

时空复合激光预放大系统研究

王雅民^{1,2}, 王江峰^{1*}, 郭江涛¹, 卢兴华¹, 黄大杰¹, 王晓琴^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 在激光惯性约束核聚变(ICF)实验中,为了满足打靶光束动态聚焦的需求,提出了通过时空复合激光预放大系统实现动态聚焦的技术路线。基于菲涅耳衍射传输理论,利用快速傅里叶变换的数值模拟方法,建立了时空复合光束的传输模型,分析了滤波器小孔尺寸、软化因子、消光比以及相位差等多种因素对时空复合光束传输效果的影响,并进行了实验验证。初步实验结果与模拟结果较为吻合,这可有效支撑对时空复合光束各项传输参数的优化,为后续时空复合光束的传输放大提供指导。所提出的技术下一步将用于高功率激光装置预放段的时空复合系统,支持高功率激光装置动态聚焦打靶实验研究。

关键词 激光光学; 时空复合; 预放大系统; 动态聚焦; 光束传输; 激光放大器

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2405001

1 引言

惯性约束核聚变(ICF)是实现受控核聚变技术的重要途径,典型的一种 ICF 为激光驱动惯性约束核聚变,需要高功率激光装置实现^[1],如美国利弗莫尔实验室(LLNL)的 NIF 装置^[2]、法国 LMJ 装置和我国中国科学院上海光学精密机械研究所的神光系列装置^[3]。高功率激光装置主要包含前端注入系统、预放大系统、主放系统、终端光学系统、测量系统及靶场系统等部分^[4]。各国围绕高功率激光装置开展了快点火、中心点火等多种点火方案,目前最先进的是基于间接驱动的 NIF 装置,激光输出能量超过 1.8 MJ^[1]。由于存在间接驱动能量耦合效率较低的问题,NIF 现有装置仍未实现点火。

近期,Zhang 等^[5]提出了一种利用双锥点火(DCI)实现 ICF 的新方案,该方案能显著降低压缩和加热激光脉冲的能量需求,增强压缩和加热过程的鲁棒性,克服了常规点火方案所面临的困难,具有良好的应用前景。在 DCI 实验方案的准等熵压缩过程中,高功率激光经过聚焦后轰击金属锥

内的靶材料,锥内填充的靶材料与光束接触的面积会随之急剧减小,因此入射光束焦斑需随时间的推移而减小。DCI 实验对打靶光束的控制能力提出了更高的要求,基于此提出了打靶光束动态聚焦的实验需求。2013 年,Froula 等^[6]基于 OMEGA 装置提出了双态变焦的实验方案^[6],在时域与空域都彼此分离的一束圆环形光与一束互补的圆形光,经过变焦相位板(ZPP)后,聚焦形成两个大小不同的焦斑用于打靶。在双锥点火实验方案中,动态聚焦过程与此类似,需要两束时空分离的脉冲光,依次进入预放大系统和后续放大系统,进行传输放大,并利用相位板进行波前调制及焦斑匀滑。相位板对合束的内外两个光斑进行不同类型的调制,最后通过终端组件聚焦形成两个不同的焦斑,在时间上先后对靶材料进行辐照,进行物理实验。基于动态聚焦物理实验对高功率激光装置的要求,本文提出了一种实现时空复合的光束调控设计方案,该方案能够支持动态聚焦需求,主要由预放系统中的光束控制模块实现。作为高功率激光装置的核心系统,预放系统能够灵活地实现高功率激光装置前级放大与输出特征的

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-05-16; 录用日期: 2021-05-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA25020307)

通信作者: *wajfeng@163.com

全域参数控制^[7], 可对时空复合光束的各项参数进行精密调控。

本文提出了基于时空复合预放大激光系统以实现动态聚焦的技术路线, 以菲涅耳衍射传输理论以及快速傅里叶变换的数值模拟方法为基础, 建立了时空复合光束的空间传输模型, 对时空复合光束空间传输特性的关键技术指标进行理论分析, 并进行初步实验验证, 该技术为时空复合光束系统的后续传输放大提供设计参考, 下一步将用于动态聚焦实验中, 以支持双锥点火方案的实施。

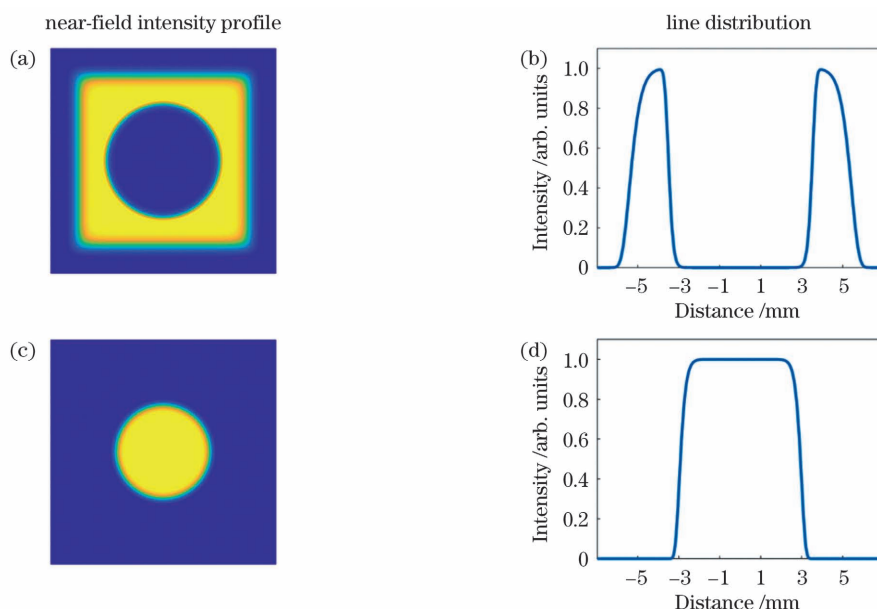


图 1 近场强度分布和线分布。(a)(b) 光束 1; (c)(d) 光束 2

Fig. 1 Near-field intensity profiles and line distributions of beam 1 and beam 2. (a)(b) Beam 1; (c)(d) beam 2

