

# 大功率激光驱动器光束匀滑技术的研究进展

江秀娟<sup>1</sup> 林尊琪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

<sup>2</sup>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

**摘要** 改善激光在靶面的辐照均匀性,一直是惯性约束聚变(ICF)驱动器中非常关键的课题,在过去的30多年里已经发展了多种光束匀滑技术。其中空间匀滑技术可以控制焦斑的包络形状并改善大空间尺度的辐照均匀性,时间匀滑技术则可消除焦斑内部高空间频率的强度调制。综述了国内外现有的各种光束匀滑技术及其进展,并对“神光II”激光装置的光束匀滑要求、拟采用的光束匀滑路线及其中关键技术单元的研究进展做简单介绍。

**关键词** 激光光学;惯性约束聚变;高功率激光驱动器;靶面均匀辐照;空间匀滑;时间匀滑

中图分类号 O 433.5<sup>+</sup>4

OCIS 140.3460 120.4820

文献标识码 A

## Research Progress of Beam Smoothing in High Power Laser Driver

Jiang Xiujian<sup>1</sup> Lin Zunqi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Information Engineering, Guangdong University of Technology,  
Guangzhou, Guangdong 510006, China

<sup>2</sup> Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** The improvement of the uniformity of on-target irradiation has long been a critical task for Inertial confinement fusion(ICF) laser driver. A number of smoothing techniques have been developed in the past decades. Spatial techniques can control the target spot envelope and improve the irradiation uniformity of large spatial scale, while temporal techniques can smooth the beam by eliminating intensity modulation of short wavelength inside the spot. A comprehensive review on this field is made, and a brief introduction of the smoothing requirements for the facility “SG II” is given, as well as the development of smoothing techniques used in it.

**Key words** laser optics; inertial confinement fusion; high power laser driver; uniform on-target irradiation; spatial smoothing; temporal smoothing

## 1 引言

在地球上实现受控热核聚变反应,将可能为人类提供丰富、经济、安全的能源,惯性约束聚变(ICF)是实现受控热核聚变很有希望的途径之一<sup>[1]</sup>。ICF是当代重大的国际研究课题之一,其研究工作无论对国民经济还是基础研究都有着重要而特殊的意义。美国于2009年建成国家点火装置(NIF),它是迄今为止世界上最大的激光聚变装置。我国先后建造了神光I、II和神光III原型激光装置。其中,建于中国科学院上海光学精密机械研究所的“神光II”激光驱动器是我国中近期ICF研究的重要实验平台,位于中国工程物理研究院激光聚变研究中心的“神光III”装置正在建设当中<sup>[2]</sup>。

激光聚变是用强激光辐照氘氚靶丸,通过内爆压缩使其达到高温高密度,以实现热核点火和燃烧,从而获取聚变能。目前实现激光聚变有两种方式:直接驱动和间接驱动。直接驱动将多路激光直接辐照到球形

收稿日期:2009-12-25;收到修改稿日期:2010-04-26

基金项目:广东工业大学博士启动基金(073053)资助课题。

作者简介:江秀娟(1974—),女,博士,讲师,主要从事激光传输及靶面均匀辐照技术方面的研究。

E-mail: jiangxj@gdut.edu.cn

靶丸上引起内爆点火。间接驱动是将激光照射到柱形靶内壁上转换成 X 光,通过 X 光辐射输运驱动内爆点火。在这两种聚变方式中,靶丸的聚心内爆除了对靶本身对称性有严格要求外,对靶面辐照均匀性也有很高的要求<sup>[3]</sup>。在直接驱动中,如果照射到靶面的激光强度分布不均匀,靶面将产生“指纹”(imprinted)效应,对内爆实验造成极大的危害。与直接驱动方式相比,间接驱动对辐照均匀性的要求稍微低一些,但也要求焦斑圆滑无旁瓣,以保证激光全部射入黑洞腔内。而在一些与 ICF 研究相关的单项物理实验(如流体不稳定性实验、高压冲击波实验和状态方程研究等)中,则需要将入射的激光束在平面靶上聚焦成一个光强分布非常均匀的二维焦斑。

由于上述原因,改善激光在靶面的辐照均匀性,一直是 ICF 激光驱动器中非常关键的课题,在过去的 30 多年里,国内外的研究工作者做了大量的努力,发展了多种靶面均匀辐照技术。

## 2 光束匀滑技术进展

靶面均匀辐照研究主要解决控制焦斑的包络形状和控制焦斑的强度谱、减少散斑两方面的问题。目前发展起来的靶面均匀辐照技术可大致分为空间域技术与时间域技术。

### 2.1 空间匀滑技术

各种空间匀滑技术的基本思想是将入射激光分割成大量子光束,然后让它们在靶面上重叠起来,以消除入射激光强度或相位不均匀分布的影响,实现靶面的均匀辐照。利用空间匀滑技术还可以对焦斑进行整形,获得所需要的焦斑包络形状。目前用于实现空间匀滑的主要有二元光学技术和透镜阵列技术等。

