

## ICF 中光束平滑及靶面辐照均匀性技术评述\*

谢永杰 刘晶儒 赵学庆  
(西北核技术研究所, 西安, 710024)

**摘要:** 由于激光的高强度, 它成为惯性约束聚变的首选驱动器。但为实现聚变靶丸的均匀压缩, 必须提高激光的辐照均匀性。分析了惯性约束聚变中实现激光光束平滑和靶面均匀辐照的几种主要技术方案的原理和方法, 得出各技术手段的性能特点及适用条件。

**关键词:** 惯性约束聚变 激光驱动器 均匀辐照 相干性

### Laser beam smoothing and uniform illumination in ICF

*Xie Yongjie, Liu Jingru, Zhao Xueqing*  
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024)

**Abstract:** Laser driver is the first choice of inertial confined fusion due to its high intensity. The illumination uniform of laser on targets must be improved in order to compress the fusion pellet. The principles and techniques of several important methods use to produce uniform illumination for laser driven fusion have analyzed and their characteristics have been obtained.

**Key words:** inertia confined fusion laser driver uniform illumination coherence

### 引 言

激光驱动惯性约束聚变(ICF)是实现受控热核聚变,完成实验室核爆模拟的重要技术手段之一。为了可靠地实现对聚变靶丸的压缩和点火,必须尽可能抑制压缩过程中产生的不稳定性<sup>[1]</sup>,主要包括瑞利-泰勒流体力学不稳定性<sup>[1]</sup>和等离子体不稳定性。在靶丸压缩过程中,当瑞利-泰勒流体力学不稳定性大到一定程度,会使靶丸由于非对称压缩而提前垮掉;主要的激光等离子体不稳定性过程有受激喇曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)、双等离子体衰变不稳定性(TPD)、共振吸收(RA)、参量衰变不稳定性(PDI)和成丝不稳定性(FI)等。SRS, TPD, RA 和 PDI 容易产生超热电子,导致对靶丸预压缩,影响压缩度和内爆对称性,而 SBS 会造成很大的散射损失,不利于激光能量在等离子体中的沉积。以上两种不稳定性的强弱和靶丸照明的均匀程度密切相关,激光对靶丸辐照的不均匀可以滋生这些不稳定性,并助长各种不稳定性的发展,因此,靶面均匀辐照是实现 ICF 必不可少的条件,同时,靶面均匀辐照还有利于提高靶丸压缩比,降低对激光能量的要求。

但是,实际运行的激光驱动器工作在大能流密度下,受诸如激活介质不均匀、增益饱和等效应的影响,输出光束将发生畸变,造成激光远场分布的不均匀。这就要求必须按照 ICF 物理实验的要求,进行打靶光束的平滑,改善靶面不均匀性。为此,近年来,不少国家的实验室对靶面均匀性辐照做了许多工作和努力,发展了多种技术手段,并在实验上取得了一些结果。但由于此课题本身的复杂性,以及激光驱动器的多样性,迄今为止,仍没有一种方法能完全满足

\* 国家八六三激光技术领域资助项目。

激光驱动聚变物理实验的所有要求。作者对近几年国内外关于激光光束控制和靶面均匀辐照的几种主要技术方案进行了较全面的总结对比,分析了各技术方法的性能特点,并指出了它们的不足之处和适用范围。

## 1 辐照光滑化基本原理

激光空间相干性与时间相干性都着眼于光波场中各点次波源是否相干的问题上。空间相干性用区域的孔径角  $\Delta\theta_0$  来描述,它与光源宽度  $b$  的关系由空间相干性的反比公式决定:

$$b \Delta\theta_0 \approx \lambda \quad (1)$$

时间相干性用相干时间来描述,相干时间  $t_c$  与谱线宽度  $\Delta\nu$  的关系为:

$$t_c \Delta\nu \approx 1 \quad (2)$$

通过多束激光叠加可以改善聚焦光斑的均匀性,但由于激光束所固有的特性——相干性,多个子光束进行叠加时,会在聚焦光斑上产生许多细密的干涉散斑,造成光斑高频不均匀,从而影响靶面的辐照均匀性。因此,必须对各叠加子波束进行去相干处理,以消除干涉散斑。

