

# 高功率 KrF 准分子激光光束平滑技术实验研究

向益淮,单玉生,龚堃,汤秀章,高智星,戴辉,王乃彦

(中国原子能科学研究院核技术与计算机应用研究所,北京 102413)

**摘要:**均匀辐照是束靶相互作用实验的首要条件。采用无阶梯诱导空间非相干(EFISD)光束平滑技术对 KrF 准分子激光光束进行平滑实验研究,初步得到了带宽为  $4 \times 10^{-10}$  m、相干时间  $t_c$  为 0.5 ps、不均匀性小于 12% 的光束空间分布。

**关键词:**惯性约束聚变;无阶梯诱导空间非相干;均匀性;带宽;相干时间

**中图分类号:** TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2003)02-0101-05

## Experimental Investigations of Beam Smooth Technique for High Power KrF Laser System

XIANG Yi-huai, SHAN Yu-sheng, GONG Kun, TAN G Xiuzhang,  
GAO Zhi-xing, DAI Hui, WANG Nai-yan

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The technique called echelon-free induced spatial incoherence is adapted for producing smooth target beam profiles with high power KrF excimer lasers. The result of bandwidth  $= 4 \times 10^{-10}$  m, optical coherence time  $t_c = 0.5$  ps and inhomogeneous coefficient 12% is obtained.

**Key words:** inertial confine fusion; echelon-free induced spatial incoherence; laser intensity uniformity; bandwidth; optical coherence time

在激光惯性约束聚变(ICF)研究中,要求将入射激光变成某种特定空间分布的光束对靶进行辐照,对辐照均匀性又有相当高的要求,使之成为这一领域中难度极高的研究课题之一。激光直接驱动 ICF 是将激光直接辐照在球形 DT 靶丸上,使燃料达到高温后烧蚀外喷,由等离子体的反冲作用聚心压缩,内爆点火。对直接驱动而言,瑞利-泰勒流体力学不稳定性是最有害的,这种不稳定性增大到一定程度会造成

靶丸的非对称压缩,使靶壁和燃料物质混合,达不到聚变点火所要求的温度和密度。因此,能否有效抑制瑞利-泰勒流体力学不稳定性成为成功实现内爆的关键<sup>[1]</sup>。瑞利-泰勒流体力学不稳定性的强弱与激光辐照的均匀性密切相关,激光束本身的不均匀性会大大助长其发展,而激光器直接产生的激光具有很好的相干性和光强分布不均匀性,因此,需要通过改善激光束本身的相干性和均匀性来抑制该不稳定性。另

收稿日期:2002-04-28;修回日期:2002-08-23

作者简介:向益淮(1976—),男,四川遂宁人,在职硕士研究生,等离子体物理专业

外,在物质的状态方程的研究实验中,同样也需要入射激光束具有均匀的光强分布。

目前,世界上几个主要的激光实验室都在努力改善激光系统的输出特性,寻求提高激光光束均匀性的技术途径,因此,随之出现了一些光束平滑技术。针对 KrF 准分子激光具有宽频带和高增益的特点,本工作拟采用由美国海军实验室提出的无阶梯诱导空间非相干(EFISI)光束平滑技术对 KrF 准分子激光束进行平滑实验研究。

### 1 技术原理及分析<sup>[2,3]</sup>

EFISI 技术原理示意图示于图 1,它是一个

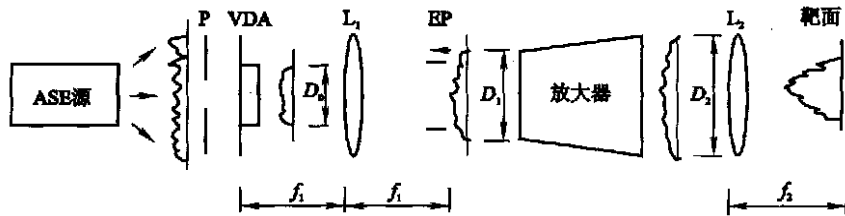


图 1 EFISI 技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EFISI

振荡器产生的 ASE 源要求满足:有足够的空间非相干,使光束相干带  $d$  小于放大过程中增益不均匀性、像差等因素引起的畸变量度  $S_a$ ,即  $d \ll S_a$ ,保证每个光束元在焦平面上都有相同形状的光强分布;经 VDA 在其有效口径  $D_0$  内产生的光强分布必须非常均匀。如果以上两个条件得到满足,最后在靶上的光强分布则为:

