

# 高功率准分子激光 MOPA 系统光束平滑技术研究

王大辉 赵学庆 薛全喜 张永生 胡云 朱永祥 易爱平 赵军

(西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要** 在充分调研大型激光系统多种光束平滑技术基础上, 针对高功率准分子激光系统波长短、宽频带等特点, 选用了无阶梯诱导空间非相干(EFISI)技术来实现角多路高功率准分子激光系统的平滑化。利用前端部分相干散射源和严格的像传递光路, 开展了光束经预放大器 1 三程放大和预放大器 2 双程放大实验, 研究了光束动态均匀性。实验结果表明, 基于 EFISI 技术的平滑方法较好地保持了散射源的光束均匀性, 经预放大器 1 放大后不均匀性为 2.04%, 经预放大器 2 放大后不均匀性为 1.96%, 能够满足高功率 XeCl 准分子激光角多路系统建设需求。

**关键词** 激光光学; 准分子激光; 角多路系统; 光束平滑; 无阶梯诱导空间非相干; 像传递

**中图分类号** TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0214003

## Technical Study on Beam Smoothing of High Power Excimer Laser MOPA System

Wang Dahui Zhao Xueqing Xue Quanxi Zhang Yongsheng Hu Yun  
Zhu Yongxiang Yi Aiping Zhao Jun

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract** High power excimer laser system has its outstanding features such as short wavelength, broad bandwidth, *et al.* On the basis of adequate study of numbers of beam smoothing techniques in large scale laser facilities, the echelon free induced spatial incoherence (EFISI) technique is selected to accomplish the beam uniform irradiation in the angular multiplexed high power excimer laser system. In this way, measurements on dynamic uniformity of the seed beam after three paths amplification of pre-amplifier1 and double paths amplification of pre-amplifier2 with the use of partial coherence scattering seed and strict optical image relaying. Experimental results indicate that the uniformity of scattering seed is relatively kept owing to beam smoothing by EFISI technique. Typically, the nonuniformity of the beam after pre-amplifier1 amplification is 2.04%, and after pre-amplifier2 amplification is 1.96%. Meanwhile, the results mentioned above show that the technique adapts to the high power XeCl excimer laser systems.

**Key words** laser optics; excimer laser; angular multiplexed system; beam smoothing; echelon free induced spatial incoherence; image relaying

**OCIS codes** 110.0115; 140.2180; 140.3300; 140.7090

## 1 引 言

准分子激光具有波长短、增益高、频带宽、效率高、可定标放大及可重复频率运行等优点, 在直接驱动惯性约束聚变(ICF)研究和清洁能源上有良好的发展前景<sup>[1-3]</sup>。尤其准分子激光频带宽, 采用气体工作介质, 自身非线性相移小, 原则上可以实现高保真光束传输, 获得良好的光束辐照均匀性, 进而可以防止靶上产生压力不均匀的印痕, 抑制流体力学不

稳定性, 并阻止等离子体细丝的形成, 抑制激光等离子体不稳定性, 最终获得更高的聚变增益<sup>[4-6]</sup>。

在实际使用过程中, 由于振荡器自身出光和放大器激活介质的不均匀、传输中大气湍流、光学元件缺陷及增益饱和效应等因素的影响, 光束将发生畸变, 造成激光远场光束分布的不均匀。需要根据物质状态方程、靶丸的对称内爆压缩、流体力学不稳定性及等离子体不稳定实验研究等多种物理实验的指

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-08-16

基金项目: 国家 863 计划、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1106)

作者简介: 王大辉(1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光技术及等离子体物理等方面的研究。

E-mail: chsslw@163.com

标要求对激光进行光束平滑。国内外学者做了大量的工作,努力改善激光系统的输出特性,发展了多种靶面光束平滑和均匀辐照技术,并在实验上取得了一些结果。总体来说,光束平滑分为空间域平滑和时间域平滑两类,前者包括随机相位板(RPP)、偏振控制板(PCP)、阵列透镜(LA)、正交光楔阵列(SWA)以及二元光学元件(BOE)技术等,主要利用一些特殊光学元件来提高靶面能量效率和控制靶斑强度分布;后者包括部分非相干光(PCL)、诱导空间非相干(ISI)和光谱色散技术(SSD)等技术,主要利用焦斑上的干涉条纹随时间快速变化的特点,通过时间意义上的平滑来改善辐照均匀性<sup>[7-11]</sup>。

