

光谱色散匀滑光束焦斑动态特性的实验研究

贺军^{1,2}, 李平^{1*}, 柴向旭¹, 王礼权¹, 王冠中¹, 田晓琳¹¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;²中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 光谱色散匀滑(SSD)光束的焦斑动态特性是联系激光等离子体不稳定性(LPI)和高功率激光装置性能的重要纽带。为了提升对 SSD 光束聚焦性能的认知,基于条纹相机的光成像系统,开展了带时间分辨的光束测试实验,获得了 SSD 光束的焦斑动态图像和演化规律。实验直接演示了 SSD 光束的焦斑动态特性,沿 SSD 扫动方向的焦斑图像具有典型的周期余弦扫动特征,扫动幅度、周期等特征与调制频率相关,而垂直 SSD 扫动方向的焦斑的时空分布则较为杂乱,不再具有典型的余弦扫动特征。另外,实验也表明,SSD 光束焦斑有强烈的幅度调制,且调制具有明显的区域效应,调制的大小和 SSD 扫动方向以及调制频率密切相关。SSD 光束焦斑的动态分布特性对光束匀滑性能的分析 and 优化具有重要指导意义。

关键词 激光光学; 焦斑特性; 光谱色散匀滑; 幅度调制; 动态演化

中图分类号 TN24 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL202249.1105001

1 引言

在惯性约束聚变(ICF)实验中,为了有效抑制激光等离子体的不稳定性(LPI),要求入射激光的焦斑尽可能辐照均匀^[1-3],高功率激光装置因此发展了以焦斑形态控制为主要目标的连续相位板匀滑(CPP)^[4]及以光束去相干为主要目标的光谱色散匀滑(SSD)^[5]和偏振匀滑(PS)^[6]等光束匀滑技术。SSD 技术作为当前唯一能应用于现有大型驱动器中的时域平滑技术,其特性理解和参数优化控制是研究的重点,对于 ICF 驱动器的研究具有重要意义。目前已有多个科研团队开展了对 SSD 光束焦斑形态和强度分布等特性的研究。2006 年,周申蕾等^[7-8]利用电荷耦合器件(CCD)在焦面上采集了焦斑的时间积分图像,研究了 SSD 光束焦斑的静态特性,明确了其光学匀滑效果。2018 年,郑天然等^[9]数值模拟得到了 SSD 光束远场焦斑强度分布随时间演化的示意图,并研究了其匀滑特性,但时间精细度还不够且缺乏实验支撑,需要进一步挖掘焦斑动态演化的具体物理内涵。随着 LPI 物理实验研

究的逐步深入,人们发现,SSD 光束制备中使用的调频脉冲在聚焦过程中不可避免地造成远场焦斑在时间维度上的幅度调制,这会导致脉冲的瞬时功率密度增加,影响 LPI 实验的物理效果^[10-11],也大幅增加了 SSD 光束的匀滑效应以及焦斑演化的复杂度^[12],因此亟须进一步提升对 SSD 光束焦斑动态特性的认知。

本文在高功率激光装置上搭建了基于条纹相机的光成像系统,开展了带高时空分辨的焦斑测试实验,获得了光谱色散匀滑光束焦斑精细的时空演化图像,并结合理论及数值计算进行了详细的论证分析,明确了不同参数下的动态特征,为提升高功率激光装置的性能提供了支撑。

2 理论模型

图 1 所示为 SSD 技术的基本原理^[5],电光调制器(EO)将入射窄带光调制展宽,光栅把不同频率的光在空间上分开,并且光栅的色散在激光脉冲不同空间位置处引入了不同的时间延迟。在实际应用中,SSD 一般会与 CPP 联用以达到更好的匀滑效果^[13]。

收稿日期: 2021-09-28; 修回日期: 2021-10-24; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金(YZJLX2016008)

通信作者: *liping1984@caep.cn

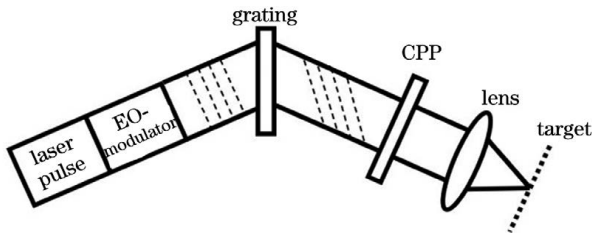


图 1 SSD 技术示意图

Fig. 1 Schematic of SSD technique

具有角色散和一定带宽的激光束经过 CPP 以及透镜聚焦后,靶点焦斑光电场分布 (E_f)^[14-15] 可以表示为

$$E_f(x_f, y_f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp(-i2\pi n f_m t) \times [J_n(\beta) E_{\text{CPP}}(x_f, y_f - nN_c \lambda F/D)] \right\}, \quad (1)$$

$$E_{\text{CPP}}(x_f, y_f) = \mathfrak{F}[E_0(x, y) \exp(i\varphi_{\text{CPP}})], \quad (2)$$

