

高功率激光装置光束精密调控性能研究进展*

郑万国, 李平, 张锐, 张颖, 邓学伟, 许党朋,
黄小霞, 王芳, 赵军普, 韩伟

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘 要: 光束精密调控是惯性约束聚变(ICF)研究对激光驱动器的基本需求, 它是一项装置层面的系统工程。主要介绍了中国工程物理研究院激光聚变研究中心近年来在靶面光强控制、脉冲波形控制、光束近场控制以及在新型光束探索方面所取得的重要进展。

关键词: 高功率激光装置; 靶面光强控制; 脉冲精密整形; 光束近场控制; 新型光束探索

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190469

Progress on laser precise control for high power laser facility

Zheng Wanguo, Li Ping, Zhang Rui, Zhang Ying, Deng Xuewei, Xu Dangpeng,
Huang Xiaoxia, Wang Fang, Zhao Junpu, Han Wei

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: Beam precise control is the basic requirement of Inertial Confinement Fusion (ICF) research for laser facility. Its technical characteristics determine that it is a system project for laser facility. This paper introduces the important progress made by the Laser Fusion Research Center of Chinese Academy of Engineering Physics in the control of focal-plane irradiance, pulse precision shaping, beam near-field intensity and novel beam exploration in recent years.

Key words: high power laser facility; focal-plane irradiance control; pulse precision shaping; beam near-field intensity control; novel beam exploration

激光驱动的惯性约束聚变(ICF)由 20 世纪 60 年代前苏联巴索夫院士和我国王淦昌教授所独立提出^[1-2], 在 1972 年美国 Nuckolls 博士发展了一套较完备的激光聚变理论体系后^[3], 各国便开始大力发展高功率激光技术, 并诞生了多个大型激光装置, 如美国国家点火装置(NIF)^[4], 法国兆焦耳装置(LMJ)^[5] 和中国神光系列装置^[6], 有力推动了激光聚变的研究。激光聚变的基本思想是使用激光或激光转换的 X 光均匀辐照装有热核燃料的靶丸, 最外层的球壳被烧蚀向外运动时, 内层的燃料会因为动量守恒而被压缩, 当燃料的温度、密度和约束时间三项指标满足 Lawson 判据的要求时即能发生聚变点火。激光聚变要求驱动激光脉冲不仅有足够高的驱动能量和功率^[7], 同时还必须具有以时域、频域、空域、偏振为代表的光束精密调控能力, 以满足点火过程的精密调控需要^[8]。光束调控包含脉冲波形、靶面光强、能量和功率等方面的精确控制^[9]。激光驱动器也因此发明了多种技术手段实现光束的精密调控, 例如采用电光调制器实现脉冲波形的精密控制^[10], 采用相位调制器实现脉冲频谱的精密控制^[11], 采用液晶光阀实现光束近场强度的主动控制^[12], 采用连续相位板(CPP)实现焦斑的主动整形^[13], 采用光谱和偏振的控制实现光束聚焦的去相干等^[14-15]。

具体而言, 光束精密调控的需求主要体现在三方面: 首先, 基于激光等离子体的相互作用控制要求, 装置需具备以光束匀滑技术为特点的靶面光强精密控制能力; 其次, 基于内爆过程的低熵压缩和辐照对称性的要求, 装置需具备脉冲精密整形能力; 第三, 为满足驱动器较高的输出能力和安全运行的要求, 装置需具备光束近场的精密控制能力。本文以激光驱动器光束精密调控为牵引, 介绍中国工程物理研究院(简称“中物院”)激光聚变研究中心近年来在靶面光强、脉冲波形、光束近场的控制以及新型光束探索方面所取得的重要进展。

* 收稿日期: 2019-11-30; 修订日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(11404306); 中国工程物理研究院院长基金项目(YZ1602)

作者简介: 郑万国(1966—), 研究员, 主要从事高功率固体激光技术与工程研究; wgzheng_caep@sina.com。

1 靶面光强精密控制研究进展

1.1 单束靶面光强精密控制研究进展

黑腔内激光等离子体相互作用的不稳定性(LPI)是实现点火的重要风险之一, LPI效应会降低靶的激光吸收效率, 改变光束功率的分配, 影响辐照对称性, 产生超热电子预热靶丸, 从而破坏点火过程, 靶面光强分布控制是ICF对高功率激光驱动器的基本要求。高功率激光装置也因此发展了多种束匀滑技术手段用于改善靶面光强的性能, 它们包含以焦斑形态控制为主要目标的连续相位板(CPP)整形技术, 和以光束去相干为主要目标的光谱色散匀滑(SSD)和偏振匀滑(PS)技术。经过多年发展最终形成了“CPP+SSD+PS”的靶面光强控制技术体系^[16-17], 如图1所示。

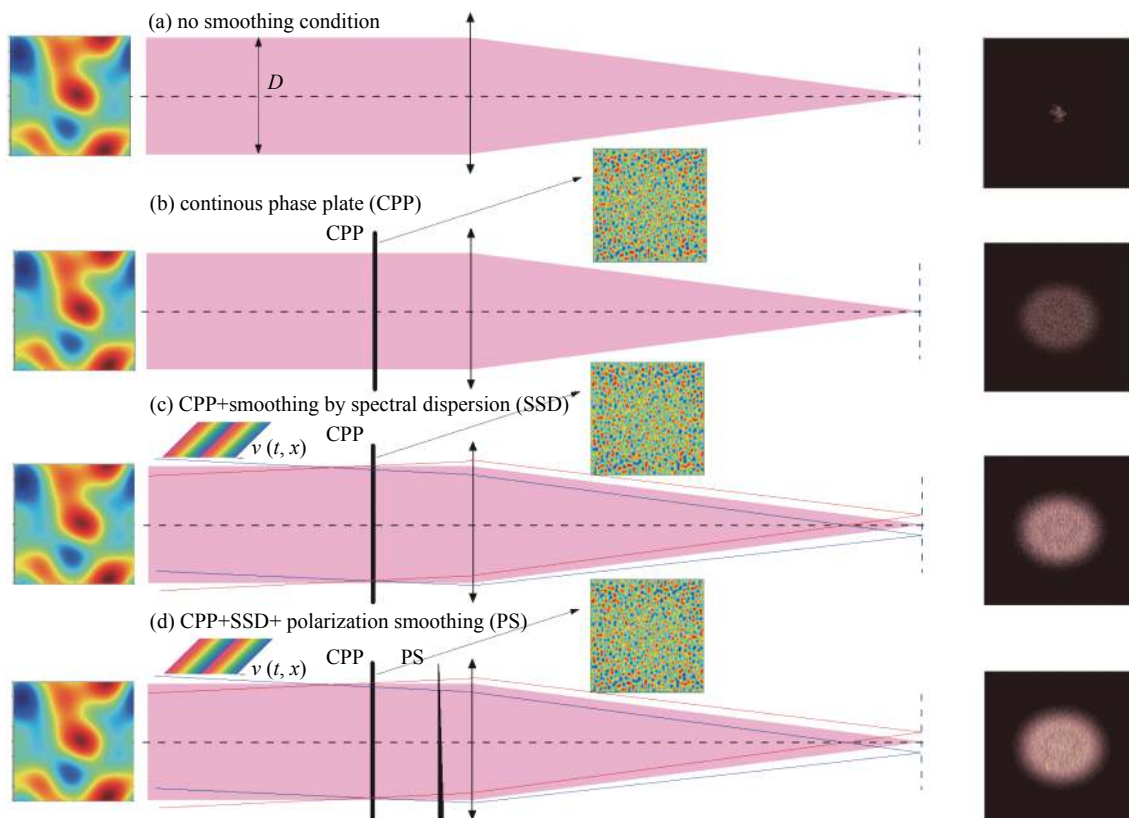


Fig. 1 Schematic diagram of focal-plane irradiance based on “CPP+SSD+PS” technology

图1 基于“CPP+SSD+PS”技术的靶面光强控制原理示意图

在单束靶面光强控制中, 基于主机装置, 国内首次建立了基于“CPP+SSD+PS”的靶面光强控制技术体系^[18]。其技术路线如图2所示, 在光束前级, 通过光栅将两级正弦调频(2.488 GHz+19.9 GHz)产生小宽带光进行色散实现SSD功能, 在光束末级, 通过CPP和偏振晶体的引入实现光束整形和偏振匀滑的功能, 整体上实现对靶面光强的精密控制。

SSD技术源于装置前级, 对激光放大、传输和频率转换均有重要影响, CPP和PS应用在装置后级, 对终端构型、频率转换也具有重要影响, 因此靶面光强控制是关联全装置的一个系统性问题。在原型装置和主机装置上, 中物院激光聚变研究中心通过束匀滑技术对激光放大、频率转换、脉冲整形、光束传输和元件负载的影响研究获得了各项技术在高功率激光装置上应用的边界条件, 确定了包含基频带宽不超过0.3 nm的要求, 基频CPP应用范围等安全运行条件^[19-20]; 通过对焦斑形态、焦斑微观分布、焦斑动态变化、焦斑离焦演化和激光穿孔等特性的研究获得了束匀滑技术对靶面光强控制的光学效果, 如图3所示, 各项技术均实现了各自的物理功能, 实验结果与理论预期一致^[21-24]; 通过在两大装置平台上开展以黑腔能量学为主的物理实验研究, 明确了靶面光强控制在抑制LPI效应, 提升束靶耦合性能中发挥的重要作用, 从系统层面验证了靶面光强的控制体系^[25-26]。目前各项束匀滑技术已作为ICF研究的标配, 支撑了两大装置数千发物理实验。