由于激光末端输出能量水平很高,靶前光束平滑方法比如阵列透镜、光谱色散、随机相位板、阶梯诱导非相干等方法的应用必须考虑激光破坏阈值的限制;而纯空域的光束平滑技术存在稳定的小尺度干涉条纹,如果辅之以时域平滑,即采用宽频带光束,在观察时间远大于相干时间情形下,将会产生条纹的统计平均,达到理想的光束平滑效果<sup>[12]</sup>。1987年,Lehmberg等<sup>[13]</sup>提出的无阶梯诱导空间非相干(EFISI)光束平滑方法就是上述思想的体现。EFISI方法在前端引入部分空间非相干,获得以相干带为表征的若干子光束,子光束之间是空间非相干的,采用像传递的方法进行放大传输,这些子光束在靶面非相干叠加获得理想辐照,该方法不仅易于实现,而且消除了其他空域方法引入的旁瓣衍射损耗,可大大提高能量利用率。

本文针对XeCl准分子激光角多路主振荡器功率放大(MOPA)系统特点,在部分相干源散射基础上采用严格的像传递光路,基于EFISI技术来实现

角多路MOPA系统的平滑化;利用搭建的预放大器1和预放大器2像传递光路,研究了前端部分相干散射源经预放大器1和预放大器2放大后像面处光斑的均匀性,达到了较好的光束平滑效果。

## 2 EFISI原理

EFISI原理是首先设法产生宽带、部分空间非相干光照明可变密度吸收片(VDA)<sup>[14]</sup>,在其有效口径 $D_0$ 内获得靶面需要的理想光束空间分布。然后以此口径作为物面,通过双透镜组成的像传递结构将物面逐级成像于靶面,靶上光束的空间分布就是物面处光束分布的再现,可获得激光对靶面的均匀辐照<sup>[15-16]</sup>。

在满足前端部分相干源具有足够的空间非相干性和VDA有效口径内有非常均匀光强分布前提下,通过VDA传输的光束 $E_0(x)$ 可以用自相干函数 $\Gamma_0(X, \xi)$ 表示为

$$\Gamma_0(X, \xi) = \langle E_0(X)E_0^*(X) \rangle \gamma_0(\xi), \quad (1)$$

其中 $X = (x + x')/2, \xi = x - x', x'$ 表示 $E_0(x)$ 的自相关函数对应于 $x$ 的自变量, $X, \xi$ 分别为经过VDA后光束横向分布平均位置和横向坐标分开的距离, $\gamma_0(\xi)$ 体现了光源的空间相干程度。在透镜组成像结构的前透镜前焦面上,VDA的透射率为 $F(x)$ ,通过VDA后的互相干函数 $\Gamma'_0(X, \xi)$ 表示为

$$\Gamma'_0(X, \xi) = \langle E_0(X)E_0^*(X) \rangle F(X) \gamma_0(\xi) = \langle I_0 \rangle F(X) \gamma_0(\xi), \quad (2)$$

其中 $I_0 = |E_0(X)|^2$ 为VDA传输光束的强度。

由范西特-泽尼克定理,在前透镜后焦面可以得到放大链入口处的互相干函数为

$$\Gamma_1(X, \xi) = \langle I_0 \rangle [1/(\lambda f_1)]^2 \int F(X') \exp(-ik\xi X'/f_1) d^2 X' \times \int \gamma_0(\xi') \exp(-ikX\xi'/f_1) d^2 \xi' = a \langle I_0 \rangle \tilde{F}(\xi) \tilde{\gamma}_0(X), \quad (3)$$

