-power laser drivers; beam smoothing; smoothing by spectral dispersion; modulation frequency

**OCIS codes** 140.3295; 140.3430; 140.3580; 140.3300

## 1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)中,光束匀滑技术是抑制激光和等离子体相互作用(LPI)的重要手段。现有的大型激光装置采用的匀滑手段有:光谱色散匀滑(SSD)技术<sup>[1~3]</sup>,连续相位板(CPP)技术<sup>[4]</sup>,偏振匀滑技术<sup>[5]</sup>。SSD 技术已经运用到各大激光装置上,其中最为典型的是美国国家点火装置(NIF)<sup>[6]</sup>。但是由于工程设计的原因,与传统的 SSD 技术相比仅采用了一块光栅,这会对光场匀滑的效果造成影

响。本文理论模拟了单光栅下的 SSD 技术对焦斑的作用,发现可以通过调节相位调制器调制频率来调高匀滑效果。

## 2 单光栅下的 SSD 技术分析

### 2.1 单光栅光场模型

双光栅 SSD 系统如图 1 所示,图中 B 为光束经过相位调制器后所产生的高频部分,R 为光束经过相位调制器后所产生的低频部分。光束通过该系统

**收稿日期**: 2012-11-21; **收到修改稿日期**: 2013-01-24

**作者简介**: 周煜梁(1987—),男,博士研究生,主要从事高功率固体激光光束控制技术方面的研究。

E-mail: zyljiushiwo@gmail.com

**导师简介**: 隋 展(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率固体激光器技术方面的研究。

E-mail: liqing@vip.163.com

后的光场为

$$E(t) = E_0 \exp(i\omega_0 t + ikR) \exp(i\delta_1 \sin \omega_1 t), \quad (1)$$

式中  $\omega_0, k$  分别为光场中心角频率与波矢,  $\delta_1, \omega_1$  分别为调制器调制深度与调制角频率,  $k_n R$  可表示为

$$k_n R = \frac{1}{c} (\omega_0 + n\omega_1) (Z \cos \theta_n + Y \sin \theta_n), \quad (2)$$

式中  $k_n$  为第  $n$  个频率分支的波矢,  $z$  为光束沿主轴传播距离,  $Y$  为光束色散方向传播距离.  $\theta_n$  为第  $n$  个频率分支的色散角度,

$$\theta_n = \frac{d\theta}{d\omega} \cdot (n\omega_1) = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{\omega_0} \cdot (n\omega_1). \quad (3)$$

当  $n\omega_1 \ll \omega_0, \theta_n \ll 1$  时,

$$k_{nm} R = \frac{1}{c} (\omega_0 + n\omega_1) (Z \cos \theta_n + Y \sin \theta_n) \approx \frac{Z}{c} (\omega_0 + n\omega_1) - Y \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{c} \cdot (n\omega_1). \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式进行简单变换后可得到

$$E_D(z, y, t) \approx E_0(z, y, t) \exp\{i\omega_0 t - ikz + i\delta_1 \sin[\omega_1(t - Z/c + \alpha Y)]\}, \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为光栅色散系数, 表示了调制频率  $\omega_1$  下光栅色散的大小。

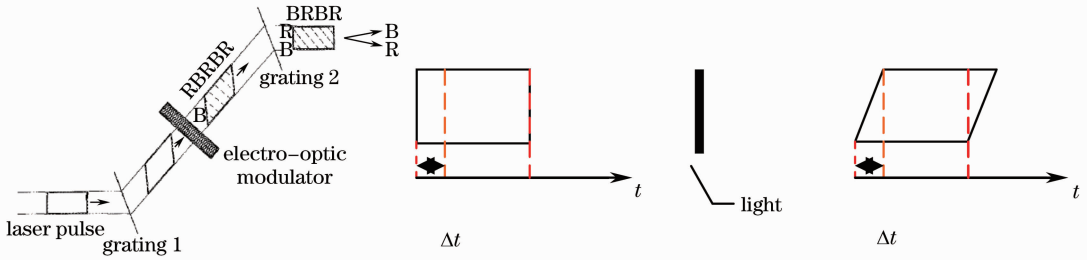


图 1 SSD 示意图

Fig. 1 Schematic of SSD

可以发现光栅存在会带来两个影响:

1)  $Y$  截面上不同位置对应的频率不一样. 当  $\alpha Y$  对应的时间恰好为  $n$  个时间周期, 那么在光束截面上将会出现  $N$  个完整频率周期(色循环数);