1.2 集束靶面光强精密控制研究进展

高功率激光装置随着激光能量需求增加, 子束数目不断增多, 装置因此采用集束模式平衡多光束需求和有限

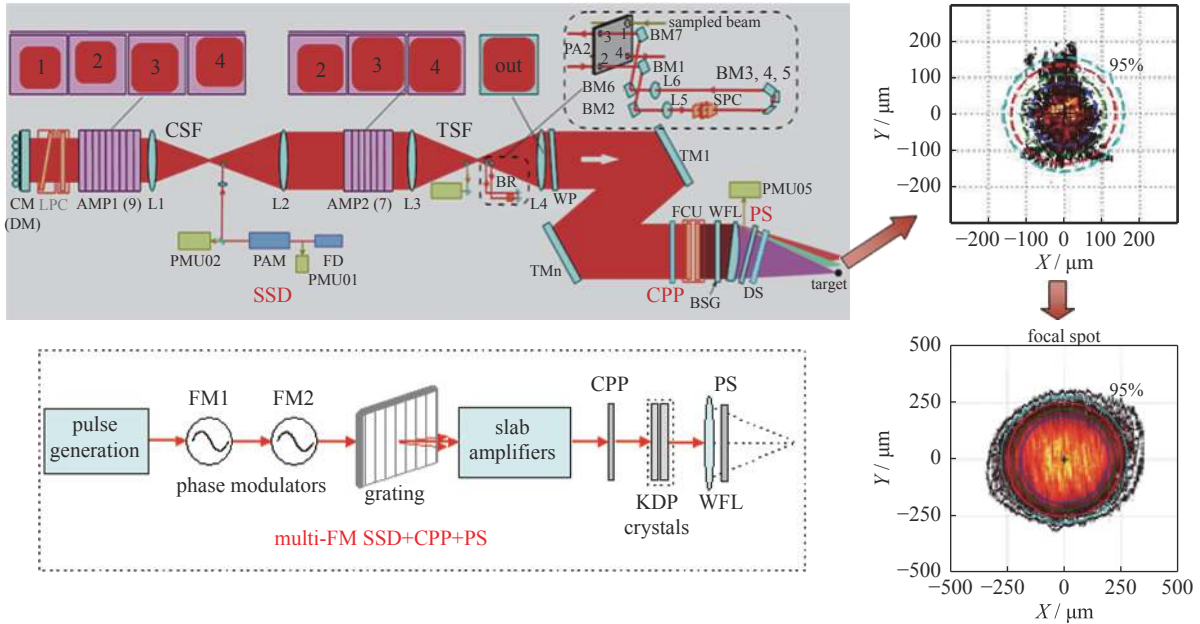


Fig. 2 Single beam smoothing technology applied to the laser facility
图 2 应用于主机装置的单束束匀滑技术

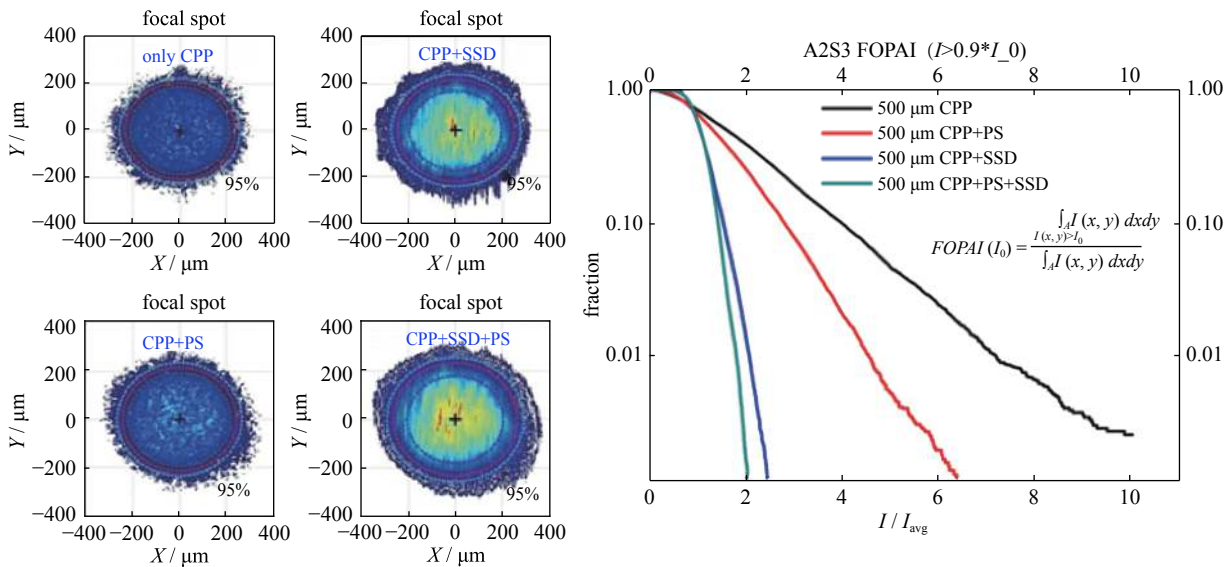


Fig. 3 Effect of single beam smoothing technology on the target irradiation
图 3 单束束匀滑技术在靶面光强上的控制效果

靶室开孔资源的矛盾。集束因子束在束靶耦合全区域交叠并与等离子体相互作用，子束叠加特性对 LPI 的影响至关重要^[27]。为提升集束叠加光场的“去相干”程度，提出了子束独立调控的多色多频 3×3 阵列集束模式来改善集束束靶耦合性能^[28]，如图 4 所示。针对该需求，中物院激光聚变研究中心建立了子束可独立调控的 3×3 阵列集束研究平台，并开展了集束靶面光强性能的实验研究。

多色多频 3×3 阵列集束采用不同的种子源，其叠加特性是认识该集束焦斑散斑特性的基础。基于集束实验平台，优化设计了光束和诊断的参数，获得了清晰的叠加区域的条纹，如图 5 所示，利用频谱特性对交叠所产生的干涉条纹进行提取，可获得干涉条纹的对比度。改变激光脉冲宽度(测量时间)和两子束的波长差，可分别获得条纹对比度与子束波长、偏振、测量时间的定量关系。实验结果与光束相干叠加的理论一致，明确了不同源子束的叠加是完全相干的，且不同波长(多色)的光束会随着积分时间增加而消除随时的演化项，从而表现为非相干，相干时间与波长差成反比。该结论为集束靶面光强计算模型的建立奠定了基础。

LPI 效应与激光散斑尺寸紧密相关，集束焦斑散斑尺寸及其空间分布特性是关联 LPI 与集束性能的重要纽带。在掌握了子束时间相干性规律的基础上，优化选择实验参数，通过不同形式子束的组合，开展了变子束 F 数和