其中 $X', \xi'$ 分别为前透镜后焦面外 $E_1(x)$ 自相关函数对应于 $X, \xi$ 的自变量。 $f_1$ 是前透镜的焦距, $a = [1/(\lambda f_1)]^2, \tilde{F}(\xi), \tilde{\gamma}_0(X)$ 分别为 $F(X), \gamma_0(\xi)$ 的傅里叶频谱,并且

$$\tilde{F}(\xi) = \int F(X') \exp(-ik\xi X'/f_1) d^2 X', \quad \tilde{F}(0) = 1. \quad (4)$$

接着,光束进入放大器放大,在后透镜前焦面光束振幅记为 $E_2(x)$ ,其互相干函数 $\Gamma_2(X, \xi)$ 表示为

$$\Gamma_2(X, \xi) = \langle E_2(X)E_2^*(X) \rangle. \quad (5)$$

根据谢尔定理,后透镜后焦面即靶面上的光强分布为

$$\langle I_T(x) \rangle = [1/(\lambda f_2)]^2 \int d^2 X' \times \int d^2 \xi' \Gamma_2(X', \xi') \exp(-ik\xi'x/f_2), \quad (6)$$

式中 $f_2$ 为后透镜焦距。

在理想情况下,放大器增益不均匀性和像差等产生的影响可以忽略,仅有的变化是光束传播过程

中孔径的缩束比  $M$ 。这样,互相干函数  $\Gamma_2(X, \xi)$  可写为

$$\Gamma_2(X, \xi) = G(x)\Gamma_1(X/M, \xi/M) = a\langle I_0 \rangle G(x)\tilde{F}(\xi/M)\tilde{\gamma}_0(X/M), \quad (7)$$

其中  $G(x)$  为放大器增益函数,将(7)式代入(6)式,得

$$\langle I_T(x) \rangle = (f_1/f_2)^2 \langle P \rangle F(-Mf_1x/f_2), \quad (8)$$

其中  $\langle P \rangle$  为平均输出功率:

$$\langle P \rangle = \int G(X') \langle I_0 \rangle \tilde{\gamma}_0(X'/M) d^2 X'. \quad (9)$$

(8)式表明靶面上获得的光强分布是 VDA 透射率在靶面上的投影。因此,通过改变 VDA 的工作状态,就可以对靶面光束辐照进行控制。采用严格的像传递对光束进行放大传输,随光束口径的逐级增大,激光束散角逐级缩小,相干带被逐级放大,而系统光

束的空间相干性是由前端得到的部分相干源决定。

下面具体分析线性和非线性相位畸变产生的效果,采用微扰处理方法分析。线性相位畸变主要来自于大气湍流、非均匀增益介质抽运以及窗口等。非线性相位畸变主要来自于自聚焦效应和增益饱和等。将以上考虑组合起来,靶面光强分布可以写为

$$\langle I_T(x) \rangle = \langle I_T^{(0)}(x) \rangle + \langle I_T^{(1)}(x) \rangle + \langle I_T^{(2)}(x) \rangle + \langle I_T^{(NL)}(x) \rangle, \quad (10)$$

其中零阶项

$$\langle I_T^{(0)}(x) \rangle = (f_1/f_2)^2 \langle P \rangle F(-Mf_1x/f_2),$$

一阶线性扰动

$$\langle I_T^{(1)}(x) \rangle = -(f_2/k) \{ \nabla' \Phi \}_2 \cdot \nabla \langle I_T^{(0)}(x) \rangle,$$

二阶线性扰动

$$\langle I_T^{(2)}(x) \rangle = \frac{1}{2} (f_2/k)^2 \left\{ (\nabla'_u \Phi)(\nabla'_v \Phi) - \frac{1}{4} \nabla'_u \nabla'_v \ln(TG) \right\}_2 \cdot \nabla_u \nabla_v \langle I_T^{(0)}(x) \rangle - (Z_{12}/k) \{ \nabla'_u \nabla'_v \Phi_2 \}_2 \nabla_u [x_v \langle I_T^{(0)}(x) \rangle], \quad (11)$$