$$I_T(x) = (f_1/f_2)^2 P F(-Mf_1x/f_2) \quad (1)$$

其中:  $F(x)$  为 VDA 的空间传输函数,  $P$  为平均输出功率,有

$$P = G(X) I_0 \int_0^X (X/M) d^2 X \quad (2)$$

式(1)表明,靶上获得的光强分布是透镜  $L_1$  前焦面上 VDA 片透过率  $F(x)$  在靶面上的投影。因此,通过改变  $F(x)$  可在靶上得到所需的辐照光束分布。

### 2 实验与结果

实验的光路布置图示于图 2。为了获得非相干源,对 LPX-150 放电泵浦激光器作了一些

ISI 的替代性方案,阵列完全被省略,其基本思想主要是像传递技术。KrF 激光器产生的宽带、部分空间非相干光源(图中的 ASE 源)照明可变密度吸收体(VDA),在其有效口径  $D_0$  里可获得靶上所需要的理想空间分布的光束;将该口径作为物面,通过由透镜  $L_1$ 、 $L_2$  组成的光学像传递和激光放大系统把物面传递到靶上,靶上光束的空间分布是物面处光束分布的再现,靶从而可以获得均匀的辐照。VDA 是它的中心部分,其空间传输函数  $F(x)$  (在有效口径  $D_0$  内)根据靶的辐照需求,要求平滑并且可变。

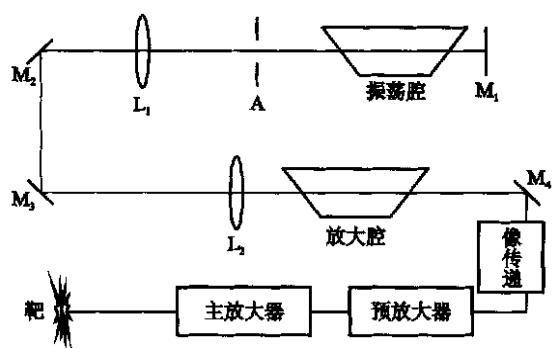


图 2 光路布置图

Fig. 2 Sketch of experimental setup

改动,去掉振荡腔的前腔镜,用一块平面反射镜  $M_1$  代替其后腔镜。这样,经过双程放大的自发辐射(ASE)便从振荡腔的前端输出。输出的 ASE 照射一个口径为 8 mm 的小孔 A,该小孔起图 1 中 VDA 的作用。 $L_1$  和  $L_2$  是一组像传递透镜,小孔处的像被它们传递到放大腔的出口附近,光束经过放大腔被单程放大后,输出端的像又被另外三级扩束像传递系统传递到预放大器的附近,扩束比由放大器的口径决定。用

同样的方法可将像一直传递下去,依次到主放大器和靶头。

图 3 示出了一些用 CCD 摄像机拍照的 ASE 光斑图。为了评价光束均匀程度,引入光束不均匀因子,其定义为光束的光强均方差与光强平均值之比<sup>[4]</sup>:

$$= \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2}{N - 1}} \times 100\%$$

其中:  $\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{N}$  为平均光强;  $N$  为光束截面包括的像素数。

按整个光束截面的 70% 计算,这 3 幅图的不均匀性依次为 3.57%、1.03%、3.29%。从 3 幅不同位置处的光斑图可以看出:长距离的传输对光束的均匀性有一定的影响,这主要是因 ASE 源本身具有较强的发散性,但放大却能使