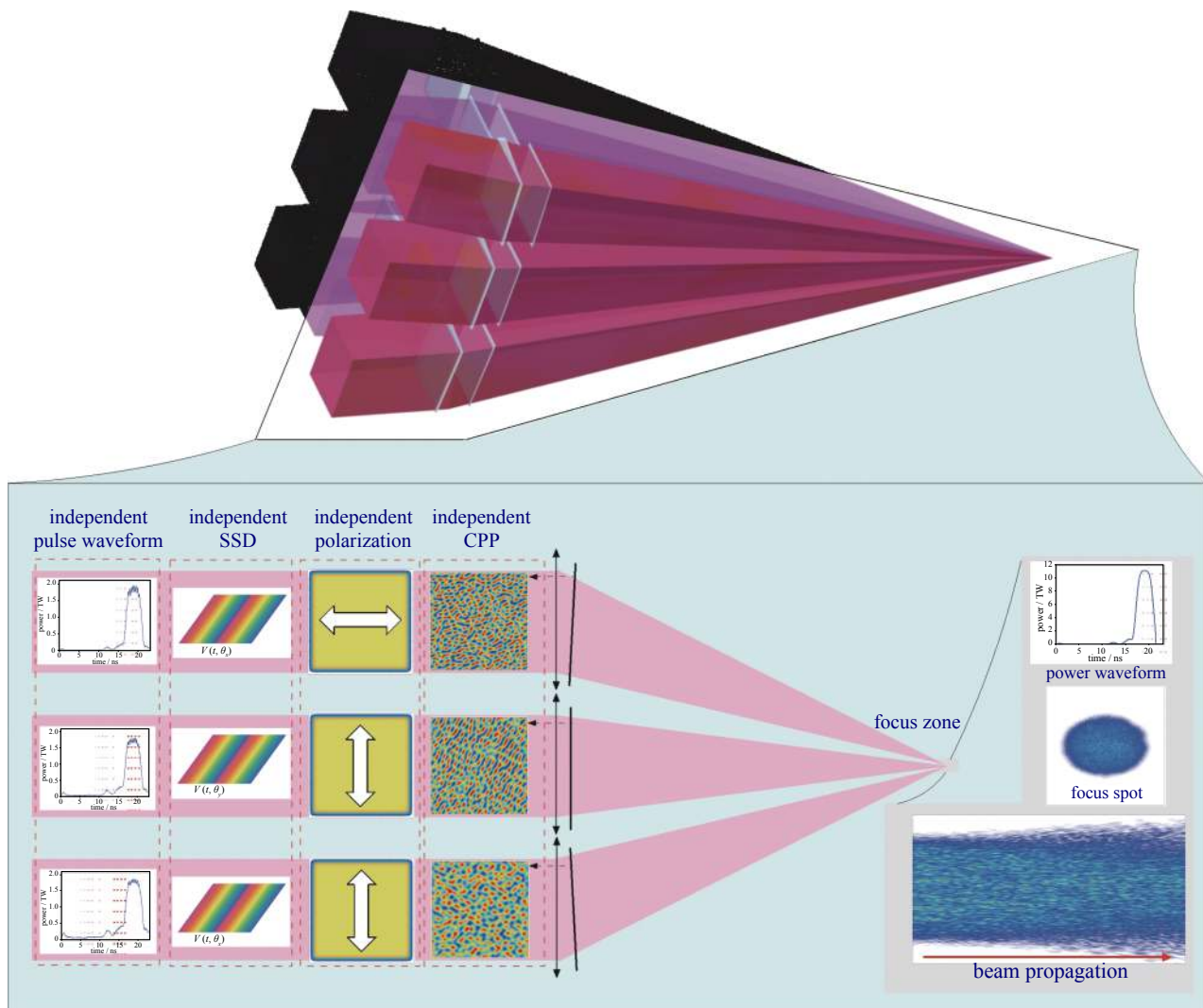


Fig. 4 Schematic diagram of optimizing bundle output based on independent beams

图 4 基于子束独立调控实现集束优化输出的示意图

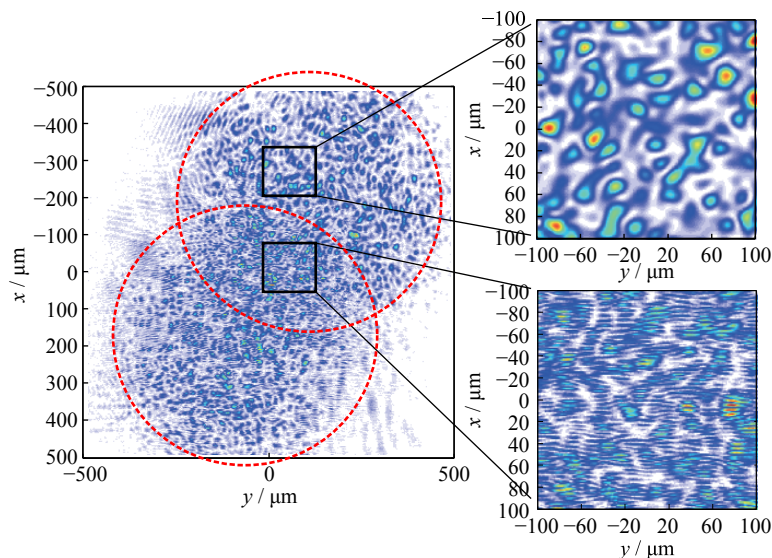


Fig. 5 Characteristics of interference fringes in the area of focal spot superposition for bundle laser

图 5 集束焦斑中光束叠加区域的干涉条纹特性

变集束 F 数的实验,如图 6 所示, (a)与(b)为同子束 F 数,不同集束 F 数的对比,两者最小散斑尺寸不同,但散斑簇的尺寸相同; (b)与(c)为同集束 F 数不同子束 F 数的对比,两者最小散斑尺寸相同,但散斑簇尺寸不同。结合理论

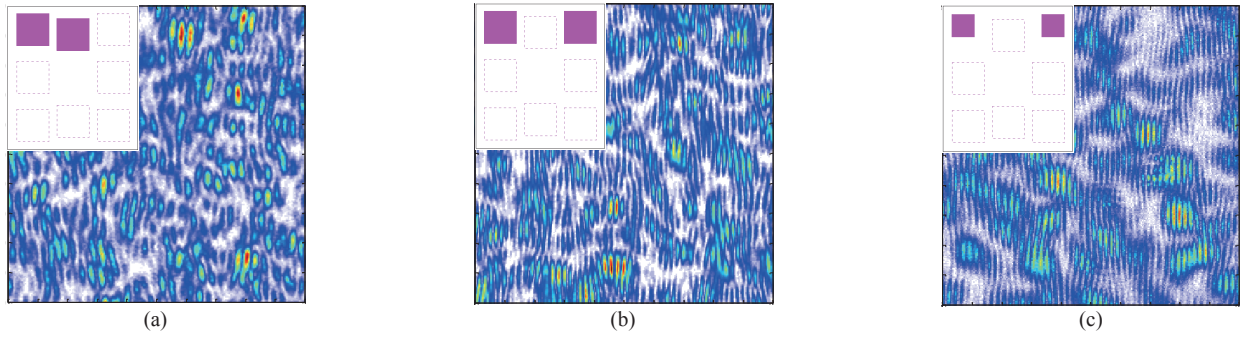


Fig. 6 Speckle distribution comparison of focal spots formed by different beams combinations: (a) and (b) have the same F number of beams but different bundle F number, (b) and (c) have the same bundle F number but different beams, F number

图6 不同子束组合形成焦斑的散斑分布(a)与(b)为同子束F数,不同集束F数的对比,(b)与(c)为同集束F数不同子束F数的对比

分析进一步获得了集束焦斑散斑尺寸的一般性物理规律:靶面散斑最小尺寸与集束F数成正比,但交叠光斑中还存在与子束F数相关的较大尺度的散斑,实验结果完整地解释了集束焦斑散斑成因、规律、特征和影响。

多色多频 3×3 阵列集束束匀滑方案,其特色体现在更多子束和多色多频SSD的独立调控,从而可创造更多套散斑非相干叠加^[28]。在明确了光束叠加特性基础上,研究获得了子束优化设计的方法,并通过子束一维SSD的设计优化出了具有二维SSD效果的集束靶面光强效果。图7所示为实验上获得的单束和 3×3 阵列集束焦斑图像,单束焦斑在引入一维SSD后,焦斑只在竖直方向存在扫动,受原始焦斑均匀性影响较大,一维SSD无法改善局部强区的分布;而在更多子束作用的集束模式下,通过子束扫动方向的相互垂直设计,集束焦斑无明显的局部强区,整体均匀性改善明显。单束与集束焦斑的对比实验明确了子束数目的增加可大幅改善集束焦斑的均匀性,且证实了通过SSD色散方向的优化,可更大程度发挥集束SSD的效果,达到了与单束二维SSD相比拟的匀滑效果,研究结果为LPI的物理实验开展提供了重要支撑。

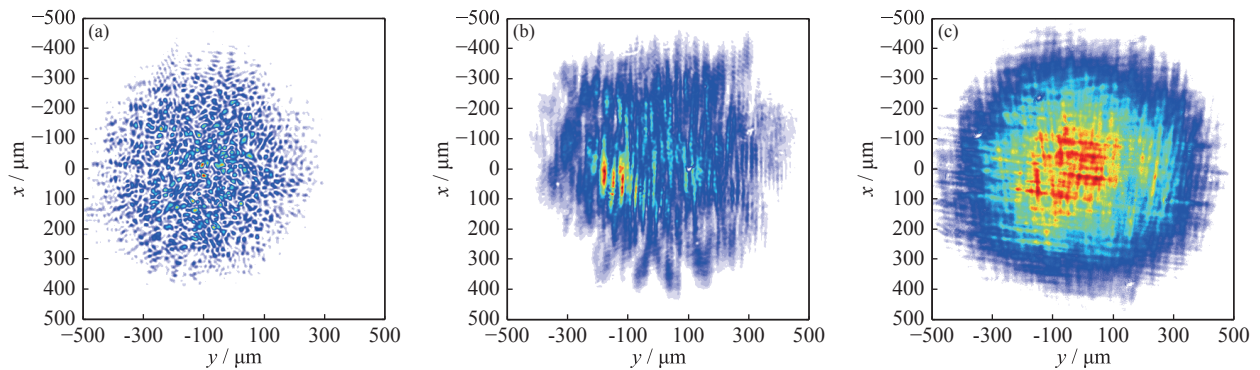


Fig. 7 Comparison of focal-plane irradiance distribution between single beam and 3×3 array bundle: (a) the focused single beam with a CPP, (b) the focused single beam with a CPP and SSD (c) the focused 3×3 array bundle beam with CPPs and SSD

图7 单束束匀滑和集束束匀滑性能的对比(a)加CPP的单束焦斑,(b)加CPP和SSD的单束焦斑,(c)加CPP和SSD的 3×3 阵列集束焦斑

2 激光脉冲波形精密控制能力进展

2.1 激光脉冲精密整形能力研究进展

等熵压缩是ICF中心点火的物理基础,脉冲精密整形是实现等熵压缩的关键,是ICF对高功率激光驱动器的另一项基本要求^[29]。高功率激光装置在发展中逐渐确定了以电光调制器为核心器件,通过电脉冲驱动实现脉冲波形精密控制的技术路线。基于原型装置和主机装置,中物院激光聚变研究中心通过对脉冲波形在光束传输、激光放大、长脉冲过孔、频率转换的变化规律的理论 and 实验研究,建立了一套针对靶点任意目标输出的控制模型和迭代算法,如图8所示,可在发次间隙内实现任意脉冲波形的输出^[30]。模型中采取了多项创新设计:为应对长期运行中装置参数的演化,提出了基于历史数据具有自适应功能的整形脉冲反演模型修正方法,可较好地消除随机偏差,追踪系统偏差,满足了装置长期稳定运行的需求;提出了采用矩阵反馈算法和动态收敛因子,实现了重频段脉冲自动闭环的准确高效的控制,使得激光驱动器的灵和多变的输出能力得到了显著加强^[31]。

脉冲控制模型支撑了神光系列装置近五年来任意整形脉冲的输出,支撑了装置的物理实验。尽管装置多年运行中各状态参数均发生了变化,但自适应控制模型的引入,仍可保障在半小时调试时间内实现任意整形目标的输

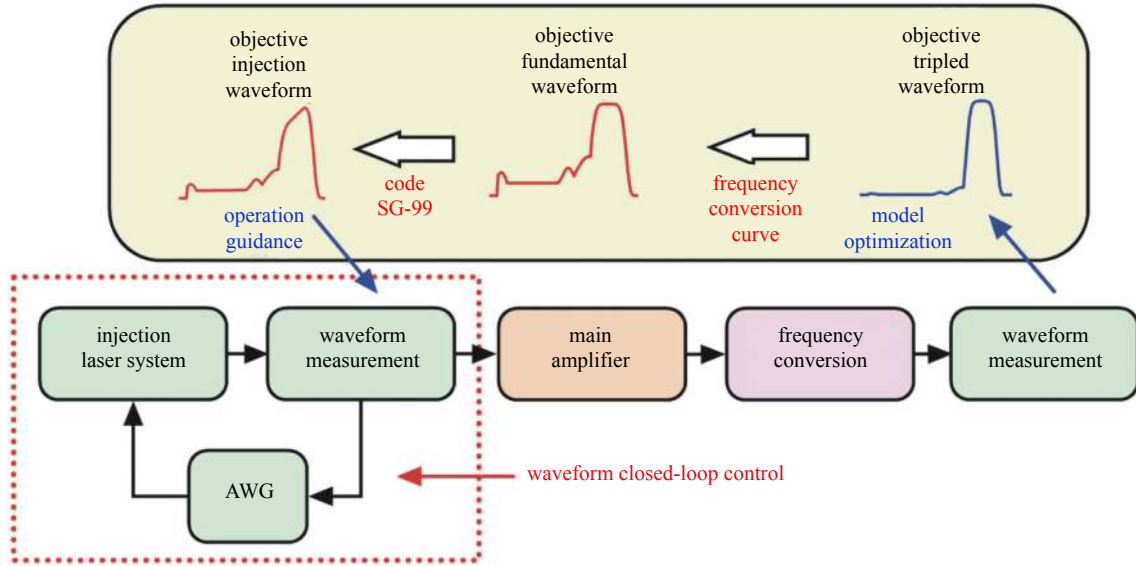


Fig. 8 Schematic diagram of pulse precision shaping control principle

图 8 脉冲精密整形控制原理示意图

出, 图 9 展示了装置近年应用于物理实验的几种典型脉冲波形, 它包含冲击点火脉冲波形、三台阶脉冲波形、黑腔恒温脉冲波形和指数增长脉冲波形, 各类脉冲波形控制的偏差值优于 10%(RMS), 显示了较好的精度。

