

基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案

钟哲强 侯鹏程 张彬

A novel radial beam smoothing scheme based on optical Kerr effect

Zhong Zhe-Qiang Hou Peng-Cheng Zhang Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 094207 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于六角格子光子晶体波导的高效全光二极管设计

High efficiency all-optical diode based on hexagonal lattice photonic crystal waveguide

物理学报.2016, 65(6): 064207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064207>

外腔镜非线性运动对激光回馈应力测量系统精度的影响及修正

Correction of error induced by nonlinear movement of feedback mirror in laser feedback stress measurement system

物理学报.2015, 64(8): 084208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084208>

用于直接驱动的快速变焦新方案

A novel fast zooming scheme for direct-driven laser fusion

物理学报.2015, 64(5): 054209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054209>

单光子调制锁定 Fabry-Perot 腔

Fabry-Perot cavity locked by using single photon modulation

物理学报.2012, 61(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.204203>

基于多路复用体全息光栅的角度放大器设计

Design of angular magnifier based on multiplexed volume holographic grating

物理学报.2012, 61(6): 064216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064216>

基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案*

钟哲强 侯鹏程 张彬†

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

(2015年12月4日收到; 2016年1月10日收到修改稿)

针对惯性约束聚变装置中提高靶面辐照均匀性的要求, 提出了一种基于光克尔效应的径向光束匀滑方案, 其基本原理是利用光克尔介质和周期性高斯脉冲光束相互作用实现对激光束透射波前附加周期性的球面位相调制, 以周期性地改变激光束远场焦斑尺寸, 进而引起远场焦斑内部散斑的快速径向扫动, 从而在积分时间内抹平靶面焦斑的强度调制, 实现径向方向的光束匀滑. 通过建立基于光克尔效应的径向光束匀滑的理论模型, 分析了焦斑形态及其径向匀滑特性, 并讨论了光克尔介质的选取和径向扫动特性. 结果表明, 基于光克尔效应的径向光束匀滑方案可以有效地实现远场焦斑内部散斑的周期性径向扫动, 从而在积分时间内快速改善靶面辐照均匀性.

关键词: 惯性约束聚变, 径向光束匀滑, 光克尔效应, 均匀性

PACS: 42.79.-e, 42.68.Ay, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.65.094207

1 引言

在激光驱动惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 装置中, 由于物理实验要求高功率激光装置可精密控制靶面光场分布, 因而广泛采用了各类空域和时域光束匀滑技术. 在空域束匀滑技术中, 连续相位板 (continuous phase plate, CPP) 作为纯相位元件, 能有效控制激光束靶面光斑轮廓^[1,2], 但由于激光束内部子光束之间的相干叠加, 其靶面光斑内部存在散斑. 文献^[1]提出了一种新的 CPP 设计方法, 文献^[2]则报道了 CPP 在神光 III 装置中的实验结果. 因此, 提出了以光谱角色散匀滑 (smoothing by spectral dispersion, SSD) 为代表的时域束匀滑技术来抑制散斑的存在, 以减小各种参量不稳定性效应的危害^[3,4]. 光谱角色散技术的基本原理是利用光栅对相位调制脉冲进行色散, 使激光束在靶面的散斑沿光栅色散方向快速扫动, 从而在较短的积分时间内提高靶面辐照均匀性. 这一技术的优点是在保持焦斑包络不变的前提

下, 能有效地抹平焦斑内部强度调制, 从而降低通量对比度^[5]. 文献^[3]介绍了神光 II 装置中用于二维 SSD 的电光调制器件, 文献^[4]则分析了 SSD 对激光束近场传输特性的影响. 然而, 一维光谱角色散匀滑技术 (1D-SSD) 仅能实现激光束远场散斑沿光栅色散方向的扫动, 导致其焦斑内部出现沿光栅色散方向的条纹状强度调制. 因此, 又提出了二维光谱角色散匀滑技术 (2D-SSD)^[6]和三方向光谱角色散匀滑技术^[7]. 但是, 二维光谱角色散中激光束在远场存在不可避免的相干现象, 致使焦斑内部强度调制的抹平不够充分, 而三方向光谱角色散匀滑技术则存在光路结构复杂、调节困难等缺点.

我们曾针对 ICF 直接驱动方式提出了一种基于电光效应的快速变焦方案^[8], 以实现在脉冲持续时间内 (纳秒量级) 控制打靶激光束的聚焦位置和焦斑大小. 进一步的分析表明, 快速变焦能引起靶面光斑内部散斑在径向方向产生扫动, 从而在积分时间内抹平强度调制, 提高靶面辐照均匀性. 相比于电光效应而言, 光克尔效应是一种三阶非线性效应, 其响应时间为亚皮秒量级, 介质的折射率与光

* 国家重大专项应用基础项目 (批准号: JG2014114) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

强度有关^[9]. 当抽运光为周期性高斯脉冲光束时, 光克尔介质的折射率可近似为周期性球面分布, 而激光束通过光克尔介质后的透射波前也将受到周期性球面位相调制. 因此, 可以利用光克尔介质和周期性高斯脉冲光束实现亚皮秒量级的快速变焦, 以实现靶面光斑内部散斑在径向方向的快速扫动, 从而在热匀滑时间内 (10 ps 左右) 提高靶面辐照均匀性^[10]. 由于激光束靶面光斑的均匀性在径向方向得到改善, 因而我们将这一束匀滑方式命名为“径向匀滑”(radial smoothing, RS). 本文重点介绍 ICF 装置中基于光克尔效应径向光束匀滑技术, 建立相应的物理模型, 与光谱角色散匀滑技术做了比较和分析. 在此基础上, 对光克尔介质的选取和径向扫动特性进行了讨论, 进而论证其有效性.