式中: x 方向为光栅刻线方向,垂直于 SSD 扫动方向; y 方向为 SSD 扫动方向即光栅色散方向; x_f 和 y_f 分别为焦斑处 x 和 y 方向的坐标; E_{CPP} 为 CPP 整形散斑的光电场分布; $\mathfrak{F}(\cdot)$ 表示傅里叶变换; $E_0(x, y)$ 为入射光束的光电场分布; φ_{CPP} 为 CPP 相位分布; J_n 为 n 阶贝塞尔函数; f_m 为 SSD 调制频率; β 为 SSD 调制深度; N_c 为 SSD 色循环数; t 为

时间; λ 为光波长; F 为聚焦透镜的焦距; D 为聚焦透镜的直径。由式(1)可知,SSD 光束焦斑是由多套 CPP 整形散斑图案叠加组成,各散斑具有相对幅值 $J_n(\beta)$ 并且所处空间位置不同,在沿 SSD 扫动方向,相邻散斑图案的间距为 $N_c \lambda F/D$,各个散斑图案的相位不同但变化频率都与 f_m 相关,因此焦斑光场分布也是随时间动态演化的。值得注意的是,当 N_c 远远小于 1 时,沿 SSD 扫动方向的相邻散斑间距远远小于衍射极限距离 ($\lambda F/D$),相邻的散斑图案几乎重合,从而产生相干叠加,此时 SSD 光束焦斑的光电场分布^[9]可近似为

$$E_f(x_f, y_f) \approx \exp[i\beta \sin(2\pi f_m t)] \times E_{\text{CPP}}[x_f, y_f - \beta N_c \cos(2\pi f_m t) \lambda F/D], \quad (3)$$

对应的焦斑光强分布为

$$I_f(x_f, y_f) = |E_f(x_f, y_f)|^2 =$$

$$I_{\text{CPP}}[x_f, y_f - (\beta N_c \lambda F/D) \cos(2\pi f_m t)], \quad (4)$$

式中: I_{CPP} 表示 CPP 整形散斑的光强分布。由式(4)可以看出,此时焦斑为 CPP 整形散斑图案并在 y 方向随时间呈余弦周期运动。数值模拟给出了 8 阶高斯光束在色循环数 N_c 为 0.125(调制频率为 2.488 GHz)和 1.000(调制频率为 19.900 GHz)时两方向的 SSD 焦斑的单散斑动态演化图像,如图 2 所

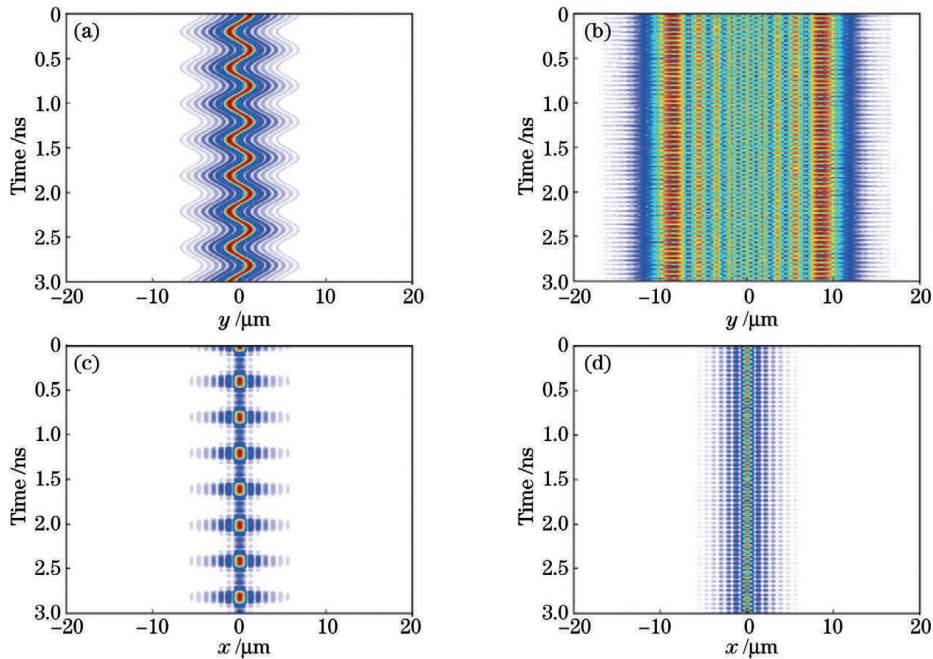


图 2 SSD 光束焦斑的单散斑一维光强随时间演化的数值模拟图像。(a)沿 SSD 扫动方向,调制频率为 2.488 GHz;(b)沿 SSD 扫动方向,调制频率为 19.900 GHz;(c)垂直 SSD 扫动方向,调制频率为 2.488 GHz;(d)垂直 SSD 扫动方向,调制频率为 19.900 GHz

Fig. 2 Numerical simulation images of one-dimensional light intensity evolution with time for single speckle of SSD beam focal spot. (a) 2.488 GHz modulation along SSD scanning direction; (b) 19.900 GHz modulation along SSD scanning direction; (c) 2.488 GHz modulation along vertical SSD scanning direction; (d) 19.900 GHz modulation along vertical SSD scanning direction