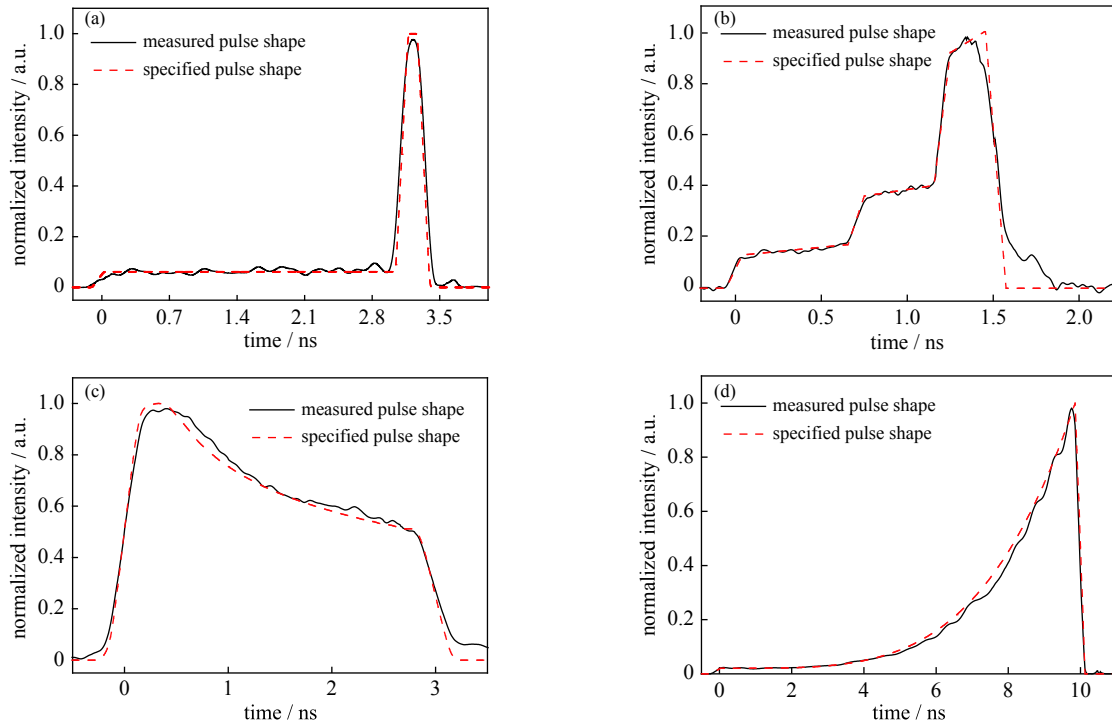


Fig. 9 Illustration of the broad range of pulse shapes applied to physical experiments in Shenguang (SG) series facilities: (a) high-contrast shock ignition pulse shape, (b) three-steps pulse shape, (c) hohlraum constant temperature pulse shape, (d) t^2 exponential pulse shape

图 9 神光系列装置物理实验中的整形脉冲输出(a)冲击点火脉冲(b)三台阶脉冲(c)黑腔恒温脉冲(d) t^2 指数脉冲

在更大输出能力的需求下, 激光放大需从现役神光系列装置的浅度饱和和提升至深度饱和, 它引入了更大的波形畸变, 因此对脉冲精密整形提出了更大的挑战。针对新的需求, 中物院激光聚变研究中心通过优化系统指标, 提升单元器件的控制能力, 并在单口径高通量实验平台上, 考核了在点火脉冲的输出能量和功率下, 500 : 1 的高对比度脉冲输出的性能, 获得了如图 10 所示的激光脉冲, 脉冲峰值功率达到了 1.8 TW, 动态对比度优于 500 : 1, 控制精度 $\sim 8\%$ (picket), 25%(trough), 5%(peak), 脉冲的精密控制能力达到了国际先进水平。

2.2 激光脉冲波形幅频效应 (FM-to-AM) 控制研究进展

幅频效应指的是调频到调幅转变的效应(FM-to-AM), 是指经过频率调制具有一定带宽的信号, 在传输过程中

由于光谱畸变而出现幅度调制的现象。对激光驱动器而言，幅度调制将导致脉冲瞬时功率密度增加，增大了装置的损伤风险；对束靶耦合而言，幅度调制会增强 SBS、SRS 等效应，放大 LPI 效应，还可能造成光束辐照的瞬时不均匀性，影响压缩的对称性，因此脉冲波形的 FM-to-AM 过程必须得到有效控制^[32-34]。

针对幅频效应的来源，中物院激光聚变研究中心在主机装置和 ITB 实验平台上对抑制方法进行了研究，明确了造成幅频效应的因素包括光纤系统中的群速度色散、保偏光纤中的偏振模色散、光谱带宽内的增益不均匀性、弱标准具效应、光学元件膜层透过率以及频率转换过程，并提出了“装置静态控制，光谱强度补偿”的总体控制思路。在装置静态控制方面，通过对技术路线选择(增益合理分配、大带宽增益介质的选择、减少平板元件、前端相位调制器的后移)、参数优化(滤波小孔尺寸优化、频率转换参数优化)和元器件约束(透射元件减反膜约束、低阶波片)大幅减少了装置的光谱静态畸变量；在光谱强度补偿方面，提出了采用基于高双折射保偏光纤的偏振选择滤波器自动闭环控制装置前级输出的 FM-to-AM 效应，采用基于双折射偏振滤波技术补偿空间光路中光谱强度畸变。偏振选择滤波器是利用偏振色散和偏振光干涉的原理，实现正弦模式的光谱补偿函数，光谱透过率中心波长和透过率深度均可进行调节^[35-36]。

ITB 实验平台的实现结果显示，初始基频 FM-to-AM 调制度为 20% 时，在总体控制模型下，可实现基频 FM-to-AM 调制度优于 2%，如图 11 补偿前后的对比；在基频 Fm-to-AM 得到有效控制的条件下，三倍频点火脉冲波形的典型输出如图 10 所示，脉冲 peak 部分的 FM-to-AM 调制度优于 10%，达到了装置总体设计要求。

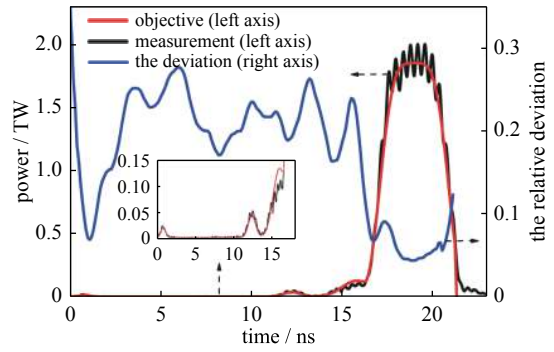


Fig. 10 Pulse control accuracy under ignition pulse output based on ITB facility

图 10 基于 ITB 装置演示的点火脉冲控制精度

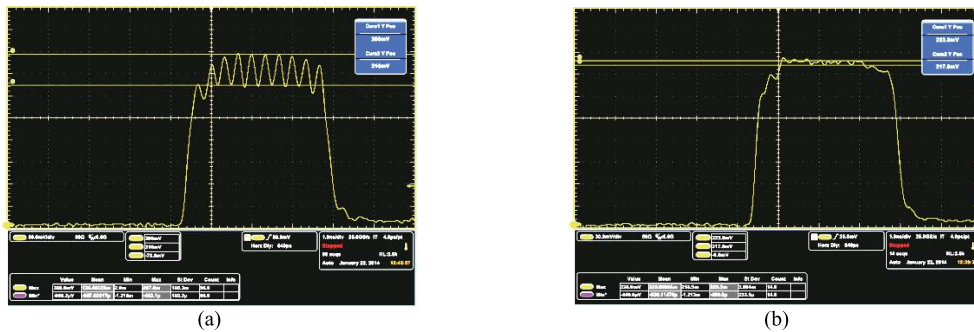


Fig. 11 Compensation effect of FM-to-AM based on birefringent polarization filtering technology: (a) pulse waveform before compensation, (b) pulse waveform after compensation

图 11 基于双折射偏振滤波技术补偿幅频效应的效果(a)补偿前脉冲波形(b)补偿后脉冲波形

基于物理需求和驱动器对 FM-to-AM 性能控制的差异，中物院激光聚变研究中心进一步研究了光束远场 FM-to-AM 与光束近场的关系，如图 12 所示，由于光束近场与远场的全域与全域对应关系，近场上每时间切片上涵盖了全部光谱成分，且比较均匀，那么焦斑上任意位置也涵盖了全部光谱成分，远场的幅度调制会由于 SSD 这种设计而