2 理论模型

2.1 径向光束匀滑方案

基于光克尔效应的径向光束匀滑技术的基本原理是: 在 ICF 驱动器光传输链中加入光克尔介质, 利用其与抽运光的相互作用实现对光传输链中激光束透射波前附加周期性球面位相调制, 以周期性地快速改变激光束远场焦斑尺寸, 进而引起靶面光斑内部散斑在径向方向的快速周期性扫动, 从而在径向方向上抹平靶面光斑强度调制, 提高靶面辐照均匀性. 由于要求径向光束匀滑的周期为皮秒或

亚皮秒量级, 因而要求子脉冲的脉宽为皮秒或亚皮秒量级, 子脉冲间的延时亦为皮秒或亚皮秒量级, 其时间波形如图 1 所示.

以 NIF 装置为例, 图 1 给出了在光传输链中的预放大系统和主放大系统之间加入光克尔介质的径向光束匀滑方案. 该径向匀滑方案中需要利用到皮秒激光器、光纤脉冲堆积单元、二向色镜、光克尔介质和滤光元件等. 光克尔介质在周期性高斯脉冲光束作用下产生周期性球面位相调制, 以实现激光束透射波前进行周期性附加位相调制. 激光束通过光克尔介质后, 再经由主放大单元、倍频单元和连续相位板, 最后经透镜聚焦到靶面^[11]. 由于激光束的透射波前受到周期性球面位相调制, 其远场焦斑尺寸产生快速变化, 进而引起远场焦斑内部散斑在径向方向快速扫动, 从而在积分时间内实现了激光束远场光斑的径向匀滑.

在径向光束匀滑方案中, 可采用脉冲堆积单元获得周期性高斯脉冲光束, 即利用分束器将皮秒激光器输出的单个高斯脉冲分成多个子高斯脉冲, 各子高斯脉冲经长度不同的光纤传输至振幅调制器, 再经合束器合束后得到周期性高斯脉冲光束. 为避免对后续光路中激光束的传输与放大产生影响, 选择波长与光传输链中基频光波长 (1053 nm) 不同的皮秒激光器, 如掺钛蓝宝石激光器 (808 nm)^[12]、掺 Yb³⁺ 的光纤激光器 (980 nm) 等^[13]. 如图 1 所示, 周期性高斯脉冲光束经透镜、二向色镜耦合至光传

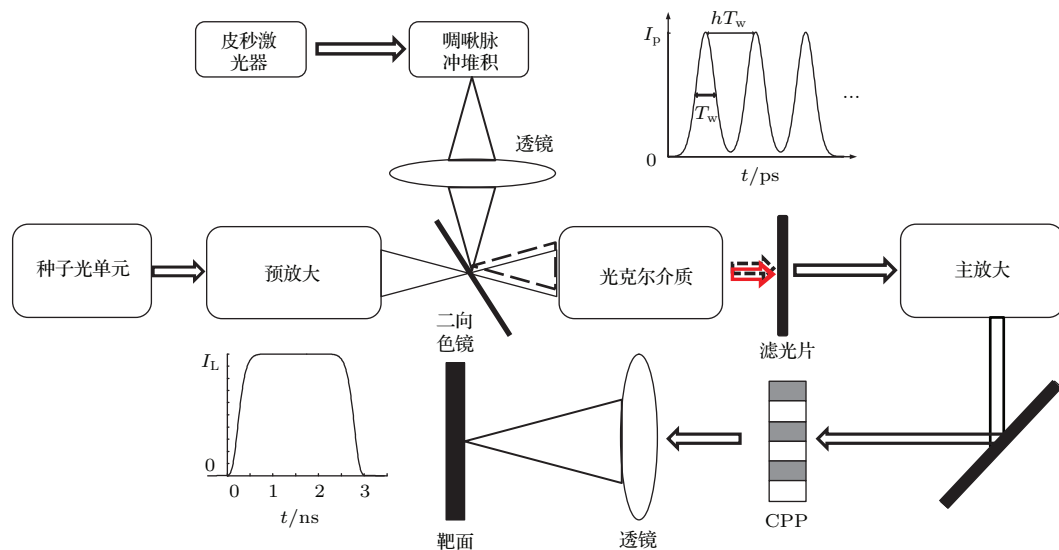


图 1 NIF 光传输链中的径向光束匀滑方案示意图

Fig. 1. Schematic illustration of radial smoothing in NIF beamline.

输链中,再经过光克尔介质后,被滤光片、旋光片等滤光元件所滤除,以避免对后续光路产生影响.在这一径向匀滑方案中,由于抽运光和主脉冲激光均是脉冲运转的,为方便讨论而不失一般性,将主激光脉冲设定为超高斯脉冲,且与抽运光脉冲完全同步.

