

# 抽运光小尺度自聚焦对基于动态波前调控的 径向匀滑效果的影响

李建龙\*, 翁小凤, 钟哲强, 张彬\*\*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

**摘要** 基于抽运光非线性小尺度自聚焦效应, 分析了光克尔介质类型、抽运光光束质量和光克尔介质长度对束匀滑效果的影响。研究表明, 在基于动态波前调控的径向匀滑方案中, 当抽运光的峰值强度一定时, 与  $\text{CS}_2$  相比, 采用硝基苯作为光克尔介质可获得较好的束匀滑效果。在实际应用中, 抽运光的小尺度自聚焦效应会随着抽运光峰值强度和光克尔介质长度的增加而加剧, 因此需要合理选择抽运光和光克尔介质参数, 以获得较好的束匀滑效果, 避免抽运光小尺度自聚焦效应的影响。

**关键词** 激光光学; 惯性约束聚变; 径向束匀滑; 小尺度自聚焦; 均匀性

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0305001

## Influence of Small-Scale Self-Focusing of Pump Laser on Radial Smoothing Effect Based on Dynamic Wavefront Control

Li Jianlong\*, Weng Xiaofeng, Zhong Zheqiang, Zhang Bin\*\*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

**Abstract** Based on the nonlinear small-scale self-focusing effect of pump laser, the influences of optical Kerr medium type, pump laser beam quality, and optical Kerr medium length on the beam smoothing effect are analyzed. The research results show that in the radial smoothing scheme based on dynamic wavefront control, an excellent beam smoothing effect is obtained with nitrobenzene instead of  $\text{CS}_2$  as the optical Kerr medium when the pump laser peak intensity is constant. In the practical applications, since the small-scale self-focusing effect of pump laser is aggravated with the increase of pump laser peak intensity or optical Kerr medium length, it is necessary to select suitable parameters of pump laser and optical Kerr medium for a good beam smoothing effect. Thus the influence of small-scale self-focusing effect of pump laser can be avoided.

**Key words** laser optics; inertial confinement fusion; radial beam uniformity; small-scale self-focusing; uniformity

**OCIS codes** 140.3290; 140.3295; 140.3300; 140.3518

## 1 引言

在激光驱动的惯性约束聚变装置中, 为实现对靶丸的均匀对称压缩, 已发展了多种束匀滑技术<sup>[1-2]</sup>。这些束匀滑技术可分为两类: 一类是以连续相位板(CPP)为代表的空域束匀滑技术; 另一类是以光谱角色散(SSD)匀滑为代表的时域束匀滑技术。CPP可以有效控制激光束在远场的焦斑包

络<sup>[3]</sup>, 但子束间的相干叠加会导致焦斑内部出现较多的不均匀散斑, 不能有效抑制激光等离子体相互作用时产生的非线性效应<sup>[4-5]</sup>。为进一步消除散斑的影响, 研究人员又发展了时域束匀滑技术<sup>[6-8]</sup>。美国国家点火装置(NIF)采用的是二维光谱角色散(2D-SSD)束匀滑技术<sup>[9]</sup>, 然而 2D-SSD 会导致远场焦斑内出现明显的相干条纹, 致使其焦斑的均匀性受到严重影响<sup>[10]</sup>。为了能更有效地改善靶场辐照

收稿日期: 2018-11-22; 修回日期: 2018-12-10; 录用日期: 2018-12-19

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(G2017149, JG2017029, JG2018115)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队资助项目(2014RA4051)

\* E-mail: 2965123511@qq.com; \*\* E-mail: zhangbinff@sohu.com

均匀性,本课题组曾提出一种基于光克尔效应的径向束匀滑(RS)方案<sup>[11-12]</sup>。在该方案中,主激光束与抽运光正入射至光克尔介质,抽运光是周期性高斯型脉冲序列,因而抽运光通过与光克尔介质相互作用给透射的主激光束附加周期性相位调制,使得焦斑内部的散斑在径向做周期性快速扫动,从而在一定时间内抹平远场焦斑内部强度调制的匀滑效果。

在抽运光正入射的径向束匀滑方案中,当抽运光强度较低时,其附加给主激光的相位变化率较小,这会导致该方案所获得的束匀滑效果不稳定<sup>[13-15]</sup>。为此,本课题组又提出一种基于动态波前调控的径向束匀滑方案<sup>[16]</sup>,使抽运光以小角度倾斜入射至光克尔介质,从而同步实现靶面散斑的横向和径向快速扫动,以获得快速、高效、稳定的束匀滑效果。然而,在实际应用中,抽运光的峰值强度较高,将产生小尺

