

# 高功率激光装置光束匀滑技术研究进展

周煜梁<sup>1,2</sup> 隋展<sup>1</sup> 刘兰琴<sup>1</sup> 粟敬钦<sup>1</sup> 李平<sup>1</sup> 张锐<sup>1</sup> 许立新<sup>2</sup> 王文义<sup>1</sup> 莫磊<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变中心, 四川 绵阳 621900)  
(<sup>2</sup>中国科学技术大学光电子重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要** 在高功率激光驱动的惯性约束聚变(ICF)系统中, 为了提高束靶耦合效率, 抑制激光与等离子体相互作用时产生的瑞利-泰勒流体不稳定性与等离子体不稳定性, 需要对光束进行匀滑处理。对各国研究的匀滑技术进行了调研, 并对国外大型激光装置的匀滑技术进行了总结分析, 分析了我国光束匀滑技术方面的进展情况。

**关键词** 激光光学; 高功率激光驱动器; 光束匀滑; 光谱色散匀滑; 偏振匀滑; 相位板

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101407

## Research on Beam Smoothing Technology for High-Power Laser System

Zhou Yuliang<sup>1,2</sup> Sui Zhan<sup>1</sup> Liu Lanqin<sup>1</sup> Su Jingqin<sup>1</sup> Li Ping<sup>1</sup>  
Zhang Rui<sup>1</sup> Xu Lixin<sup>2</sup> Wang Wenyi<sup>1</sup> Mo Lei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup>Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China,  
Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** One of the key requirements in high-power laser drivers used for inertial confinement fusion (ICF) research that will minimize Rayleigh-Taylor instability and plasma instability is that laser irradiation on a fuel target should be highly uniform. The research of beam smoothing technology of china is described and the beam smoothing projects of high-power laser drivers are analysed.

**Key words** laser optics; high-power laser drivers; beam smoothing; smoothing by spectral dispersion; polarization smoothing; phase plate

**OCIS codes** 140.3295; 140.3430; 140.3580

## 1 引言

在激光驱动的惯性约束聚变(ICF)系统中, 对靶面的均匀辐照是一个关键问题。为了对聚变靶丸实现可靠的点火跟压缩, 必须尽可能地抑制压缩过程中产生的不稳定性, 其中包括了瑞利-泰勒不稳定性跟等离子体不稳定性。在靶丸的压缩过程中, 瑞利-泰勒不稳定性将扰动进行指数性放大, 会使靶丸由于非对称压缩而提前垮掉。激光等离子体不稳定性能够产生几十电子伏特到兆电子伏特的超热电子, 这些超热电子能预热靶芯燃料, 影响压缩度跟内爆对称性, 降低聚变效率并且会使激光散射, 降低吸收效率, 并且改变吸收位置破坏对称性。而激光驱动源的靶面不均匀性均对上述效应产生影响, 因此各国都开始对靶面均匀辐照进行深入研究, 发展了一系列的单元以及复合匀滑技术。本文对各国研究的匀滑技术进行了调研, 分析了我国光束匀滑技术方面的进展情况。

**收稿日期**: 2011-04-20; **收到修改稿日期**: 2011-05-25; **网络出版日期**: 2011-08-29

**作者简介**: 周煜梁(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率固体激光光束控制技术方面的研究。

E-mail: zyljiushiwo@gmail.com

**导师简介**: 隋展(1965—), 男, 研究员, 主要从事高功率固体激光器技术方面的研究。E-mail: liqing@vip.163.com

\* **通信联系人**。E-mail: molei0223@163.com

## 2 国内外匀滑技术简介

无论是直接驱动还是间接驱动,光束的均匀辐照都是提高束靶耦合效率的必要条件,均匀辐射取决于驱动器的光束数目、光束的排布方式、光束之间的功率平衡、焦斑轮廓以及焦斑条制度。束平滑技术主要分为两类:

1) 空域平滑技术(针对焦斑的轮廓)包括随机相位板(RPP)、阵列透镜(LA)、连续相位板(CPP)、相息相位板(KPP)、偏振匀滑(PS)等;

2) 时域平滑技术(针对焦斑的高频调制)包括诱导空间非相干匀滑技术(ISI)、自发辐射放大加上光谱角色散(ADSP)、光谱色散平滑(SSD)等。

### 2.1 随机相位板

RPP 技术由日本大阪大学激光工程研究所 Y. Kato 等<sup>[1]</sup>在 1984 年提出,它是在一块相位板上随机分布的  $0$  或者  $\pi$  的相位,当光照射到相位板上时,被各相位单元分离成各个子束然后通过透镜聚焦在靶面上,原理如图 1 所示。由于各相位单元对应的相位不同,也极大改善了各个子束之间的干涉问题。