实现时空复合光束的总体技术方案如图 2 所示, 主要包括由本课题组自主研发的由全光纤种子源和 LD 泵浦的钕玻璃再生激光放大器组成的注入光源、近场控制、光谱控制、空间滤波、合束等几部分。光束 1 和光束 2 的种子脉冲分别来自两套前端种子源系统, 分别经过独立的再生放大器进行放大^[7-8], 因此内外环光束参数具有独立精密调控能

2 基本原理

2.1 时空复合光束概述

基于双锥点火方案中动态聚焦的实验需求, 时空复合光束需要一束外方内圆的环形光(光束 1)与一束内嵌的圆形光(光束 2), 如图 1(a)、(c)所示。理想情况下, 光束 1 与光束 2 在时域与空域都彼此分离, 为了降低光束衍射传输引入的调制对近场的影响, 光束 1 与光束 2 边沿需要设计为强度渐变的“软边”, 如图 1(b)、(d)所示。

力。两束输出光分别经本课题组自行研制的液晶光寻址空间光调制器(OASLM)^[9]和软边光阑整形后, 被整形为光束 1 与光束 2。对经近场整形的光束进行光谱控制, 包括谱色散匀滑(SSD)和增益窄化控制等, 之后将光束注入后续预放和主放系统。经过多级传输放大后, 光束 1 与光束 2 分别聚焦, 之后进行打靶。

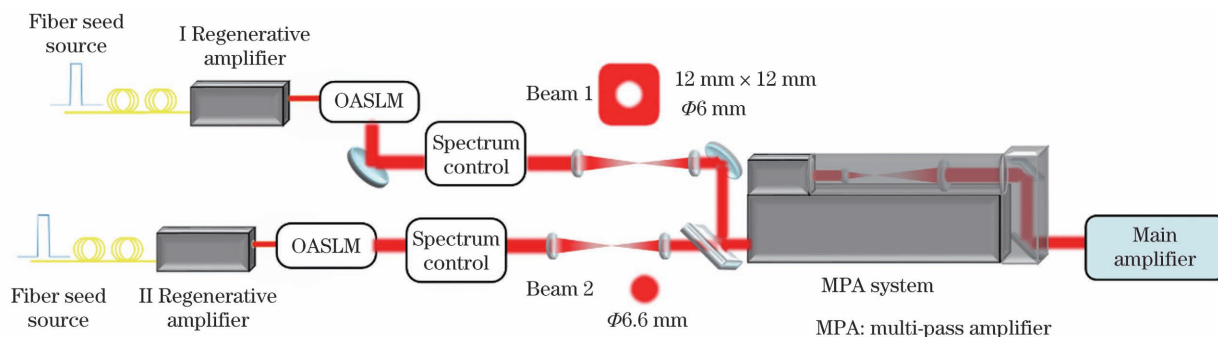


图 2 时空光束复合方案示意图

Fig. 2 Schematic of spatial and temporal beam combination

2.2 时空复合光束衍射传输模型

时空复合光束可以表示为

$$u(x, y, t) = u_{01}(x, y, t) \times u_{02}(x, y, t) = \left\{ a_1 \exp \left[-\left(\frac{x}{w_{11}} \right)^{n_{11}} \right] \exp \left[-\left(\frac{y}{w_{11}} \right)^{n_{11}} \right] - a_1 \exp \left[-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{w_{12}} \right)^{n_{12}} \right] \right\} \times b_1 \exp \left[-\left(\frac{t}{\tau_1} \right)^{n_{13}} \right] \times a_2 \exp \left[-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{w_2} \right)^{n_{21}} \right] b_2 \exp \left[-\left(\frac{t}{\tau_2} \right)^{n_{22}} \right], \quad (1)$$

式中: $u_{01}(x, y, t)$ 为光束 1 在空域和时域的复振幅分布; $u_{02}(x, y, t)$ 为光束 2 在空域和时域的复振幅分布; a_1 和 a_2 分别为光束 1 和光束 2 的空间强度振幅; w_{11} 和 w_{12} 分别为光束 1 外边和内边强度 $1/e^2$ 处束宽; $n_{11}, n_{12}, n_{13}, n_{21}, n_{22}$ 为超高斯阶数; w_2 为光束 2 强度 $1/e^2$ 处的束宽; τ_1 和 τ_2 分别为光束 1 与光束 2 的时域宽度; b_1 和 b_2 分别为光束 1 与光束 2 的时域强度振幅。使用时域超高斯波形[(1)式]举例, 实际物理实验中会定制不同类型的各种复杂波形^[7]。

光束的空间传输过程可以写为光场复振幅与其脉冲响应的卷积:

$$u(x, y) =$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} u(x_0, y_0) h(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0, \quad (2)$$

$$h(x, y) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp \left[\frac{jk}{2d} (x^2 + y^2) \right], \quad (3)$$

式中: λ 为光波长, 本实验采用的光波长为 1053 nm; d 为空间传输距离; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; (x_0, y_0) 表示起始物平面坐标; (x, y) 表示观察面坐标; $u(x, y)$ 为观察面的光波复振幅分布; $u(x_0, y_0)$ 为起始物面的光波复振幅分布; $h(x, y)$ 为衍射传输系统的脉冲响应。结合菲涅耳衍射传输与傅里叶变换理论, 传播方程可以写为

$$\bar{u}(f_x, f_y) = \text{FFT}^{-1} \left\{ \text{FFT} \{ u_0(x_0, y_0) \} \exp \left[jkd \left[1 - \frac{\lambda^2}{2} (f_x^2 + f_y^2) \right] \right] \right\}, \quad (4)$$

$$H(f_x, f_y) = \exp \left\{ jkd \left[1 - \frac{\lambda^2}{2} (f_x^2 + f_y^2) \right] \right\}, \quad (5)$$

式中: f_x 和 f_y 分别为 x, y 轴的空间频率; $\bar{u}(f_x, f_y)$ 为观察面的光强复振幅分布; $H(f_x, f_y)$ 为菲涅耳衍射传递函数。观察面和衍射面的尺寸均为 $L_{x0} \times L_{y0}$, 抽样点数为 $N_x \times N_y$, 据此可以计算光传输到后续空间的光强复振幅分布^[10]。