度自聚焦效应,从而对主激光束的附加调制相位产生较大影响。本文将着重从影响抽运光小尺度自聚焦效应的关键参数的角度对基于动态波前调控的径向束匀滑方案展开进一步分析和讨论。

## 2 物理模型

以 NIF 装置为参照,基于动态波前调控的径向束匀滑方案如图 1 所示。为了方便分析,以主激光的传输方向为  $oz$  轴,垂直于主激光的传输方向为  $oy$  轴建立平面直角坐标系,图 1 中  $oz_1$  表示抽运光的传输方向。主激光束正入射至光克尔介质,依次通过扩束系统、放大系统、三倍频单元和 CPP,最终由聚焦透镜会聚到靶面<sup>[17]</sup>。而抽运光以小角度倾斜入射至光克尔介质,由于抽运光是高功率激光脉冲串<sup>[18]</sup>,其在光克尔介质中传输时会产生明显的非线性小尺度自聚焦效应。

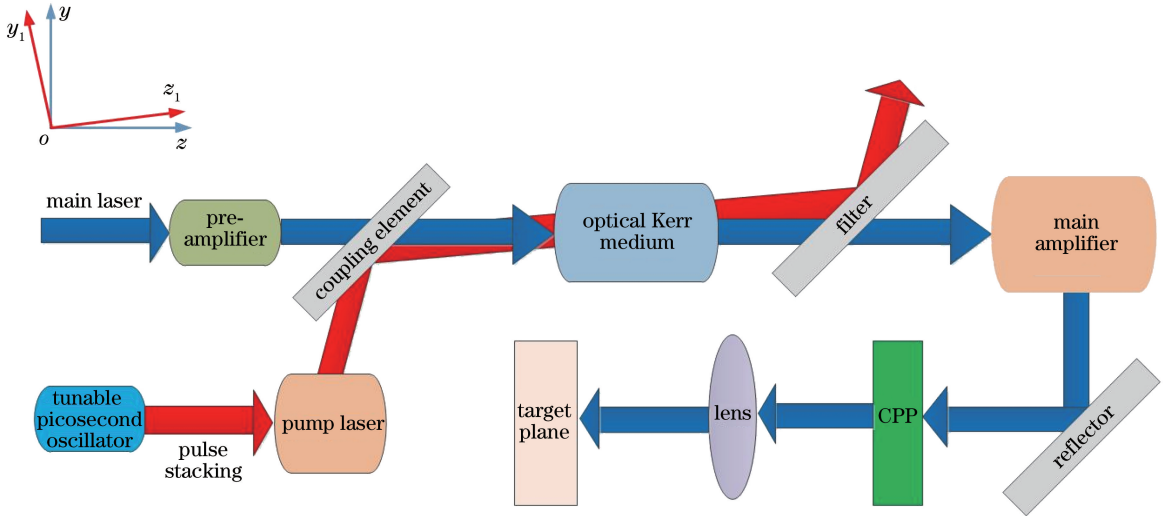


图 1 基于动态波前调控的径向束匀滑方案

Fig. 1 Radial smoothing scheme based on dynamic wavefront control

抽运光的时域波形为高斯脉冲序列,其空间分布为高斯型,且具有振幅调制和相位畸变等特点<sup>[18]</sup>。于是,抽运光的光场分布可表示为

$$E_p = A_p [1 + a_p(x_1, y_1)] \times \exp\left[-\left(\frac{x_1^2 + y_1^2}{w_p^2}\right)\right] \exp[i\phi_p(x_1, y_1)] \times \sum_m \exp\left\{-4\ln\left[2\left(\frac{t - mT_d}{T_w}\right)^2\right]\right\}, \quad (1)$$

式中:  $A_p$  为抽运光的振幅;  $a_p(x_1, y_1)$  为抽运光的振幅调制;  $w_p$  为抽运光的  $1/e$  束腰半径;  $\phi_p(x_1, y_1)$  为抽运光的相位畸变;  $t$  为抽运光与光克尔介质相互作用的时间;  $m$  为抽运光的子脉冲个数;  $T_d$ 、 $T_w$  分别为抽运光子脉冲间的延时和子脉冲的脉宽;