2.2 物理模型

在高功率激光装置中,由于激光束不可避免地存在位相畸变和振幅调制,其近场光场可表示为

$$E_{\text{near}} = A_0 [1 + a(x, y)] \times \exp \left[- \left(\frac{x}{w_{\text{pre}}} \right)^{2N} - \left(\frac{y}{w_{\text{pre}}} \right)^{2N} \right] \times \exp[i\phi_{\text{initial}}(x, y)], \quad (1)$$

式中, A_0 为归一化振幅, w_{pre} 为预放端激光束的 $1/e$ 束腰半径, N 为超高斯阶数, $a(x, y)$ 为振幅调制, $\phi_{\text{initial}}(x, y)$ 为高斯随机位相分布.

当激光束经过光克尔介质时,由于光克尔介质与抽运光(即周期性高斯光束)的相互作用,激光束的透射波前可表示为

$$\Phi = kdn_0 + kdn_2 \exp \left[- \left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2} \right) \right] \sum_m I_m \times \exp \left[- 2 \log(2) \left(\frac{t - mhT_w}{T_w} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为基频光波长; n_0 为光克尔介质本征折射率, n_2 为光克尔系数, d 为光克尔介质厚度; w_x, w_y 为抽运高斯光束的 $1/e$ 半宽, I_m 为各子高斯脉冲峰值强度, h 为时间延迟因子, T_w 为子高斯脉冲的半高全宽脉宽.

激光束经过扩束、三倍频和连续相位板,最终经透镜聚焦.根据柯林斯公式并做进一步简化,可得其靶面光场为

$$E_f = \frac{\exp(ikL)}{iB\lambda_0/3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{near}} \exp(i\Phi) \times \exp \left[\frac{ik'}{B} (-xx_f - yy_f) \right] dx dy, \quad (3)$$

式中, $L = 2f$, f 为透镜焦距; $k' = 6\pi/\lambda_0$, 为三倍频光波矢; $B = f/M$, M 为预放大系统至主放大系统的扩束比; $(x, y), (x_f, y_f)$ 分别为近场和远场坐标.

于是,在积分时间 Δt 内,靶面光强可表示为

$$I = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E_f|^2 dt. \quad (4)$$

基于上述建立的径向光束匀滑方案中的物理模型,可对径向光束匀滑效果进行分析,从而与传统的光谱角色散匀滑技术进行比较.在此基础上,还可进一步分析脉冲堆积参数、抽运光峰值强度、脉宽等参数对束匀滑效果的影响.

3 束匀滑效果分析

在径向光束匀滑方案中,抽运光参数为:峰值强度 $I_m = 50 \text{ GW/cm}^2$, 高斯光束 $1/e$ 半宽 $w = 21 \text{ mm}$. 激光束在预放大系统中的口径为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 在主放大系统中的口径为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$, 扩束比 $M = 12$, 最后经焦距 $f = 7.7 \text{ m}$ 的透镜聚焦.此外,考虑到激光束存在不可避免的振幅调制和位相畸变,不妨设其振幅调制深度为 1.2, 位相畸变(PV)值为 $2\lambda_0$ [14]. 为便于比较和分析,我们还给出了典型一维、二维光谱角色散技术下焦斑的匀滑效果.数值模拟时采用的 SSD 参数为:调制频率 $\nu_m = 17 \text{ GHz}$, 调制深度 $\delta = 2.4$, 带宽 $\Delta\lambda \approx 0.3 \text{ nm}$, 光栅色散系数为 $2156.8 \text{ } \mu\text{rad/nm}$ (对应于一个色循环数) [15,16].

为了更好地说明径向光束匀滑的效果,令积分时间为 10 ps (即等离子体热匀滑时间);相应地,径向光束匀滑方案中单个高斯脉冲的周期亦为 10 ps , 脉宽为 $T_w = 2.2 \text{ ps}$, 时间延迟因子 $h = 3.3$.

3.1 焦斑形态分析

以多层石墨烯为例,其参数为:光克尔系数 $n_2 = 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{W}$, 厚度 $d = 5 \text{ nm}$, 口径大于 30 mm [17,18]. 图 2 中分别给出了不使用 CPP 时, 1D-SSD 和径向匀滑的焦斑光强分布及其光束匀滑方向.

从图 2(a) 和图 2(b) 中可以看出,在不使用连续相位板时, 1D-SSD 的焦斑沿光栅色散方向,即 x 或 y 方向扫动,而径向匀滑的焦斑有所增大,其匀滑方向为径向,且沿各个方向都存在.

图 3(a) 和图 3(b) 中分别给出了使用 CPP 时, 1D-SSD 和径向匀滑的焦斑光强分布(积分时间 $\Delta t = 10 \text{ ps}$).为实现多方向束匀滑,以进一步改善靶面辐照均匀性,图 3(c) 进一步给出了 1D-SSD 和径向匀滑联合使用的焦斑光强分布.为定量分析这三种方案对焦斑内部热斑的改善程度,采用

fractional power above intensity (FOPAI) 曲线来评价^[19], 即

$$FOPAI = \frac{\int_{\text{where } I(x,y) > I_{\text{mean}}}^A I(x,y) dx dy}{\int_A I(x,y) dx dy}, \quad (5)$$

式中, A 为焦斑观察面积, I_{mean} 为平均光强. FOPAI 曲线左移表示束匀滑方案对焦斑内部的改

善效果越好. 图 3(d) 中进一步给出了图 3(a)—(c) 中的焦斑对应的 FOPAI 曲线.