2) 由于光束截面上不同位置存在延时  $\alpha Y$ , 实际在  $t$  时刻探测到的强度应为  $t - \alpha Y$  时刻的强度。

采用一个光栅时, 脉冲包络延时无法得到补偿(图 1), 此时的光场为

$$E_D(z, y, t) \approx E_0(z, y, t - \alpha Y) \exp\{i\omega_0 t - ikz + i\delta_1 \sin[\omega_1(t - Z/c + \alpha Y)]\}, \quad (6)$$

当  $E_0$  为时间上包络时, 可以看出, SSD 特有的时空耦合特性会使时间上的影响在空间截面上反映出来. 因为 SSD 技术一般是和 CPP 技术联合使用的, 加入 CPP 后可以得到焦点处光场

$$E_{\text{focalspot}}(z, y, t) \approx F\{E_0(z, y, t - \alpha Y) \times \exp\{i\omega_0 t - ikz + i\delta_1 \sin[\omega_1(t - Z/c + \alpha Y)]\} \times \exp[i\varphi_{\text{CPP}}(x, y)]\}, \quad (7)$$

式中  $\varphi_{\text{CPP}}$  为连续相位板的空相位分布,  $F$  为傅里叶变换. 光栅的存在使得光束的扫描成为可能, 但是它固有的延时特性也会使得脉冲的时间波形发生畸变, 会对光束匀滑造成影响。

## 2.2 光场模拟与分析

本文模拟采用的 CPP 设计焦斑为椭圆形, 长轴

长为  $450 \mu\text{m}$ , 短长轴之比为 0.57. 通过对衍射焦斑的研究, 来对比分析单光栅与双光栅情况下的 SSD 匀滑效果的不同(无论单光栅或者双光栅, 采用的为同一块 CPP). 为了定量描述焦斑的匀滑效果, 引入衍射焦斑包络的均方根(RMS)值:

$$\delta_{\text{RMS}} = \left\{ \frac{\iint_A [I(x, y) - \bar{I}(x, y)]^2 dx dy}{\iint_A [\bar{I}(x, y)]^2 dx dy} \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

式中 RMS 值为 1 时, 则为散斑状态, 当 RMS 值越低时, 焦斑匀滑效果越好. SSD 匀滑是基于时间积分的, 首先模拟了调制频率为 9.2 GHz 下焦斑的

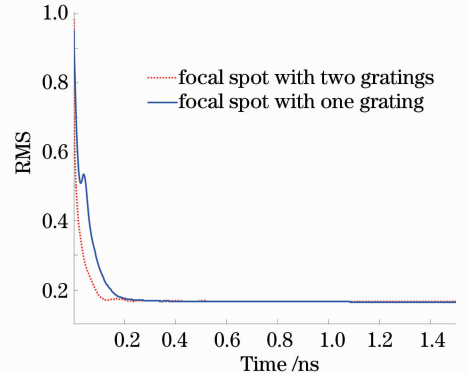


图 2 焦斑的 RMS 值

Fig. 2 RMS of the focal spot

RMS 值随时间的变化图(图 2)。由图 2 可以看出,随着时间的增加,焦斑的匀滑效果逐渐变好,而在更长时间内,匀滑效果趋于稳定,达到渐进值。

但是发现两种脉冲焦斑在匀滑初始的 200 ps 时间内 RMS 的下降存在很大差异,双光栅的 RMS 比单光栅下降得更快,也更早地达到稳定。这说明双光栅在初始时间内的匀滑效果更好。因为选取的色循环数为 1,调制频率为 9.2 GHz 时,一个光栅所带来的延时大约为  $\Delta t=110$  ps。因此在匀滑开始的 150 ps 时间内,光栅所造成的影响最大,这时单光栅