$x_1$ 、 $y_1$  分别为抽运光在近场的坐标。抽运光在光克尔介质中传输时产生的非线性小尺度自聚焦效应可由非线性薛定谔方程描述<sup>[19]</sup>:

$$2ik_p \frac{\partial E_p}{\partial z_1} + \nabla_{\perp}^2 E_p + k_p^2 \frac{n_2}{n_0} |E_p|^2 E_p = 0, \quad (2)$$

式中:左端第一项表示抽运光在光克尔介质中沿  $z_1$  方向传输,  $k_p = 2\pi/\lambda_p$ , 表示抽运光的波数,  $\lambda_p$  为抽运光的波长;第二项描述抽运光在其横向空间的衍射作用;第三项表示抽运光与光克尔介质之间的非线性相互作用,  $n_0$ 、 $n_2$  分别为光克尔介质的线性折射率系数和非线性折射率系数。令  $i\nabla_{\perp}^2/2k_p = D$ ,  $D$  为光克尔介质的色散,其中  $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  为拉普拉斯算符 (Laplace operator); 再令

$ik_p n_2 |E_p|^2 / 2n_0 = N$ ,  $N$  为抽运光与光克尔介质之间的非线性相互作用,  $E_p$  为抽运光的光场。当抽运光在光克尔介质中传输一小段距离  $h$  后, 为了尽可能准确地反映抽运光光场的变化, 采用对称分步傅里叶变换方法进行数值求解<sup>[20-21]</sup>, 该过程可以表示为

$$E_p(z_1 + h) = \exp\left(\frac{h}{2}D\right) \exp(hN) \exp\left(\frac{h}{2}D\right) E_p(z_1), \quad (3)$$

式中:  $z_1$  为抽运光在光克尔介质中的传输距离。在动态波前调控束匀滑方案中, 由抽运光与光克尔介质之间的相互作用附加给主激光束的相位  $\phi_R$  可以表示为

$$\phi_R = \int_0^{d_1} k n_2 |E_p|^2 dz_1, \quad (4)$$

式中:  $k = 2\pi/\lambda$ , 表示主激光的波数,  $\lambda$  为主激光的波长;  $d_1$  为抽运光在  $z_1$  方向的传输距离。

主激光经过光克尔介质、扩束系统、放大系统、三倍频及 CPP 后, 其光场分布表达式可表示为

$$E_m = A_m [1 + a_m(x, y)] \times \exp\left[-\left(\frac{x^{2N_1} + y^{2N_1}}{\omega_m^{2N_1}}\right)\right] \exp[i(\phi_m + 3\phi_R + \phi_{CPP})], \quad (5)$$

式中:  $A_m$  为主激光的振幅;  $a_m(x, y)$  为主激光振幅调制;  $\omega_m$  为主激光的  $1/e$  束腰半径;  $N_1$  为主激光束的超高斯阶数;  $\phi_m$  为主激光的初始相位畸变<sup>[22]</sup>;  $\phi_{CPP}$  为主激光经过 CPP 引入的相位;  $x, y$  分别为主激光在近场的坐标。由于主激光和抽运光在光克尔介质中的传输方向不同, 主激光和抽运光的坐标存在差异。为了方便计算与分析, 可将抽运光的坐标转换到主激光的坐标系中, 即:

$$\begin{cases} x_1 = x \\ y_1 = \left(y - \frac{d \sin \theta}{2}\right) \cos \theta - z \sin \theta \\ z_1 = \left(y - \frac{d \sin \theta}{2}\right) \sin \theta + z \cos \theta \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $d$  为光克尔介质的长度;  $\theta$  为抽运光相对于主激光束的偏转角。

主激光经过聚焦透镜后, 其靶面光场分布  $E_f(x_f, y_f)$  可由柯林斯公式计算得到:

$$E_f(x_f, y_f) = \frac{\exp(ik_{3\omega}L)}{i\lambda_{3\omega}B} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_m(x, y) \times \exp\left[-\frac{ik_{3\omega}}{B}(xx_f + yy_f)\right] dx dy, \quad (7)$$

式中:  $k_{3\omega}$  为主激光在经过三倍频过程后的波数;