示。图 2(a)、(b) 所示的散斑分布和运动规律与上述理论分析完全吻合, 并且可以看到, 沿 SSD 扫动方向, 高频调制明显拉长了散斑分布。由图 2(c)、(d) 可知, 相较于 SSD 扫动方向, 垂直 SSD 扫动方向的焦斑的时间演化和空间分布均更为杂乱无规。模拟结果大致演示了 SSD 光束焦斑的理论动态特征, 将其和实验结果对照分析以期对光谱色散匀滑光束焦斑的动态特性有更详细的认识。

3 实验研究

3.1 实验装置

建立的带时间分辨的焦斑测试实验平台如图 3 所示, 在高功率激光装置集束实验平台上, 种子光束经过脉冲整形处理后进行了光谱色散匀

滑, 其相位调制器共包含两级, 调制频率分别为 2.488 GHz 和 19.900 GHz。对应 2.488 GHz 调制频率的色循环数为 0.125, 对应 19.900 GHz 调制频率的色循环数为 1.000, 调制带宽分别为 0.15 nm 和 0.32 nm。SSD 光束经放大、频率转换和 CPP 整形后聚焦靶点, 此聚焦系统中的透镜焦距为 12 m, CPP 整形焦斑直径为 200 μm 。为了实现较好的空间分辨率, 将原始焦斑进行 3.5 倍的放大后成像至条纹相机中。条纹相机的狭缝在 10~100 μm 区间可调, 采集部分的空间分辨率为 20 μm , 时间分辨率为 5 ps, 考虑光束的散斑尺寸为 11.7 μm , 放大 3.5 倍后约为 41.0 μm , SSD 光束的最小周期约为 50 ps, 实验平台可满足 SSD 光束焦斑的精密测试要求。

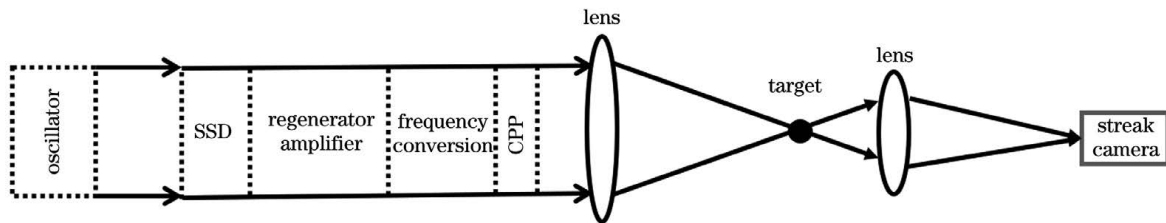


图 3 实验光路排布图

Fig. 3 Schematic of experimental light path arrangement

3.2 实验结果分析及讨论

3.2.1 无 SSD 的光束焦斑动态特性

首先在无 SSD 情况下通过条纹相机获得了光束远场焦斑的动态演化图像, 如图 4(a) 所示, 焦斑各区域的强度随时间的演化非常稳定。在条纹相机狭缝方向, 短时间积分的强度分布如图 4(b) 所示, 实验结果显示, 其分布有一定的不确定性, 它与

CPP 整形的平顶焦斑之间有一定的偏离。这是因为 CPP 是基于二维空间内的平均轮廓设计的, 而实验中的条纹相机仅取样于焦斑中的一条狭缝, 无法在全区域内进行平均, 所以所测试的强度分布轮廓具有偏离平顶分布的不确定性, 这与已有的焦斑静态测量结果一致, 也不影响本文对 SSD 光束动态性能的分析。

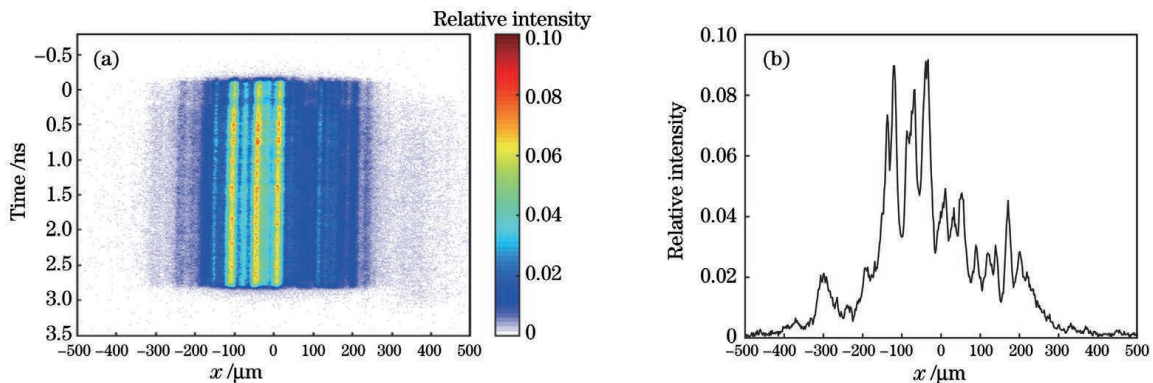


图 4 无 SSD 条件下的窄带激光。(a) 焦斑光强的动态演化图像; (b) 某时刻开始 20 ps 积分时间内的一维光强空间分布
Fig. 4 Narrow band laser without SSD. (a) Dynamic evolution image of focal spot intensity; (b) one-dimensional spatial distribution of light intensity within 20 ps integration time from certain moment