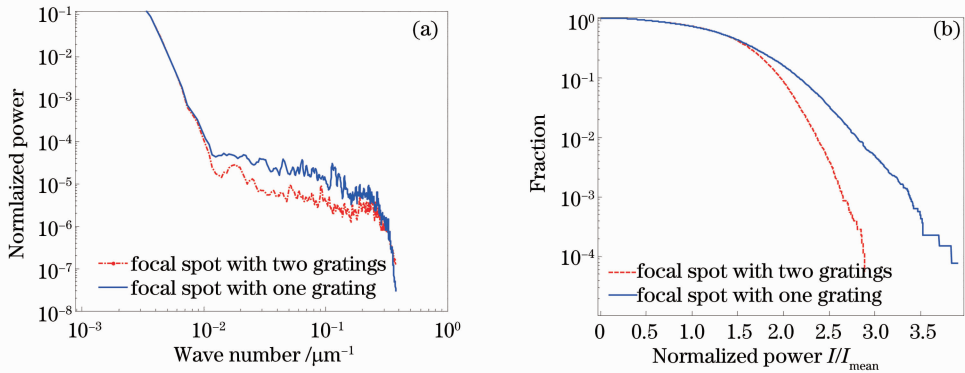


图 3 焦斑的 PSD 与 FOPAI

Fig. 3 PSD and FOPAI of the focal spot

激光等离子体作用时间尺度很短,大约只有 10 ps,而单光栅带来的延时为 110 ps,这已经足够影响激光等离子体相互作用<sup>[7]</sup>。为了更好地反映出单光栅带来的影响,模拟了匀滑开始后 100 ps 内积分焦斑的功率谱密度(PSD)与 FOPAI(fractional power above intensity),如图 3 所示。PSD 曲线描述了衍射焦斑的空间频率能量分布,其中高频能量越低匀滑效果越好。FOPAI 曲线代表了焦斑能量高于某能量的份额,当高能量份额越少的时候,焦斑的能量分布越均匀。从 PSD 曲线看出,单光栅的高频份额明显多于双光栅,而 FOPAI 图也可看出单光栅高能量份额明显多于双光栅。这是因为单光栅情况下,SSD 将脉冲时间上的强度变化反映到空间上来,而非像双光栅那样只是将相位上的变化反映到空间上。在对应的光栅延时时间内,这种强度变化足以使得焦斑发生形变,无论是高频份额还是高能量份额都明显增多。

### 3 单光栅的 SSD 技术调制频率的选择

单光栅所造成的畸变会减弱初始时间内的匀滑效果,而 LPI 效应的作用时间非常短,足够对打靶

与双光栅的匀滑效果有很大的不同,但随着积分时间的加长,大量不同散斑的叠加也使得失真得到抑制。两种情况的匀滑效果趋于一致。无论是单光栅还是双光栅,其最终匀滑效果都是由叠加的散斑数目决定的,当只有光栅数目不同时,是不会影响散斑数目的,因为无论是双光栅还是单光栅,光束的扫动距离以及扫动范围是唯一的。而单光栅使得脉冲时间包络的不平反映到空间上,这就使得在单光栅的延时范围内,匀滑效果有很大的不同。

造成不利影响。采用单光栅的情况,空间的强度变化是无可避免的,但是我们仍然可以发现这种不利影响是有一定时间尺度的,它是由光栅的延时造成的。

SSD 技术的调制频率  $f_M$ ,光栅色散项  $\alpha$ ,光束截面宽度  $D$  以及色循环数  $N_c$ <sup>[1]</sup> 存在关系:

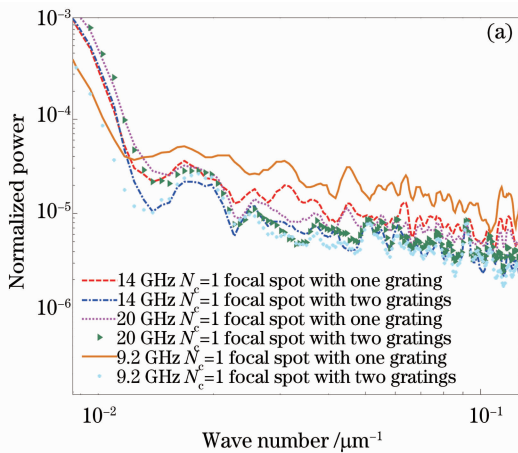
$$N_c = \alpha D \times f_M. \quad (9)$$

光栅的时间延时为  $\Delta t = \alpha Y$  这一项,直观上来讲可以通过减小  $\alpha$  值来减弱单光栅延时,从而抑制单光栅带来的影响。从(9)式来看,在光束截面宽度不变条件下,当固定色循环数后, $\alpha$  值与调制频率值呈反比关系,当提高调制频率时  $\alpha$  值就会减小,相应的单光栅带来的畸变也会减小。这同时也带来一个问题,调制频率是 SSD 技术的一个关键参数,为了抑制单光栅的影响而改变调制频率是否会对光束匀滑造成更大的影响,这种“替换”是否值得。为了研究这一情况,对多调制频率下单光栅与双光栅的匀滑效果做了比较分析。

图 4 为不同调制频率下焦斑的 FOPAI 以及 PSD 图(前 100 ps)。可以看出无论选取的调制频率是多少,双光栅的匀滑效果都是要好于单光栅的。

同时可以发现在色循环数相同条件下,调制频率越高时,单光栅情况与双光栅情况的区别越小(对应两条曲线靠的越近)。这是因为调制频率的提高使得光栅的延时影响减弱,从而减弱了相同时间内焦斑的畸变。可喜的是调制频率的提高并没有让匀滑效果大大地降低,只是有一些影响。这些影响相对于光栅延时所造成的影响是完全可以接受的。