但是这种技术也存在极大的缺点:1) 由于衍射的影响,衍射效率只有 82%。2) 无法对远场强度分布进行更精确的控制(始终为零级衍射分布)。1993 年, S. Skupsky 等<sup>[2]</sup>提出将相位元有规则分布的相位板结合 2 单元偏振控制板构成零相关相位板(ZCPP)来匀滑散斑,肖峻等<sup>[3]</sup>就入射场振幅和相位起伏对 ZCPP 的影响做了详细的理论分析。

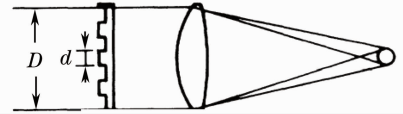


图 1 随机相位板原理

Fig. 1 Schematic of random phase plate (RPP)

### 2.2 相息相位板

相息相位板技术于 1994 年由美国劳伦斯利弗莫尔实验室 S. N. Dixit 等<sup>[4]</sup>提出,为了解决 RPP 的衍射效率差(82%)以及对远场焦斑的控制,他们提出了一种迭代算法对 RPP 的面型进行了重新分布,根据这种算法得到的相位板,获得了 95%衍射效率的超高斯型光斑,但相息相位板的造价很高。

### 2.3 连续相位板

连续相位板<sup>[5,6]</sup>采用了严格的连续面型,并且采用与 KPP 类似的算法,也能获得任意想要的远场焦斑形状,但是因为它的连续面型从而衍射效率理论值可以达到 100%。

### 2.4 阵列透镜技术

阵列透镜技术于 1985 年由邓锡铭等<sup>[7]</sup>提出(图 2),通过阵列透镜将光束分为很多空间子束,然后通过主透镜聚焦叠加到靶面上,来达到均匀照射的效果。并且可以通过靶面略离焦<sup>[8]</sup>,来达到消除衍射斑点的目的。但是也存在不足,第一是阵列透镜单元的大小决定能量利用率的大小,为 82%。第二是没法很好地控制远场焦斑形态。

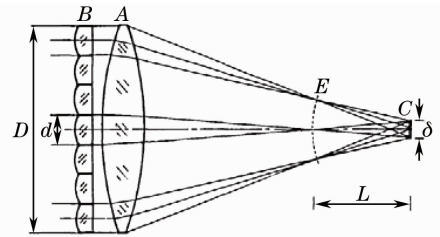


图 2 透镜阵列原理

Fig. 2 Schematic of lens array

### 2.5 偏振匀滑技术

PS 技术原理<sup>[9]</sup>(图 3)是通过一个双折射晶体让入射光分成垂直偏振的 o 光与 e 光然后通过 RPP 后再聚焦到靶面,由于这两束光的偏振方向相互垂直,因此在靶面上进行非相干叠加,降低了靶面的不均匀度。

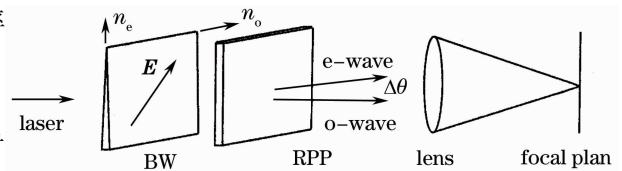


图 3 偏振匀滑原理

Fig. 3 Schematic of polarization smoothing

### 2.6 诱导空间非相干技术

诱导空间非相干技术于 1983 年由海军实验室的 R. H. Lehmborg 等<sup>[10]</sup>提出,该技术是将宽带激光束通过阶梯光栅分成很多子束并对每个子束引入延时,在大于相干时间量级上,众多互不相干子束的远场衍射光斑,在靶上进行非相干叠加,使靶上得到均匀辐照。1987 年, R. H. Lehmborg 等<sup>[11]</sup>又提出不采用阶梯光

栅的 Echelon-Free ISI 方法,一系列实验结果表明,这种部分相干光与靶相互作用时,还可以减小受激拉曼散射、布里渊散射、超热电子的产生<sup>[12]</sup>,并且可以通过对阶梯光栅面的倾斜获得超高斯型远场<sup>[13]</sup>。它对空间频率较低部分的平滑效果很好,但是在放大环节由于波前发生畸变使得它的效率低于光谱色散平滑,而且倍频效率也低于 SSD 技术。