$L = 2f$  为主激光沿光轴的光程;  $B = f/\beta_0$ ,  $f$  为聚焦透镜的焦距,  $\beta_0$  为系统的扩束比;  $x_f, y_f$  分别为主激光在远场的坐标。当积分时间为  $\Delta t$  时, 主激光在靶面的光强分布为

$$I_f = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E_f(x_f, y_f)|^2 dt. \quad (8)$$

为定量分析抽运光小尺度自聚焦效应对新型径向束匀滑技术的影响, 主要采用光通量对比度和 FOPAI (fractional power above intensity) 对远场焦斑的均匀性进行评价<sup>[23]</sup>, 其表达式分别为:

$$C_{\text{contrast}} = \frac{1}{I_m} \sqrt{\iint_{(x_f, y_f) \in A} [I_f(x_f, y_f) - I_m]^2 dx_f dy_f / A}, \quad (9)$$

$$F_{\text{FOPAI}} = \frac{\int_{\text{where } I_f(x_f, y_f) \geq I_m} I_f(x_f, y_f) dx_f dy_f}{\int_A I_f(x_f, y_f) dx_f dy_f}, \quad (10)$$

式中:  $I_m$  为考察区域的平均强度;  $A$  为考察区域的面积;  $I_f(x_f, y_f)$  为考察范围内各点的强度。

### 3 抽运光小尺度自聚焦效应对束匀滑效果的影响

数值模拟采用以下基本参数: 主激光束腰半径  $\omega_m = 186$  mm, 主激光的超高斯阶数  $N_1 = 6$ , 主激光的波长  $\lambda = 1053$  nm; 抽运光束腰半径  $\omega_p = 12$  mm, 抽运光脉宽  $T_w = 4.2$  ps, 抽运光子脉冲延迟时间  $T_d = 10$  ps, 抽运光的波长  $\lambda_p = 1064$  nm, 抽运光倾斜入射至光克尔介质时相对于主激光束的偏转角  $\theta = 3.5^\circ$ ; 主激光和抽运光的振幅调制均服从随机分布, 聚焦透镜的焦距  $f = 7.7$  m, 计算时取考察区域的面积为 86.5% 焦斑的环围能量。

#### 3.1 光克尔介质类型对径向束匀滑效果的影响

光克尔效应与介质的非线性折射率系数密切相关, 不同光克尔介质的非线性折射率系数不同, 因此有必要探究不同的光克尔介质对动态波前调控径向束匀滑方案束匀滑效果的影响。本实验要求所选用的光克尔介质对主激光和抽运光均高透, 因此, 分别以  $\text{CS}_2$  和硝基苯 (NB) 作为光克尔介质进行比较讨论。其中,  $\text{CS}_2$  的线性折射率系数为 1.55, 非线性折射率系数为  $3 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}^{[24]}$ ; 硝基苯的线性折射率系数和非线性折射率系数分别为 1.53 和  $2 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}^{[25]}$ 。图 2 所示为不同的光克尔介质对动态波前调控径向束匀滑效果的影响。为了方便比较, 图 2 还给出了常规正入射的径向束匀滑方案的结果。