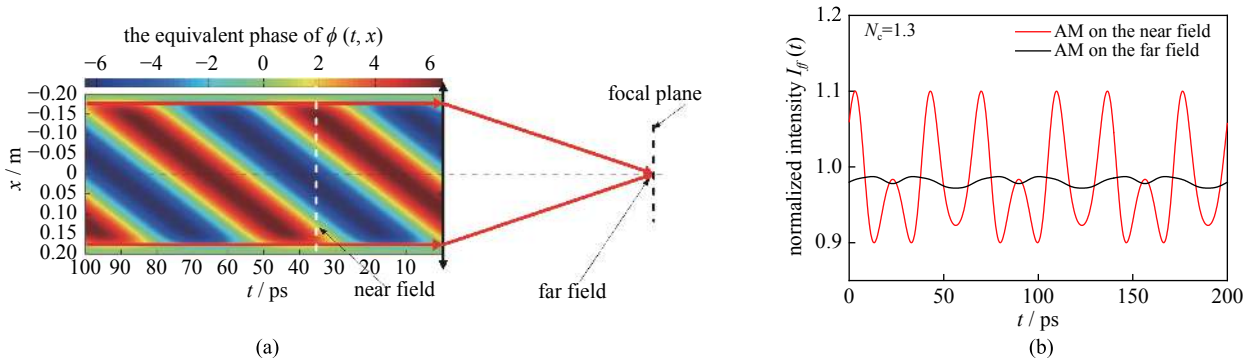


Fig. 12 (a) Schematic diagram of SSD beam focusing and (b) comparison of FM-to-AM between beam far-field and near-field for an SSD beam

图 12 (a)SSD 光束聚焦示意图(b)SSD 光束远场和近场的 FM-to-AM 对比

大幅缓解,色循环数约为1(图中取的是1.3)时,光束近场FM-to-AM调制度10%形成的远场,其FM-to-AM调制度达到了1.5%。集束是更多子束组成的光束远场,可更大程度消除FM-to-AM效应,进而降低对物理过程造成影响^[37]。

3 光束近场控制能力研究进展

3.1 光束近场整形控制研究进展

有效增大光束的填充因子可在确定的激光装置设计边界下,最大化装置输出能力。光束近场整形控制是提升光束填充因子的保障,它包括对光束近场边沿轮廓的控制、近场均匀性补偿以及基于抑制损伤点增长的近场遮挡。

基于神光系列装置,研究了强激光在传输放大过程中的增益不均匀性和光束传输演化特性,确定了“液晶光阀(一次整形光阑)+二次锯齿整形光阑”的技术方案实现光束近场整形控制,如图13所示,液晶光阀为光寻址的可编程液晶光阀,可对光束近场强度分布进行主动控制,产生一定轮廓及一定软化因子的光束,在保障光束可在预放系统中安全传输的基础上,实现对增益不均匀性的补偿和损伤点的遮挡。二次锯齿光阑对液晶光阀调制后的空间整形光束进行再次整形,获得主放大系统光束所需的光束轮廓和边沿软化^[17,38]。

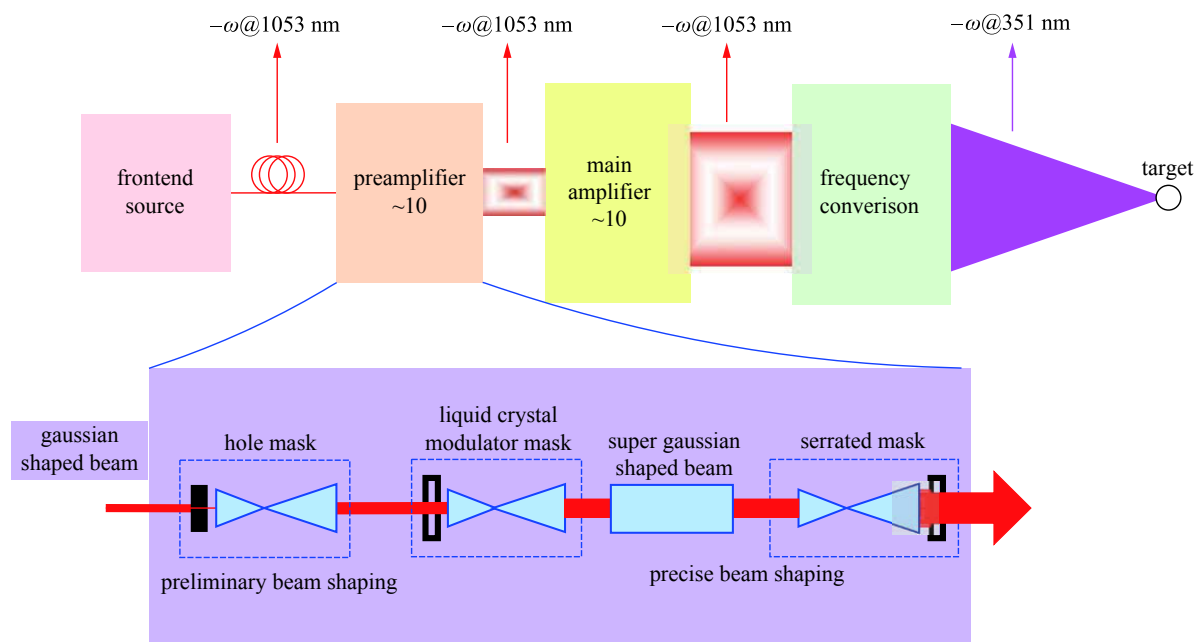


Fig. 13 Beam shaping control diagram in near field of high power laser facility

图13 高功率激光装置光束近场整形控制示意图

基于光束传输规律的研究,中物院激光聚变研究中心建立了一种可实时动态调整补偿的迭代闭环模型,并在ITB平台上,对深度饱和下的点火脉冲的光束近场整形控制效果进行了实验考核,实现了光束近场边沿轮廓的控制、近场均匀性控制和损伤点遮挡的功能。获得了基频和三倍频光束近场如图14所示,光束基频近场平均通量为 14 J/cm^2 ,近场软化因子0.055,对比度0.08,三倍频近场平均通量 7 J/cm^2 ,近场软化因子0.04,对比度0.149,实验结果显示基频和三倍频光束近场可达到良好的控制效果,优于光束近场整形控制的目标(基频近场软化因子0.06,对比度0.1,三倍频近场软化因子0.04,对比度0.15)。

3.2 光束近场分裂及“热像”控制的研究进展

强激光传输的非线性效应控制是光束近场控制中另一个非常重要的问题,它限制了装置最大输出功率。针对噪声的来源不同,强激光传输问题包含起源于噪声的小尺度自聚焦和起源于元件缺陷的“热像”效应。

针对小尺度自聚焦,1966年由Bespalov和Talanov提出的基于平面波微扰的B-T理论是高功率固体激光装置的重要设计判据^[39]。但B积分的判据主要解决的是单波长效应^[40-43],高功率激光装置的三倍频段存在三种光束波长,每种光场都会对介质的折射率改变产生影响从而影响整体的折射率分布,多种波长的光在传输过程中相互作用和影响,使得光传输规律非常复杂。美国利弗莫尔实验室(LLNL)在终端构型优化设计中首次指出了复合波长下互相位调制作用将对小尺度自聚焦产生影响,但研究是仅限于数值模拟,并没有对互相位调制的影响机制进行阐述^[44-45]。从三波耦合方程的基本理论出发,中物院激光聚变研究中心首次获得了强激光复合波长小尺度自聚焦的传输理论解^[46],如图15所示,从原理上指出复合波长强激光自聚焦相比单波长的差异:一是小尺度自聚焦指数

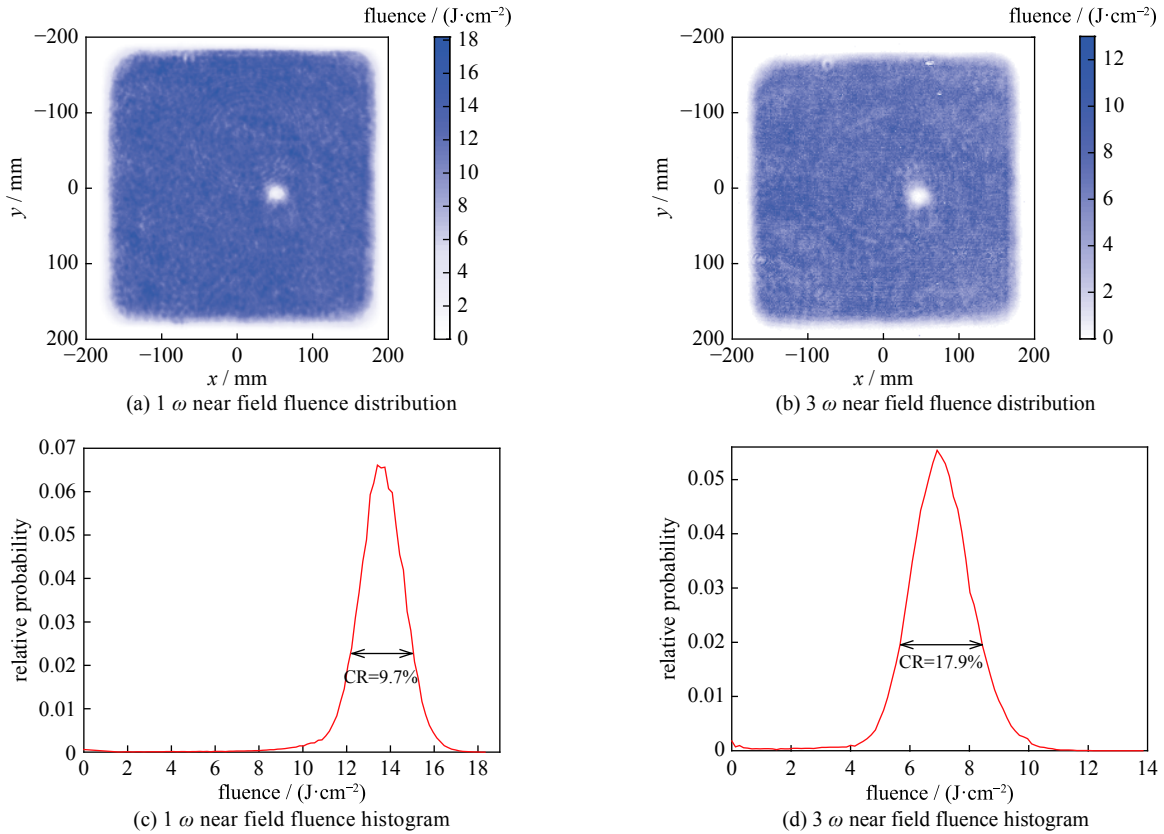


Fig. 14 Near-field beam profiles of measurement: (a) 1ω laser and (b) 3ω laser at ignition pulse output based on ITB facility, (c) and (d) are the probability density functions of the fluence for (a) and (b) respectively