设两束激光同时照射一接收屏,它们的光场分布分别为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{aligned} E_1 &= |F_1(r, t)| \exp[-i\omega_1 t + k_1 \cdot r + \phi_1(x, t)] \\ E_2 &= |F_2(r, t)| \exp[-i\omega_2 t + k_2 \cdot r + \phi_2(x, t)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $F_1(x, t)$ ,  $F_2(x, t)$  为时间的慢变部分。在接收屏上的光场分布可以写成:

$$I = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 \cdot F_2 \cos[(k_1 - k_2) \cdot r - (\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (4)$$

类似地,有多光束叠加的去相干方法,对多个光束在接收屏上的光场强度分布为:

$$\begin{aligned} I &= \sum_i |F_i(r, t)|^2 + \sum_{i,j} 2 |F_i(r, t) \cdot F_j(r, t)| \cdot \\ &\cos[(k_i - k_j) \cdot r - (\omega_i - \omega_j)t + \phi_i(r, t) - \phi_j(r, t)] \end{aligned} \quad (5)$$

可见,从原理上分析,可采用的去相干方法有:(1)  $\omega_1 \neq \omega_2$ , 如色散元件光滑化;(2)  $\phi_1(r, t) - \phi_2(r, t) \neq \text{const}$ , 如 ISI<sup>[3]</sup> 方法;(3)  $F_1 = F_2 = 0$ , 如 PCP<sup>[4]</sup> 法;(4)  $\phi_j = \phi_i(r, t) - \phi(r, t)$ , 不随时间变化,但随机分布,如 RPP<sup>[5]</sup> 法;(5)  $\phi_{ij} = \phi_i(r, t) - \phi_j(r, t)$ , 随时间变化,且随机分布,如 SSD<sup>[6]</sup> 法。

以上去相干技术,可以归结为时间和空间去相干两大类,主要包括:诱导空间非相干法 ISI(induced spatial incoherence)、无阶梯诱导空间非相干法 EFISI<sup>[7]</sup>(echelon-free induced spatial incoherence)、列阵透镜法 LA<sup>[8]</sup>(lens array)、随机位相板法 RPP(random phase plate)、宽带随机相位板法 BRP<sup>[9~11]</sup>(broadband random phase-plate)、谱色散光滑化法 SSD(smoothing by spectral dispersion)、自发辐射放大法 ASE<sup>[12]</sup>(amplified spontaneous emission)、光学空间光滑化法 OSS<sup>[13]</sup>(optical spatial smoothing)、相息相位板法 KPP<sup>[14]</sup>(kinofom phase plate)等,以及新近发展起来的二元光学技术及元件<sup>[15]</sup>。在应用中也可以采用几种技术组合使用的方法,如 SSD+ RPP, ASE+ BRP 等,下面进行介绍。

## 2 主要技术方案

### 2.1 阶梯诱导空间非相干技术

ISI 技术是 1983 年由美国海军实验室 Lehmborg 等人提出的,它采用阶梯光栅诱导空间

非相干,实现宽频带激光的靶面均匀辐照。该技术是一种新的控制光束分布,得到均匀光束的方法,其实质是利用阶梯光栅将激光束分割为许多子波束,同时对每个子束引入时延  $T_{N-1} - T_N > T_C$  来实现各子束的非相干,如图1所示。之后再将子束组合到靶上,在大于相干时间的时间量级上,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。它属于一种时间光滑化方法。

靶面上光强分布形状由阶梯光栅各级的衍射光斑决定,  $S = fND$ , 其中,  $D$  为阶梯大小,阶梯可取为方形、三角形、六角形等,另外通过倾斜阶梯面,可展宽光束面,以改变光斑形状和大小。