在无任何相位调制器时, 焦斑为非轴对称离散光斑; 而在单独使用 CPP 时, 焦斑为所设计的椭圆光斑. 从图 3(a) 中可以看出, 1D-SSD 的焦斑仅在单一方向得到了匀滑, 存在明显的条纹状强度调制; 而径向匀滑的焦斑则因快速变焦的作用, 焦斑内部斑纹在径向方向均得到匀滑, 从而避免了条

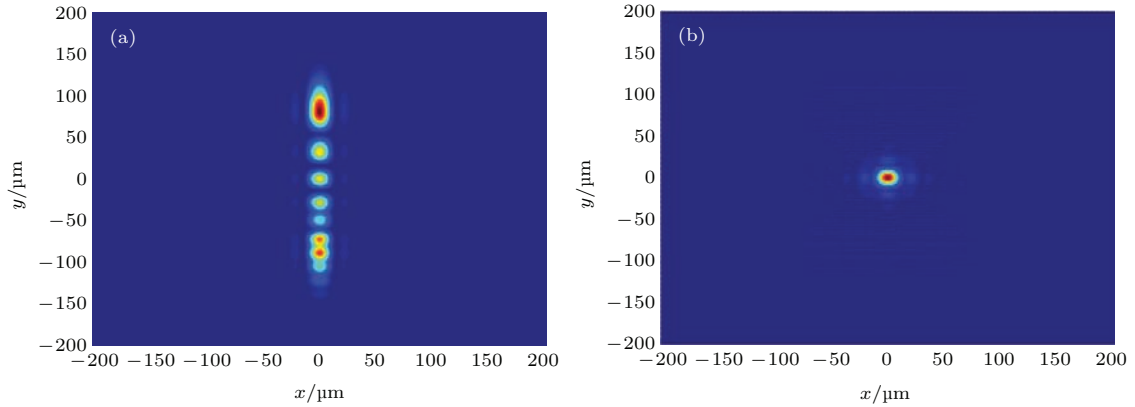


图 2 (网刊彩色) 不使用 CPP 且积分时间 $\Delta t = 100$ ps 时焦斑光强分布 (a) 1D-SSD; (b) RS

Fig. 2. (color online) Comparison of focal spots without CPP at the integral time $\Delta t = 100$ ps: (a) 1D-SSD; (b) radial smoothing.

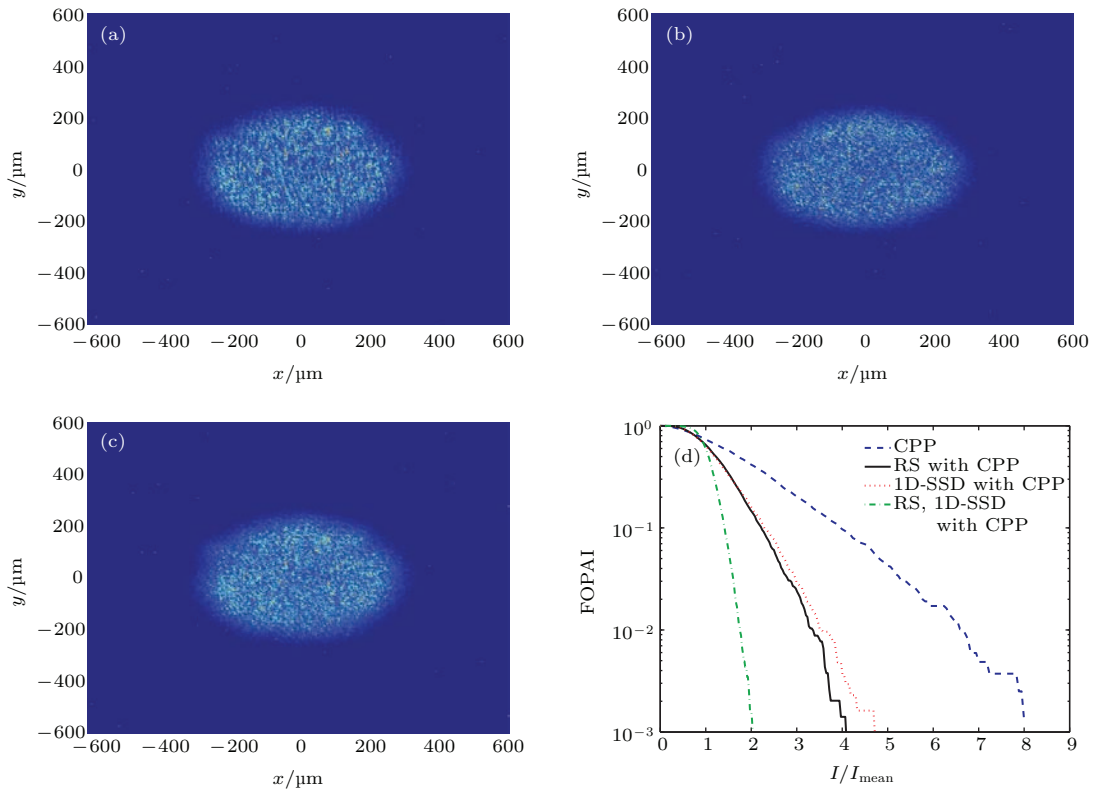


图 3 (网刊彩色) 焦斑光强分布及其 FOPAI 曲线 (a) 1D-SSD+CPP; (b) RS+CPP; (c) 1D-SSD, RS+CPP; (d) FOPAI 曲线