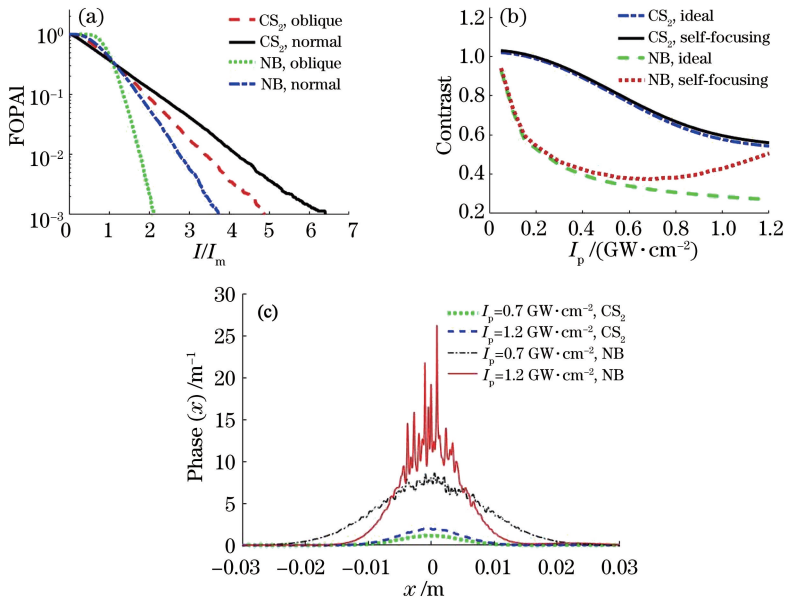


图 2 克尔介质类型对束匀滑效果的影响。(a) FOPAI 曲线;(b) 焦斑对比度随抽运光峰值强度的变化规律;(c) 不同光克尔介质附加给主激光束的相位截面

Fig. 2 Influence of Kerr medium type on beam smoothing effect. (a) FOPAI curve; (b) contrast of focal spot versus pump laser peak intensity; (c) phase cross sections of different optical Kerr media attached to main laser beam

图 2(a) 的计算结果表明,与 CS<sub>2</sub> 相比,选用硝基苯作为光克尔介质可以更加有效地抑制远场焦斑内部的高强度热斑。图 2(b) 表明,当抽运光峰值强度在 0.05~1.2 GW/cm<sup>2</sup> 内变化时,硝基苯作为光克尔介质的束匀滑效果优于 CS<sub>2</sub> 作为光克尔介质的效果。从图 2(b) 还可以看出,在考虑了小尺度自聚焦效应后,随着抽运光峰值强度的增加,以硝基苯作为光克尔介质获得的远场焦斑的光通量对比度曲线呈现先下降后上升的趋势,即抽运光峰值强度在 0.7 GW/cm<sup>2</sup> 附近的束匀滑效果最好。从图 2(c) 可以看出,当抽运光的峰值强度为 0.7 GW/cm<sup>2</sup> 时,由硝基苯附加给主激光束的相位调制大于 CS<sub>2</sub> 附加给主激光束的相位调制;而当抽运光峰值强度为 1.2 GW/cm<sup>2</sup> 时,使用硝基苯作为光克尔介质使抽运光产生了明显的小尺度自聚焦效应。

由(4)式可知,当主激光束的波数  $k$ 、抽运光的峰值强度  $|E_p|^2$  和抽运光在光克尔介质中的传输距离  $d_1$  一定时,主激光束的附加相位  $\phi_R$  与光克尔介质的非线性折射率系数  $n_2$  呈正比,因此,在理想情况下,使用硝基苯作为光克尔介质能给主激光附加更大的相位调制,这将导致远场焦斑内散斑的离焦量变大,有利于产生更佳的束匀滑效果。此外,当抽运光的强度较低时,抽运光在两种介质中产生的光克尔效应均很弱,导致抽运光与光克尔介质相互作用后附加给主激光束的相位调制都很小,因此随着

抽运光强度的逐渐增强,束匀滑效果逐渐改善。然而,当抽运光的峰值强度较高时,硝基苯的克尔系数更高,导致其非线性小尺度自聚焦效应也更加明显,束匀滑效果反而变差。由此可见,为了能够获得更佳的束匀滑效果,选用的光克尔介质既要能够产生足够强的光克尔效应,同时还必须避免因抽运光峰值强度过高而使其产生的非线性小尺度自聚焦效应对束匀滑效果带来的不利影响。

### 3.2 抽运光光束质量对束匀滑效果的影响

在基于动态波前调控的径向束匀滑方案中,抽运光可以由光纤脉冲堆积装置产生。由于光纤色散所引起的振幅调制和相位畸变是不可避免的,因此有必要研究抽运光光束质量对束匀滑效果的影响。在分析抽运光光束质量对束匀滑效果的影响时,取抽运光峰值强度  $I_p = 0.7 \text{ GW/cm}^2$ ,以硝基苯作为光克尔介质开展后续相关的讨论。图 3(a)、(b) 所示分别为无、有振幅调制和相位畸变时,抽运光对主激光的附加相位,图 3(c) 所示为抽运光光束质量对束匀滑效果的影响。

从图 3 可以看出,在基于动态波前调控的径向束匀滑方案中,当抽运光的光束质量降低时,抽运光通过与光克尔介质相互作用附加给主激光束的相位调制带有很明显的畸变,导致远场焦斑的光通量对比度曲线呈明显的上升趋势。从图 3(c) 给出的计算结果不难看出:在获得相同束匀滑效果的前提下,