该技术的最大不足是:(1)阶梯光栅必须放在激光器的输出端,这造成光栅非常大,阶梯非常多,费用昂贵且加工困难,同时由于光栅衍射,使最终打靶光束能量利用率低等;(2)由于光栅阶梯面不可能加工到太小,各子波束的近场光斑受光栅的阶梯影响,从而使各阶梯子束光斑不均匀。

### 2.2 无阶梯诱导空间非相干技术

1987年,Lehmberg等人又提出了无阶梯空间诱导非相干技术,它可以用于大型准分子激光以产生光滑、可控的靶面光束分布。其思想是基于投影成像技术,将物孔处光强的光滑分布通过激光器传输放大,投影成像于靶上,即将所需要的光束时间平均空间分布  $F(x, y)$  通过激光系统,利用宽带部分相干光投影到靶面上。重建  $F(x, y)$  所需的信息利用大量相互独立的相干带(其直径小于系统线性畸变比例长度和增益非均匀性长度)在系统中传输。其结构原理如图2所示。

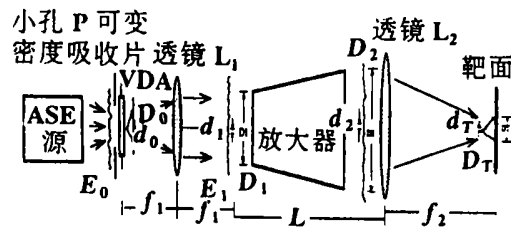


图2 无阶梯诱导空间非相干技术进行靶面均匀辐照结构原理图

小孔P可变  
密度吸收片  
透镜L<sub>1</sub>  
VDA  
ASE源  
E<sub>0</sub>  
D<sub>0</sub>  
d<sub>0</sub>  
E<sub>1</sub>  
f<sub>1</sub>  
f<sub>1</sub>  
L  
D<sub>1</sub>  
D<sub>2</sub>  
透镜L<sub>2</sub>  
靶面  
d<sub>T</sub>  
d<sub>R</sub>  
f<sub>2</sub>

该技术与MOPA系统相差无几,所以,工作稳定,且使用寿命长。另外,该方法还有两个突出优点,一是远场分布形状灵活性大,取决于物面的光强分布,而物面处于低功率端,相对较易控制。而其它方法的远场光强分布形状基本上是固定的,一般列阵透镜,ISI, BRP方法是平顶分布,而RPP方法是高斯分布。二是该技术容易和角多路传输放大技术结合在一起。该方法充分利用了激光源的宽带特性,适用于气体准分子激光器,但此技术中如何得到均匀且相干性差的前级光源是一个问题。

### 2.3 列阵透镜

1985年,中国上海光机所邓锡铭教授等提出了列阵透镜实现靶面均匀辐照的方法,该技术结构原理如图3所示(其中A为主聚焦透镜,B为透镜列阵,C为综合焦斑,E为各单元焦点所在球面)。其实质是利用多个微小透镜分割入射光束,每个子束形成一个菲涅耳衍射斑,为消除衍射斑纹,使靶面略离焦,衍射斑纹相互叠加,靶面上得到焦后的准近场光滑分布。

在几何光学上,光束分割越细,越有利于消除光斑不均匀,实现均匀辐照。但从物理光学

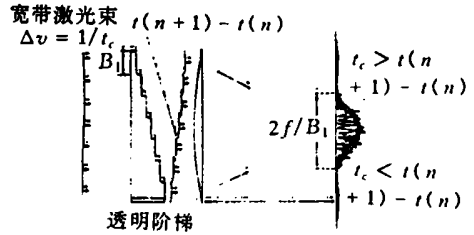


图1 阶梯诱导空间非相干技术原理图

原理如图2所示。

此技术是由ISI技术思想发展而来的,其关键是利用非相干光束将物孔处的均匀光强分布成像于靶上,其前提必须保证物孔处光强均匀,且光源相干性差。由于该方法中并未在高功率端加入控制元件,与通常的主控振荡器功率放大器MOPA(master oscillator power amplifier)