Fig. 3. (color online) Focused intensity distributions and related FOPAI curves: (a) 1D-SSD+CPP; (b) RS+CPP; (c) 1D-SSD, RS+CPP; (d) FOPAI curves.

纹状强度调制的产生(图3(b)). 图3(c)则说明了1D-SSD和径向匀滑联用之后,能同时在径向和光栅色散方向抹平焦斑内部斑纹,达到更好的匀滑效果. 分析图3(d)可知,相比于单独使用CPP, CPP和1D-SSD或径向匀滑的联用均能有效地抑制焦斑内部热斑比例;相比于单独使用1D-SSD或径向匀滑,1D-SSD和径向匀滑联用的FOPAI曲线左移,进一步表明这一方案能进一步减少靶面焦斑内部斑纹比例,极大地改善靶面辐照特性.

值得指出的是,径向匀滑和连续相位板联用之后,通过优化抽运光与连续相位板的参数可以使焦斑在径向方向的扫动范围为数十微米,与1D-SSD在光栅色散方向的扫动范围相当. 因此,在间接驱动装置中,径向匀滑方案不会导致“堵孔”效应的产生;而在直接驱动装置中,径向匀滑也不会加剧交叉光束能量转移^[20]这一问题. 相反地,径向匀滑在以快速变焦的方式改善靶面辐照均匀性时,也能在一定程度上抑制交叉光束能量转移的发生^[21].

3.2 光克尔介质的选取

当径向光束匀滑方案中光克尔介质分别为石墨烯、液体二硫化碳(CS₂)和硫系玻璃时,对抽运光的参数进行比较和分析. 三种光克尔介质的典型参数如表1所列. 图4给出了达到相同的束匀滑效果下,三种光克尔介质所需的抽运光强度变化曲线.

表1 石墨烯、CS₂和硫系玻璃的参数
Table 1. Parameters of graphene, CS₂ and chalcogenide glass.

材料	光克尔系数 /cm ² ·W ⁻¹	响应时间	损伤阈值 /GW·cm ⁻²	厚度
石墨烯 ^[17,18]	~ 10 ⁻⁷		~ 70	1 nm
CS ₂ ^[22,23]	2.1 × 10 ⁻¹⁵	<1 ps	>200	10 mm
硫系玻璃 ^[24,25]	1.2 × 10 ⁻¹³		—	10 mm

图4表明,石墨烯、CS₂和硫系玻璃这三类材料均能产生足够大的径向扫动范围,可以获得有效的束匀滑效果. 虽然CS₂和硫系玻璃的光克尔系数比石墨烯低,但其厚度可达毫米量级,因而仍可满足径向匀滑的需求. 图5中则给出了分别采用CS₂和硫系玻璃时,径向匀滑效果随光克尔介质的厚度的变化曲线. 其中,抽运光峰值强度均为

100 GW/cm². 由于石墨烯的光克尔效应随着其厚度的增加而改变甚至消失^[26,27],在此暂不做讨论.

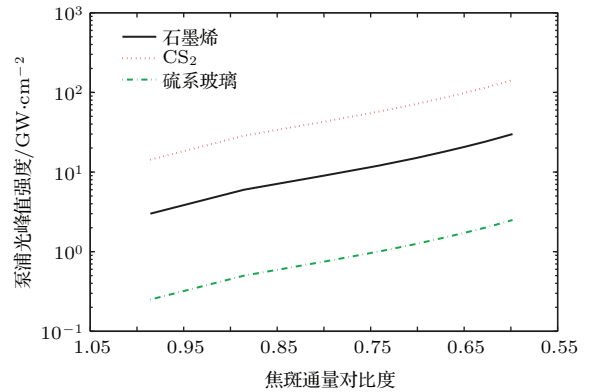


图4 采用不同光克尔介质时抽运光强度随束匀滑效果的变化
Fig. 4. Intensity variations of pump laser with the smoothing effect, when different optical Kerr medium is applied.

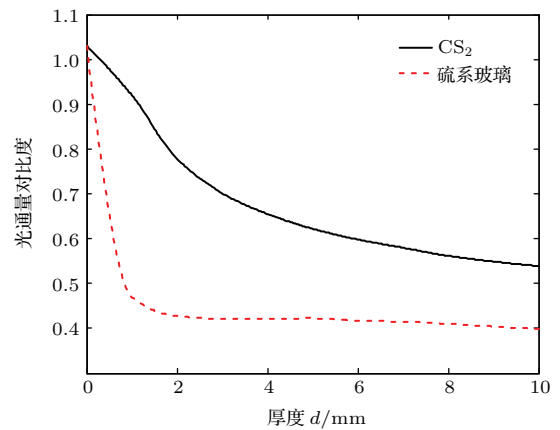


图5 径向匀滑效果随介质厚度的变化
Fig. 5. Variation of radial smoothing effect with the thickness of optical Kerr medium.