3 时空复合光束传输特性分析

时空光束复合包括空域复合与时域复合, 具体涉及两束光的时域参数与空域参数的精密调控, 本文主要针对时空复合光束的空域参数进行分析。空域参数主要包括光束边沿软化因子、空间滤波器小孔尺寸、消光比和光束间相位差等, 会对光束的近场传输及光强稳定性产生影响, 需要分别对其进行分析。根据装置的设计指标, 结合离线实验条件进行如下设置: 光束 1 的 1% 强度处外尺寸为 12 mm × 12 mm, 内圆孔强度 1% 处的直径为 6 mm; 光束 2 的 1% 强度处直径为 6.6 mm。

3.1 光束传输对近场光束质量的影响分析

如图 3 所示, 对光束传输过程中近场产生影响的因素主要包括两个。第一个因素是光束边沿软化因子。为抑制衍射效应对光束近场调制度的影响, 需要将光束 1 与光束 2 的边沿设计为“软化”边沿^[11], 这里用软化因子来表征“软边”程度。软化因子为光斑边沿 1%~90% 强度区域的长度与光斑 1% 强度区域的长度的比值, 对时空复合光束包含三个边沿的软化因子进行定义, 如图 3(b) 所示, 光束 1 外边沿、光束 2 外边沿和光束 1 内边沿的软化因子分别为 $Q_1 = D_1/D_0$, $Q_2 = D_2/D_0$, $Q_3 = D_3/D_0$, 其中 D_0 为光斑 1% 强度处的宽度。光束边缘的软化结果呈超高斯分布, 改变光束的超高斯阶数即可产生不同软化因子的光束。图 3(c) 中实线为光束 1 内边沿强度线分布, 其余曲线代表具有不同软化因子的光束 2 的外边沿强度线分布。光束 1 内边沿软化因子不变时, 光束 1 与光束 2 的空间间隙随着光束 2 外边沿软化因子的增大逐渐增大, 能量利用率逐渐降低, 软化因子的逐渐增大对衍射效应的抑制效果逐渐增强。因此, 需要在保证光束近场传输质量的前提下, 兼顾能量利用率, 对光束 1 与光束 2 的边沿软化因子进行合理的设计。第二个影响

因素为空间滤波器小孔尺寸。在激光光束的空间传输放大过程中,为了去除光束高频成分、保证光束传输质量、抑制寄生振荡和小尺度自聚焦等,需要进行空间滤波^[12-13]。软化因子的不同取值同样对应传输

过程中不同的高频分量,不同直径的空间滤波器小孔对光束空间高频成分的滤波效果不同,同样会对光束的近场调制度产生影响。因此,需合理设计光束软化因子与空间滤波器的小孔尺寸,以保证光束传输质量。

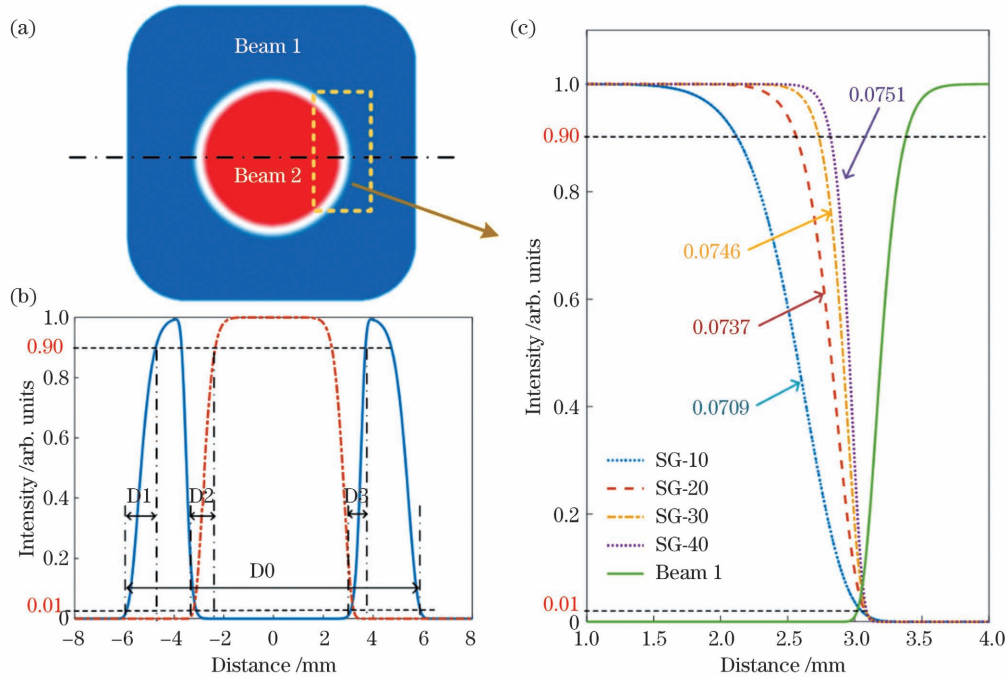


图 3 光束 1 与光束 2 的近场分布示意图,光束 1 与光束 2 的中心位置强度线和光束 2 的边沿软化因子。(a)光束 1 与光束 2 的近场分布示意图;(b)光束 1 与光束 2 的中心位置强度线;(c)光束 2 的边沿软化因子

Fig. 3 Near field profiles of beam 1 and beam 2, intensity lines at centers of beam 1 and beam 2, and edge softening factor of beam 2. (a) Near field profiles of beam 1 and beam 2; (b) intensity lines at centers of beam 1 and beam 2; (c) edge softening factor of beam 2

为了描述近场光束质量,使用调制度 $F_M = (I_{max} - I_{min}) / \bar{I}$ 进行衡量, I_{max} 表示计算区域内的光强最大值, I_{min} 表示计算区域内的光强最小值, \bar{I} 为计算区域内的光强平均值,如图 4(a)、4(d)所示,图中虚线围成的区域为实际的计算区域。

光束在实际预放系统中传输时,会多次经过激光放大器,激光增益介质棒的长度为 20~30 cm。为了保证传输放大过程中的近场光束质量,在空间滤波器像面处及像面前后 15 cm 处,光束近场调制度 F_M 需要低于 5%;在此基础上还需要尽可能地提高光束的能量利用效率。通过减小光束 1 和光束 2 边沿的软化因子,可减小两束光的空间间隔,提高能量利用率。基于以上条件,选择合适的软化因子和空间滤波器小孔尺寸。

分析过程采用上述光束传输模型,分别模拟光束 1 与光束 2 通过 4f 系统的过程。光束 1 的外边沿软化因子 Q_1 为 0.1,同时改变光束 1 的内边沿软化因子 Q_3 和空间滤波器的小孔直径,分别计算光