## 2.7 自发辐射放大加上光谱角色散

ADSP 由日本大阪大学 H. Nakano 等<sup>[14]</sup>提出,它采用自发辐射放大(ASE)的部分相干光作为光源,后来通过加入光谱角色散来平滑焦斑<sup>[15]</sup>。它是由 ASE 振荡器产生宽带光源,然后通过光谱角色散后与 RPP 结合工作,通过增大发散角的方法使光束空间相干性降低。焦面上非相干叠加的光斑越多,焦斑的均匀性就越好。实验表明,当色散为 22 倍最小衍射角,光源带宽为 0.6 nm 时,不均匀度降低到 3.3%,但是由于带宽为 0.6 nm,不能满足高效三倍频转换要求。

## 2.8 光谱色散平滑

SSD 于 1989 年由罗彻斯特大学激光力学能实验室的 S. Skupsky 等<sup>[16]</sup>提出,它采用的光源是通过单频光调制展宽而成的宽带光,通过光栅后不同频率的光色散的角度方向不一样,光束会在小范围不停地抖动,使光斑在焦平面上快速移动,在时间平均内产生平滑效果。其原理如图 4 所示。

后来人们发现单一方向上光谱色散平滑在本方向上平滑效果很好,但是对于另外一个方向上仍然存在很深的调制,于是提出了二维方向的光谱色散平滑<sup>[17,18]</sup>,最开始采用的为两块正交光栅,后来简化为一块斜光栅。

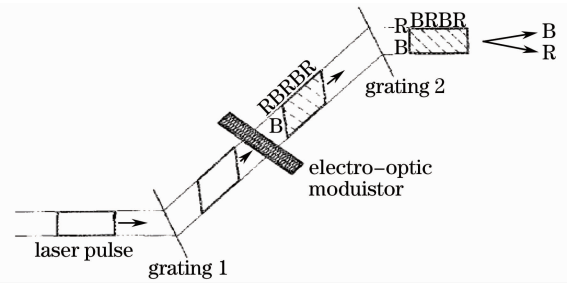


图 4 SSD 原理

Fig. 4 Schematic of smoothing by spectral dispersion (SSD)

## 3 国外大型激光装置中平滑技术的应用

### 3.1 美国的 OMEGA, NIF

美国的 OMEGA 系统采用了 2D-SSD 结合 PS 以及 CPP 的技术<sup>[18]</sup>,后来由于三倍频技术的快速发展<sup>[19,20]</sup>,人们将 2D-SSD 对应的紫外带宽调整到 1 THz<sup>[21]</sup>。图 5 是 OMEGA 上面所采用的平滑方案,OMEGA 将脉冲整形以及色散放在前端部分,并且在通过巧妙的镜面设计,让脉冲两次通过相位调制器从而提高了脉冲的调制效率,但是因为脉冲在前端部分就已经色散扩束了,这样对于后面放大对于光束质量的控制以及空间滤波都要有很高的要求,同时也要注意堵孔效应。PS 以及相位板技术则放在后端,通过 KDP 晶体分为两束光经相位板最终聚焦靶面。2001 年美国的 LLE 实验室给出了 NIF 系统的 2D-SSD 设计<sup>[22]</sup>,如图 6 所示。为了节省成本它在分束前就进行了第一次相位调制,并且采用了一块斜光栅。最后一块色散

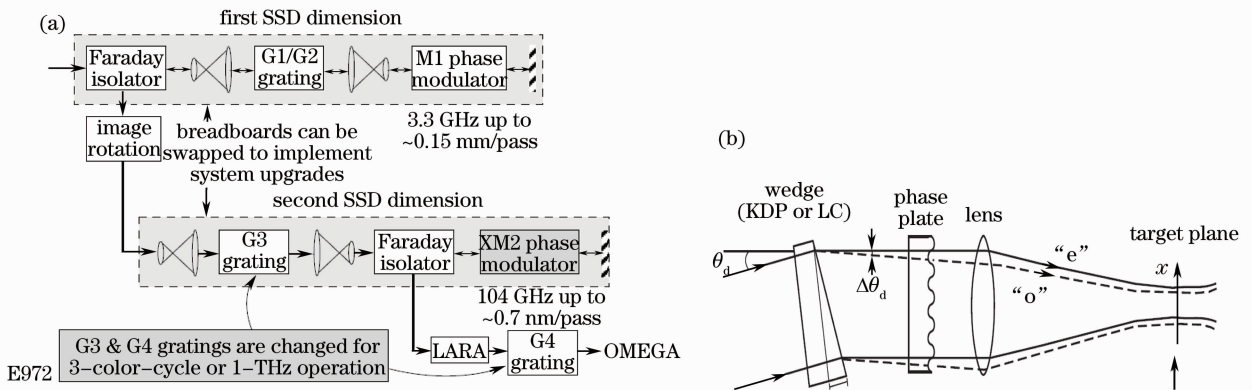


图 5 (a) OMEGA 2D-SSD 装置;(b) OMEGA PS,相位板技术原理

Fig. 5 (a) Schematic of 2D-SSD on OMEGA; (b) schematic of polarization smoothing (PS) and RPP on OMEGA