光束的均匀性得到一些改善。图 4 是激光的光斑图样,它们的不均匀性均在 30% 以上。图 5 示出了上述图 3 的 ASE 光斑图对应的远场焦斑,3 幅图的均匀性分别为 8.7%、4.2%、12%。以图 5a 计算 ASE 的发散角,其焦斑直径为 2 mm,聚焦透镜的焦距为 440 mm,所以,其发散角为 4.6 mrad。图 6 示出了激光焦斑的二维和三维图,其不均匀性已经超过了 50%。

振荡腔双程输出的 ASE 能量约为 30 mJ,在孔 A 后面的能量约为 10 mJ,通过放大腔后输出的能量约为 150 mJ,传递到预放大器前,由于距离比较长,损失后剩约 100 mJ,经过预放大器的双程放大后,输出能量约为 3 J。经过主放大器的双程放大后,输出能量为 40 J。由于目前只有一束光,不存在解码消延时光路,所以,靶上能量与主放输出的能量差别不会太大。

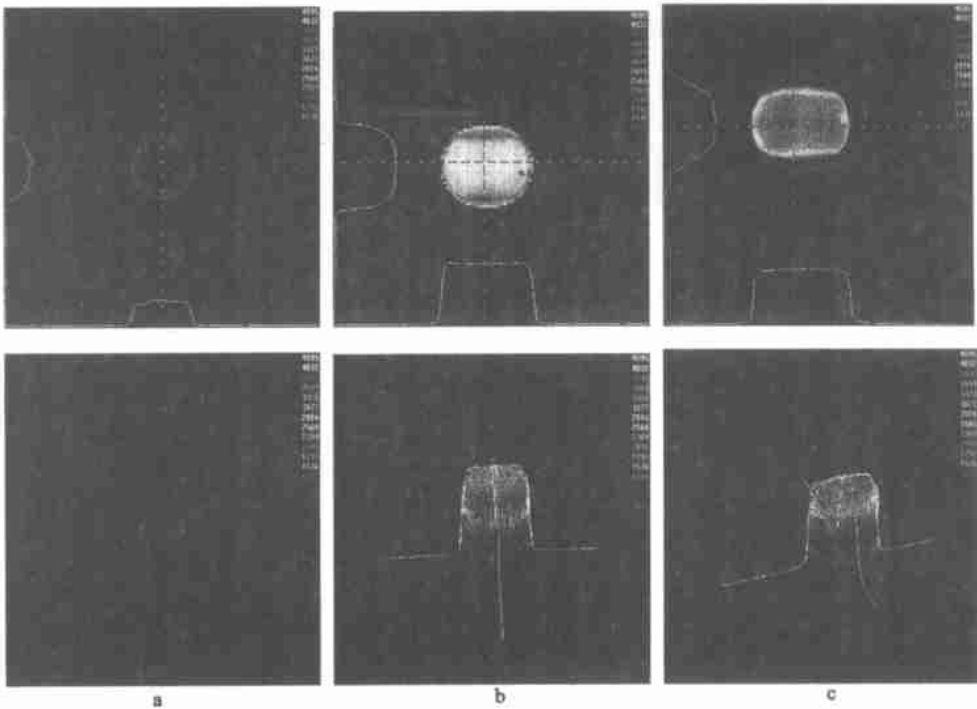


图 3 不同位置处 ASE 的强度分布图

Fig. 3 Intensity profiles of ASE at different position

a——振荡腔输出光斑;b——放大腔输出光斑;c——进入预放大器的光斑

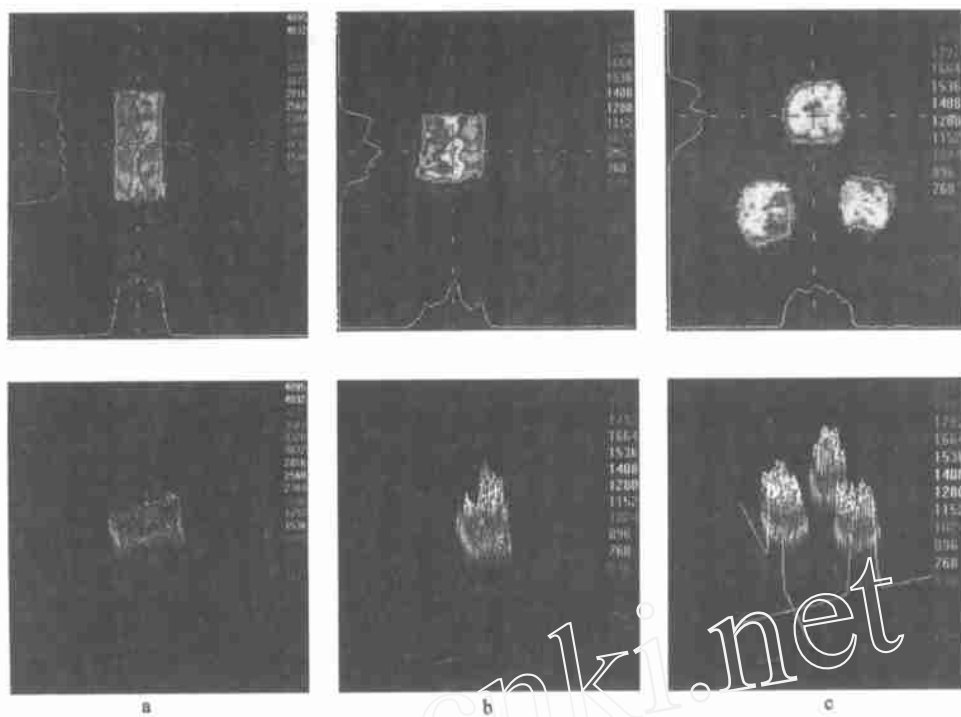


图 4 不同位置处激光的强度分布图

Fig. 4 Intensity profiles of laser at different position

a——L.PX-150 输出激光光斑 ; b——进入预放大器前的激光光斑 ; c——预放大器输出的激光光斑