束 1 与光束 2 经过 4f 系统传输后的近场像面处与像面前后 15 cm 处的近场调制度。图 4(a)~(c)分别为光束 1 的内边沿软化因子 $Q_3 = 0.0278$ 时,光束 1 在像面及像面前后 15 cm 处的近场强度图,图 4(d)~(f)分别为光束 2 外边沿软化因子 $Q_2 = 0.0275$ 时,光束 2 在像面及像面前后 15 cm 处的近场强度图。其中,空间滤波器的小孔尺寸均为光束 1 外尺寸的 18.3 倍衍射极限。时空复合光束在预放段的传输过程中,要求其近场 F_M 值低于 5%,同时满足高功率激光系统的实际应用需求^[14-15]。

图 5 为软化因子与空间滤波器小孔对时空复合光束近场影响的模拟结果,横坐标为滤波器小孔尺寸,为了方便统一计算,所有横坐标均用光束 1 外尺寸的衍射极限倍数(D_L)表示。图 5(a)~(c)为光束 1 经过 4f 传输系统后,近场调制度在像面处、像面前 15 cm 处,以及像面后 15 cm 处随滤波小孔尺寸的变化趋势,不同的曲线表示光束 1 内软化因子 Q_3 的不同取值。光束 1 的内边沿软化因子 $Q_3 \geq 0.0625$,空间滤波器的小孔尺寸 $\geq 18.3 D_L$ 时,其像

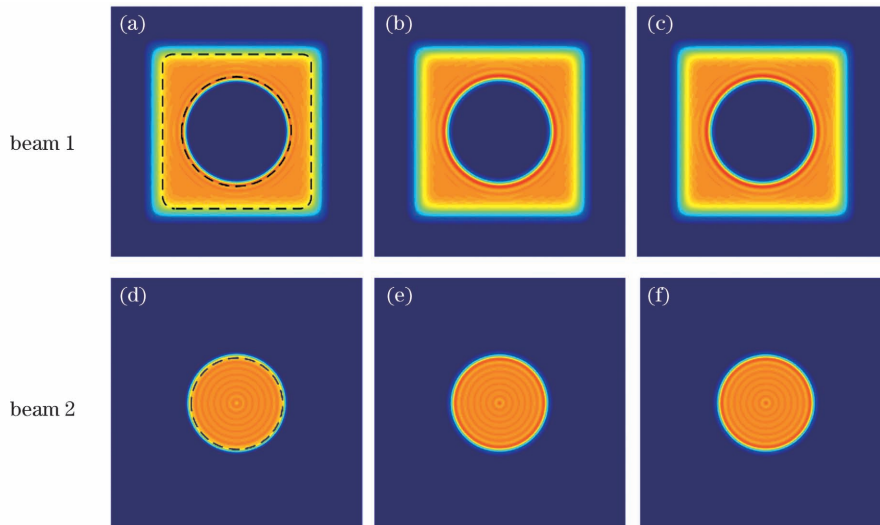


图 4 光束 1 与光束 2 在 $4f$ 系统像面处和像面前后 15 cm 的近场强度图。(a)(d)像面处;(b)(e)像面前 15 cm;(c)(f)像面后 15 cm

Fig. 4 Near field distributions of beam 1 and beam 2 at image plane and positions 15 cm away from image planes.

(a) (d) Image plane; (b) (e) 15 cm in front of image plane; (c) (f) 15 cm behind image plane

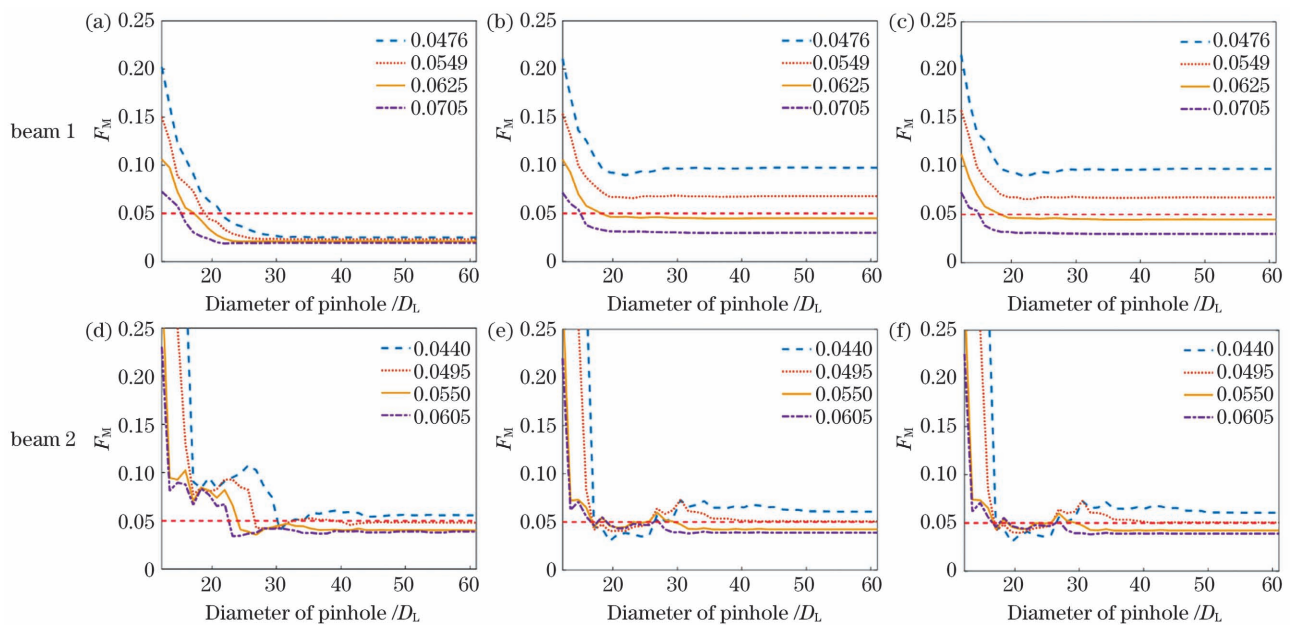


图 5 空间滤波器小孔和软化因子对时空复合光束传输的影响。(a)(d)像面处;(b)(e)像面前 15 cm;(c)(f)像面后 15 cm

Fig. 5 Influences of space filter pinhole and softening factor on propagation of spatial and temporal combined beams.