非线性扰动

$$\langle I_T^{(NL)}(x) \rangle = -2(f_2/k) \{ \nabla' \langle B \rangle \}_2 \cdot \nabla \langle I_T^{(0)}(x) \rangle - 2 \{ \langle B \rangle \}_2 [ \langle I_T^{(0)}(x) \rangle - (f_1/f_2)^2 \langle P \rangle H(x) ], \quad (12)$$

$$H(x) = \left( \frac{k}{2\pi f_1} \right)^2 \int |\tilde{F}(\xi)|^2 \tilde{F}(\xi) \exp\left(-i \frac{k}{f_2} Mx \cdot \xi\right) d^2 \xi, \quad (13)$$

其中  $T, \Phi$  分别为线性像差导致的非均匀强度传输和相位变化,  $z_{12}$  表示窗口间自由传输距离,  $u, v$  代表横向垂轴两个方向上空间变化,  $\nabla_u \equiv \partial/\partial u, \nabla_v \equiv \partial/\partial v, \nabla'_u = \partial/\partial u', \nabla'_v = \partial/\partial v', x_v$  表示光束横向分布在  $v$  空间上的投影。

线性相位畸变会导致像面焦斑空间位置发生变化。如果激光能精确地准直到像面上,那么空间位置变化将会消失。在实际的光路中,由于放大器和传输光路中微小湍流产生的相移导致的随机角度抖动会产生一个小的残留对准误差,但影响很小。对于  $\langle I_T^{(2)}(x) \rangle$  项,主要是由于衍射和相位畸变共同产生的一种场曲效果,可以通过调整像面或者倾斜聚焦透镜得到补偿。

非线性相位畸变的影响主要取决于  $2 \{ \langle B \rangle \}_2$  项,主要来自于自聚焦光学、高功率传输光路中的大气及增益饱和等,同样得到了合理的控制。

因此,对角多路 MOPA 系统,利用前端振荡源输出激光成像聚焦照射到聚四氟乙烯散射板上,经收集透镜对物孔照明形成理想物面,得到部分相干源,再采用严格的像传递结构,即可获得均匀光束。

### 3 实验

相对于前端部分相干源仅仅经放大器光束静态像传递传输,本实验内容主要是测量经放大器放大后光束的动态均匀性。动态放大与静态像传递传输最大差别是光斑放大过程中会额外产生振荡器自身激活介质不均匀、振荡器放电不均匀及增益饱和和效应等影响因素,进而影响输出放大光斑的均匀性。基于上述理论分析,采用 EFISI 光束平滑技术减小振荡器本身输出光不均匀、激活介质不均匀、传输中大气湍流、光学元件缺陷及增益饱和效应的影响,获得合理的均匀性测试结果,综合评估 EFISI 方法像传递和傅里叶面传递的光束平滑效果。

#### 3.1 实验布局

光路布局图如图 1 所示。振荡源输出激光聚焦到散射体上,经收集透镜对物孔进行照明,并作为初始物面种子光,通过预放大器 1 进行三程放大,输出光经电光削波开关对激光波形进行控制,接着传输到预放大器 2 进行双程放大。整个传输光路采用严格的  $4f$  像传递结构,并进行放大器间光束口径的匹配;将放大器置于像传递透镜的傅里叶频谱面,这样各个角谱分量在放大器中都能得到等量放大,可