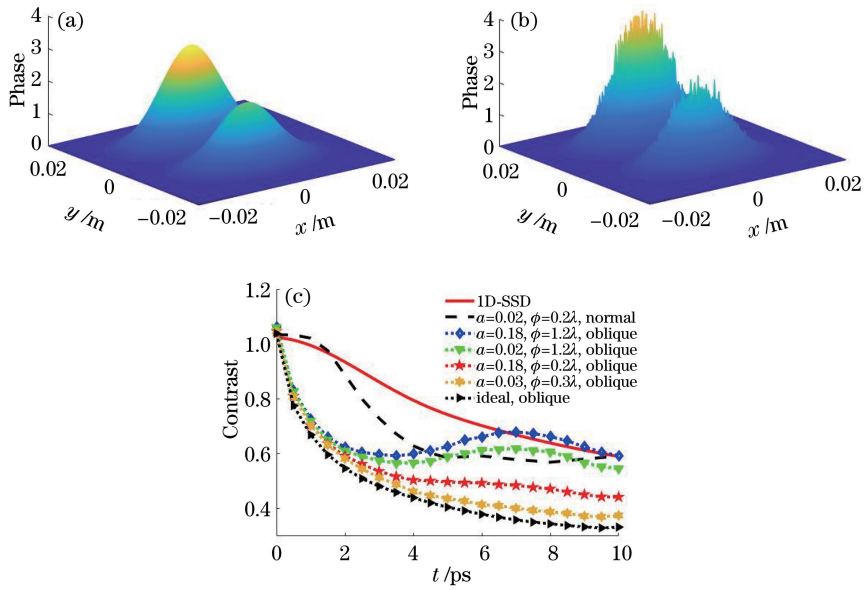


图 3 抽运光光束质量对新型径向束匀滑效果的影响。(a)理想条件下主激光获得的相位;(b)当抽运光具有振幅调制和初始相位畸变时,主激光的附加相位;(c)在不同的抽运光光束质量下,焦斑的对比度随积分时间的变化曲线

Fig. 3 Influence of pump beam quality on new radial beam smoothing effect. (a) Phase obtained by main laser under ideal conditions; (b) phase obtained by main laser when pump laser has amplitude modulation and initial phase distortion; (c) contrast of focal spot versus integration time under different pump beam qualities

与抽运光正入射方案相比,抽运光倾斜入射方案对光束质量的要求相对较低;而当抽运光光束质量较差时,远场焦斑的光通量对比度曲线随积分时间的增加出现比较明显的波动。由 Bespalov-Talanov 理论可知<sup>[26]</sup>:当抽运光在光克尔介质中传输时,其振幅调制与相位畸变导致抽运光产生的非线性小尺度自聚焦效应在传输过程中不断加剧,这也是导致附加给主激光束的相位调制具有严重波前畸变的根本原因。由此可见,在基于动态波前调控的径向束匀滑方案中,为了获得更加理想的束匀滑效果,应采用相应的光束质量管控技术,尽可能使抽运光保持较好的光束质量。

### 3.3 光克尔介质长度对径向束匀滑效果的影响

由于在实际应用中,抽运光在光克尔介质中产生的非线性小尺度自聚焦效应将随着光克尔介质长度的增加而加剧,因此本节重点讨论的是光克尔介质长度的影响。在计算时,取抽运光峰值强度  $I_p = 0.7 \text{ GW/cm}^2$ 。图 4 所示为不同的光克尔介质长度下,远场焦斑的形态及光克尔介质长度对束匀滑效果的影响。

由图 4(a)~(c)给出的计算结果可以看出,在基于动态波前调控的径向束匀滑方案中,不同的光克尔介质长度得到的远场焦斑的均匀性明显不同。分析图 4(d)所示的模拟结果可知,在本文所选取的

计算参数下,当光克尔介质长度  $d = 0.1 \text{ m}$  时,所得到的束匀滑效果最好。在不考虑抽运光小尺度自聚焦效应的理想情况下,抽运光通过光克尔效应附加给透射主激光束的调制相位将随光克尔介质长度的增加而增加,这有利于产生更加理想的束匀滑效果。而在考虑抽运光小尺度自聚焦效应后,当光克尔介质的长度较大时,抽运光在光克尔介质中传输时将产生明显的非线性小尺度自聚焦效应,致使远场焦斑均匀性受到明显影响,导致远场焦斑的光通量对比度明显上升。由此可见,在实际应用中,为了获得更理想的径向束匀滑效果,光克尔介质长度的选取存在最佳值。