光栅则放在四程放大之前。它跟 OMEGA 一样也是将色散调制部分放在光学前端,PS 以及相位板技术放在后端。LLNL 研究表明,在间接驱动中虽然二维 SSD 对靶面光强调制的匀滑较一维 SSD 更有效果,但只发生在更长的时间尺度内。在激光等离子体成丝发展和饱和的更短时间内,在总带宽相同和至少一个色循环下,一维 SSD 和二维 SSD 几乎没有差别<sup>[23]</sup>,于是以间接驱动为主的 NIF 装置采用的为 1D-SSD 方案。但是后来由于工程设计上的原因,NIF 采用的 1D-SSD 的方案与传统的 SSD 技术相比只有一块色散光栅,缺失了色散补偿光栅。

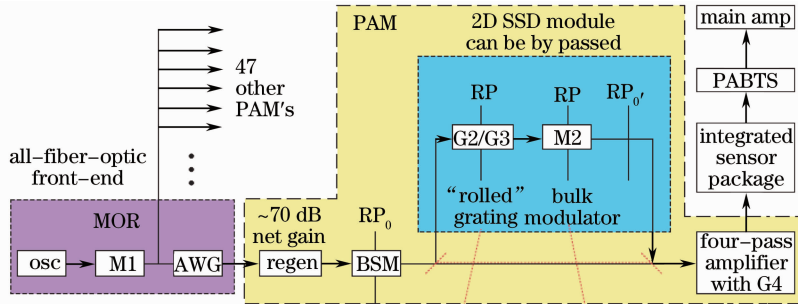


图 6 NIF 2D-SSD 设计装置

Fig. 6 Schematic of 2D-SSD on NIF

图 7 为一维 SSD 光栅在多重放大内的排布<sup>[24]</sup>。SSD 光栅被排布在上臂,光束以利特罗角入射到闪耀光栅上。最近 NIF 使用 96 束或者 192 束打金制的真空黑体辐射腔,激光能量为 150~650 kJ,实验中光束采用了 CPP+PS 以及 45 GHz 的 1D-SSD 的光束匀滑路线,最终获得了极高的 X 射线转换效率(85%~90%)<sup>[25]</sup>。

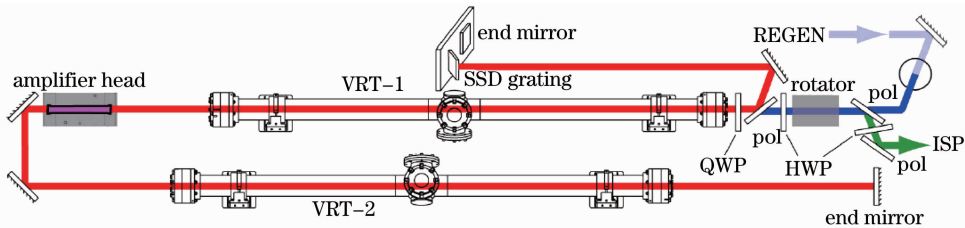


图 7 NIF 1D-SSD 装置

Fig. 7 Schematic of 1D-SSD on NIF

### 3.2 日本的 Gekko X II 装置

日本大阪大学方面在提出了 ASDP<sup>[15]</sup>,并在 Gekko X II 进行了应用研究<sup>[26]</sup>。随后又提出了 3 个方向色散的 SDD 技术并在钕玻璃激光系统上进行了验证<sup>[27]</sup>,它使得近场上频率分布更加的趋于无规,从而减弱 2D-SSD 中不可避免的相干斑现象,图 8 为它的原理图与装置图。这套方案利用保偏光纤中的交叉相位调制效应产生调频脉冲,但是这套方案也存在着装置复杂,调节困难的缺点。

### 3.3 法国的 LMJ 装置

法国的 LMJ 系统采用的是将宽带光源,相位板技术,色散平滑结合起来的办法<sup>[6]</sup>,这种技术方案本身与日本的 ADSP 方案相类似,但是它采用的是连续相位板技术,相较于日本的随机相位板来说,衍射效率以及焦斑的控制都大大提高。从图 9 可以发现它另外一个显著的特点,就是它使用了 3 倍频光栅透镜并在整个装置的后端进行色散,这样由于在放大传输过程中光束没有色散,因此无需对空间滤波器进行调整,并且有利于保证较好的光束质量。缺点是造价高昂,并且由于色散元件在后端放置对其损伤阈值有着很高的要求。