(a) (d) At image plane; (b) (e) 15 cm in front of image plane; (c) (f) 15 cm behind image plane

面与像面前后 15 cm 处的近场调制度 $F_M \leq 5\%$; 图 5(d)~(f) 为光束 2 经过 $4f$ 传输系统后, 近场调制度在像面处、像面前 15 cm 处, 以及像面后 15 cm 处随滤波器小孔尺寸的变化趋势, 横坐标按照光束 1 外尺寸的衍射极限进行标定, 而光束 2 的远场焦斑大于光束 1, 所以对于相同尺寸的小孔, 相比于光束 1, 光束 2 的低频成分更容易被过滤。因此滤波器小孔过小 ($\leq 32D_L$) 时, 光束 2 的近场调制度随小孔尺寸的变化更明显。外边沿软化因子 $Q_2 \geq$

0.055、空间滤波器小孔尺寸 $\geq 32D_L$ 时, 经过 $4f$ 系统后, 像面与像面前后 15 cm 处光束 2 的近场调制度 $F_M \leq 5\%$ 。在保证光束能量利用率的前提下, 将光束 1 内边沿的软化因子 Q_3 设为 0.0625, 将光束 2 外边沿的软化因子 Q_2 设为 0.055, 系统空间滤波器的小孔尺寸设为 $32D_L$ 。

3.2 光强近场稳定性分析

在时空复合光束传输过程中, 影响合束后光强稳定性的因素主要有两个: 消光比和束间相位差。

消光比包括空间消光比与时域消光比。受空间近场强度整形器件(如软边光阑)的性能限制,时空复合光束中的光束 2 内会存在光束 1 经近场整形后的残余弱光,同样地,光束 1 的近场主光斑内也会存在光束 2 引入的弱光。空间消光比定义为 $S_a = -10\lg(I_{s1}/I_{s0})$,其中 I_{s1} 表示空间近场光强的最大值, I_{s0} 表示空间近场光强的最小值,如光束近场强度整形器件镀铬软边光阑的最大空间消光比为 20 dB,OASLM 在实际使用中的空间消光比也为 ~ 20 dB^[16]。同理,时域消光比定义为 $T_a = -10\lg(I_{t1}/I_{t0})$, I_{t1} 为时域脉冲的峰值强度, I_{t0} 为除主脉冲外其余弱脉冲的强度。实际情况下,高功率激光装置的前端全光纤激光系统能够实现整体时域消光比 > 40 dB^[14]。在时空复合光束的传输过程中,两套种子源系统引入的相位抖动、传输过程中大气扰动与系统消光比等因素会引入额外的相位差抖动,导致主光斑近场与残余弱光发生干涉,使得主光斑强度整体增大或减小,这种强度波动会成为潜在风险,对主放系统能量通量阈值有较大的限制,因此有必要对其进行定量分析。

为了简化模型,选择光束 2 的光斑区域内某一

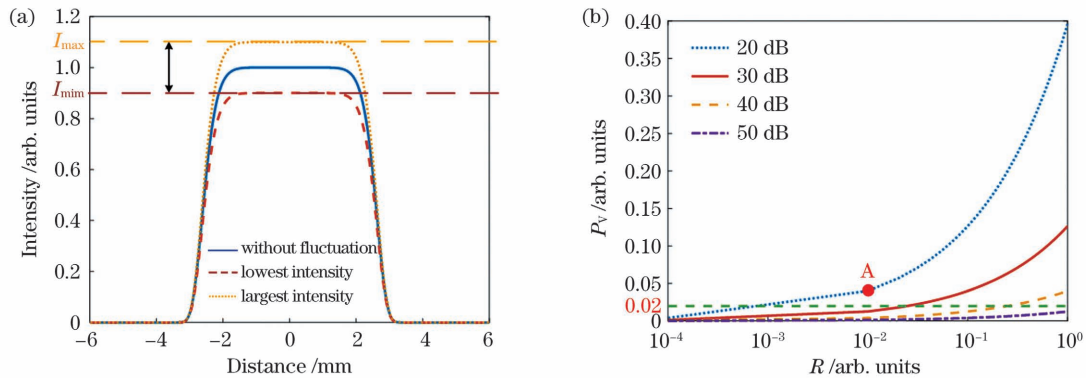


图 6 光束 2 的近场强度波动和中心点 P_V 值。(a)近场强度波动;(b)中心点 P_V 值

Fig. 6 Near-field intensity fluctuation and P_V at center point of beam 2. (a) Near-field intensity fluctuation; (b) P_V at center point

模拟中,光束 1 的外尺寸(1%强度处)为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,外边沿软化因子 Q_1 为 0.1;光束 1 的内空心圆直径(1%强度处)为 6 mm,内边沿软化因子 Q_3 为 0.0625。光束 2 的外直径为 6.6 mm,外边沿软化因子 Q_2 为 0.055。所得结果如图 6(b)所示,图中点 A 处对应的 R 值为 0.0101(时域消光比为 19.96 dB),空间消光比为 20 dB,附加相位差在 $-\pi \sim \pi$ 之间变化时,计算所得的强度波动的 P_V 值为 0.0402。图 6(b)中点线、实线、虚线、点划线分别表示空间消光比为 20 dB、30 dB、40 dB、50 dB 时,随着 R 值的增大,附加相位差在 $-\pi \sim \pi$ 之间变

空间点在某一时刻的强度变化来评估光强稳定性。在时域内,光束 1 和光束 2 的时间脉冲波形完全相同,但存在一定延时以确保两束光的主脉冲不发生交叠。选取光束 2 的主脉冲内某一点进行分析,该点的脉冲强度与光束 1 的残余弱脉冲的强度存在叠加。将该时刻下光束 1 的残余弱脉冲与光束 2 的主脉冲强度比值 $R = I_{t1}/I_{t2}$ 作为自变量进行分析。在空域内,选择光束 2 光强分布的平顶区中心点进行分析,所选位置处的强度为该光束近场强度的最大值。分别计算在 20 dB~50 dB 的空间消光比下,所选取计算点的峰谷值(PV,其值可用 P_V 表示)值随 R 值的变化。为了定量描述由此扰动产生的整体强度抖动,使用 $P_V = (I_{\max} - I_{\min})/I_{\text{avg}}$ 进行描述, I_{\max} 表示计算点强度波动的最大值, I_{\min} 为该点强度波动的最小值, I_{avg} 为该点强度波动的平均值。如图 6(a)所示,实线为强度未发生波动时的线分布,虚线为强度变化至最小时的线分布,点线为强度最大时的线分布。此外,为了分析束间相位差对光强稳定性的影响,在光束 1 与光束 2 之间引入 $-\pi \sim \pi$ 的附加相位差,分析其对计算点强度抖动 P_V 值的影响。