3.2.2 沿 SSD 扫动方向的焦斑的动态特性

应用 SSD 后, 沿 SSD 扫动方向(y 方向)的焦斑

的动态演化实验结果如图 5 所示, 其中图 5(a)、(b) (右侧较弱的光是成像系统剩余反射形成的杂散光)

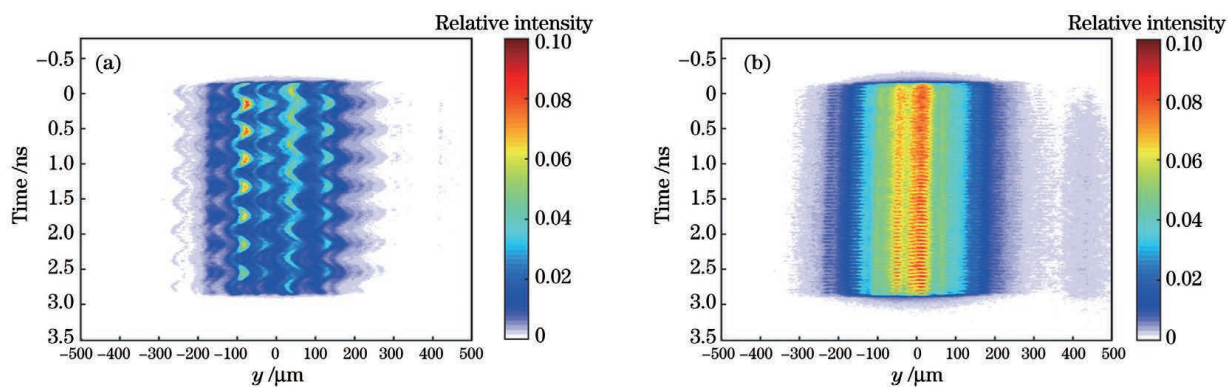


图 5 沿 SSD 扫动方向的焦斑的动态演化图像。(a)调制频率为 2.488 GHz;(b)调制频率为 19.900 GHz

Fig. 5 Dynamic evolution images of focal spot along SSD scanning direction. (a) 2.488 GHz modulation; (b) 19.900 GHz modulation

分别对应 2.488 GHz 和 19.900 GHz 这两种调制情况。

在 2.488 GHz 调制频率下,SSD 光束在 y 方向上的焦斑的运动轨迹为余弦曲线,如图 5(a)所示,这与图 2(a)所示的单散斑的计算结果完全一致。此时色循环数(0.125)远小于 1,所有 CPP 整形散斑图案完全相干叠加,焦斑表现为一套散斑图案的余弦扫动,这给焦斑各区域带来了幅度调制,且幅度调制频率与电光调制频率一致,在一定程度上影响了焦斑的平滑性能。图 5(b)表明,在 19.900 GHz 调制频率下,SSD 光束在 y 方向上的焦斑光强具有较均匀的时空分布特性,也具有频率与电光调制频率一致的周期余弦扫动,这与图 2(b)所示的较均匀的散斑分布吻合;焦斑由多套随时间快速变化的不同 CPP 散斑图案叠加而成,这与 2.488 GHz 的模式有着较大的区别,各组散斑不重合,但散斑之间的界限不明,19.900 GHz 调制频率下的焦斑的空间分布更为均匀,故高频调制可以在较短时间内“抹平”光强时空分布,从而达到较好的匀滑效果。

从空间分布方面分析了某时刻开始 20 ps 积分时间内(等离子体成丝过程的典型豫时间) y 方向的焦斑光强分布,如图 6 所示。由图 6 可知,应用 SSD 后,焦斑光强的空间调制有明显改善,19.900 GHz 条件下的改善效果更为显著,且相较于 2.488 GHz 条件,其散斑分布拉长了 80 μm ,与 SSD 光束的理论计算值 22 μm 的 3.5 倍基本一致,散斑拉长使得高频调制的 SSD 光束有更好的空间平滑效果,有利于焦斑的整体匀滑。形成该效果的根本原因是,19.900 GHz 调制频率下的色循环数为 1.000,相邻散斑图案间距为 $\lambda F/D$ (与衍射极限尺度一致),相邻散斑之间的部分叠加表现为空间拉