#### 2.1.1 二元光学技术

1984 年 Y. Kato 等<sup>[4]</sup>提出用随机相位板(RPP)改善靶面辐照均匀性。RPP 是一种简单的二元光学器件,它由二维的相位元阵列构成,这些相位元所产生的相位变化分别为 0 或  $\pi$ ,它们在相位板上随机地分布,如图 1 所示。激光束经过 RPP 时,被分割成很多子光束,每个子光束随机地发生 0 或  $\pi$  的相位改变,再在聚焦透镜的焦面重叠起来。对比图 1(c)和(d)可以看出,使用 RPP 后焦斑的大尺度不均匀性得到了明显的改善。RPP 对入射光振幅和相位的随机性畸变不敏感,通过改变相位元的大小和形状还可方便地控制焦斑的大小和形状,借助成熟的半导体工艺,其制作也比较快捷。由于这些明显的优点,RPP 在多个激光驱动器装置上都得到了应用。但是 RPP 方案不足之处是:1)所得焦斑包络是单个相位元的远场衍射斑,不能得到平顶的强度分布,而且存在旁瓣,只有大约 82% 的激光能量被包含在中心的零阶衍射区中,驱动器末端光能损耗很大,旁瓣能量还可能对某些 ICF 实验造成危害;2)由于各子光束叠加时发生干涉,焦斑内有大量的小散斑。

为了控制远场焦斑的包络形状以满足实验要求,1994 年 S. N. Dixit 等<sup>[5]</sup>提出了相息图相位板(KPP)方案。这一方案的基本思想是,当激光束入射到 KPP 时,如果其相位分布受到合适的调制,就可以在特定的

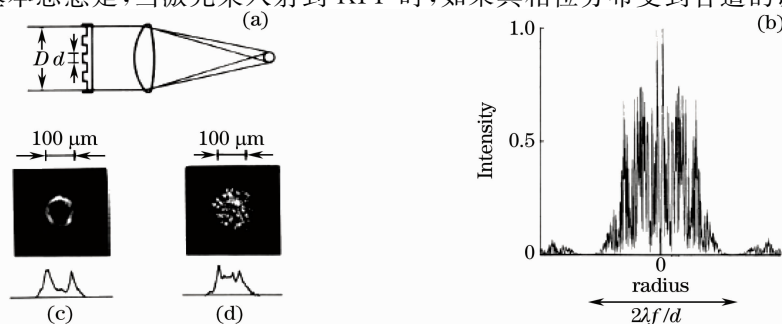


图 1 (a)用光束随机相位法实现靶面均匀辐照的典型结构(随机相位板放置在焦距为  $f$  的聚焦透镜之前), (b)光束经过随机相位板后在焦面的强度分布(理论计算), (c)、(d)分别是准球面波及经过随机相位板后的光波在焦面上的强度分布(实验观测)

Fig. 1 (a) Typical arrangement of random phasing of the laser beam for uniform target irradiation(the random-phase plate is placed in front of a lens of focal distance  $f$ , (b) calculated intensity distribution of the random-phased wave at the focal plane, (c) and (d) observed intensity distributions of a quasispherical wave and a random-phased wave, respectively

观察平面上产生特定的光场分布。KPP 上的相位分布可用 Gerchberg-Saxton 优化迭代算法来确定<sup>[6]</sup>,其流程如图 2 所示。利用该方案可以获得具有高阶高斯强度分布的远场焦斑,但由于其连续浮雕结构的制造工艺长期未能解决,KPP 的实际应用受到限制。

分布相位板(DPP)是 T. J. Kessler 等<sup>[7]</sup>于 1995 年前后提出来的,其基本思想与 KPP 相似,即针对一定的近场分布来设计合适的近场相位调制,以获得所需要的远场光强分布,但 DPP 用多台阶相位结构来近似代替 KPP 的连续浮雕结构,解决了工艺问题<sup>[8]</sup>。在基底上涂抹感光胶,通过掩模和离子束刻蚀可得到多台阶相位板,台阶数越多,器件的衍射效率就越高。使用 DPP 可以更灵活地控制焦斑的包络形态,得到平顶且无旁瓣的靶面强度分布,这是 RPP 所不能实现的。