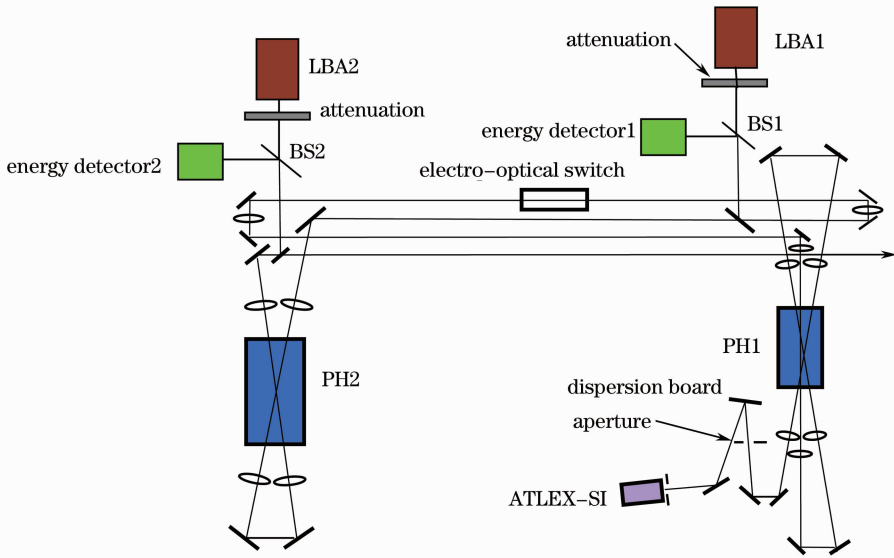


图 1 动态光束均匀性测量光路布局

Fig. 1 Optical sketch of dynamic beam uniformity measurement

最大限度地降低放大过程中放电激励不均匀和波前畸变对像面光束的影响。

预放大器 1 对激光三程放大后的光束动态均匀测量在电光开关削波系统之后,输出 10 mJ 级能量经 1%分束片,反射光束通过等比分束片 BS1 进行能量检测和光斑不均匀性测量。预放大器 2 对激光双程放大后的光束动态均匀性测量在下级放大器之前,输出 20 mJ 级能量经 50%分束片,反射光束通过等比分束片 BS2 进行能量检测和光斑均匀性测量。

振荡源所用窄脉冲 XeCl 准分子激光器为德国产 ATLEX-SI 激光器,抽运腔尺寸为 6 mm×4 mm×380 mm,激光波长为 308 nm,振荡器能量约 8 mJ,脉冲宽度为 6~8 ns,光束发散角约 2 mrad×1 mrad;光束均匀性测量采用美国 Spiricon 公司生产的光束质量分析仪 (LBA),光束采集 CCD 型号为 COHU-

4812,感光光谱范围 185~1100 nm,光敏面积为 8.8 mm×6.6 mm,分辨率为 512 pixel×480 pixel,对 308 nm 激光的响应能量范围为 30~300 nJ,通过对衰减倍数的控制能够满足对光斑均匀性的测试要求;能量检测采用以色列 OPHIR 公司生产的两套能量测量系统,能量探头型号分别为 PD10 和 PE50,表头型号为 NOVA II,两者测量范围分别为 200 μJ~20 μJ 和 200 μJ~10 J,口径分别为 Φ10 mm和 Φ50 mm,能够满足激光放大器输出能量直测和监测的需求。

### 3.2 实验结果

数据处理中,利用光束不均匀因子来评价光束分布的均匀性,按总能量下降到 1/e 处定义光束尺寸,光束不均匀因子定义为光束的光强均方差与光强平均值之比,用  $\sigma_{RMS}$  表示为

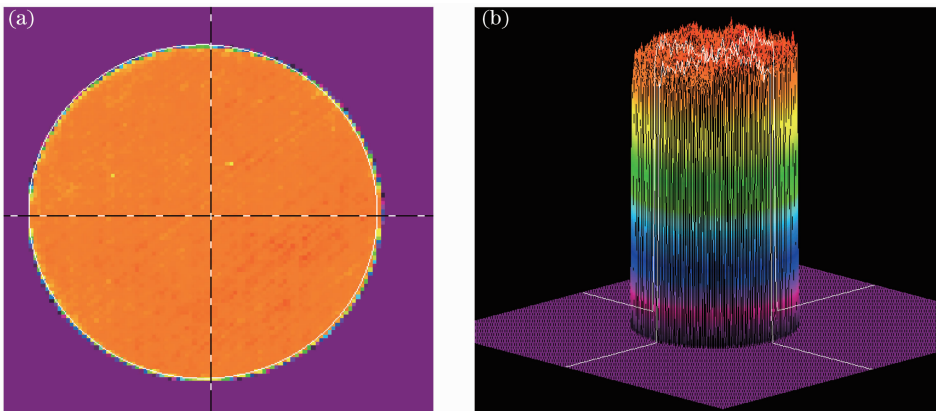


图 2 部分相干源光束分布。(a)二维图;(b)三维图

Fig. 2 Beam distributions of partial coherence scattering seed. (a) Two-dimensional image; (b) three-dimensional image

$$\sigma_{\text{RMS}} = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2 / (N-1)} \times 100\%, (14)$$