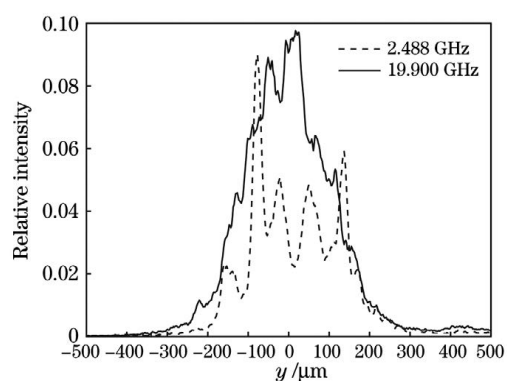


图 6 某时刻开始 20 ps 积分时间内沿 SSD 扫动方向的焦斑的空间强度分布

Fig. 6 Spatial intensity distribution of focal spot along SSD scanning direction within 20 ps integration time from certain moment

长的散斑图案的快速变化。

进一步从时间演化方面分析了 y 方向焦斑光强重心位置的变化情况,如图 7 所示。由图 7 可见,在 2.488 GHz 频率调制下,焦斑重心位置随时间呈

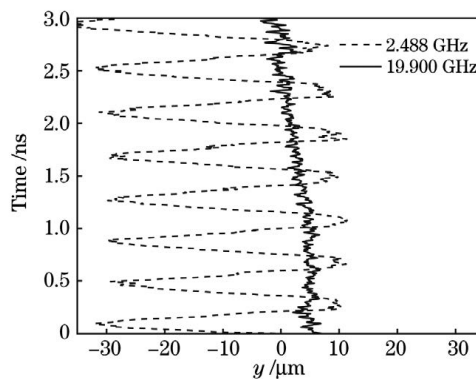


图 7 沿 SSD 扫动方向的焦斑的光强重心位置随时间的变化

Fig. 7 Center of focal spot light intensity versus time along SSD scanning direction

余弦周期扫动,扫动范围约为 $40\ \mu\text{m}$,扫动时间周期为 $0.4\ \text{ns}$,理论计算的余弦扫动范围为 $\beta N_c \lambda F / D = 39\ \mu\text{m}$,时间周期为 $1/f_m = 0.4\ \text{ns}$,二者吻合较好,表明焦斑光强的空间分布随时间的改变较大,改变周期与调频周期一致,光强空间分布较长时间的的不稳定性导致 $2.488\ \text{GHz}$ 调制下的焦斑在短时间内的匀滑能力较弱,与图 6 的分析结果完全一致;在 $19.900\ \text{GHz}$ 频率调制下,焦斑光强重心位置随时间的变化极快,但幅度很小。结合理论分析可知,由于此时整套焦斑中的相邻散斑的零级条纹间距较大,各散斑的主要部分独立演化,焦斑在空间分布上随时间的变化极小,故重心位置的变化幅度也小,这与图 6 的分析结果一起证明了沿 SSD 扫

动方向的高频调制焦斑的时空分布具有整体均匀性。

3.2.3 垂直 SSD 扫动方向的焦斑的动态特性

调整条纹相机的狭缝方向,获得了应用 SSD 后垂直 SSD 扫动方向(x 方向)的焦斑的动态演化图像,如图 8 所示。比较图 8(a)、(b)和图 5(a)、(b),可知垂直 SSD 扫动方向的焦斑的动态演化和沿 SSD 扫动方向的异同,前者不再有明显的余弦扫动特征,但高频调制下具有更为匀滑的光强时空分布。另外,图 8 所示的不规律的光强时空分布与图 2(c)、(d)的理论计算结果吻合较好,表明垂直 SSD 扫动方向的 SSD 光束焦斑光强有混乱的空间分布,也不具有与调频脉冲一致的周期结构。

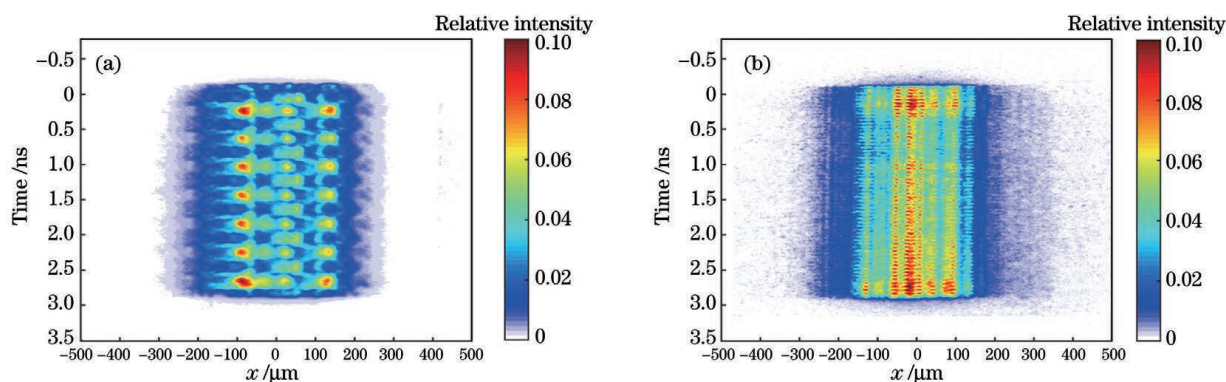


图 8 垂直 SSD 扫动方向的焦斑的动态演化图像。(a)调制频率为 $2.488\ \text{GHz}$; (b)调制频率为 $19.900\ \text{GHz}$
Fig. 8 Dynamic evolution images of focal spot along vertical SSD scanning direction. (a) $2.488\ \text{GHz}$ modulation; (b) $19.900\ \text{GHz}$ modulation