图 14 点火脉冲输出下光束近场整形控制性能 (a) 基频光束近场, (b) 三倍频光束近场, (c) 基频光束通量直方图, (d) 三倍频光束通量直方图

增益的频谱范围增加; 二是指数增益的增益系数在全频域区域均增大; 三是最快增长频率向高频方向移动, 这些变化会加剧光束质量的恶化, 缩短三倍频光的成丝长度。研究结果为高功率激光装置复合波长下的终端构型设计奠定了理论基础。

进一步研究了复合波长强激光传输中光场的空间演化规律, 结果表明复合波长强激光在传输过程中的光强分布有自相似解, 且峰谷结构完全重合, 如图 16 所示, 该特性表明在高功率激光装置中, 初始三倍频效率的空间不均匀性形成的复合波长强区互补, 经过非线性介质传输后, 会演化成复合波长的强区重合, 这对装置负载是一个较大的威胁。研究结果加深了对复合波长自聚焦的物理机制和表现形式的认识, 为高功率激光装置复合波长的负载模型建立提供了理论支撑。

在“热像”效应的控制方面, 由于“热像”造成是高功率固体激光装置光学元件损伤的一个重要的物理机制^[47-48], 且位相缺陷特征信息是决定热斑位置和强度的关键量, 因而必须对大口径光学元件上的位相缺陷进行全面检测。为了兼顾光学元件位相缺陷检测的精度和效率, 中物院激光聚变研究中心确定了基于线扫描微分成像的“粗检”和相移衍射干涉成像的“精检”相结合的总体技术路线^[49-50], 研制成功国内首台大口径光学元件全自动位相缺陷检测设备, 如图 17 所示, 通过热像演化物理规律的研究建立了基于位相缺陷检测数据的强激光传输模型, 它们共同构成了位相缺陷管理的完整流程, 可对不同光学排布终端光学系统的热斑损伤风险进行全面评估^[51]。

在 ITB 实验平台上, 对光学元件热像损伤的全控制流程进行了实验验证。在如图 18 所示的位相缺陷点引入的强激光传输特性基础上, 通过对光束近场分布和元件损伤点的位置分析, 评估了终端内晶体模块内所检测出的位相缺陷点对光束传输和下游元件的影响。实验中未发现经评估安全的位相缺陷点的下游出现损伤点, 反映了检

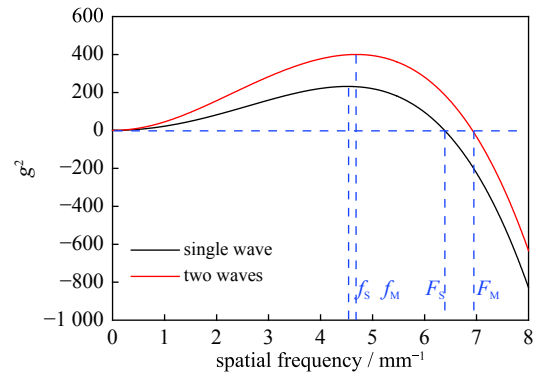


Fig. 15 Square of nonlinear spatial spectrum's gain for high-power lasers with two-wavelengths

图 15 复合波长小尺度自聚焦的增益系数曲线

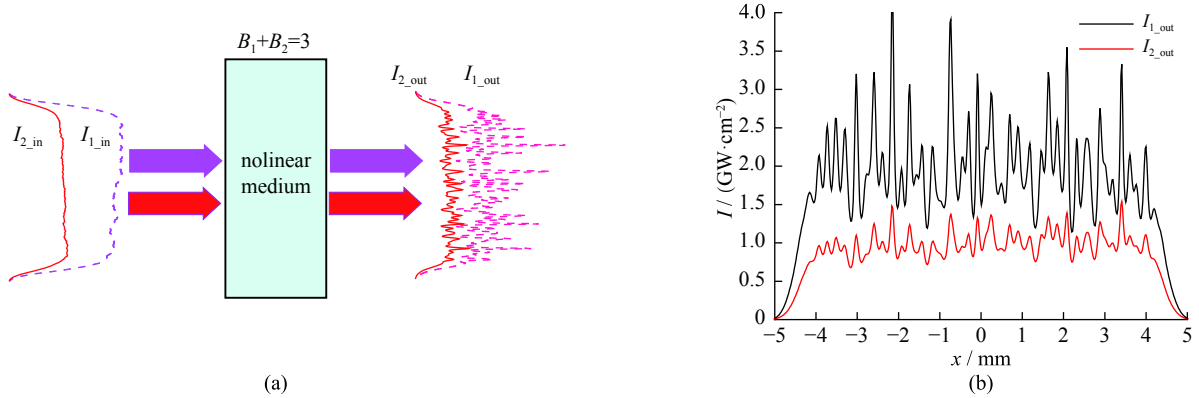


Fig. 16 (a) Schematic diagram of nonlinear propagation of two-wavelength beams in medium and (b) intensity lineout across the output near-field image of the two-wavelength beams

图 16 (a) 复合波长强激光在非线性质中传输的演化示意图 (b) 输出光束的一维近场强度分布

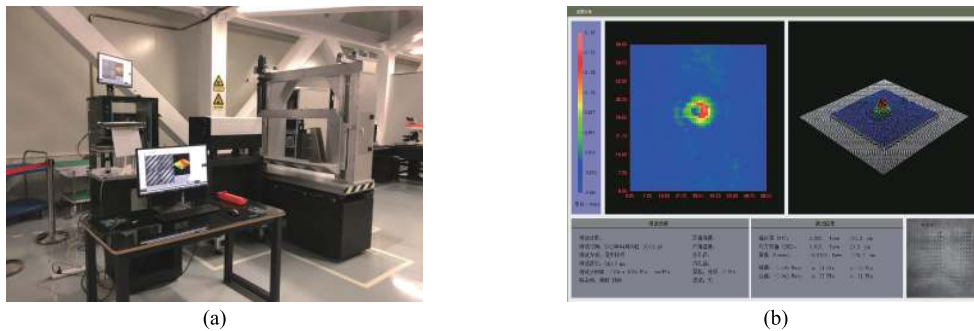


Fig. 17 (a) Phase defect detection platform and (b) typical detection data

图 17 (a) 研制的位相缺陷检测平台 (b) 典型的位相缺陷检测数据

测和评估计算方法可正确地评估“热像”特性对装置的影响规律,验证了位相缺陷管理流程在规避热像损伤的方法是有效的。研究结果为高功率激光装置的负载性能提升提供了支撑。

4 新型光束控制技术的研究进展

4.1 异型焦斑在间接驱动中的应用研究

激光聚变的间接驱动中,高功率激光需通过黑腔注入口 (LEH) 传输到腔壁并转换成驱动靶丸内爆的 X 射线。黑腔内多光束 LPI 效应的物理过程非常复杂,单纯地控制激光某些参数达不到整体最优效果^[8, 52]。如图 19 的激光注入示意

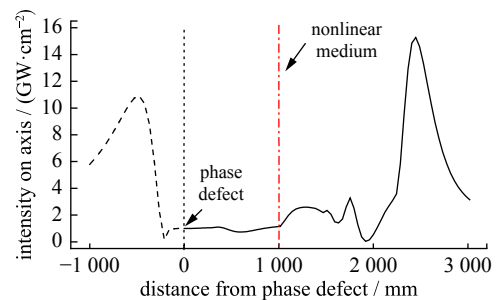


Fig. 18 Intense laser propagation characteristics introduced by phase defect point

图 18 位相缺陷点引入的强激光传输特性

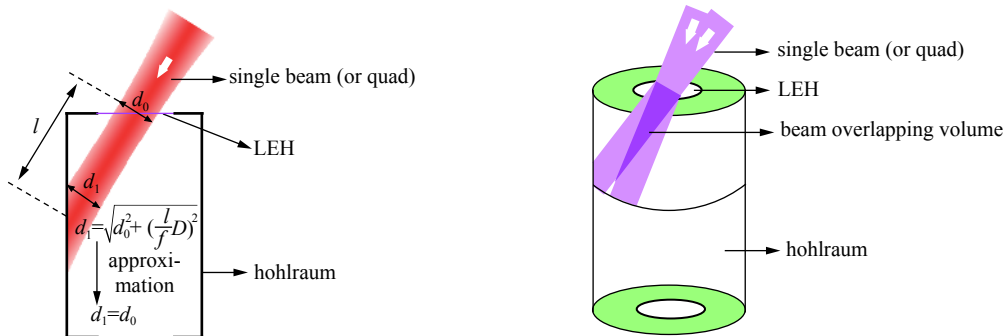


Fig. 19 (a) Approximation of beam propagation in hohlraum. (b) Two overlapped beams pass through the LEH and reach the hohlraum wall (Beam overlapping volume is emphasized with dark color)

图 19 (a) 激光通过黑腔 LEH 传输至腔壁示意图 (b) 光束在黑腔中传输交叠示意图

图所示，黑腔 LEH 会限制单束焦斑尺寸，采用最大化的单束焦斑尺寸利于降低单束 LPI 效应，但此时多光束在腔内交叠程度会大幅增加，这会诱导具有拍频形式的等离子体分布，从而造成其它的 LPI 效应如 CBET，不利于多光束 LPI 效应，因此焦斑形态设计是一个优化权衡过程。