其中  $\bar{I} = \sum_{i=1}^N I_i / N$  为平均光强,  $N$  为计算区域内包含的像素数。

前端部分相干源光场分布测试结果如图 2 所示。

由图 2 可知,部分相干源的光束均匀性较好,光

束不均匀性仅为 1.54%。部分相干源经预放大器 1 三程放大之后像面光场分布测试结果如图 3 所示。

由图 3 可知,部分相干源经预放大器 1 放大后光束质量变差,但是像面基本保持了物面的均匀性,光束不均匀性分析结果为 2.04%。进入预放大器 2 双程放大之后像面光场分布测试结果如图 4 所示。

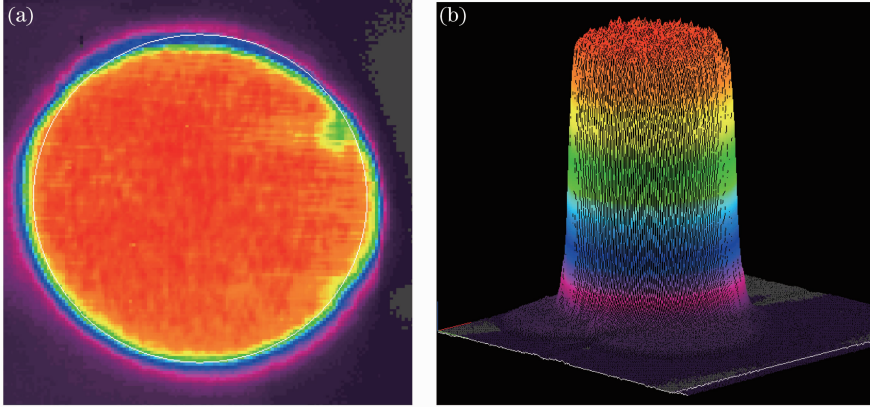


图 3 部分相干源经预放大器 1 放大后光束分布。(a)二维图; (b)三维图

Fig. 3 Beam distributions of partial coherence scattering seed after pre-amplifier1 amplification. (a) Two-dimensional image; (b) three-dimensional image

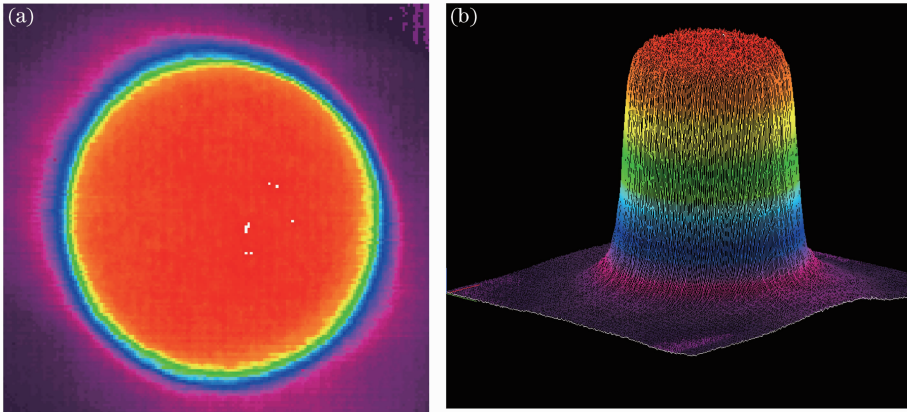


图 4 经预放大器 2 放大后的光束分布。(a)二维图; (b)三维图

Fig. 4 Beam distributions after pre-amplifier2 amplification. (a) Two-dimensional image; (b) three-dimensional image