在 DPP 的设计和制造中,相位板上存在大量的相位极点及  $2\pi$  相位突变点,激光会在这些相位不连续点附近产生大角度散射,导致能量发散到所需的焦斑区域之外。Y. Lin 等<sup>[9]</sup>后来又提出了混合型分布相位板设计方法,得到了几乎连续的相位分布,使激光能量衍射效率达到 95% 以上,这种相位板被称为连续相位板(CPP)。CPP 的连续山丘结构由化学腐蚀头进行多次腐蚀形成,也可利用磁流变工艺制作。由于 CPP 能灵活地控制焦斑的形状,而且设计和制造工艺也已经非常成熟,普遍认为它是目前最为理想的一种空间匀滑技术。除美国以外,法国的高功率激光装置国际月球实验室(LIL)和北焦耳激光器(LMJ)也设计制造了大口径(383 mm×398 mm)的 CPP<sup>[10]</sup>。高功率激光束口径大,并且通过了许多光学器件,到达驱动器末端的实际光束有较为严重的随机相位及振幅畸变,而 CPP 是纯相位元件,一般是按特定的近场复振幅分布设计的,对入射光的畸变较为敏感,这是其不足之处。理论分析表明,若 CPP 元件有足够宽的频率谱,其对入射光畸变的宽容度较大<sup>[11]</sup>。

### 2.1.2 透镜列阵

1986 年邓锡铭等<sup>[12]</sup>提出了透镜列阵(LA)方案,在该方案中,焦斑位于激光束的准近场区。LA 系统的结构原理如图 3 所示,其中 A 为主聚焦透镜,B 为透镜列阵,C 为主透镜焦面。透镜列阵由几十至一百个左右的方形或者六角形小透镜构成,它将入射光束分割成大量子光束,每个子束在靶面形成一个菲涅耳衍射图样,所有衍射图样叠加,可得到均匀性较好的焦斑光强分布。

使用 LA 可获得准近场的焦斑,此焦斑有陡峭的边缘和近似平顶的结构。但是和 RPP 一样,被分割的多个子光束在靶面上相干叠加,会产生干涉条纹,而且由于子光束的衍射效应,焦斑存在中等尺度的强度调制。使靶面略为离开主聚焦透镜的焦面,可以在一定程度上消除衍射调制。消衍射的措施还有:控制透镜元的同心度误差;使用非球面透镜列阵;在透镜列阵前加边缘整形板等<sup>[13]</sup>。近年有研究人员进一步提出焦斑可调的透镜阵列方案<sup>[14]</sup>。

虽然在焦斑整形方面,LA 的灵活性不如衍射光学元件,但由于 LA 不是纯相位元件,它对光束近场随机畸变有较大的宽容度,这又是目前的 CPP 等技术所不能做到的。LA 在中国科学院上海光学精密机械研究所使用了 20 多年,即使在“神光 II”装置近场激光存在直径为 50 mm 左右的强度空洞的情况下,单独使用 LA 仍能获得不均匀度仅为 10% 的焦斑,取得了很好的实验效果。近期,中国工程物理研究院激光聚变研究中心的研究人员在“星光 II”装置上也进行了三倍频束匀滑激光辐照金盘靶的实验<sup>[15]</sup>,结果表明,使用透镜列阵后金盘靶有效地提高了吸收,降低了散射,还增大了 X 光转换效率。

## 2.2 时间匀滑技术

由于激光本身具有高度的相干性,被空间元件分割而成的大量子光束在靶面上叠加时会形成细密的干

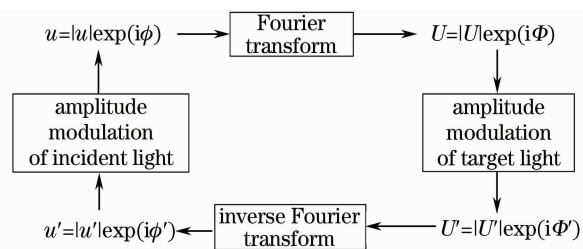


图 2 Gerchberg-Saxton 优化迭代算法的流程图  
Fig. 2 Flow chart of the Gerchberg-Saxton iterative algorithm

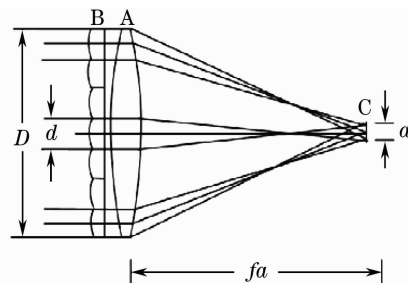


图 3 透镜列阵结构图  
Fig. 3 Schematic of a lens array

涉条纹,产生散斑结构。采用时间匀滑技术可破坏光束的时间相干性,在一定程度上消除这类高空间频率(或者说小空间尺度)的强度调制,进一步改善靶面的均匀辐照质量。

### 2.2.1 诱导空间非相干

1983年 R. H. Lehmborg 等<sup>[16]</sup>提出了诱导空间非相干(ISI)的匀滑方法。宽带激光束入射到阶梯光栅上,被分割成大量的子光束,相邻子束之间存在一定的延迟,子光束通过聚焦透镜在靶面上重叠,形成复杂的瞬时干涉图样。使相邻子束之间的时间延迟大于激光的相干时间,在一定时间内取强度平均,干涉图样会被平滑掉,得到均匀的靶面光强分布。