化时的强度波动的 P_V 值分布。虚线表示 P_V 值为 0.02 的参考线,当强度波动的 P_V 值低于该参考线时,光束强度波动的影响基本可忽略。由图 6 可看出,空间消光比不变时,随着 R 值的增加,所选计算点的强度变化的 P_V 值均逐渐增加;当 R 值固定时,随着空间消光比的提升,所选计算点的强度变化的 P_V 值均逐渐减小。当 R 低于 10^{-3} (系统的时域消光比高于 30 dB)、空间消光比 ≥ 20 dB 时,光强波动的 P_V 值低于 2%。目前系统的时域消光比可达 40 dB 以上,空间消光比约为 20 dB。模拟结果表明,现有的系统参数满足装置的设计指标。

4 实验设计与结果分析

时空复合光束的离线实验光路如图 7 所示。离线实验中,将课题组自主研发的参数可调的全光纤种子源和输出波长为 1053 nm、能量为 25 mJ、脉冲宽度为 2.5 ns 的再生放大器组成的系统作为输入光源。输入光经过偏振分束器 PBS1 的偏振分束,分为反射 s 偏振光和透射 p 偏振光。第一路的 s 光经过半波片 HWP2,偏振态变为 p 偏振态,通过反射镜、导轨和位移台来对光束 1 和光束 2 之间的光程差进行调控,从而调节两束脉冲在时域上的重合

程度。经过扩束之后,通过软边光阑的整形、空间滤波和非偏振合束器合束后,利用 CCD 进行测量。第二路为 PBS1 透射光,经过扩束和 OASLM 整形,通过等光程的空间滤波和 4f 缩束后,进行缩束测量。OASLM 和软边光阑效果类似,通过加载合适的透过率,对光束进行振幅调控,得到所需的光强分布。实验中,采用重庆睿视垣公司的 EHD01M-GE 科学相机进行近场强度测量。利用上面的实验装置,对光斑软化因子、空间滤波器小孔尺寸等因素对时空复合光束传输的影响进行了初步实验验证。

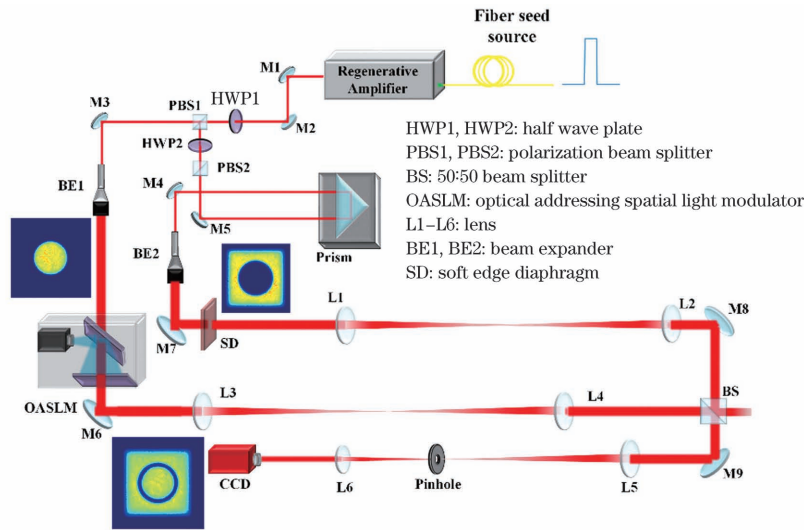


图 7 时空光束复合实验装置图

Fig. 7 Experimental setup for spatial and temporal beam combination

4.1 空间滤波器的小孔尺寸对时空复合光束传输的影响

在验证空间滤波器小孔对时空复合光束传输影响的实验中,光束 1 的 1% 光强处的外边沿尺寸为 12 mm×12 mm,外边沿软化因子 Q_1 为 0.1,光束 1 的内环空心直径为 6 mm,内边沿软化因子 Q_3 为

0.0625。光束 2 的外直径为 6.6 mm,外边沿软化因子 Q_2 为 0.055。改变小孔尺寸,分别测量光束 1 与光束 2 单独经过 4f 系统的近场调制度。为了验证仿真模型的正确性,将实验测得的输入光作为仿真模型的初始输入光,计算输出光的近场调制度,并将计算结果与实验结果进行对比(图 8)。

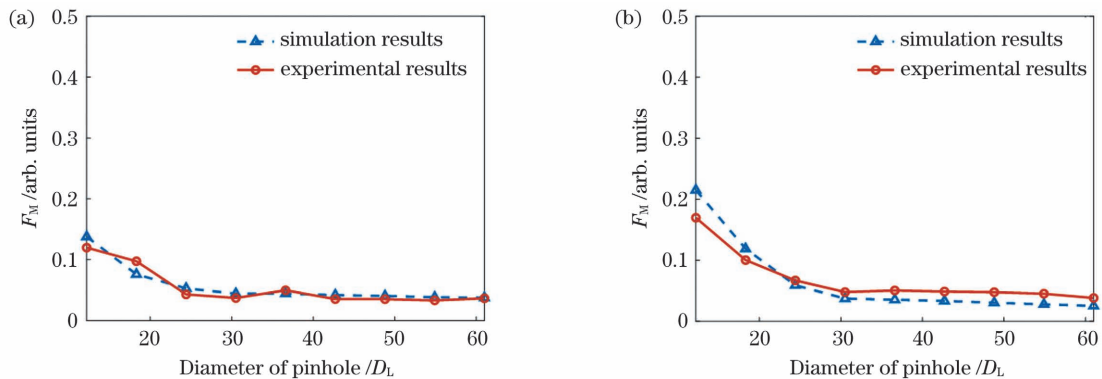


图 8 滤波器的小孔尺寸对时空复合光束传输的影响。(a) 光束 1; (b) 光束 2

Fig. 8 Influence of diameter of filter pinhole on propagation of spatial and temporal combined beams. (a) Beam 1; (b) beam 2