从空间分布方面分析短积分时间内 x 方向焦斑的光强分布,如图 9 所示。从图 9 可以看到, $2.488\ \text{GHz}$ 和 $19.900\ \text{GHz}$ 调制频率下 x 方向短时间积分的焦斑光强的空间分布大体类似,空间调制的改善效果较差,但 $19.900\ \text{GHz}$ 频率下的改善效

果比 $2.488\ \text{GHz}$ 频率下的稍好。比较图 9 和图 6 可知,在应用低频 SSD 调制时,垂直 SSD 扫动方向的短时间积分焦斑的空间调制改善效果与沿 SSD 扫动方向相差无几;而高频 SSD 调制时,垂直 SSD 扫动方向的空间调制改善效果远远不如沿 SSD 扫动方向。

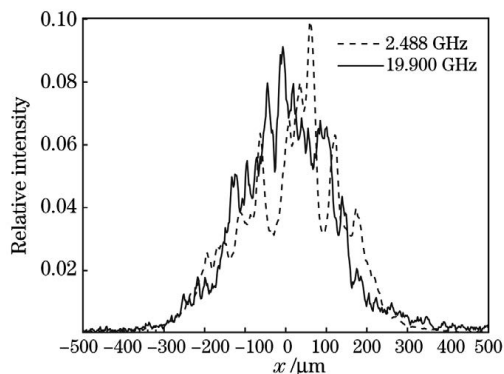


图 9 某时刻开始 $20\ \text{ps}$ 积分时间内垂直 SSD 扫动方向的焦斑的空间强度分布

Fig. 9 Spatial intensity distribution of focal spot along vertical SSD scanning direction within $20\ \text{ps}$ integration time from certain moment

进一步从时间演化方面分析焦斑光强重心位置的变化情况,如图 10 所示。由图 10 可知,在 $2.488\ \text{GHz}$ 调制频率下, x 方向的焦斑光强重心位置随时间的变化不再呈标准的余弦扫动,而是变为两种不同的交替扫动,且两种方式的扫动范围也不一致,这是由于沿 SSD 扫动方向存在空间余弦扫动,垂直方向的区域会交替地扫进或扫出各类不同的散斑结构,因此该区域的光强演化周期不再与相位调制周期一致,但也有着非典型的周期结构;在 $19.900\ \text{GHz}$ 调制频率下,焦斑光强重心位置随时间的变化呈快速小范围扫动,并且不再呈余弦扫动。这再次验证了相较沿 SSD 扫动方向,垂直方向的焦斑的光强空间分布随时间的演化是杂乱无规的。

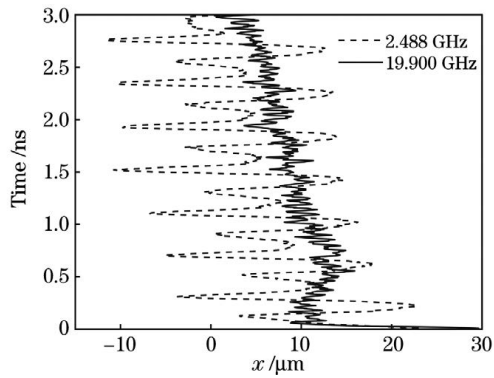


图 10 垂直 SSD 扫动方向的焦斑的光强重心位置随时间的变化

Fig. 10 Center of focal spot light intensity versus time along vertical SSD scanning direction

3.2.4 SSD 光束焦斑的幅度调制特性

根据上述时间分辨的焦斑光强图像,定量计算

表 1 不同 SSD 参数下的焦斑幅度调制深度

Table 1 Focal spot amplitude modulation depth for different SSD parameters

unit: %

Region	Without SSD	Along SSD		Vertical SSD	
		@2.488 GHz	@19.900 GHz	@2.488 GHz	@19.900 GHz
A	10.10	82.63	51.91	96.81	64.19
B	5.02	75.26	82.19	65.42	55.04
C	5.52	43.87	53.92	93.90	56.51
D	6.64	44.27	35.33	60.39	50.43
E	6.70	44.45	60.09	115.66	48.84
F	8.07	78.87	42.76	46.61	59.65
G	7.74	68.80	75.64	64.89	77.93
\bar{R}	7.11	62.59	57.41	77.67	58.94

4 结 论

针对 SSD 光束焦斑时空演化的特性,基于条纹相机的光成像系统,在高功率激光装置上开展了带时间分辨的光束测试实验,获得了 SSD 光束焦斑精细的动态演化图像。实验演示并论证了 SSD 光束的控制参数对焦斑动态演化特性的影响,沿 SSD 扫动方向的焦斑具有典型的 CPP 整形散斑图案,不同调制频率下的动态演化方式不同,高频调制下光强整体的时空分布更为均匀,在较短匀滑时间内可达到较好的匀滑效果。而垂直 SSD 扫动方向的焦斑具有十分杂乱的光强空间分布和时间演化。SSD 给光束焦斑引入了强烈的幅度调制且不同区域的调制具有明显差异,调制的大小总体上与 SSD 扫动方向以及调制频率有关。研究结果为优化 SSD 匀滑性能提供了参考:SSD 光束在空间两维方向上的不一致性有助于优化 SSD 的扫动方向,SSD 光束的调制结构