靶面的光强分布均匀性与激光束的带宽有非常密切的关系,带宽越宽(即相干时间越短),光强分布就越均匀。Naval 研究实验室的 Nike 装置是 KrF 准分子激光装置,具有超过 3 THz 的宽带宽,而且运行在紫外波段,无需在驱动器末端进行激光频率转换,因此该装置采用 ISI 技术取得了非常好的光束匀滑效果。在通常的激光-等离子体实验条件下,烧蚀面附近的平均压力不均匀度可降低到大约 1%。但对于固体激光驱动器来说,ISI 的不规则频带会产生时间上的强度尖峰,造成激光玻璃的损伤,同时也会使末端的激光频率转换效率大大降低。

### 2.2.2 部分相干光

1993年 H. Nakano 等<sup>[17]</sup>提出用光纤产生部分相干光(PCL)来改善靶面辐照均匀性。如图 4 所示,激光脉冲进入单模光纤,由于自相位调制作用产生频率啁啾,激光的光谱被展宽。该激光脉冲再进入一段多模光纤,在传输过程中产生空间模式转换,使激光光谱在空间上也被展开。经过单模和多模光纤后的激光时间和空间的相干性都被降低,它们在靶面形成的焦斑均匀性得到很大的改善。改变输入到单模光纤的激光脉冲强度可以控制谱宽(或说时间相干性),选择不同的多模光纤纤芯尺寸和数值孔径可以控制激光束的空间展宽程度(或说空间相干性),所以该方法具有结构简单和操作灵活的特点。

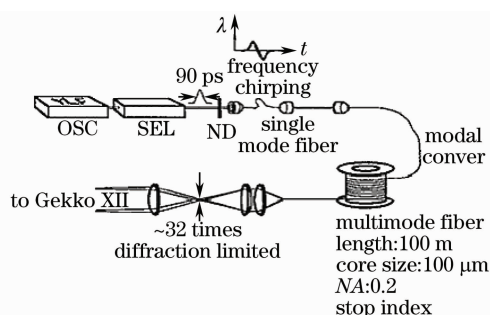


图 4 产生部分相干光的光纤系统结构图

Fig. 4 Schematic of the fiber system used to produce partial coherent light

### 2.2.3 光谱色散匀滑

1989年 S. Skupsky 等<sup>[18]</sup>提出了光谱色散匀滑(SSD)方法。如图 5 所示,窄带激光束经过一个电光相位调制器,其频谱被展宽。此宽带激光再被光栅色散,不同的频率成分在空间展开。激光束一般会再通过相位板类的衍射元件,然后聚焦到靶面。在某一瞬时,靶面的光强分布有高度的干涉强度调制,但是由于参与干涉的子光束频率不同,干涉条纹会随时间快速变化,在一段时间内的平均光强分布将是均匀的。为了纠正光栅所引起的脉冲波形畸变,在调制器之前放置了一个预补偿光栅。与 ISI, PCL 技术比较,SSD 中被展宽的激光没有频率“chaotic”,所以驱动器末端仍能获得高的谐波转换效率。另外,采用这种方法不会在激光脉冲中产生很高的时间强度尖峰而损坏激光介质,所以它很适合应用于高功率玻璃激光系统中。采用 SSD 技术可以达到的均匀辐照水平主要取决于激光的带宽和光谱色散量两个因素<sup>[19]</sup>。带宽决定了光束平滑的速率,色散量则决定了不均匀度可以降低的最大程度(同时也决定了可以被平滑掉的最大不均匀性尺度)。

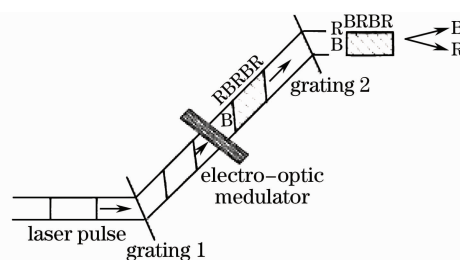


图 5 SSD 的原理图

Fig. 5 Schematic of SSD

电光相位调制器是 SSD 单元的核心器件,目前美国的 OMEGA 激光装置和日本的 GEKKO III 激光装置,都分别研制出满足 SSD 单元技术要求的体相位调制器。OMEGA 的体相位调制器采用了谐振腔式设计,早期的设计没有采用速度匹配方案<sup>[20]</sup>,工作频率为 3.3 GHz 时,加 3.5 kW 的调制电压可以获得 0.149 nm 的调制带宽;后期的调制器<sup>[21]</sup>采用了基于截止波导耦合的谐振腔式设计,实现了速度匹配,所需晶



体短、效率高,能较好地控制光束质量,工作频率为 10.412 GHz,加 300 W 的调制电压可将红外光带宽展开到 300 GHz,通过三倍频后可获得 1 THz 的激光带宽。GEKKO Ⅻ采用了钽酸锂晶体的周期畴反转技术,实现准速度匹配设计<sup>[22]</sup>。