图 8 为实验与模拟结果对比图,实线+圆圈为实验结果,虚线+三角形为模拟结果。图 8(a)为小孔尺寸对光束 1 像面处近场调制度影响的实验与模拟结果对比图。图 8(b)为小孔尺寸对光束 2 像面处近场调制度影响的实验与模拟结果对比图。小孔尺寸小于 $32D_L$ 时,光束 2 的近场调制度 F_M 的变化幅度大于光束 1;随着滤波器小孔的增大,光束 1 与光束 2 的近场调制度逐渐降低,最后趋近于常值。滤波器小孔大于 $32D_L$ 时,近场调制度满足设计指标,此时实验结果与模拟结果较为吻合。

4.2 光斑软化因子对时空复合光束传输的影响

为了验证光束 1 内边沿软化因子与光束 2 外边沿软化因子对时空复合光束近场调制度的影响,实验上制作了三种不同软化因子的软边光阑,并将其放置在光束 1 处,通过更换软边光阑改变软化因子;

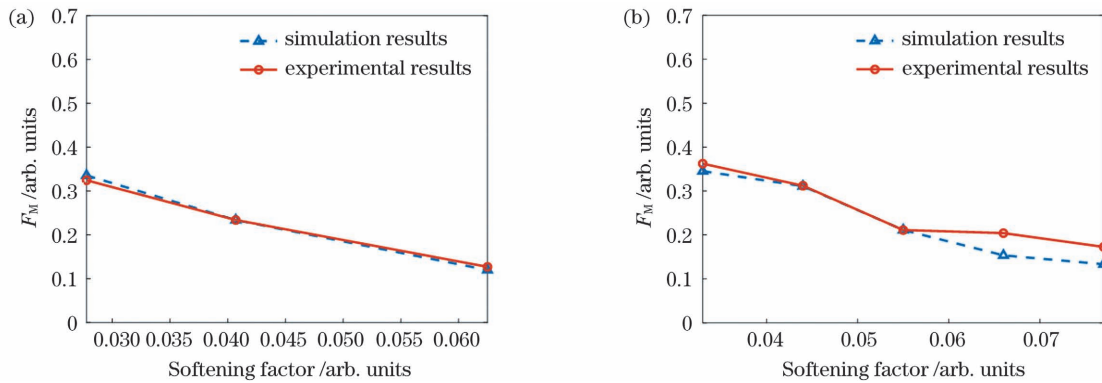


图 9 软化因子对时空复合光束传输的影响。(a)光束 1;(b)光束 2

Fig. 9 Influence of softening factor on propagation of spatial and temporal combined beams. (a) Beam 1; (b) beam 2

5 结 论

基于高功率激光装置双锥点火方案中动态聚焦的物理实验需求,提出了一种通过时空复合预放大激光系统实现动态聚焦的新方案。利用菲涅耳衍射传输理论与快速傅里叶变换的数值分析方法,建立了时空复合光束的空间传输模型,模拟了时空复合光束在预放系统传输过程中,小孔尺寸、软化因子、消光比以及束间相位差对光束近场质量与光强稳定性的影响,结合现有技术指标,给出了合理的软化因子与小孔尺寸,并对模型进行了初步的实验验证。模拟结果表明:当光束 1 的尺寸为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 、内空心直径为 6 mm 、外边沿软化因子 Q_1 为 0.1 时,光束 1 的内边沿软化因子 Q_3 为 0.0625;当光束 2 的外直径为 6.6 mm 、外边沿软化因子 Q_2 为 0.055,空间滤波器小孔大于光束 1 的 32 倍衍射极限时,满足装置设计指标。实验结果与模拟结果

利用 OASLM 改变光束 2 的软化因子,通过改变 OASLM 的加载图形,可以实现不同的软化因子。分别改变光束 1 的内边沿软化因子 Q_3 与光束 2 的外边沿软化因子 Q_2 ,空间滤波器小孔为光束 1 外尺寸的 12.2 倍衍射极限,测量两束光单独经过 $4f$ 空间滤波后的近场调制度 F_M 。为了对模型进行验证,将实验测得的初始输入光作为模型的注入光,计算经过 $4f$ 系统传输后的近场调制度,将计算结果与实验结果进行对比。

随着光束 1 内边沿软化因子的逐渐增加,光束 1 经过 $4f$ 系统后像面处的近场调制度逐渐降低,如图 9(a)所示;在图 9(b)中,随着光束 2 的外边沿软化因子的逐渐增加,光束 2 经过 $4f$ 系统后像面处的近场调制度逐渐降低,这与模拟结果较为吻合。

较好地吻合。同时,从风险防范角度分析,当时域消光比高于 30 dB、空间消光比 $\geq 20\text{ dB}$ 时,光强波动对系统的影响可忽略。目前系统的时域消光比可达到 40 dB 以上,空间消光比约为 20 dB,满足时空复合光束传输中的强度稳定性要求。接下来的研究进一步对时空复合光束的其他参数(如时域脉冲重叠度)进行精密调控,评估其对光束近场调制度的影响,以为后续时空复合光束的传输放大提供支持。所提技术下一步将用于神光 II 装置预放段的时空复合系统,支持高功率激光装置双锥点火中动态聚焦打靶实验的研究。

参 考 文 献

- [1] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. Nature Physics, 2016, 12(5): 435-448.
- [2] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Special issue on development of the national ignition