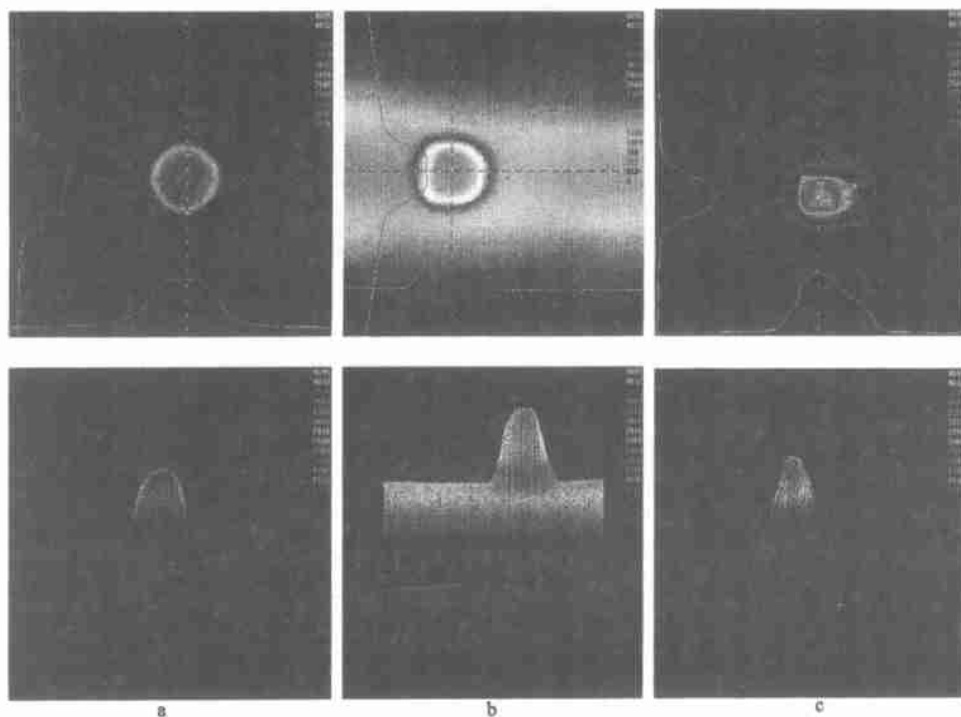


图 5 不同位置处 ASE 的焦斑强度分布图

Fig. 5 Focal point intensity profiles of ASE at different position

a——振荡腔输出焦斑 ; b——放大腔输出焦斑 ; c——进入预放大器的焦斑

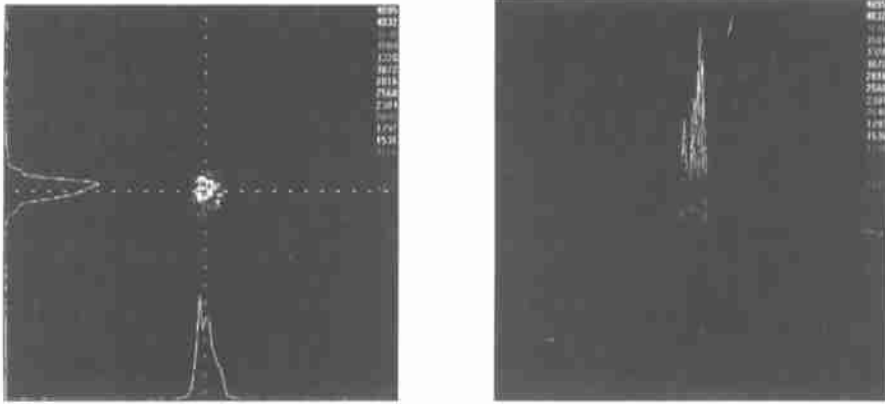


图 6 激光焦斑的强度分布

Fig. 6 Focal point intensity profiles of laser

图 7 示出了 ASE 的光谱图。测得其带宽  $= 4 \times 10^{-10} \text{ m}$ , 其相干时间  $t_c$  为:

$$t_c = \frac{1}{\Delta \nu} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{\Delta \lambda} = \frac{c}{\lambda^2 \Delta \lambda} \quad (4)$$

其中:  $c$  为光速;  $\lambda$  为波长。

将式(4)代入式(3)可得:

$$t_c = \frac{2}{c \Delta \lambda} \quad (5)$$

将数据代入上式,可得到相干时间  $t_c$  为

0.5 ps。

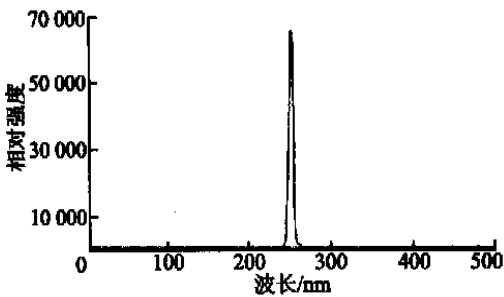


图 7 ASE 源的光谱图

Fig. 7 Spectrogram of ASE

### 3 结语

实验结果表明,EFISI 光束平滑技术在本

系统是可行的。本项工作还将继续进行下去,进一步优化 ASE 源和像传递系统,以期得到更好的参数,并考虑把以往实验所用的 MOPA 角多路系统用到现在的光束传输光路中来,这样,可充分利用主、预放大器电子束的宽度,提高它们的能量抽取效率,在靶头得到更高的能量。

在本项实验工作中,陆泽、马景龙、陶业争等给予了很多帮助,在此一并表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社,1999. 274 ~ 277.
- [2] Robert HL, Julius G. Use of Incoherence to Produce Smooth and Controllable Irradiation Profiles With KrF Fusion Lasers[J]. Fusion Technology, 1987, 11:532 ~ 540.
- [3] Shaw MJ, Bailly-Salins R, Key MH, et al. Development of High-performance KrF and Raman Laser Facilities for Inertial Confinement Fusion and Other Applications[J]. Laser and Particle Beams, 1993, 11:331 ~ 346.
- [4] 刘晶儒. 准分子激光光束平滑及均匀辐照技术实验研究[R]. 西安:西北核技术研究所,2000.