由图 4 可知,光束经预放大器 2 放大后光束同样基本保持了物面的均匀性,光束不均匀性分析结果为 1.96%。此处光束质量要好于预放大器 1 放大后的光束,分析原因如下:实际中,相对于预放大器 1,影响预放大器 2 后光束均匀性的因素包含了预放大器 1 和预放大器 2 中激活介质的不均匀、传输中大气湍流、光学元件缺陷及增益饱和效应等,同时还包含中间传输光路的影响。但这些影响因素均是随机的,相互之间可以累积也可以少量抵消。因此,光束经预放大器 2 放大传输,影响光束均匀性的

因素累积后,却对光束分布进行了补偿。但需要说明的是,上述结果必须在无阶梯诱导空间非相干技术像传递的基础上,否则不论预放大器 1 还是预放大器 2 的光束不均匀性都要远远大于这个数值,多次实验也对此进行了验证。

同时,部分相干源、经预放大器 1 及预放大器 2 后的光束尺寸经测量均为 3 mm,与光束在整个光路设计中采用等比成像的像传递结构吻合;三处激光输出脉宽均为 6 ns,光束在放大过程中并无展宽;部分相干源处光束能量为 100 nJ,经预放大器 1 后

光束能量为 1.05 mJ, 经预放大器 2 后光束能量为 21.5 mJ。这些均验证了该技术方案在保证激光尺寸、脉宽及能量等参数前提下较好地提高了激光光束的均匀性。

下面从理论上讨论一下输出激光光束的光束质量。

用宽带激光照射聚四氟乙烯散射板对小孔进行均匀辐照产生部分非相干光, 产生一个多倍衍射极限的光束。光束衍射极限倍数为

$$N_d = Dd/(\lambda f), \quad (15)$$

其中  $D$  为傅里叶光斑直径,  $d$  为物孔直径,  $\lambda$  为光的波长,  $f$  为物孔和傅里叶面之间透镜的焦距。将透镜焦距 300 mm, 物孔直径 3 mm, 光波长 308 nm 及傅里叶光斑直径 1.5 mm 代入(15)式可以得到  $N_d \approx 50$ , 即前端输出光束具有 50 倍的衍射极限。衍射极限倍数越大, 焦斑分布受光束传递过程中像差的影响就越小。在 50 倍衍射极限情况下, 光束质量受传输过程中放大器增益不均匀及像差等的影响已经很小, 只需理论分析前端部分相干源的光束质量。

根据光束的相干域尺寸公式  $\delta = d/N_d$  可以得出  $\delta = 0.06$  mm, 相当于产生  $(d/\delta)^2 = 2500$  个空间非相干的小子束, 这些小子束经过像传递、放大, 最终在靶面上叠加成像。部分相干源带宽  $\Delta\lambda = 1 \times 10^{-9}$  m, 光谱曲线如图 5 所示。根据  $\Delta\nu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \nu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} c$  可以得到相干时间为

$$\tau_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda \cdot c}, \quad (16)$$

其中  $c$  为真空光速,  $\lambda$  为波长。代入(16)式可以得到相干时间  $\tau_c = 3 \times 10^{-13}$  s。

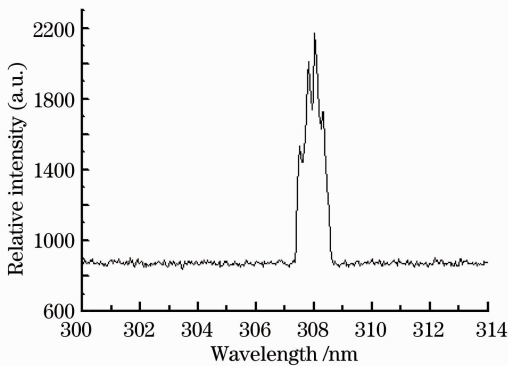


图 5 部分相干源光谱分布

Fig. 5 Spectral distribution of partial coherence scattering seed

根据 EFISI 光束平滑理论, 各小子束干涉形成的调制情况下光束不均匀性为

$$\sigma_{\text{rms}} = \sqrt{\tau_c/t_1}, \quad (17)$$

其中  $t_1 = 6$  ns 为激光脉宽。将  $\tau_c = 3 \times 10^{-13}$  s 代入(17)式可以得到  $\sigma_{\text{rms}} = 0.71\%$ , 与实验结果 1.54% 基本相当。经过预放大器 1 和预放大器 2 放大后, 光束不均匀性分别变为 2.04% 和 1.96%, 也验证了 50 倍衍射极限光束受传输过程中放大器增益不均匀及像差等的影响很小。