了不同实验条件下焦斑各区域(焦斑一维空间划分为 A~G 7 个区域)由调频引起的脉冲顶部幅度的时间调制深度(R),如表 1 所示。由表 1 可知,在无 SSD 窄带的情况下,焦斑脉冲顶部幅度的时间调制深度相对较小,平均调制深度(\bar{R})约为 7%,表示无 SSD 的脉冲波形有较好的控制精度;加上 SSD 后,在不同方向上,不同频率的调频脉冲引入的幅度调制在总体上差别明显,焦斑不同区域均出现了较为严重的调制,且调制深度也有明显差异。这是由于 SSD 相位调制脉冲的不同扫动方向造成了空间特性不一致。考虑 LPI 具有空间局域特性,SSD 光束焦斑引入了具备上述特征的幅度调制,对装置 LPI 的控制也会表现出明显的时空分布特性,这会降低辐照的对称性。焦斑光强幅度的时间调制进一步深化了我们对 SSD 光束的认识。

可用于辅助调制频率的选择,而准确的焦斑特性描述则为焦斑弹道点位置的优化提供了重要边界条件。

参 考 文 献

- [1] Desselberger M, Afshar-Rad T, Khattak F, et al. Nonuniformity imprint on the ablation surface of laser-irradiated targets[J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(10): 1539-1542.
- [2] 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.
- [3] Robey H F, Celliers P M, Moody J D, et al. Shock timing measurements and analysis in deuterium-tritium-ice layered capsule implosions on NIF [J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(2): 022703.
- [4] Dixit S N, Feit M D, Perry M D, et al. Designing fully continuous phase screens for tailoring focal-plane irradiance profiles [J]. *Optics Letters*, 1996, 21

- (21): 1715-1717.
- [5] Skupsky S, Short R W, Kessler T, et al. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(8): 3456-3462.
- [6] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, et al. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate [J]. *Optics Communications*, 1992, 91(1/2): 9-12.
- [7] 周申蕾, 朱俭, 李学春, 等. 光谱色散平滑的实验研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 321-325.
Zhou S L, Zhu J, Li X C, et al. Experimental study of smoothing by spectral dispersion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(3): 321-325.
- [8] 张锐, 李平, 栗敬钦, 等. 采用光谱色散平滑和连续相位板实现靶面均匀辐照的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 054204.
Zhang R, Li P, Su J Q, et al. Experimental research of target uniform illumination using smoothing by spectral dispersion and continuous phase plate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 054204.
- [9] 郑天然, 张颖, 耿远超, 等. “强度扫动”光束匀滑特性的理论研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111405.
Zheng T R, Zhang Y, Geng Y C, et al. Theoretical research of “intensity sweep” laser beam smoothing characteristics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111405.
- [10] Rothenberg J E, Browning D F, Wilcox R B. Issue of FM to AM conversion on the national ignition facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3492: 51-61.
- [11] 许党朋, 张锐, 田小程, 等. 高功率激光驱动器中幅频效应及其抑制技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020005.
Xu D P, Zhang R, Tian X C, et al. Progress on FM-to-AM effect and its suppression in high power laser driver [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020005.
- [12] Li P, Wang W, Su J Q, et al. Analysis on FM-to-AM conversion of SSD beam induced by etalon effect in a high-power laser system [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e21.
- [13] Rothenberg J E. Comparison of beam-smoothing methods for direct-drive inertial confinement fusion [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(7): 1664-1671.
- [14] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [15] 郑天然, 张颖, 耿远超, 等. 基于集束多频调制的光谱色散匀滑技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1205003.
Zheng T R, Zhang Y, Geng Y C, et al. Smoothing by spectral dispersion technology based on bundle multiple-frequency modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1205003.

Experimental Study on Dynamic Characteristics of Focal Spots of Spectral Dispersion Smoothing Beams

He Jun^{1,2}, Li Ping^{1*}, Chai Xiangxu¹, Wang Liquan¹, Wang Guanzhong¹, Tian Xiaolin¹