- facility and transition to a user facility for the ignition campaign and high energy density scientific research [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [3] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, et al. Status and development of high-power laser facilities at the NLHPLP [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e55.
- [4] Guo J T, Wang J F, Wei H, et al. High-power, Joule-class, temporally shaped multi-pass ring laser amplifier with two Nd: glass laser heads [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(1): 64-71.
- [5] Zhang J, Wang W M, Yang X H, et al. Double-cone ignition scheme for inertial confinement fusion [J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2020, 378(2184): 20200015.
- [6] Froula D H, Kessler T J, Igumenshchev I V, et al. Mitigation of cross-beam energy transfer: implication of two-state focal zooming on OMEGA [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(8): 082704.
- [7] Fan W, Jiang Y E, Wang J F, et al. Progress of the injection laser system of SG-II [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e34.
- [8] Guo J T, Wang J F, Pan X, et al. Suppression of FM-to-AM conversion in a broadband Nd: glass regenerative amplifier with an intracavity birefringent filter [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): 1261-1270.
- [9] Huang D J, Fan W, Li X C, et al. Performance of an optically addressed liquid crystal light valve and its application in optics damage protection [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(7): 072301.
- [10] Qian X F. *Information optics digital laboratory* [M]. Beijing: Science Press, 2015.
钱晓凡. *信息光学数字实验室* [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [11] Lin Z Q, Zheng Y X, Yu W Y. Apodized aperture used in the laser oscillator [J]. *Acta Physica Sinica*, 1979, 28(2): 268-275.
林尊琪, 郑玉霞, 余文炎. 激光振荡器中采用软边光阑技术 [J]. *物理学报*, 1979, 28(2): 268-275.
- [12] Celliers P M, Estabrook K G, Wallace R J, et al. Spatial filter pinhole for high-energy pulsed lasers [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(12): 2371-2378.
- [13] Sharma A K, Patidar R K, Daiya D, et al. Simple and sensitive technique for alignment of the pinhole of a spatial filter of a high-energy, high-power laser system [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2546-2554.
- [14] Xia G, Fan W, Wang X C, et al. Detection and analysis of the signal-to-noise ratio in the injection laser system of the Shenguang-II facility [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(34): 9898-9906.
- [15] Feng G Y, Zhou S H. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1643-1653.
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1643-1653.
- [16] Huang D J. Key techniques of near-field beam quality control in high power laser [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 2-3.
黄大杰. 高功率激光近场光束质量控制关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2013: 2-3.

Exploration of Spatiotemporal Beam Combination Laser Preamplifier System

Wang Yamin^{1,2}, Wang Jiangfeng^{1*}, Guo Jiangtao¹, Lu Xinghua¹, Huang Dajie¹,
Wang Xiaoqin^{1,2}

¹ *National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

² *Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective Inertial confinement fusion (ICF) is important to achieve controlled nuclear fusion. To solve the problem of low energy coupling efficiency in the traditional ignition scheme in a laser-driven ICF experiment, Zhang Jie and other researchers proposed double-cone ignition (DCI) as a new solution for ICF ignition. In DCI experiments, using

laser irradiation, the surface area of the target material filled in the metal cone decreases sharply as the laser irradiates fusion targets; therefore, the focal spot size of the irradiated beam must be dynamically reduced accordingly. In this process, the control of shooting laser beamlines in the laser driver must be flexible. Thus, to meet the aforementioned demand, the dynamic focusing of shooting beams has been proposed. In 2013, to mitigate cross-beam energy transfer during low-adiabat cryogenic experiments on the OMEGA laser facility, researchers in the Laboratory for Laser Energetics of the University of Rochester in the United States proposed a technical solution of two-state focal zooming. The dynamic focusing process of the proposed technique is similar to that of the two-state focal zooming. Two combined spatiotemporal laser pulses are amplified by coaxial propagation. Then, a specially designed continuous phase plate is used to modulate the wavefronts of these two beams (denoted as beams 1 and 2) and smooth the focal spot separately. Next, the target material is irradiated by laser spots after focusing. In this study, to realize beam control using dynamic focusing technology, a new method for achieving dynamic focus using a combined spatiotemporal beam based on a preamplifier system is proposed to provide support for the subsequent research of DCI.

Methods Herein, near-field beam quality during the generation and propagation of the combined spatiotemporal beam is analyzed. First, based on the Fresnel diffraction propagation theory and the numerical simulation method of fast Fourier transform, a propagating model of the combined spatiotemporal beam is established. Then, the influences of the filter pinhole diameter, softening factors, extinction ratio, and phase difference on the propagation of the combined spatiotemporal beams are discussed. Finally, based on the overall plan of the spatiotemporal beam combination, an experimental laser system is constructed to verify the accuracy of the numerical simulation.

Results and Discussions In the analysis of the generation and propagation of the combined spatiotemporal beam, the outer size of beam 1 is $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, the outer edge softening factor is 0.1, the inner circle diameter is 6 mm, and the diameter of beam 2 is 6.6 mm. When the softening factor of the inner edge of beam 1 is $Q_3 \geq 0.0625$ and that of the outer edge of beam 2 is $Q_2 \geq 0.055$, and the pinhole of the spatial filter is greater than or equal to $32D_L$. After the propagation of laser in the $4f$ system, the near-field modulations of beams 1 and 2 are less than 5% at the positions of the image plane and 15 cm away from the image plane (Fig. 5). These results meet the demand for the near-field beam quality of the combined spatiotemporal beam. Furthermore, considering the perspective of risk prevention, when the time-domain extinction ratio is higher than 30 dB and the spatial extinction ratio is higher or equal to 20 dB, the influence of near-field intensity fluctuation on the system can be negligible [Fig. 6(b)]. Presently, the time-domain extinction ratio of the system can be greater than 40 dB and the spatial extinction ratio is ~ 20 dB, meeting the requirements of intensity stability of combined spatiotemporal beams in the propagation.

Conclusions Herein, to meet the physical experimental requirements of dynamic focus in the scheme of DCI using a high-power laser facility, a method based on the spatiotemporal beam combination laser preamplifier system in the laser driver is proposed. Based on Fresnel diffraction propagation theory, the laser propagation model of the combined spatiotemporal beam is established using the numerical simulation method of fast Fourier transform. The effects of the filter pinhole diameter, softening factor, extinction ratio, and phase difference on the propagation of the combined spatiotemporal beams are analyzed in the simulation, and reasonable softening factors and spatial filter pinhole diameters are obtained. The preliminary experimental results agree well with the simulation results. Moreover, the parameters of the facility can meet the intensity stability requirements of the propagation of the combined spatiotemporal beam from a risk prevention viewpoint. The numerical model can be used for optimizing other parameters, which can guide the propagation and amplification of the combined spatiotemporal beams in future research. The proposed method will be used in the spatiotemporal beam combination system of the preamplifier of the high-power laser facility. In the future, experimental research will be conducted on dynamic focus to meet target physics requirements.

Key words laser optics; spatiotemporal beam combination; preamplifier system; dynamic focusing; beam propagation; laser amplifier

OCIS codes 140.3280; 140.3298; 140.3300