基于对激光穿孔受限条件的综合分析，并结合激光注入黑腔的几何结构模型，中物院激光聚变研究中心李平等提出了异型焦斑用于平衡单束 LPI 效应和多光束交叠问题^[53]。异型焦斑的设计思想如图 20 所示，在黑腔的任意轴截面上，多束并穿激光束相互交叠，虚线圈是由于 LEH 限制所允许的最大焦斑分布，轴截面圆环上的切线方向是产生交叠的原因，为减少交叠体积，措施是减小焦斑在圆环切向上的尺寸，最为有效的设计是构建如图中右侧所示的异型焦斑。通过对 CBET 的物理机制的分析建立了异型焦斑的设计模型，提出了焦斑面积和光束交叠体积作为评估影响黑腔性能的两个量化指标。并以 LEH 所允许最大的焦斑作为基准，量化分析了焦斑形态参数对黑腔性能的影响规律，结果显示采用异型焦斑，在单束焦斑功率密度提升 10% 的代价下，光束交叠体积可降低 30%，这有望为黑腔性能带来更优效果。

通过 CPP 的理论研究和数值模拟分析进一步研究了异型焦斑的技术可行性^[54]。如图 21 所示，以模型所优化的焦斑作为整形目标，以现有 CPP 的生产受限条件作为边界条件，完成了 CPP 面形设计并评估了实际可获得的焦斑性能，模拟显示所获得的焦斑性能与预期一致。该项研究对黑腔能量学的理论和实验研究提供了一种思路和技术方案。

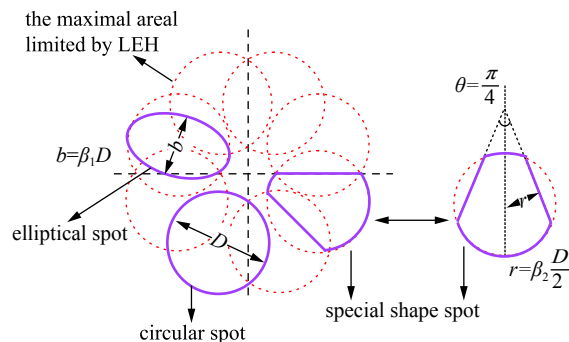


Fig. 20 Some focal spots, including circular spot, elliptical spot and special shape spot, are proposed to reduce the degree of beam overlap. The dashed circle shows the maximal area limited by LEH
图 20 用于减少光束交叠的异型焦斑设计思想示意图

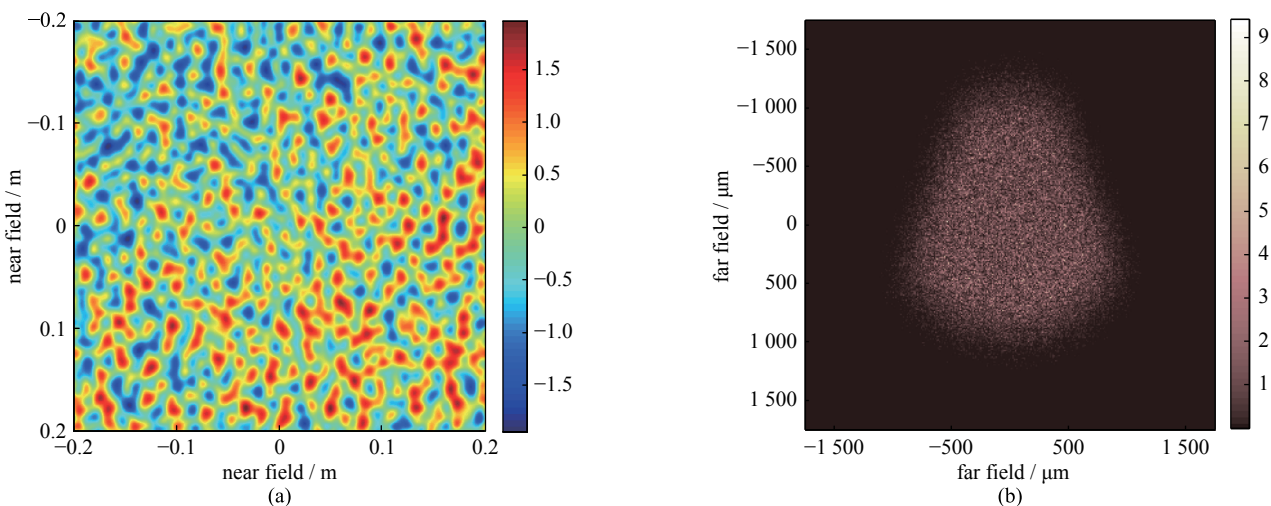


Fig. 21 (a) The designed CPP that produces a super-Gaussian of order $sg=6$ with special laser spot in the far field.
(b) Speckled far-field intensity patterns produced by the full aperture illumination of the CPP

图 21 (a) 异型焦斑的 CPP 面型设计和 (b) 获得的异型焦斑分布

4.2 新型偏振匀滑技术及其性能研究

偏振匀滑是作为一种瞬时匀滑技术，对改善靶面光强性能，缓解 LPI 效应有非常明显的作用，目前已广泛应用于各类大型激光装置。中物院激光聚变研究中心李平等人研究了光束偏振空间分布和焦斑匀滑效果间的理论关系，建立了焦斑全频段匀滑的光束偏振分布理论模型^[55-56]，模型指出传统楔板晶体获得的两种正交偏振态的光斑图样相同，不能对整个空间频谱进行匀滑，要实现焦斑空间频率的全域优化，需满足光束偏振态在空间上具有随机分布的特点。同时 LPI 的模拟计算也显示，在复杂的黑腔等离子体状态下，光束不同偏振态非线性过程的阈值并不相同，这表明了精密控制光束在空间上的偏振分布有利于改善 LPI 性能，理论模型为偏振匀滑的优化设计提供了指导。

在创造光束偏振态随机分布的方式上，根据单轴晶体对线偏振光的偏振特性的影响规律，提出了采用单轴晶

体对入射光的角度不同而产生不同相移的方法,实现两种正交偏振态在靶点的分离,它可通过设计偏振元件的面形分布,来全频域降低焦斑空间频率。图 22 为光束分别通过楔形偏振晶体和新方法设计偏振晶体后的偏振分布图,它反映了光束近场偏振之间的相关性,近场上灰度越接近的两点,它们之间的相关性越强。由图可见,新方法实现了光束偏振态的随机分布。

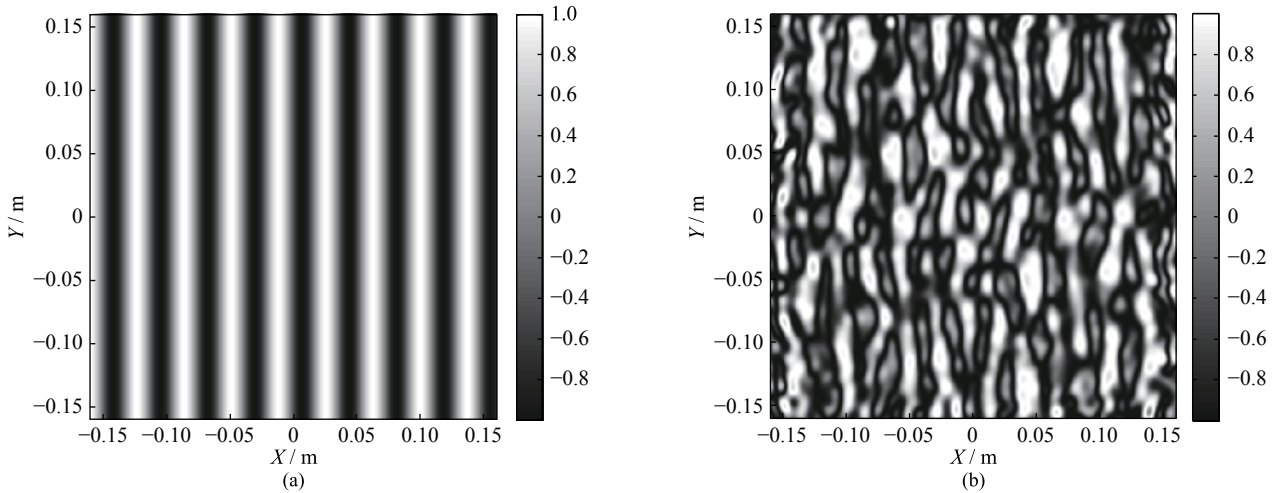


Fig. 22 Polarization distribution of beam passing through polarization plate. (a) wedge polarization crystal, (b) crystal with random phase distribution

图 22 光束通过偏振元件后的偏振分布(a)楔形偏振晶体(b)具有随机相位分布的晶体

在实现方法上,提出了偏振匀滑和焦斑整形相互耦合的方法,即采用晶轴与光轴成 45° 角的晶体作为 CPP 的材料,此时 CPP 的面形既作为整形焦斑的面形,又承担引入激光不同入射角的功能来实现偏振匀滑,因而焦斑整形和偏振匀滑在物理图像上集成于同一光学元件。偏振匀滑对应焦斑性能效果如图 23 所示,新方法设计的偏振匀滑对应的焦斑 PSD 曲线相对原始焦斑在全频域均得到了降低,它反映了该偏振匀滑方式将焦斑对比度改善效果较均匀地分布给了所有的空间频率,与设计思想完全一致。该项目研究为 LPI 控制的研究提供了新的探索方向和技术手段,

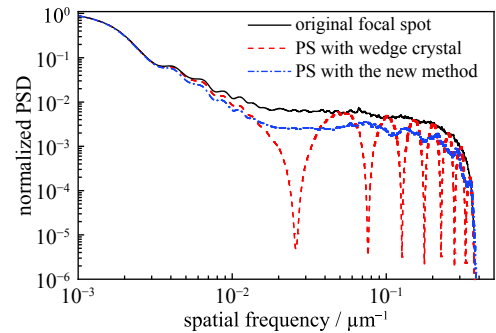


Fig. 23 Focal spot PSDs corresponding to different polarization smoothing

图 23 不同偏振匀滑形式对应的焦斑 PSD 曲线

5 结论

激光 ICF 要求驱动激光脉冲有足够高的能量和功率,同时还要求具有以时域、频域、空域、偏振为代表的光束精密调控能力。基于神光系列装置,并展望未来 ICF 的需求,中物院激光聚变中心开展了完整的光束精密调控性能研究,近年来已在靶面光强控制、脉冲波形控制、光束近场控制等方面取得了重要进展,光束输出性能已经达到了国际先进水平,支撑了两大装置数千发装置的物理实验。在 NIF 攻关面临困难的条件下,结合物理需求的新型光束的探索是一个重要的研究方向,中物院激光聚变研究中心还将继续研究开发精度更高、灵活性更强的新型光束控制技术,支撑激光聚变事业向前发展。

参考文献:

- [1] Basov N G, Krohkin O H. The conditions of plasma heating by optical generation of radiation[C]//Proceedings of the 3rd International Congress on Quantum Electronics, 1963.
- [2] 王淦昌. 利用大能量大功率的光激光器产生中子的建议[J]. 中国激光, 1987, 14(11): 641-645. (Wang Ganchang. Suggestion of neutron generation with powerful lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 1987, 14(11): 641-645)
- [3] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) applications[J]. Nature, 1972, 239(5368): 139-142.
- [4] Moses E, Wuest C R. The National Ignition Facility: status and plans for laser fusion and high-energy-density experimental studies[J]. Fusion Science and Technology, 2003, 43: 420.