从图5中可以看出,在抽运光峰值强度为100 GW/cm²时,焦斑的光通量对比度均随着光克尔介质厚度的增大而减小. 与CS₂相比,硫系玻璃所需的厚度更小,因而在相对低的抽运光强度下也能达到相同的径向匀滑效果. 然而,随着硫系玻璃厚度的增加,其光通量对比度几乎保持不变;并且,随着厚度的进一步增加,其附加球面位相调制的PV值进一步增加,将会导致焦斑尺寸过大,从而加剧“堵孔”效应.

目前,石墨烯的光克尔性能最好,但其技术工艺尚未成熟,难以重复地制取性能一致的石墨烯. 而硫系玻璃各方面性能均较好,但其损伤阈值尚不

清楚 [21,25]. 因此, 我们选择 CS_2 来开展进一步的分析讨论.

3.3 径向扫动特性

在径向匀滑方案中, 焦斑内部散斑的径向扫动特性是至关重要的. 径向扫动范围由抽运光峰值强度决定, 而径向扫动速度则取决于抽运光脉冲时间波形. 图 6 中给出了周期性高斯脉冲作为抽运光时, 归一化的时间波形及其一阶导数.

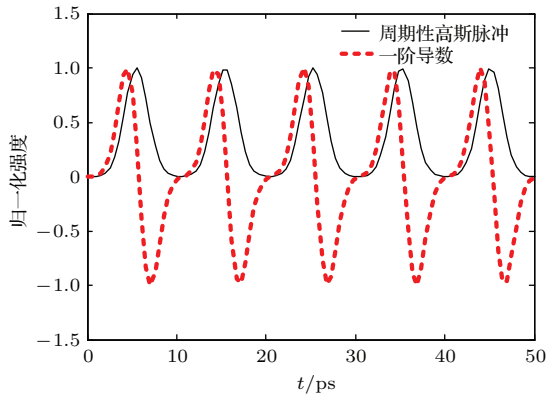


图 6 (网刊彩色) 抽运光时间波形及其一阶导数
Fig. 6. (color online) Pulse wave of the pump laser and its first-order derivative.

由于周期性高斯脉冲两两之间的强度过低且变化缓慢(如图 6 所示), 导致焦斑径向扫动范围过小且扫动速度过慢, 从而影响束匀滑效果. 为此, 可以采用下面两种方式进行改善: 1) 采用三角波脉冲时间波形, 以使径向扫动速度为常数; 2) 使抽运光提前或延迟半个周期(即 5 ps), 从而在更短的时间内达到更好的束匀滑效果, 如图 7(a) 所示. 图 7(b) 中则给出了三种情况下光通量对比度随积分时间的变化规律.

从图 7(b) 中可以看出, 激光束与抽运光的时间同步将极大地影响径向匀滑特性. 当激光束与抽运光完全同步时, 焦斑的光通量对比度随积分时间的增长而迅速减少, 而后在某一值附近振荡; 而当抽运光提前或延迟半个周期时, 焦斑光通量对比度能在极短时间内(约 4 ps)达到最低, 而后亦在某一值附近振荡. 因此, 在现有的抽运方案中, 将抽运光提前/延迟半个周期能更快地改善辐照均匀性. 值得指出的是, 由于主脉冲激光持续时间为纳秒量级, 而抽运光中堆积子脉冲持续时间为皮秒量级, 且靶面辐照均匀性为数十皮秒时间累积的结果, 因

而对主脉冲激光与抽运光的同步要求为皮秒量级. 与周期性高斯脉冲相比, 三角波脉冲因其径向匀滑速度保持不变, 因而其光通量对比度快速减小, 并最终保持不变. 图 7(b) 中进一步给出了径向光束匀滑方案中, 所期望的理想光通量对比度随积分时间的变化规律. 从中可以看出, 径向匀滑的最佳目标是焦斑光通量对比度随时间快速减小, 最后稳定在最佳辐照均匀性, 并且在这一过程中引入的径向扫动在合理范围内, 以避免产生“堵孔”效应.