## 4 我国的匀滑技术发展现状

神光 II (SG II)在近 20 年来一直都是采用的 LA 技术为主的匀滑方法,并且报道了相关的理论与实验情况<sup>[28~31]</sup>,周申蕾等<sup>[32,33]</sup>做了谱色散均匀化的计算研究和一维 SSD 的实验研究。模拟和实验结果表明:1) SSD 中最重要的因素是色循环;2) SSD 只对某个空间尺度范围内的强度调制具有平滑作用。2007 年他们结合 SSD 技术对匀滑方案进行了改进<sup>[34]</sup>,但是由于 LA 本身菲涅耳衍射斑的缺陷使得光斑并没有得到充分



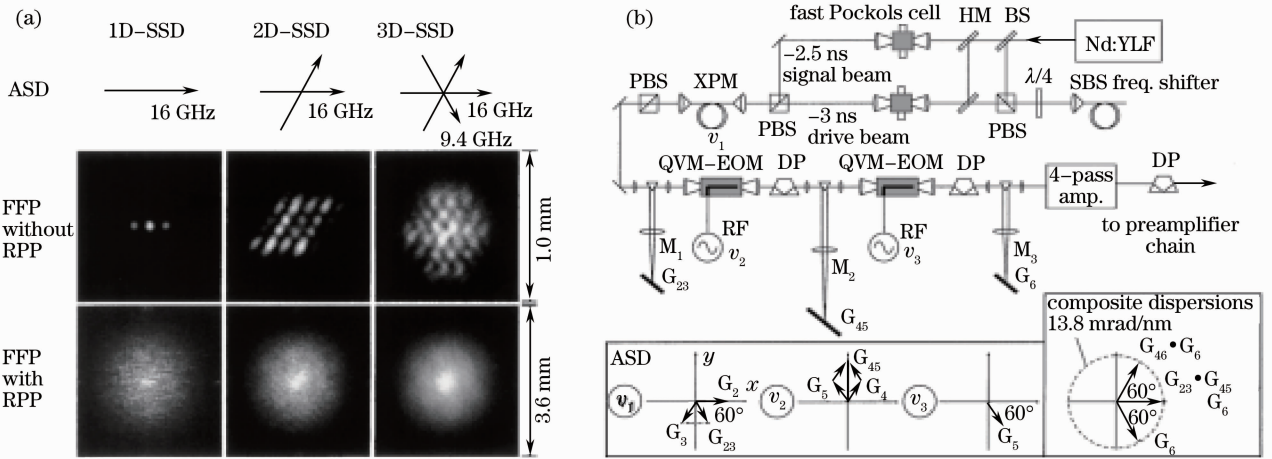


图 8 (a) 1D,2D,3D-SSD 焦斑图;(b) 3D SSD 实验装置

Fig. 8 (a) Far field beam patterns for 1D, 2D, 3D-SSD; (b) schematic of 3D SSD

匀滑,于是提出了透镜单元的改进方案透镜元边缘次化(ESLA)<sup>[35]</sup>,通过对透镜阵列进行处理,获得超高斯型的聚焦光斑,再联合 2D-SSD 技术将焦斑的不均匀度降低到 1.99%,但是受透镜单元大小的影响其能量利用率为 81.4%。

2007 年,江秀娟等<sup>[36]</sup>提出用二维光谱色散平滑和消衍射透镜阵列改善焦斑辐射均匀性。采用了透镜元边缘软化的方法来消除衍射,焦斑的中小尺度强度调制被大大降低。在光路中加入二维光谱色散平滑单元以后,光束在两个互相垂直的方向发生光谱色散,多光束干涉所引起的细密条纹在很大程度上被抹平。

2010 年,李菁辉等<sup>[37]</sup>研究了空间滤波器小孔对色散平滑的影响,模拟了光谱色散后的六阶超高斯光通过不同尺寸的滤波小孔后的传输结果。2010 年张琥杰等<sup>[38]</sup>做了光谱色散平滑中关于调制器的实验研究,由于在电光调制器中光波与微波速度失配问题,制约了光谱色散匀滑的频谱展宽效果,提出了双通调制器技术,从理论以及实验上表明该技术提高调制器调制度的可行性。