的观点, 分割数目和透镜焦距对衍射和多光束干涉叠加效果有影响, 因此, 设计列阵透镜时, 必须综合考虑二者的作用<sup>[8]</sup>。

此方法的优点是可获得均匀准近场光斑, 在主焦斑外光强度按指数迅速衰减为 0, 且不要求激光具有的宽频带(如固体玻璃激光器)。该方法最大的缺点是每个子束是相干的, 各子束会在靶面上形成多光束干涉花纹, 最终光斑是子束菲涅耳衍射斑和多光束干涉花纹二者的卷积(其中衍射斑大小为  $fND$ , 干涉散斑间距:  $f\lambda/D$ )。通过靶面略离焦, 可以消除衍射斑纹, 但干涉条纹却无法消除。

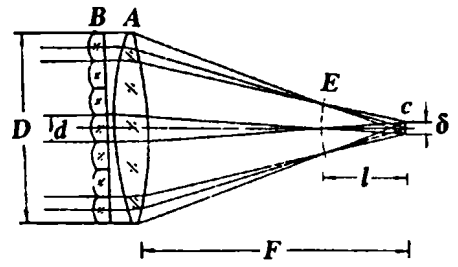


图 3 列阵透镜均匀辐照原理图

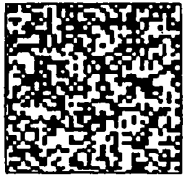


图 4 随机位相板工作原理图

## 2.4 随机位相板

1984 年, 日本大阪工程研究所 Yamanaka 提出利用相位板把相干波化为随机相位波, 以改善激光束辐照均匀性, 其原理如图 4 所示。无规位相板是由许多按阵列形式排列的小位相单元组成, 每个小

位相单元随机地被选择对入射的激光光束引入 0 或  $\pi$  的相位延迟, 无规位相板上的列阵位相单元把入射光束波面分割为许多大小相同的子光束, 经透镜聚焦在同一靶面上(焦平面上), 靶面上光强分布由各个子波束的衍射图样随机叠加确定, 从而达到平滑靶面的目的。位相板位相单元的形状确定了透镜焦面焦斑的形状, 位相板位相单元的大小确定了焦面焦斑的大小, 通过改变位相单元的形状或大小, 可以达到控制透镜焦面焦斑形状和大小的目的。

无规位相板法具有对靶面焦斑形状和大小易于控制、制作简单及容易使用等优点。但是, 由于位相板阵列单元分割出的各子光束同样是相干的, 透镜焦平面上光强分布实际是无规位相板上的单个小位相单元衍射光强分布受到各个小位相单元衍射光束之间相互干涉所调制的结果, 靶面上不可避免地存在干涉散斑。目前, 此技术在不断发展, 形成了一维、二维色散的宽带无规相位板(BRP)技术, 利用某些激光的宽带特性, 可加入色散元件来一定程度上平滑干涉散斑。

## 2.5 谱色散光滑化法

SSD 属于一种时间光滑化方法, 主要包括宽频带光源和色散元件, 位于光路的前端。SSD 方法中利用电光晶体对单频激光电场的相位进行调制, 可以得到宽频带光源。之后, 经过一个线性色散元件, 例如光栅, 在  $x$  或是  $y$  方向上进行谱色散, 这样, 在谱色散方向上瞬时频率周期变化。通常 SSD 要与 RPP 联合使用, 经过调制和色散处理后的激光入射到 RPP 上时, 不同基元的瞬时频率是不一样的, 每个频率产生一套干涉图样, 不同频率之间进行非相干叠加, 从而实现靶面的均匀辐照。由于 SSD 是一维色散的, 仅在  $x$  或是  $y$  方向上进行时间光滑化, 因此, 仍存在干涉花纹。

## 2.6 相息相位板和二元光学技术

二元光学是指基于光波的衍射理论, 利用计算机辅助设计, 并用超大规模集成(VLSI)电路制作工艺, 在片基上(或传统光学器件表面)刻蚀产生两个或多个台阶深度的浮雕结构, 形成纯相位、同轴再现、具有极高衍射效率的一类衍射光学元件。二元光学元件具有重量轻、易复