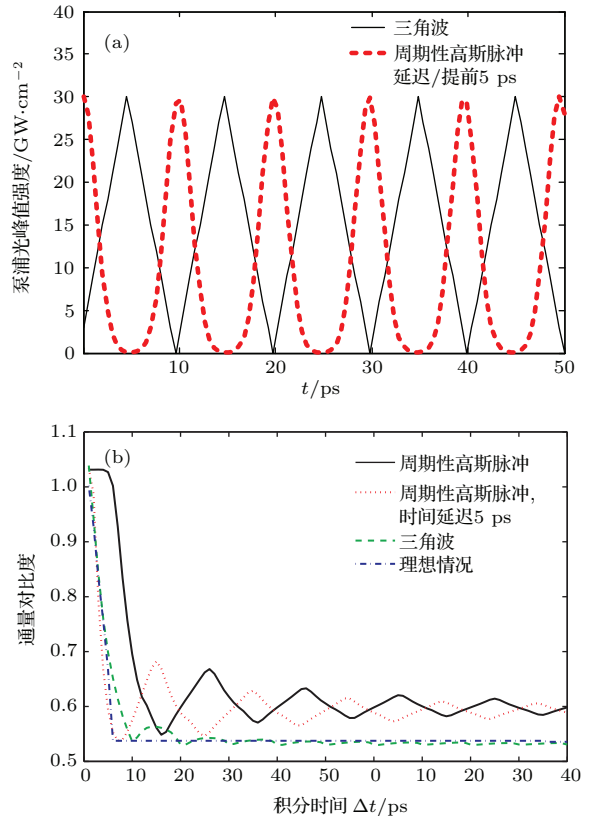


图 7 (网刊彩色) 径向扫动速度的比较 (a) 三角波和周期性高斯脉冲时间波形(延迟或提前 5 ps); (b) 光通量对比度随积分时间的变化

Fig. 7. (color online) Comparison of radial smoothing velocity: (a) Pulse temporal shapes of triangle wave and periodic Gaussian pulses with 5 ps delay or ahead; (b) variation of contrast with the integral time.

在径向光束匀滑方案中, 为满足在等离子体热匀滑时间内(约 10 ps)提高靶面辐照均匀性, 要求径向光束匀滑的周期为皮秒或亚皮秒量级, 因而要求抽运光的堆积子脉冲持续时间为皮秒或亚皮秒量级, 子脉冲间的延时亦为皮秒或亚皮秒量级. 另外, 抽运光堆积子脉冲峰值强度的抖动将降低径向光束匀滑效果, 因而需要通过进一步优化抽运光参数和提高光强稳定性以获得最佳的辐照均匀特性.

4 结 论

针对ICF装置中提高靶面辐照均匀性的需求,提出了一种基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案.这一方案利用光克尔介质与周期性高斯脉冲光束相互作用产生的球面位相调制改变激光束的透射波前,使其焦斑尺寸快速变化,进而引起焦斑内部散斑的径向扫动,从而在径向方向改善辐照均匀性.与传统的光谱角色散匀滑技术不同的是,径向光束匀滑存在以下两个特点:1)通过快速变焦的方式实现焦斑在径向方向的匀滑,避免了条纹状强度调制的产生;2)径向匀滑和光谱色散联合使用之后,能多方向地抹平焦斑强度调制,大幅度改善靶面辐照均匀性.结果表明:本文提出的径向光束匀滑方案能通过采用光克尔介质和周期性高斯脉冲光束实现对焦斑的径向匀滑,快速改善辐照均匀性.

参考文献

- [1] Yang C L, Yan H, Wang J, Zhang R Z 2013 *Opt. Express* **21** 11171
- [2] Shui M, Chu G B, Xing J T, Wu Y C, Zhu B, He W H, Xi T, Gu Y Q 2015 *Chin. Phys. B* **24** 094301
- [3] Jiang Y E, Li X C, Zhou S L, Fan W, Lin Z Q 2013 *Chin. Opt. Lett.* **05** 58
- [4] Fan X M, Lü Z W, Lin D Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 124206
- [5] Regan S P, Marozas J A, Kelly J H, Boehly T R, Donaldson W R, Jaanimagi P A, Keck R L, Kessler T J, Meyerhofer D D, Seka W, Skupsky S, Smalyuk V A 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1483
- [6] Regan S P, Marozas J A, Craxton R S, Kelly J H, Donaldson W R, Jaanimagi P A, Jacobs-Perkins D, Keck R L, Kessler T J, Meyerhofer D D, Sangster T C, Seka W, Smalyuk V A, Skupsky S, Zuegel J D 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 998
- [7] Miyaji G, Miyanaga N, Urushihara S, Suzuki K, Matsuoka S, Nakatsuka M, Morimoto A, Kobayashi T 2002 *Opt. Lett.* **27** 725
- [8] Zhong Z Q, Hu X C, Li Z L, Ye R, Zhang B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 054209 (in Chinese) [钟哲强, 胡小川, 李泽龙, 叶荣, 张彬 2015 物理学报 **64** 054209]
- [9] Ishizumi A, Kasami M, Mishina T, Yamamoto S, Nakahara J 2003 *High Pressure Research* **23** 201
- [10] Emery M H, Gardner J H, Lehmborg R H, Obenshain S P 1991 *Phys. Fluids B* **3** 2640
- [11] Shaw M, House R 2015 *Proc. SPIE* **9345** 93450E
- [12] Wang P, Zhao H, Wang Z H, Li D H, Wei Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4161 (in Chinese) [王鹏, 赵环, 王兆华, 李德华, 魏志义 2006 物理学报 **55** 4161]
- [13] Li W J 2013 *M. S. Dissertation* (Jilin: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [李文景 2013 硕士学位论文 (吉林: 长春理工大学)]
- [14] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Sources J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3546
- [15] Liu L Q, Zhang Y, Geng Y C, Wang W Y, Zhu Q H, Jing F, Wei X F, Huang W Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 164201 (in Chinese) [刘兰琴, 张颖, 耿远超, 王文义, 朱启华, 景峰, 魏晓峰, 黄晚晴 2014 物理学报 **63** 164201]
- [16] Wisoff P J, Bowers M W, Erbert G V, Browning D F, Jedlovec D R 2004 *Proc. SPIE* **5341** 146
- [17] Feng Q 2013 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: Hunan University) (in Chinese) [冯琦 2013 博士学位论文 (长沙: 湖南大学)]
- [18] He J F, Wu D K, Wang Q S, Zhu C J, Wu Z 2011 *Opt. Prec. Engineer.* **19** 470 (in Chinese) [贺俊芳, 吴登科, 王屹山, 朱长军, 吴真 2011 光学精密工程 **19** 470]
- [19] Williams E A 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056310
- [20] Myatt J F, Zhang J, Short R W, Maximov A V, Seka W, Froula D H, Edgell D H, Michel D T, Igumenshchev I V, Hinkel D E, Michel P, Moody J D 2014 *Phys. Plasmas* **21** 055501
- [21] Froula D H, Kessler T J, Igumenshchev I V, Betti R, Goncharov V N, Huang H, Hu S X, Hill E, Kelly J H, Meyerhofer D D, Shvydky A, Zuegel J D 2013 *Phys. Plasmas* **20** 840
- [22] Wohlfarth C 2008 *Landolt-Börnstein-Group III Condensed Matter* **47** 36
- [23] Couris S, Renard M, Faucher O, Lavorel B, Chaux R, Koudoumas E, Michaut 2003 *Chem. Phys. Lett.* **369** 318
- [24] Zakery A, Elliott S R 2003 *J. Non-Cryst. Solids* **330** 1
- [25] Lenz G, Zimmermann J, Katsufuji T, Lines M E, Hwang H Y, Spälter S, Slusher R E, Cheong S W, Sanghera J S, Aggarwal I D 2000 *Opt. Lett.* **25** 254
- [26] Zhang H, Virally S, Bao Q, Ping L K, Serge M, Nicolas G, Kockaert 2012 *Physics: Optics arXiv*: **1203** 5527
- [27] Wu L H, Dai S X, Zhang P Q, Liu Z J, Wang X S, Shen X, Xu T F 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 171 (in Chinese) [吴丽华, 戴世勋, 张培晴, 刘自军, 王训四, 沈祥, 徐铁峰, 聂秋华 2015 中国激光 **42** 171]