增加光谱色散的维数可以进一步改善光束匀滑质量。OMEGA 装置采用 2-D SSD 方案,NIF 也采用 2-D SSD 的光束匀滑模块。图 6(a)是日本 GEKKO Ⅻ装置上的 3-D SSD 光路图<sup>[22]</sup>,它使用光纤交叉相位调制效应来进行第一级的光谱展宽,后两级则采用体结构的电光相位调制器,光栅排布使得光谱在互成 120° 的空间方向上散开,其远场图像呈六角形分布。从图 6(b)可以看出,使用 3-D SSD 后焦斑的均匀性确实得到了明显的改善,与使用 2-D SSD 的情况相比较,其相干条纹约为原相干条纹的 1/3。

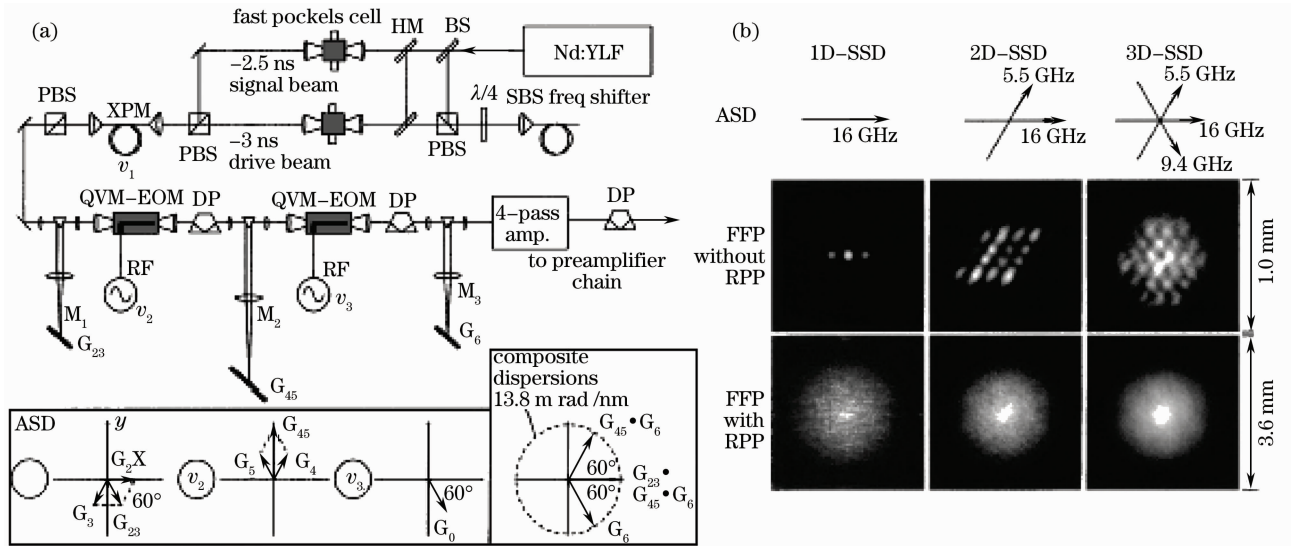


图 6 (a) 3-D SSD 的光路图;(b)使用 1-D,2-D 和 3-D SSD 前后的远场焦斑

Fig. 6 (a) Optical arrangement for generating a 3D SSD beam, (b) far-field beam patterns taken with and without a RPP for 1-D, 2-D and 3-D SSD

### 3 多种技术相结合的平滑方案

利用光的偏振性质可以进一步改善靶面的均匀照明质量,这种方法称为偏振匀滑(PS)<sup>[23]</sup>。如图 7 所示,激光束通过双折射楔型晶体(如 KDP),被分成强度相等的 o 光和 e 光,它们的偏振方向互相垂直,传播方向略有不同。这两种光经过相位板和聚焦透镜后,在靶面形成不完全重合的两套光斑,它们的叠加使焦斑均匀性得到改善[从统计的角度看,均方根(RMS)不均匀度将下降 $\sqrt{2}$ 倍]。而且由于 o 光和 e 光的偏振方向互相垂直,它们的叠加不会产生干涉现象。另外,与时间均匀平滑技术不同的是,利用 PS 可以即时地改善靶面的照明均匀性,这对抑制响应时间极短的等离子体不稳定性具有非常重要的意义。

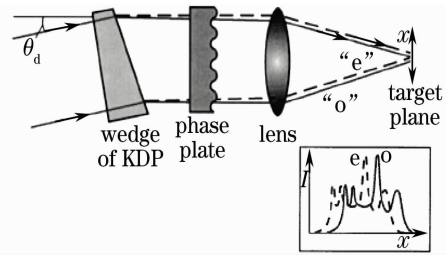


图 7 使用双折射楔型晶体实现偏振平滑的原理图

Fig. 7 Principle of polarization smoothing using a wedge of birefringent material