在连续相位板设计方面,李平等<sup>[39]</sup>在 2008 年提出了改进后的 G-S 算法来反演得到 CPP 的分布面型,结果表明,相对传统设计的 CPP,新方法能选取任意的连续初始相位;保证 CPP 的面形连续,加工单元可控,从而满足 CPP 的加工要求;通过频谱控制可以抑制特定频段的调制,使 CPP 能与 SSD 更好地耦合,同时还可以降低 CPP 的梯度均方根值。

张锐等<sup>[40]</sup>提出了一种新型脉冲(周期性啁啾脉冲)的 SSD 技术,并对周期性啁啾脉冲的 SSD 特性做了详细的理论分析。李平等<sup>[41]</sup>在 2009 年做了光谱色散匀滑对焦斑频谱的分析,建立了 SSD 对焦斑频谱的影响模型。随后张锐等<sup>[42]</sup>在预放实验平台上做了 SSD 验证实验,并且采用改进后的 CPP,对远场图像进行了模拟。实验中以周期性啁啾脉冲作为光源,图 10 为实验中得到的近场结果图,匀滑效果相当明显。

2009 年张锐等<sup>[43]</sup>在前端预放验证平台上,初步探索了关于正弦调频脉冲的 SSD 单元技术,2010 年在 TIL 装置上,又对 SSD 的关键技术包括空间过孔、幅频效应、穿孔能力、非线性问题等进行了深入研究。图 11 为在 TIL 装置上的实验结果,可以发现使用 SSD(0.3 nm 带宽)后,焦斑不均匀度得到了很好的控制,而且从随后的 PSD 图可以看出,空间波长 10~111  $\mu\text{m}$  范围内都得到了有效的匀滑。

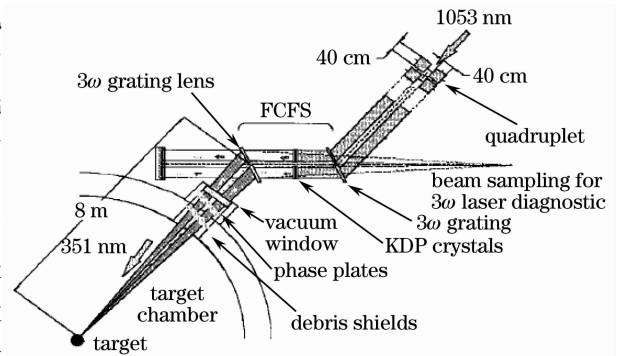


图 9 LMJ 终端光学组件

Fig. 9 Schematic of frequency conversion and focusing system for LMJ

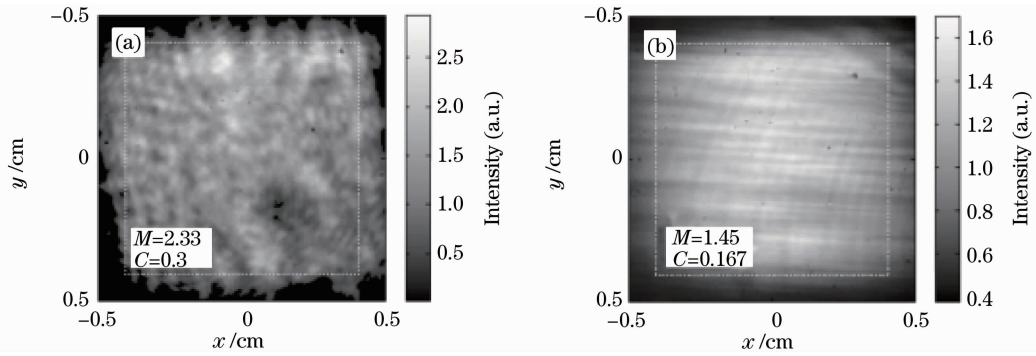


图 10 在传输 1 m 处用科学级 CCD 测得的近场分布。(a) 加光栅前;(b) 加光栅后

Fig. 10 Images of near-field with CCD. (a) Without dispersion grating; (b) with dispersion grating