A novel radial beam smoothing scheme based on optical Kerr effect*

Zhong Zhe-Qiang Hou Peng-Cheng Zhang Bin[†]

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(Received 4 December 2015; revised manuscript received 10 January 2016)

Abstract

Laser-beam illumination uniformity is a key issue in inertial confinement fusion facilities. In order to fulfill the requirement of improving illumination uniformity, a radial smoothing (RS) scheme is proposed. For smoothing the focal-spot pattern on a short time scale compared with the hydrodynamic response time of the target, the optical Kerr effect with extremely short response time is taken into consideration. The basic principle of RS based on optical Kerr effect is that by using the interaction between optical Kerr medium and periodic Gaussian pulses to generate a periodic spherical phase to be added at the wavefront of laser transmission wave, change the focal-spot size of the laser beam in far field, and further induce the fast radial redistribution of the speckles inside the focal spot in far field, and further induce the fast radial redistribution of the speckles inside the focal spot in far field. This fast radial redistribution of the speckles smoothes the intensity modulation of the focal spot on the target and eventually achieves the beam smoothing in the radial direction. The application of RS in the beamline is detailed. The optical Kerr medium is inserted in the front-end of the beamline, before the laser beam is injected into the main amplifier. The periodic Gaussian pulse for pumping the optical Kerr medium is obtained by the pulse stacking system based on fibers. The pulse width of stacked Gaussian pulse and the time delay between Gaussian pulses are set to be on a picosecond time scale or subpicosecond time scale. The induced refractive index of the optical Kerr medium by the pump laser fits spherical distribution with periodic variation, and results in the radial distribution of the speckles in focal plane. By establishing the theoretical model of the radial beam smoothing scheme implemented with continuous phase plate (CPP), the focusing characteristics of laser beam with RS and CPP are discussed in detail. The influences of the selection of optical Kerr medium and the characteristics of the radial redistribution on the radial smoothing effect are simulated and analyzed. Results indicate that the RS based on optical Kerr effect could efficiently achieve the periodic radial redistribution of the speckles on focal plane, and therefore improves the illumination uniformity in the radial direction while eliminating the stripe pattern presented in far field by one-dimensional smoothing spectral dispersion (SSD). The smoothing performance of RS is different from that of the conventional SSD due to its radial smoothing direction. Moreover, the combined application of RS with continuous phase plate could achieve a better smoothing level with a shorter time. The utilization of radial smoothing scheme in high power laser system may significantly improve the laser-beam irradiation with little influence on the performance of the beamline.

Keywords: inertial confinement fusion, radial smoothing, optical Kerr effect, uniformity

PACS: 42.79.-e, 42.68.Ay, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.65.094207

* Project supported by the Basic Research Program of the National Major Project of China (Grant No. JG2014114).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangbinff@sohu.com