## 4 结 论

通过建立基于动态波前调控的径向束匀滑方案物理理论模型,定量分析了抽运光小尺度自聚焦效应对束匀滑效果的影响,并重点讨论了光克尔介质类型、抽运光峰值强度以及光克尔介质长度的选取问题。结果表明:使用硝基苯作为光克尔介质可得到更佳的束匀滑效果。然而,随着抽运光峰值强度的增加,抽运光将在硝基苯中产生明显的小尺度自聚焦效应,致使束匀滑效果变差。并且当抽运光的光束质量下降时,束匀滑效果也会变差。此外,随着光克尔介质长度的增加,束匀滑效果呈现出先明显

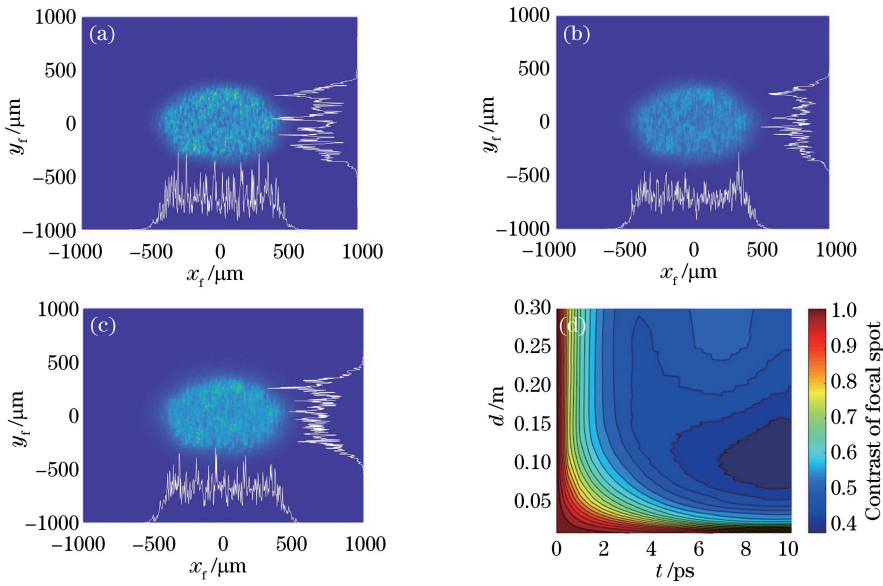


图 4 不同光克尔介质长度下的焦斑分布以及对比度。(a)焦斑分布,  $d=0.05\text{ m}$ ; (b)焦斑分布,  $d=0.1\text{ m}$ ; (c)焦斑分布,  $d=0.2\text{ m}$ ; (d)焦斑的对比度随积分时间和光克尔介质长度的变化

Fig. 4 Focal spot distributions and contrast under different optical Kerr medium lengths. (a) Focal spot distribution,  $d=0.05\text{ m}$ ; (b) focal spot distribution,  $d=0.1\text{ m}$ ; (c) focal spot distribution,  $d=0.2\text{ m}$ ; (d) contrast of focal spot versus integration time and optical Kerr medium length

改善而后变差的变化规律,即光克尔介质的长度存在最佳值。由此可见,基于动态波前调控的径向束匀滑方案中,为了获得更为理想的束匀滑效果,应综合考虑光克尔介质和抽运光的相关参数,以避免抽运光产生的小尺度自聚焦效应对束匀滑效果的不利影响。

此外,在基于动态波前调控的新型径向束匀滑方案中,由于抽运光是脉宽为数皮秒、单脉冲能量为数毫焦的脉冲串,且其占空比极高。因此,开展实验研究存在两大挑战,一方面是超高重复频率的数毫焦皮秒脉冲串的产生,另一方面是皮秒时间尺度的动态光斑的精确探测。这将是本课题组的下一步研究工作。

### 参 考 文 献

[1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, *et al.* The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.

[2] Zhang R, Su J, Hu D, *et al.* Research of beam smoothing technologies using CPP, SSD, and PS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9255: 92554B.

[3] Wen S L, Yan H, Zhang Y H, *et al.* Calculation and experiment of the focal spot caused by continuous phase plate with incident wavefront distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314001.

温圣林, 颜浩, 张远航, 等. 波前畸变下连续相位板焦斑的计算与实验 [J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314001.