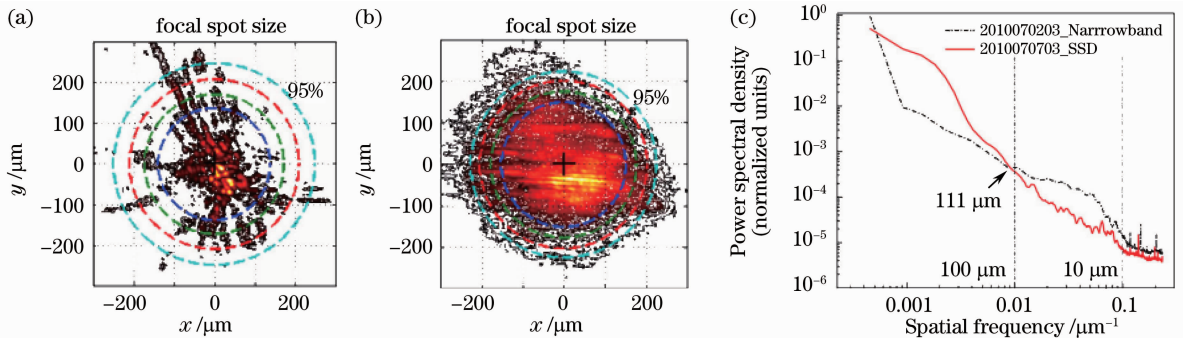


图 11 (a) 窄带光的远场焦斑;(b) 加上 SSD 的远场焦斑;(c) (a) 和 (b) 的 PSD 图

Fig. 11 (a) Narrowband focal spot; (b) SSD focal spot; (c) images of power spectral density (PSD) for (a) and (b)

## 5 结 论

高功率激光装置问世以来,基于物理实验的要求,关于光束匀滑的研究得到大力的发展,涌现出了像 LA, RPP, ADSP, ISI, SSD, KPP, PS, CPP 等方法。从各国的高功率激光装置来看,光束匀滑更多采用的是多种方法的复合,而其中采用的最多是 SSD 结合 PS 与相位板技术。但是以正弦调频宽带光作为光源的 SSD 技术仍有很多关键问题值得深入研究,例如如何联合 CPP 对整个频段的光场进行有效的匀滑,光场与等离子体相互作用时 SSD 复合技术的物理影响,光传输非线性效应等,这些问题都有待研究,并且相信对于新型宽带光源体制的研发,会对匀滑技术带来新的思路。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga *et al.*. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11): 1057~1060
- 2 S. Skupsky, T. J. Kessler. Speckle-free plate (diffuser) for far-field application[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(7): 4310~4316
- 3 Xiao Jun, Lü Baida. Theoretic study of smoothing speckles using zero-correlation phase plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1341~1346
- 肖 峻, 吕百达. 用零相关相位板匀滑散斑的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1341~1346
- 4 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 417~419
- 5 Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[R]. *LLE Review*, 1995, **63**: 126~129
- 6 Jerome Heauport, Xavier Ribeyre, Jerome Daun'os *et al.*. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for laser integration line and laser megajoule facilities[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2377~2382
- 7 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~381

- 8 Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(1): 27~31  
丘悦, 钱列加, 黄宏一等. 用消衍射方法改善透镜列阵的辐照均匀性[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(1): 27~31
- 9 Phase conversion using distributed polarization rotation[R]. LLE Review, 1990, **45**: 1~12
- 10 R. H. Lehmberg, A. J. Schmitt, S. E. Bodner. Theory of induced spatial incoherence[J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**(7): 2680~2671
- 11 R. H. Lehmberg, J. Go Idhar. Use of incoherence to produce smooth and controllable irradiation profiles with KrF fusion lasers[J]. *Fusion Technology*, 1987, **11**(5): 532~541
- 12 S. P. Obenschain, J. Grun, M. J. Herbst *et al.*. Laser-target interaction with induced spatial incoherence[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(26): 2807~2810
- 13 S. P. Obenschain, C. J. Pawley, A. N. Mostovych *et al.*. Reduction of Raman scattering in a plasma to convective levels using induced spatial incoherence[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(7): 768~771
- 14 H. Nakano, T. Kanabe, K. Yagi *et al.*. Amplification and propagation of partially coherent amplified spontaneous emission from Nd:glass[J]. *Opt. Commun.*, 1990, **78**(2): 123~127
- 15 H. Nakano, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga *et al.*. Spectrally dispersed spontaneous emission for improving irradiation uniformity into high power Nd:glass laser system[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(5): 2122~2131
- 16 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462
- 17 Joshua E. Rothenberg. Two dimensional beam smoothing by spectral dispersion for direct drive inertial confinement fusion [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 634~644
- 18 Two-Dimensional SSD on OMEGA[R]. LLE Review, 1996, **69**: 1~10
- 19 D. Eimerl, J. M. Auerbach, C. E. Barker *et al.*. Multicrystal designs for efficient third-harmonic generation[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1208~1210
- 20 A. Babushkin, R. S. Craxton, S. Oskoui *et al.*. Demonstration of the dual-tripler scheme for increased-bandwidth third-harmonic generation[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(12): 927~939
- 21 Performance of 1-THz-bandwidth, 2-D smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power siskud-stae kaser beams[R]. LLE Review, 2004, **98**: 49~53
- 22 Preliminary design of NIF 2-D SSD[R]. LLE Review, 2001, **85**: 39~46
- 23 J. D. Lindl, P. Amendt, R. L. Berger *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility[J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(2): 339~491
- 24 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 25 J. L. Kline, S. H. Glenzer, R. E. Olson *et al.*. Observation of high soft X-ray drive in large-scale hohlraums at the national ignition facility[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **106**(8): 085003
- 26 K. Tsubakimoto, M. Nakatsuka, N. Miyanaga *et al.*. Evaluation of irradiation uniformity on spherical target using angularly dispersed, partially coherent light in direct drive laser fusion[C]. *SPIE*, 1993. 186~197
- 27 G. Miyaji, N. Miyanaga, S. Urushihara *et al.*. Three-directional spectral dispersion for smoothing of a laser irradiance profile[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 725~727
- 28 Shiji Wang, Zunqi Lin, Yuan Gu *et al.*. Intense nickel-like neodymium X-ray laser at 7.9 nm with a double-curved-slab target[J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, 1998, **37**: L1234~L1237
- 29 Wang Chen, Gu Yuan, Fu Sizu *et al.*. Measurement of electron density distribution in a laser plasma with soft X-ray laser deffectometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(4): 847~851  
王琛, 顾援, 傅思祖等. 软 X 射线激光偏折法测量激光等离子体电子密度分布[J]. *物理学报*, 2002, **51**(4): 847~851
- 30 S. Fu, Y. Gu, Jiang Wu *et al.*. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to 0.8 TPa and SiO<sub>2</sub> up to 0.4 TPa[J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(9): 3461~3465
- 31 Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiuguang *et al.*. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of "Shengguang-II" facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 129~133  
傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光等. "神光-II"装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 129~133
- 32 Zhou Shenlei, Lin Zunqi, Zhu Jian *et al.*. Computation and study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 341~345