高密度直接驱动实验要求靶面激光辐照 RMS 不均匀度在几百皮秒时间内降低到 1%。仅仅采用单一的匀滑技术是难以实现这一目标的,因此,实际中一般采用多种技术相结合的匀滑方案,最通常的情况是将空间匀滑技术与时间匀滑技术同时使用,如 PCL+RPP,SSD+RPP,SSD+DPP 等,其中空间技术可以控制焦斑包络形态,时间技术可以消除焦斑内部的高频强度调制。OMEGA 装置在 2005 年报道了他们的研究进展<sup>[24]</sup>,他们将 2-D SSD,DPP 和 PS 技术结合起来,取得了很好的靶面辐照质量,如图 8 所示。在该方案中,照射到靶面的波长为 351 nm 的紫外(UV)激光带宽被提高到了 1 THz。当采用 2-D SSD 和 DPP 时,在 1 ns 的匀滑时间内焦斑 RMS 不均匀度为 3.8%,加上 PS 后,不均匀度下降到 2.7%。如果多路能量平衡且

同步性很好的激光束在靶面上重叠,焦斑的辐照质量可以得到进一步的改善,不均匀度在几百皮秒内将降低到约1%。目前,国内的高功率激光装置也正在开展这方面的研究工作<sup>[25~27]</sup>。

除了以上所述的光束匀滑方法,近年来又陆续出现了一些新的技术方案。2003年V. Malka等<sup>[28]</sup>提出将激光束通过喷射的气体来改善其时空的强度均匀性。激光束照射到靶面前,先经过一个大小为毫米量级的喷射气体区,激光使气体中产生低密度等离子体并且将其加热。激光在不均匀等离子体中传输时存在自折射现象,可以有效地抹平大尺度的光强不均匀。这种匀滑过程能量损失很小,而且在激光和靶物质相互作用最早的阶段也非常有效。2009年,该研究小组发表了他们的实验结果,证实该技术方案是实际可行的<sup>[29]</sup>。

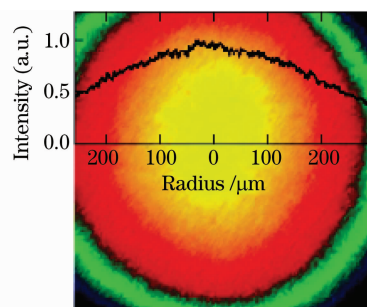


图8 采用带宽为1 THz的2-D SSD技术及PS所获得的焦斑(匀滑时间为1 ns)

Fig. 8 Measured UVETP image of a 1 ns square laser pulse with 1 THz, 2-D SSD and PS

#### 4 “神光II”装置的光束匀滑要求及技术路线

随着物理实验向精密化方向发展,“神光II”装置对打靶激光的匀滑性提出了越来越高的要求,主要有:1)对于直接驱动ICF实验,需要将多路激光对称地聚焦到靶丸上,整个球面上的强度分布不均匀度足够小;2)对于激光等离子体等实验,要求基频和倍频光在平面靶上形成的焦斑具有平顶陡边的光强分布,无低频调制且尽量消除中小空间频率的调制;3)匀滑系统对入射激光振幅和相位的随机性畸变有较大的宽容度;4)匀滑系统的引入不明显改变激光脉冲的时间波形;5)匀滑系统必须能够承受高功率激光负载。

为了满足实验需要,“神光II”装置采用空间技术与时间技术相结合的光束匀滑方案<sup>[25,30~32]</sup>。空间域采用DPP, CPP或LA,目的是控制焦斑的包络形状并消除大尺度不均匀性。时间域采用SSD技术,重点是消除焦斑内部中小空间尺度的强度调制。目前,相关的技术平台已经在“神光II”第9路装置上建立起来,并且进行了离线实验研究,图9所示的是其中部分实验结果<sup>[31]</sup>。

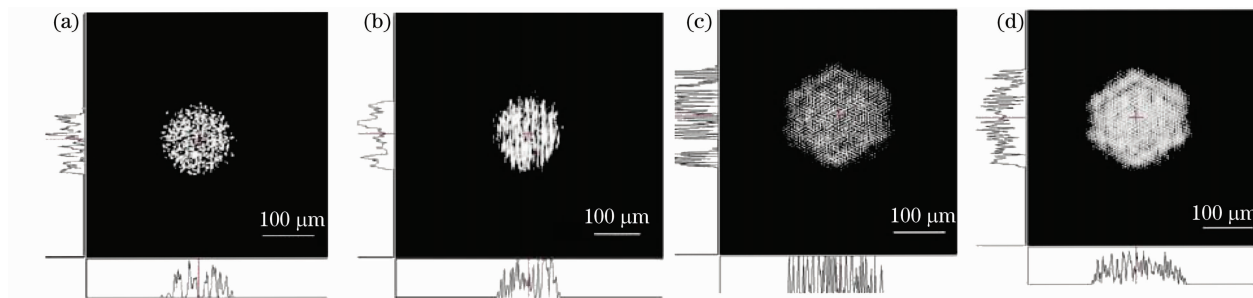


图9 2 ns 红外激光脉冲的实验光斑图。(a)仅使用DPP,(b)DPP+1-D SSD,(c)仅使用LA,(d)LA+1-D SSD

Fig. 9 Measured IR images of 2 ns laser pulse. (a) DPP without phase modulation, (b) DPP with 1-D SSD,