总体来说, 采用 EFISI 光束平滑技术, 一方面得到了光束质量较好的前端部分相干源, 另一方面, 在很大程度上避免了放大过程中放电激励不均匀、电光开关及增益饱和效应等因素的影响, 实现了对物面的高保真光学像传递。

## 4 结 论

针对角多路高功率准分子激光 MOPA 系统特点, 选用 EFISI 技术实现光束的均匀传输及对靶面的均匀辐照。对前端部分相干散射源经预放大器 1 及预放大器 2 放大后的光束进行了动态均匀性测量。结果表明, 得到光束不均匀性 1.54% 的前端散射源情况下, 利用 EFISI 技术, 通过像传递光路, 理论和实验上均实现了准分子激光系统的光束平滑及对光斑均匀性的要求。

## 参 考 文 献

- 1 L A Rosocha, J A Hanlon, J McLeod, *et al.*. Aurora multi-kilojoule KrF laser system prototype for inertial confinement fusion [J]. *Fusion Technology*, 1987, 11(3): 497-531.
- 2 S P Obenschain, D G Colombant, A J Schmitt, *et al.*. Pathway to a lower cost high repetition rate ignition facility [J]. *Phys Plasmas*, 2006, 13(5): 056320.
- 3 J R Liu, X Q Zhao, A P Yi, *et al.*. Experimental study on a long-pulse excimer laser system [C]. *SPIE*, 2005, 5627: 242-246.
- 4 J L Weaver, J Oh, B Afeyan, *et al.*. Laser plasma instability experiments with KrF lasers [J]. *Phys Plasmas*, 2007, 14(5): 056316.
- 5 C J Pawley, K Gerber, R H Lehberg, *et al.*. Measurements of laser-imprinted perturbations and Rayleigh-Taylor growth with the NIKE KrF laser [J]. *Phys Plasmas*, 1997, 4(5): 1969-1977.
- 6 Y Aglitskiy, A L Velikovich, M Karasik, *et al.*. Direct observation of feedout-related mass oscillations in plastic targets [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(26): 265002.
- 7 X M Deng, X C Liang, Z Z Chen, *et al.*. Uniform illumination for large targets using a lens array [J]. *Appl Opt*, 1986, 25(3): 377-381.
- 8 S Skupsky, R W Short, Kessler, *et al.*. Improved laser beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. *J Appl Phys*, 1989, 66(8): 3456-3462.
- 9 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.
- 10 I Matsushima, T Tomie, Y Matsumoto, *et al.*. Two-dimensional

- beam smoothing by broadband random-phase irradiation [J]. *Opt Comm*, 1995, 120(5): 299–302.
- 11 R H Lehmberg, J L Giuliani, A J Schmit. Pulse shaping and energy storage capabilities of angularly multiplexed KrF laser fusion drivers [J]. *J Appl Phys*, 2009, 106(2): 023103.
- 12 S E Bodner, D G Colombant, J H Gardner, *et al.*. Direct drive laser fusion: status and prospects [J]. *Phys Plasmas*, 1998, 5(5): 1901–1918.
- 13 R H Lehmberg, J Goldhar. Use of incoherence to produce smooth and controllable irradiation profiles with KrF fusion lasers [J]. *Fusion Technology*, 1987, 11(3): 532–541.
- 14 M J Shaw, R Bailly, M H Key, *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(2): 331–346.
- 15 S P Obenschain, S E Bodner, D G Colombant, *et al.*. The Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments [J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(5): 2098–2107.
- 16 Xue Quanxi, Zhao Xueqing, Hua Hengqi, *et al.*. Seed beam smoothing for high power XeCl excimer laser system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 332–339.
- 薛全喜, 赵学庆, 华恒祺, 等. 高功率 XeCl 准分子激光系统前端平滑实验[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(2): 332–339.

栏目编辑：张 腾