¹ *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

² *Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*

Abstract

Objective In the inertial confinement fusion (ICF) experiments, in order to effectively suppress laser plasma instability (LPI), the focal spot of the incident laser is required to have uniform irradiation as far as possible. Therefore, high-power laser devices have developed beam smoothing technologies such as continuous phase plate smoothing (CPP) with focal spot shape control as the main goal, and spectral dispersion smoothing (SSD) and polarization smoothing (PS) with beam decoherence as the main goal. The SSD technology is the only time-domain smoothing technology that can be applied to the existing large drivers. Its characteristic understanding and parameter optimization control are the focus of research, which is of great significance for the research of ICF drivers. At present, many research teams have carried out research on the characteristics of the SSD beam focal spot shape and the focal spot intensity distribution. However, with the gradual deepening of LPI experimental research, it is found that the frequency modulation (FM) pulse used by an SSD beam inevitably causes the amplitude modulation of a far-field focal spot in the time domain in the focusing process, which leads to the increase of the pulsed instantaneous

power density, thus influencing the physical effect of LPI and greatly increasing the complexity of the SSD beam smoothing effect. Therefore, it is urgent to further improve the cognition of the temporal and spatial distribution of an SSD beam focal spot. In present study, we obtain the delicate dynamic evolution image of SSD beam focal spot through experiments, and analyze its characteristics combined with theory. We hope that our basic findings can be helpful to improve the high power laser technologies and the performance of ICF devices.

Methods In present study, an optical imaging system based on streak camera is built on a high-power laser device. In the high-power laser device cluster experimental platform, the seed beam is subjected to spectral dispersion smoothing after pulse shaping. The phase modulator consists of two stages. The modulation frequencies are 2.488 GHz and 19.9 GHz, respectively. The number of color cycles for 2.488 GHz modulation frequency is 0.125 and that for 19.9 GHz is 1, and the corresponding modulation bandwidths are 0.15 nm and 0.32 nm, respectively. The SSD beam is focused to the target after amplification, frequency conversion, and CPP shaping. The focal length of the lens in the focusing system is 12 m and the size of CPP shaping focal spot is 200 μm . In order to achieve a better spatial resolution, the original focal spot is amplified by 3.5 times and imaged to the streak camera. The slit of the streak camera is 10–100 μm adjustable, the spatial resolution of the acquisition part is 20 μm , and the temporal resolution is 5 ps. Considering that the speckle size of the beam is 11.7 μm , the size is 41.0 μm after amplification of 3.5 times, and the minimum period of the SSD beam is about 50 ps, the experimental platform can cover the performance requirements of the precision test of a SSD beam focal spot. By adjusting the slit direction of the streak camera, the dynamic images of one-dimensional focal spot along different directions are obtained.

Results and Discussions Without SSD, the intensity evolution of each region of the focal spot is very stable with time (Fig. 4). After applying SSD, in the SSD sweep direction, the experimental image clearly shows that the focal spot trajectory of the 2.488 GHz SSD beam is a cosine curve, which is completely consistent with the calculation result of single speckle changes in the theoretical analysis. The sweeping of speckles brings amplitude modulation with the same modulation frequency to each area of the focal spot, which influences the smoothness of the focal spot to some extent. The focal spot intensity of the 19.9 GHz SSD beam has a very smooth temporal and spatial distribution, and also has a periodic cosine sweep consistent with the frequency modulation (Fig. 5). The speckles are not completely coincident, but the boundary between speckles is unclear, resulting in a more uniform spatial distribution (Fig. 6). Due to the high modulation frequency, it can “smooth” the temporal and spatial distributions of intensity in short time, so as to achieve a better focal spot smoothing effect. In the vertical SSD sweep direction, the temporal and spatial distribution of focal spots is chaotic, but with the high modulation frequency, the smoother temporal and spatial distribution of intensity can be obtained (Fig. 8). The periodic structure of the dynamic evolution of the focal spot speckle is no longer consistent with the phase modulation period (Fig. 10). In addition, the experiment also shows that the focal spot of the SSD beam has strong amplitude modulation, and the modulation has an obvious regional effect. The modulation depth is closely related to the scanning direction and the modulation frequency of SSD (Table 1).

Conclusions In present study, aiming to the temporal and spatial evolutionary characteristics of SSD beam focal spots and based on the optical imaging system of a streak camera, we carry out the beam test experiment with time resolution on the high-power laser device. Experiments demonstrate the influence of SSD beam control parameters on the dynamic evolutionary characteristics of focal spots. The focal spots along the SSD scanning direction have typical CPP shaped speckle patterns. The dynamic evolutionary modes presented by different modulation frequencies are different. The overall spatial-temporal distribution of intensity modulated by high frequency is more uniform, and a better smoothing effect can be achieved in short smoothing time. The spatial distribution and temporal evolution of the focal spot intensity in the vertical SSD sweep direction become very chaotic, showing the specific differences of SSD beams in two-dimensional space. The focal spot of the SSD beam has strong amplitude modulation, and the modulation has an obvious regional effect. Modulation depth is generally related to the SSD beam control parameters. Our results provide a better understanding of the dynamic evolution of the spot details of SSD beams, which can be combined with the mechanism analysis of LPI to support the optimization of SSD smoothing performances. The inconsistency of SSD beams in two dimensions can be used to optimize the sweeping direction of SSD, and the modulation structure of SSD beams can assist in the selection of modulation frequencies. An accurate description of focal characteristics provides important boundary conditions for optimizing the location of focal trajectory points.

Key words laser optics; focal spot characteristics; spectral dispersion smoothing; amplitude modulation; dynamic evolution