- 周申蕾, 林尊琪, 朱 俭 等. 谱色散均匀化的计算研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 341~345
- 33 Zhou Shenlei, Zhu Jian, Li Xuechun *et al.*. Experimental study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 321~325
- 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
- 34 X. Jiang, S. Zhou, Zunqi Lin. Improved uniformity of target illumination by combining a lens array and the technique of spected dispersion[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(2): 0230109
- 35 Xiujuan Jiang, Shenlei Zhou, Zunqi Lin *et al.*. Two-dimensional performance of uiform irradiation with the use of an edge-softened lens array and spectral dispersion[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3164~3168
- 36 Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi. Improved target irradiation uniformity using two-dimensional spectral dispersion and lens array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1533~1537
- 江秀娟, 周申蕾, 林尊琪. 利用二维光谱色散和透镜阵列改善靶面辐照均匀性[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1533~1537
- 37 Li Jinghui, Zhang Hujie, Zhou Shenlei *et al.*. Effect og smoothing by spectral dispersion considering the hole used in spacial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 827~832
- 李菁辉, 张琥杰, 周申蕾 等. 空间滤波器小孔对谱色散匀滑使用效果影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 827~832
- 38 Zhang Hujie, Zhou Shenlei, Li Jinghui *et al.*. The experienmental reearch on double-pass phase molulator applied on technology of smoothing by spectral dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1071~1075
- 张琥杰, 周申蕾, 李菁辉 等. 用于光谱匀滑技术的双通调制器实验研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1071~1075
- 39 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Design of continus phase plates for controllng spatial spectrum of focal spot[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7): 1114~1118
- 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
- 40 Zhang Rui, Zhang Xiaoming, Su Jingqin *et al.*. Temporal beam smoothing technique using chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1512~1516
- 张 锐, 张小民, 粟敬钦 等. 采用啁啾脉冲堆积的时间束平滑技术[J]. 光学学报, 2006, **26**(10): 1512~1516
- 41 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): 330~335
- 李 平, 粟敬钦, 马 驰 等. 光谱色散匀滑对焦斑光强频谱的影响[J]. 物理学报, 2009, **58**(9): 330~335
- 42 Zhang Rui, Wang Jianjun, Su Jingqin *et al.*. Experimental study on smoothing by spectraldispersion using linear frequency-modulated pulse[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1088~1094
- 张 锐, 王建军, 粟敬钦 等. 基于线性调频脉冲的光谱色散平滑技术实验研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(2): 1088~1094
- 43 Rui Zhang, Jingqin Su, Jianjun Wang *et al.*. Experimental research on the influences of smoothingby spectral dispersion on the technical integration line[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(5): 687~695