(c) LA without phase modulation, (d) LA with 1-D SSD

在空间技术中,DPP是台阶型的相位结构,可以形成较为平顶的光强分布,但会有不少能量散射到高级衍射级次。CPP连续结构避免了能量散射,但是整形包络不够平顶、陡边性稍差,而且对入射光束的畸变比较敏感。用LA可以获得均匀、平顶的焦斑,陡边性比CPP好,能量利用率也高,但是LA由大量小的透镜元拼接而成,制约了激光通量。今后,这几种空间技术将在“神光II”第9路及原8路装置上视其具体的光束条件分别加以使用。LA由中国科学院上海光学精密机械研究所设计和制造,由于进口二元衍射光学器件难度较大,中国科技大学和清华大学承担了大口径DPP和CPP的研制工作<sup>[33]</sup>。

SSD单元的主要光学器件是电光相位调制器和光栅。国内的光栅技术已经很成熟。中国科学院上海光学精密机械研究所和上海交通大学物理系承担了体调制器的研制任务。谐振腔式体调制器采用了速度匹配的工作方式,双程调制器工作频率为10.302 GHz,加300 W微波功率可得0.67 nm的调制带宽,单程调

制器工作频率 3.25 GHz, 加 1000 W 微波功率带宽为 0.12 nm。准速度匹配钽酸锂晶体电光相位调制器如图 10 所示<sup>[34]</sup>, 其工作频率 3 GHz, 基频调制带宽 30 GHz。光束的带宽越宽, 匀滑效果就越好, 但带宽受到调制器研制水平的制约, 同时也要保证驱动器末端有足够高的倍频转换效率。要进一步改善“神光 II”的光束匀滑质量, 则需要二维 SSD 技术, 这方面的理论与实验研究正在进行当中。

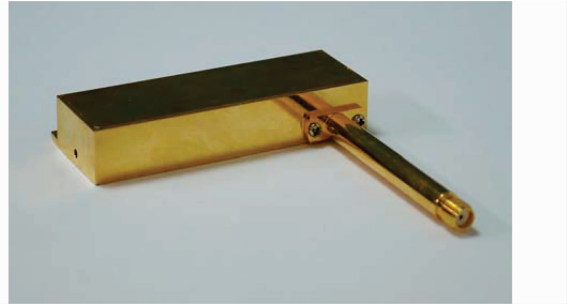


图 10 准速度匹配钽酸锂晶体电光相位调制器

Fig. 10 Quasi-velocity-matching LiTaO<sub>3</sub> phase modulator

## 5 结束语

ICF 实验及其相关的单项物理实验, 都对激光辐照的均匀性提出非常苛刻的要求。改善靶面激光辐照的均匀性, 一直是 ICF 驱动器中非常重要的研究课题, 至今已发展起来多种空间域和时间域靶面均匀辐照技术。目前各国驱动器装置一般都采用空间与时间匀滑技术相结合的方案来实现光束匀滑, 这些工作推动着高功率激光靶面均匀辐照研究的不断深入发展。高功率激光在传输和放大过程中要求具有良好的相干性, 而最终到达靶面时又要求它具有良好的非相干性以实现均匀的辐照, 这是具有矛盾性的, 我们期待这一矛盾能得到令人满意的解决。