制、造价低等特点,并能实现传统光学难以完成的微小、阵列、集成及任意波面变换等新功能。

KPP 是一种利用二元光学技术实现光束平滑化的方法,可以认为相息图(kinofom)就是早期的二元光学元件。它具有衍射效率高、光斑轮廓可调的优点,是目前比较有希望的空间平滑化方法。小型的 KPP 已在许多地方得到应用,但小型 KPP 的制作方法不适用于 ICF,因为 ICF 中的 KPP 要求有高的激光损伤阈值和大的光学口径。现已有单位开展实现 ICF 均匀照明的二元光学元件的理论设计和具体制作这一课题的研究工作<sup>[16~19]</sup>,不过,他们的应用对象大都是红外激光系统。由于紫外激光的波长短,其二元光学元件的设计和制作更为复杂。目前,针对紫外激光的二元光学元件研究和制备还鲜有报道。

### 3 性能分析

以上各种技术方案都有一定优点,但也存在不足之处,表 1 给出它们的性能比较。

表 1 靶面辐照均匀性技术性能比较

	ISI	EFISI	LA	RPP	BRP	SSD	KPP
光滑方式	时间光滑	时间光滑	空间光滑	空间光滑	时间光滑	时间光滑	空间光滑
散斑原因	阶梯子束	—	多光束	多光束	—	一维	—
	不均匀		干涉斑	干涉斑		干涉斑	
均匀性	一般	好	一般	一般	好	好	好
光斑形状	平顶	可调	平顶	爱里斑	平顶	平顶	可调
造价	高	较低	较高	较低	较高	较高	高
在光路中位置	末端	前端	末端	末端	末端	末端	末端

可以看出,各种技术对于不同特性激光驱动器的适用性是不同的。EFISI 和 ISI 技术是利用激光的宽带特性来实现散斑消除的,因此,适用于宽带激光器,如准分子激光系统。LA 和 RPP 可用于窄带激光器,对于靶面上存在的多光束干涉条纹,很细密的干涉调制可以通过靶面高温等离子体的热平滑效应得到一定程度的平滑。一般按  $\exp(-k\Delta R)$  因子平滑,  $\Delta R$  为临界面到喷出面的距离,  $k$  为靶面上空间模的波数,因此,条纹越细密,热平滑效果越好;同时,对于波长较长的激光,  $k=2\pi/\lambda$  较大,热平滑效果好,而对于准分子激光,由于波长短,故热平滑效果不好。BRP 和 SSD 技术中加入了色散元件,可用于窄带激光器,它们的平滑效果要比 LA 和 RPP 好。KPP 和二元光学技术是一种新兴的控制光束形状、得到任意波面分布的技术。它运用于 ICF 中是非常有发展希望的,但目前无论从理论设计,还是在器件制作上都存在一定困难。

另外,在光束平滑和靶面均匀辐照技术中,还应考虑能量利用率和激光传输放大过程中,引入干扰的问题。因高功率激光系统末级输出的能量非常宝贵,故必须充分利用其能量,并且,未被利用的能量还可能导致其它有害结果。在 LA, RPP 和 ISI 等技术中,光束整形、平滑元件放在高功率输出端,存在元件尺寸大、加工困难、能量利用率低和易损坏等问题。同时,子光束大小的分割必须满足靶上所需光斑尺寸的限制,太小时,衍射光斑过大;太大时,又无法做到各子束近场光斑均匀,因此,具体应用中要进行周密的计算,当然,还会受到诸如加工工艺等方面的限制。ICF 中对激光脉冲波形有严格的要求,因此,在激光传输放大过程中,均匀辐照系统不能破坏其波形。而相干光束通过系统传输放大时会产生振铃效应,引起激光波形失真,同时,易受到放大器系统中各种畸变因素的影响:部分变暗、放大增益饱和、光学系统畸变等,