[4] Desselberger M, Willi O. Measurement and analysis of Rayleigh-Taylor instability in targets driven by incoherent laser radiation [J]. *Physics of Fluids B*, 1993, 5(3): 896-909.

[5] Smalyuk V A, Boehly T R, Bradley D K, *et al.* Saturation of the Rayleigh-Taylor growth of broadband laser-imposed nonuniformities in planar targets [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(24): 5342-5345.

[6] Lehmburg R H, Schmitt A J, Bodner S E. Theory of induced spatial incoherence [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(7): 2680-2701.

[7] Li P, Wang W, Zhao R C, *et al.* Polarization smoothing design for improving the whole spatial frequency at focal spot [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 215202.

李平, 王伟, 赵润昌, 等. 基于焦斑空间频率全域优化的偏振匀滑设计 [J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 215202.

[8] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q. Improved uniformity of target illumination by combining a lens array and the technique of spectral dispersion [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(2): 023109.

[9] Rothenberg J E, Moran B D, Hennesian M A, *et al.* Performance of smoothing by spectral dispersion (SSD) on Beamlet [C]. *International Conference on*

- Solid State Lasers for Application, 1997: 313-322.
- [10] Rothenberg J E. Two-dimensional beam smoothing by spectral dispersion for direct-drive inertial confinement fusion [J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1995, 2633: 634-644.
- [11] Zhong Z Q, Hou P C, Zhang B. Radial smoothing for improving laser-beam irradiance uniformity [J]. Optics Letters, 2015, 40(24): 5850-5853.
- [12] Zhong Z Q, Hou P C, Zhang B. A novel radial beam smoothing scheme based on optical Kerr effect [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(9): 094207.  
钟哲强, 侯鹏程, 张彬. 基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案 [J]. 物理学报, 2016, 65(9): 094207.
- [13] Li T F, Hou P C, Zhang B. Parameters optimization for radial smoothing based on optical Kerr effect [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1114002.  
李腾飞, 侯鹏程, 张彬. 基于光克尔效应的径向匀滑方案参数优化 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1114002.
- [14] Hou P C, Zhong Z Q, Zhang B. Analysis and optimization of radial smoothing based on optical Kerr effect for irradiation improvement [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 85: 48-54.
- [15] Weng X F, Li T F, Zhong Z Q, *et al.* Analysis of illumination uniformity affected by small-scale self-focusing of a pump beam in the radial smoothing scheme [J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 8902-8907.
- [16] Li T F, Zhong Z Q, Zhang B. Novel dynamic wavefront control scheme for ultra-fast beam smoothing [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(17): 174206.  
李腾飞, 钟哲强, 张彬. 用于超快束匀滑的动态波前调控新方案 [J]. 物理学报, 2018, 67(17): 174206.
- [17] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National ignition facility laser performance status [J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [18] Zeng S G, Hu J, Wang F, *et al.* Pulse stacking scheme based on wavelength division multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514001.  
曾曙光, 胡静, 王飞, 等. 基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514001.
- [19] Feit M D, Fleck J A, Jr. Self-focusing of broadband laser pulses in dispersive media [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1992: UCRL-ID-112523.
- [20] Fleck J A, Jr, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. Applied Physics, 1976, 10(2): 129-160.
- [21] Zhao L, Sui Z, Zhu Q H, *et al.* Improvement and precision analysis of the split-step Fourier method in solving the general nonlinear Schrödinger equation [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4731-4737.  
赵磊, 隋展, 朱启华, 等. 分步傅里叶法求解广义非线性薛定谔方程的改进及精度分析 [J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4731-4737.
- [22] Lawson J K, Auerbach J M, English R E, *et al.* NIF optical specifications: the importance of the RMS gradient [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3492: 336-343.
- [23] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National Ignition Facility laser performance status [J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [24] Ganeev R A, Ryasnyansky A I, Baba M, *et al.* Nonlinear refraction in CS<sub>2</sub> [J]. Applied Physics B, 2004, 78(3/4): 433-438.
- [25] Kedenburg S, Steinmann A, Hegenbarth R, *et al.* Nonlinear refractive indices of nonlinear liquids: wavelength dependence and influence of retarded response [J]. Applied Physics B, 2014, 117(3): 803-816.
- [26] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids [J]. Soviet Journal of Experimental & Theoretical Physics Letters, 1966, 3(11): 471-476.