调制频率越高,单光栅对 SSD 技术带来的影响越小,但是调制频率的选择也是有条件的,因为它直接决定了 SSD 最终匀滑效果。对于不同的匀滑目标,调制频率的选择也不一样。本文模拟采用的匀



滑目标为焦斑 RMS 值。在不同匀滑目标的阈值速度下,对比不同调制频率下的匀滑速度。图 5 中实线代表了匀滑目标(100 ps 内 RMS 下降为 0.28, 0.30, 0.35)在各种调制频率下的阈值匀滑速度,而红色方块代表了模拟光路下的焦斑匀滑速度。由图 5 发现,不同的匀滑目标,其阈值频率也存在差异,匀滑目标越低,各调制频率下的阈值速度也越低;对比两条曲线发现,当 RMS 值较低时低频段的调制频率也能满足低匀滑目标要求,但随着匀滑目标的提高,相应的调制频率也需要不断提高。

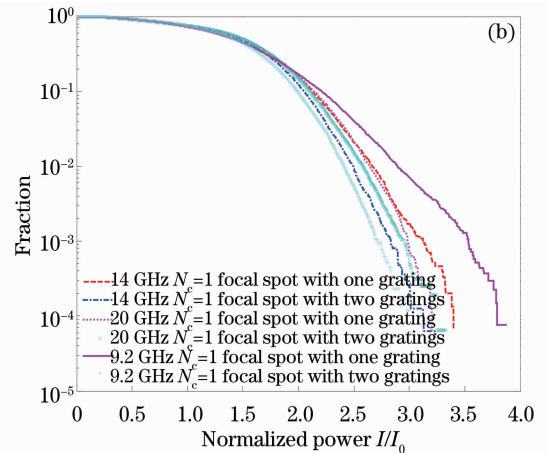


图 4 不同调制频率的 PSD 与 FOPAI 对比

Fig. 4 PSD and FOPAI of the different modulation frequencies

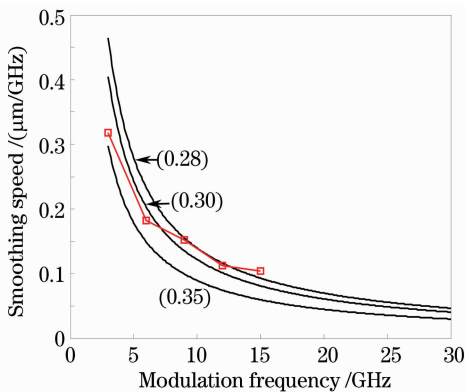


图 5 匀滑速度与调制频率

Fig. 5 Smoothing speed and modulation frequency

## 4 结 论

SSD 技术已经广泛运用于各大激光装置,光栅的存在使得光束的扫动成为可能,但只采用一块光栅会将脉冲时间的包络强度变化反映到空间上。本文首先分析了单光栅的影响结果,这种现象是因为

光栅的延时所造成的。对于焦斑来说,在光栅的延时会内会对匀滑造成很大的影响。虽然光栅延时很短,但相对 LPI 效应,已经影响到束靶耦合效率。在色循环数不变的条件下,可以通过调高调制频率的方法降低光栅的延时,从而有效地抑制单光栅所带来的影响。调制频率直接影响着焦斑的匀滑效果,不同的调制频率有着不同的匀滑速度。理论研究发现,通过优化调制频率,可以提高单光栅 SSD 的匀滑效果,降低色散延迟带来的影响,为以后单光栅 SSD 技术应用提供了理论基础。

## 参 考 文 献

- 1 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
  - 2 Zhang Hujie, Zhou Shenlei, Li Jinghui *et al.*. The experiential research on double-pass phase modulator applied on technology of smoothing by spectral dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1071~1075
- 张晓杰,周申蕾,李菁辉等.用于光谱匀滑技术的双通调制器实验研究[J].*光学学报*,2010,**30**(4):1071~1075

- 3 Li Jinghui, Zhang Hujie, Zhou Shenlei *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion considering the hole used in spacial filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 827~832  
李菁辉, 张琥杰, 周申蕾等. 空间滤波器小孔对谱色散匀滑使用效果影响 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 827~832
- 4 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
- 5 Phase conversion using distributed polarization rotation [R]. *LLE Review*, 1990, **45**: 1~12
- 6 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 7 J. D. Lindl, P. Amendt, R. L. Berger *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility [J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(2): 339~491

栏目编辑：王晓琰