这也是在均匀辐照技术中需要解决的问题。

目前, ICF 中所用激光驱动器主要有固体玻璃激光器和气体准分子激光器。对于准分子激光, 由于其波长短、频带宽、光源时间相干性差, 最适于采用空间诱导非相干技术, 不必离焦便可在靶面上实现叠加平滑效果。而对于固体玻璃激光器, 适于采用 LA, RPP, BRP 和 SSD 等技术。美国海军实验室已在他们的准分子激光系统“NIKE”装置上采用了 EFISI 技术。我国 863—ICF 研究主题中也开展了“准分子激光光束平滑及辐照均匀性技术研究”课题; 另外, 我国“神光”固体玻璃激光系统中采用的是 LA, RPP, BRP 和 SSD 等技术, 并正在尝试使用二元光学技术。

#### 4 结束语

采用空间和时间光滑化技术后, 可以显著提高激光辐照靶丸的均匀性。此时 SRS 可以降低约 3 个量级, SBS 反射率可由 18% 降低到 1~2% (如采用 RPP) 甚至 0.1% (再加上 SSD), 且能较好地抑制成丝不稳定性 and 流体不稳定性<sup>[14]</sup>。故在激光驱动惯性约束聚变中, 大力发展光束平滑和靶面均匀性辐照技术是势在必行的。目前, 随着二元光学技术的迅速发展, 及其在波面整形方面表现出的优越性, 它被认为是很有希望实现 ICF 均匀照明的新技术途径。因此, 在针对不同种类激光驱动器进行现有相应技术方案深入研究的同时, 还应积极开展这种新技术方案的研究探索与实际应用。

#### 参 考 文 献

- 1 常铁强, 贺贤士, 于敏. 强激光与粒子束, 1989; 1(3): 193
- 2 Bom M, Wolf E. Principles of Optics. Great Britain: Pergamon Press, 1978: 339~ 480
- 3 Schmitt A J, Gardner J H. J A P, 1986; 60(1): 6~ 13
- 4 Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H *et al.* Opt Commun, 1992; 91(1/2): 9~ 12
- 5 刘增水, 王润文, 路敦武 *et al.* 光学学报, 1998; 18(7): 943~ 949
- 6 Joshua E R. SPIE, 1995; 2375(4): 2633~ 2641
- 7 Lehmborg R H, Goldhar J. Fusion Technology, 1987; 11(5): 532~ 541
- 8 丘悦, 邓锡铭. 强激光与粒子束, 1997; 9(4): 507~ 510
- 9 Matsushima I, Owadano Y, Matsumoto Y *et al.* Opt Commun, 1991; 84(3): 175~ 178
- 10 Matsushima I, Yashiro H, Tomie T *et al.* 强激光技术进展, 1998; 35(1): 25~ 28
- 11 Stevenson R M, Norman M J, Bett T H *et al.* Opt Lett, 1994; 19(6): 363~ 365
- 12 Nakano H, Nakatsuka M, Miyayama N *et al.* J A P, 1993; 73(5): 2122~ 2131
- 13 Veron D, Ayrat H, Gouedard C *et al.* Opt Commun, 1988; 65(1): 42~ 48
- 14 张家泰, 杨国林. 计算物理, 1999; 16(5): 543~ 551
- 15 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学. 北京: 国防工业出版社, 1998: 1~ 16
- 16 倪明, 陆启生, 蒋治平. 国防科大硕士论文, 1997; 8~ 20
- 17 廖睿, 张静娟. 激光杂志, 1999; 20(4): 38~ 40
- 18 谭峭峰, 严瑛白, 金国藩 *et al.* 强激光与粒子束, 1999; 11(4): 445~ 449
- 19 郑学哲, 王凌, 严瑛白 *et al.* 中国激光, 1998; A25(3): 264~ 269

\* \* \*

作者简介: 谢永杰, 男, 1973 年 2 月出生。硕士, 助研。现从事高功率激光技术研究工作。