致谢 感谢李菁辉、姜有恩和邬融的有益讨论。

## 参 考 文 献

- 1 J. H. Nuckolls, L. Wood, H. A. Thiessen *et al.*. Lasers and controlled thermonuclear fusion[J]. *Nature*, 1972, **239**(5368): 129~130
- 2 Jiang Shaoen, Ding Yongkun, Miao Wenyong *et al.*. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China [J]. *Science in China Series G*, 2009, **39**(11): 1571~1583  
江少恩, 丁永坤, 缪文勇 等. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展[J]. *中国科学 G 辑*, 2009, **39**(11): 1571~1583
- 3 S. Skupsky, K. Lee. Uniformity of energy deposition for laser driven fusion[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(7): 3662~3672
- 4 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
- 5 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
- 6 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237~249
- 7 T. J. Kessler, Y. Lin, J. J. Armstrong *et al.*. Phase conversion of lasers with low-loss distributed phase plates[C]. *SPIE*, 1993, **1870**: 95~104; Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 764~766
- 8 M. T. Gale, G. K. Lang, J. M. Rayner *et al.*. Fabrication of micro-optical components by laser beam writing in photoresist[C]. *SPIE*, 1991, **1506**: 65~70
- 9 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(20): 1703~1705
- 10 Jérôme Néauport, Xavier Ribeyre, Jérôme Daurios *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
- 11 Yang Chunlin, Zhang Rongzhu, Xu Qiao *et al.*. Continuous phase plate for laser beam smoothing[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1465~1469
- 12 X. Deng, X. Liang, Z. Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~381
- 13 N. Nishi, T. Jitsuno, M. Nakatsuka *et al.*. Improvement of laser-beam irradiation-intensity distribution using multi-lens array and edge-shaped plates[J]. *Opt. Rev.*, 1998, **5**(5): 285~290
- 14 Zheng Jianzhou, Yu Qingxu, Lu Yongjun *et al.*. Improved lens arrays optical system with controllable focus width for

- uniform irradiation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 331~336
- 郑建洲, 于清旭, 卢永军等. 焦斑可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 331~336
- 15 Jiang Shaoren, Zhang Baohan, Liu Shenye *et al.*. Experiments and analysis of gold disk targets irradiated by smoothing beams of Xingguang II facilities with 350 nm wavelength[J]. *Science in China Series G*, 2007, **37**(4): 502~515
- 江少恩, 张保汉, 刘慎业等. 星光 II 三倍频束匀滑激光辐照金盘靶的实验与分析[J]. *中国科学 G 辑*, 2007, **37**(4): 502~515
- 16 R. H. Lehmborg, S. P. Obenschain. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Opt. Commun.*, 1983, **46**(1): 27~31; S. P. Obenschain, S. E. Bodner, D. Colombant *et al.*. The Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments[J]. *Phys. Plasmas*, 1996, **3**(5): 2098~2107
- 17 H. Nakano, N. Miyanaga, K. Yagi *et al.*. Partially coherent light generated by using single and multimode optical fibers in a high-power Nd:glass laser system[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(5): 580~582
- 18 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
- 19 Two-dimensional SSD on OMEGA[R]. Laboratory for Laser Energetics (LLE) Review, 1996, **69**: 1~10
- 20 Microwave Phase Modulators for Smoothing by Spectral Dispersion[R]. Laboratory for Laser Energetics (LLE) Review, 1996, **68**: 192~208
- 21 J. D. Zuegel, D. W. Jacobs-Perkins. Efficient, high-frequency bulk phase modulator[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(9): 1946~1950
- 22 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
- 23 J. E. Rothenberg. Polarization beam smoothing for inertial confinement fusion[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(8): 3654~3662
- 24 S. P. Regan, J. A. Marozas, R. S. Craxton *et al.*. Performance of 1 THz-bandwidth, two-dimensional smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power, solid-state laser beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(5): 998~1002
- 25 Zhou Shenlei, Lin Zunqi, Jiang Xiujuan. Beam smoothing by lens array with spectral dispersion[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**: 186~191; Xiujuan Jiang, Shenlei Zhou, Zunqi Lin. Improved uniformity of target illumination by combining a lens array and the technique of spectral dispersion[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(2): 023109
- 26 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and special method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 534~538
- 李平, 马驰, 粟敬钦等. 时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 534~538
- 27 Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Sui Zhan *et al.*. Research on beam smoothing characteristics using linearly modulated light[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(8): 1018~1024; Wenyong Cheng, Xiaomin Zhang, Jingqin Su *et al.*. Improved uniform irradiation by combining periodic chirped pulse, sinusoidal phase modulation light and lens array[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(1): 015709
- 28 V. Malka, J. Faure, S. Hüller *et al.*. Enhanced spatiotemporal laser-beam smoothing in gas-jet plasmas[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(7): 075002
- 29 R. Benocci, D. Batani, R. Dezulian *et al.*. Direct evidence of gas-induced laser beam smoothing in the interaction with thin foils[J]. *Phys. Plasmas*, 2009, **16**(1): 012703
- 30 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
- 31 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
- 32 Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi *et al.*. Two-dimensional performance of uniform irradiation with the use of an edge-softened lens array and spectral dispersion[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3164~3168
- 33 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Optimization of diffractive optical element used with smoothing by spectral dispersion technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 781~785
- 谭峭峰, 严瑛白, 金国藩. 与光谱色散匀滑技术联用的衍射光学器件的优化设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 781~785
- 34 Lü Hang, Design, Manufacture and Test of Quasi Velocity Matching Lithium Tantalate Phase Modulator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006
- 吕航, 准速度匹配钽酸锂电光相位调制器的设计、制作和测试[D]. 上海: 上海交通大学, 2006