- [5] André M L. The French Megajoule Laser Project (LMJ)[J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44(1/4): 43-49.
- [6] 魏晓峰, 郑万国, 张小民. 中国高功率固体激光技术发展中的两次突破[J]. *物理*, 2018, 47(2): 73-83. (Wei Xiaofeng, Zheng Wanguo, Zhang Xiaomin. Two breakthroughs in the development of high power solid-state laser technology in China[J]. *Physics*, 2018, 47(2): 73-83)
- [7] 马腾才. 等离子体物理原理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1988. (Ma Tengcai. Principles of plasma physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1988)
- [8] 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.
- [9] Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the National Ignition Campaign 2009-2012[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 020501.
- [10] Wilcox R B, Behrendt W, Browning D F, et al. Fusion laser oscillator and pulse-forming system using integrated optics[C]//Proc of SPIE. 1993, 1870: 53-63.
- [11] 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.
- [12] Heebner J, Borden M, Miller P, et al. A programmable beam shaping system for tailoring the profile of high fluence laser beams[C]//Proc of SPIE. 2010, 7842: 40.
- [13] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(20): 1703-1705.
- [14] Regan S P, Marozas J A, Craxton R S, et al. Performance of 1-THz-bandwidth, two-dimensional smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power, solid-state laser beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2005, 22(5): 998-1002.
- [15] Rothenberg J E. Polarization beam smoothing for inertial confinement fusion[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(8): 3654-3662.
- [16] Moody J D, Macgowan B J, Rothenberg J E, et al. Backscatter reduction using combined spatial, temporal, and polarization beam smoothing in a long-scale-length laser plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(13): 2810-2813.
- [17] 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.
- [18] Zhang R, Jia H, Tian X, et al. Research of beam conditioning technologies using continuous phase plate, multi-FM smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing[J]. *Optics and Lasers in engineering*, 2016, 85: 38-47.
- [19] 李平, 贾怀庭, 王芳, 等. 神光Ⅲ原型装置中连续相位板的应用位置分析[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 318-323. (Li Ping, Jia Huaiting, Wang Fang, et al. Analysis of continuous phase plates applying position for TIL facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 318-323)
- [20] 刘兰琴, 张颖, 耿远超, 等. 小宽带光谱色散光滑光束传输特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63: 164201. (Liu Lanqin, Zhang Ying, Geng Yuanchao, et al. Propagation characteristics of small-bandwidth pulsed beams with smoothing by spectral dispersion in high power laser system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 164201)
- [21] 李平, 栗敬钦, 马驰, 等. 光谱色散光滑对聚焦光强频谱的影响[J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6210-6215. (Li Ping, Su Jingqin, Ma Chi, et al. Effect of smoothing by spectral dispersion on the spatial spectrum of focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6210-6215)
- [22] Zhang Rui, Su Jingqin, Yuan Haoyu, et al. Research of beam conditioning technologies on SG-III laser facility[C]//Proc of SPIE, 2014, 9293: 92930E.
- [23] Zhang R, Su J, Wang J, et al. Experimental research on the influences of smoothing by spectral dispersion on the Technical Integration Line[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(5): 687-695.
- [24] Zheng W, Wei X, Zhu Q, et al. Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III laser facility[J]. *Matter Radiat Extrem*, 2017, 2: 243-255.
- [25] Hao L, Zhao Y, Yang D, et al. Analysis of stimulated Raman backscatter and stimulated Brillouin backscatter in experiments performed on SGIII prototype facility with a spectral analysis code[J]. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 072705.
- [26] Lan K, Li Z, Xie X, et al. Experimental demonstration of low laser-plasma instabilities in gas-filled spherical hohlraums at laser injection angle designed for ignition target[J]. *Phys Rev E*, 2017, 95: 031202.
- [27] Dewald E L, Glenzer S H, Landen O L, et al. First laser-plasma interaction and hohlraum experiments on the National Ignition Facility[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2005, 47(12B): B405-B417.
- [28] 郑天然, 张颖, 耿远超, 等. 基于集束多频调制的光谱色散光滑技术[J]. *中国激光*, 2017, 44: 1205003. (Zheng Tianran, Zhang Ying, Geng Yuanchao, et al. Smoothing by spectral dispersion technology based on bundle multiple-frequency modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 1205003)
- [29] Jones O S, Speck D R, Williams W H, et al. The NIF's power and energy ratings for ICF-shaped pulses[C]//Proc of SPIE. 1998, 3492: 49-54.
- [30] Hu Dongxia, Dong Jun, Xu Dangpeng, et al. Generation and measurement of complex laser pulse shapes in the SG-III laser facility[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13: 041406.
- [31] Li Ping, Wang Wei, Jin Sai, et al. The shaped pulses control and operation on the SG-III prototype facility[J]. *Laser physics*, 2018, 28: 045004.
- [32] Hocquet S, Penninckx D, Gleyze J F, et al. Nonsinusoidal phase modulations for high-power laser performance control: stimulated Brillouin scattering and FM-to-AM conversion[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(7): 1104-1115.
- [33] Browning D F, Rothenberg J E, Wilcox R B. The issue of FM to AM conversion on the National Ignition Facility[C]//Proceedings of SPIE. 1999, 3492: 49-54.
- [34] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, et al. FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(18): 3338-3349.
- [35] Xu D, Wang J, Li M, et al. Weak etalon effect in wave plates can introduce significant FM-to-AM modulations in complex laser systems[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6621-6627.
- [36] Li Rao, Fan Wei, Jiang Youen, et al. Tunable compensation of GVD-induced FM-AM conversion in the front end of high-power lasers[J]. *Appl Opt*, 2017,

- 56(4): 993-998.
- [37] Li Ping, Wang Wei, Su Jingqin, 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(2).
- [38] Bagnoud V, Zuegel J D. Independent phase and amplitude control of a laser beam by use of a single-phase-only spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 295-297.
- [39] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. *JETP Lett*, 1966, 3(12): 307-310.
- [40] Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 23(11): 628-630.
- [41] Jokipii J R, Marburger J. Homogeneity requirements for minimizing self-focusing damage by strong electromagnetic waves[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 23(12): 696-698.
- [42] Jia Huaiting, Xu Bing, Wang Fang, et al. Small-scale self-focusing in a tapered optical beam[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6089-6094.
- [43] Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Small-scale self-focusing of intense laser beams in the presence of vector effect[J]. *Chin Phys Lett*, 2000, 17(10): 731-733.
- [44] Parham T G, Azevedo S, Chang J, et al. Large aperture optics performance. 2009, LLNL-TR-410955.
- [45] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.
- [46] 周丽丹, 贾怀庭, 韩伟, 等. 复合波长强激光小尺度自聚焦的理论研究[J]. *高能密度科学技术*, 2016, 2(4): 11-17. (Zhou Lidan, Jia Huaiting, Han Wei, et al. Theoretical study on small-scale self-focusing of multi-wavelength beams[J]. *High Energy Density Science and Technology*, 2016, 2(4): 11-17)
- [47] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Hot images from obscurations[J]. *Appl Opt*, 1993, 32: 5973-5982.
- [48] Wang Y W, Wen S C, Zhang L F, et al. Obscuration size dependence of hot image in laser beam through a Kerr medium slab with gain and loss[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(8): 1152-1163.
- [49] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, et al. Modern approaches in phase measuring metrology [C]//Proc of SPIE. 2005, 5856: 13-22.
- [50] Ravizza F L, Nostrand M C, Kegelmeyer L M, et al. Process for rapid detection of fratricidal defects on optics using Linescan Phase Differential Imaging [R]. LLNL-PROC-420837, 2009.
- [51] 李平, 韩伟, 王伟, 等. 关联“热像”特性的缺陷带通成像检测技术[J]. *光学学报*, 2017, 37: 0914004. (Li Ping, Han Wei, Wang Wei, et al. Defect inspection by band-pass imaging related to hot image property[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37: 0914004)
- [52] 杨冬, 李志超, 李三伟, 等. 间接驱动惯性约束聚变中的激光等离子体不稳定性[J]. *中国科学*, 2018, 48: 065203. (Yang Dong, Li Zhichao, Li Sanwei, et al. Laser plasma instability in indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48: 065203)
- [53] Li Ping, Jin Sai, Zhao Runchang, et al. The special shaped laser spot for driving indirect-drive hohlraum with multi-beam incidence[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, 5(3): 49-54.
- [54] 李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 基于焦斑空间频谱控制的连续相位板设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(7): 1114-1118. (Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin, et al. Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1114-1118)
- [55] 耿远超, 刘兰琴, 王文义, 等. 利用晶体相位板同时实现焦斑整形和偏振匀滑[J]. *物理学报*, 2013, 62(14): 145201. (Geng Yuanchao, Liu Lanqin, Wang Wenyi, et al. A new method of simultaneous focal spot shaping and polarization smoothing using crystal phase plate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 145201)
- [56] 李平, 王伟, 赵润昌, 等. 基于焦斑空间频率全域优化的偏振匀设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 215202. (Li Ping, Wang Wei, Zhao Runchang, et al. Polarization smoothing design for improving the whole spatial frequency at focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 215202)