

# 准分子激光前端光束形态控制技术研究

赵学庆, 薛全喜, 郑国鑫, 黄珂, 肖伟伟, 易爱平, 刘晶儒

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**[摘要]** 在高功率准分子激光系统中, 前端光束形态直接决定着系统输出的光束形态, 并直接与靶物理需求密切相关。主要介绍了窄脉冲准分子激光前端光束形态控制的实验研究进展, 基于散射法获得了满足系统要求的部分相干源, 直接利用三束激光脉冲堆积获得了平顶整形脉冲, 并结合放大实验结果对上述实现方法进行了评价分析。

**[关键词]** 准分子激光; 光束平滑; 均匀性; 脉冲整形; 高功率

**[中图分类号]** TN248.21 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)08-0052-06

## 1 前言

作为高功率激光器件, 准分子激光具有良好的光束均匀性和可重频运行两大突出特点, 这使它自然成为聚变能源(inertial fusion energy, IFE)研究的候选者之一, 并成为惯性聚变物理和高能密度物理研究的有力工具<sup>[1,2]</sup>。物理研究往往要求靶面光束形态具有一定的灵活性, 对光束形态的控制可以在前端, 也可以在靶前<sup>[3,4]</sup>。对于高功率 MOPA(master oscillator and power amplifier)激光系统, 前端种子光性能对系统激光输出时空特性有着决定性影响, 且因前端能量水平低, 比较容易处理, 如果能够在前端通过调节种子光参数得到所需靶面辐照, 从经济上和改善效果上应是最理想的。准分子激光波长短、宽带宽, 采用气体工作介质, 介质本身的非线性相移很小, 原则上可以实现高保真光束传输, 且没有倍频环节, 所以不存在前端控制的物理限制<sup>[4]</sup>。光束形态控制主要指对光束在空域和时域分布的控制, 即空间整形和时间整形。由于许多实验要求光束平顶的光强分布, 以实现靶面的均匀辐照, 空间整形也称为光束平滑。靶物理对高功率激光系统的光束参数要求很苛刻, 要求靶面光束不

均匀性小于 2%, 并且具有所需脉冲形状。

大多数光束平滑方法是在靶前应用, 如列阵透镜(lens array, LA)、随机相位板(random phase plate, RPP)和相息相位板(kinoform phase plate, KPP)等, 目前在固体激光中比较重要的光谱色散方法(smoothing by spectral dispersion, SSD)虽然在应用于前端, 但往往与相位板方法联合使用。由于激光系统末放输出能量水平很高, 这些方法的应用必须考虑激光破坏阈值的限制因素, 而对其中纯空域的光束平滑方法, 还存在小尺度干涉斑纹。对于准分子激光, 特别适合采用无阶梯诱导空间非相干(echelon free induced spatial incoherence, EFISI)光束平滑技术, 该技术是在前端应用, 兼具空域平滑和时域平滑的特点, 效果非常理想, 如美国海军实验室的NIKE装置, 采用 EFISI 技术, 靶面单束靶面辐照不均匀性小于 1.3%, 44 束叠加后为 0.4%<sup>[5]</sup>。与固体激光相比, 准分子激光的脉冲整形研究滞后很多。准分子激光属于宽带激光, 光束叠加不会产生干涉引起的强度波动, 比较适合应用脉冲堆积法, 利用若干窄脉冲激光堆积可产生靶物理需要的各种脉冲, 哈尔滨工业大学利用受激布里渊压缩(stimulated brillouin scattering, SBS)产生的窄脉冲进

**[收稿日期]** 2008-12-20

**[基金项目]** “八六三”激光惯性约束聚变技术领域资助项目(2006AA804604)

**[作者简介]** 赵学庆(1966-), 男, 河北阜城县人, 西北核技术研究所高级工程师, 博士研究生, 研究方向为高功率准分子激光技术及应用;  
E-mail: zxq\_hb@163.com

行了脉冲整形技术研究,获得了初步结果<sup>[6]</sup>,但未见应用于放大链的报导。

靶面需求的光束形态在前端调节,使光束平滑与脉冲整形成为涉及系统全局性的工作,前端的重要性也更加凸显。文章利用1台短脉宽准分子激光源,基于EFISI光束平滑技术和脉冲堆积方法进行前端技术研究,为灵活、实用的前端设计提供依据。

## 2 研究方法

### 2.1 光束平滑

EFISI技术是在有阶梯诱导空间非相干(induced spatial incoherence, ISI)技术发展起来的,基本

原理是在宽带前端引入部分非相干,形成理想分布的物面,利用像传递将理想物面分布传到靶面,实现对靶面的均匀辐照<sup>[4,7]</sup>。像传递基本传输单元可看作相干带,光束通常为数十至百余倍衍射极限,各传输单元间是不相干的;准分子激光为宽频带的,相干时间仅为几个皮秒,具有天然的时间非相干性,对纳秒尺度的物理现象,在靶面有很好的时间平均效应。因此,该技术具有空域平滑和时域平滑联合作用的优势。应用时,首先要获得能量、空间相干性和均匀性满足后续放大传输和靶物理要求的种子源。

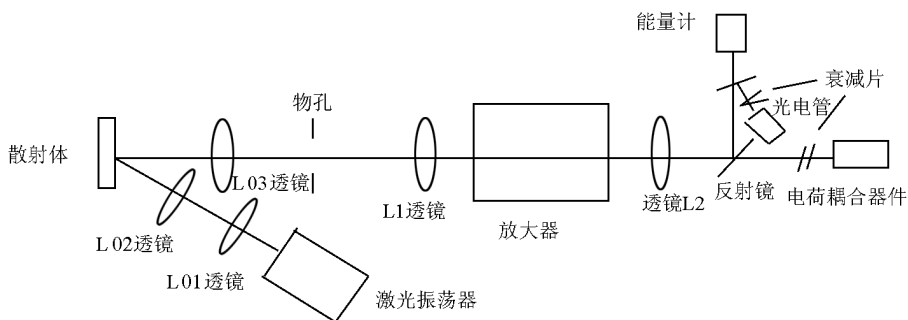


图1 部分相干源实验布局

Fig. 1 The experimental setup of partial coherence source

基于窄脉宽自由运转的准分子激光源,利用放大自发辐射法(amplified spontaneous emission, ASE)法和散射法进行部分相干种子源研究,并对获得的种子光进行放大验证。图1为散射法部分相干源实验布局,其中XeCl准分子振荡器能量最大为8 mJ,脉宽5~7 ns,光束截面为4 mm×6 mm;放大器为一台长脉冲XeCl激光器,脉宽为200 ns;物孔直径在0.5~5 mm间可调;用能量计和光电管(photodiode, PD)监测放大能量和激光脉宽。振荡源输出激光聚焦照射到散射板上,经收集透镜对物孔(object aperture, OA)照明,形成理想物面,利用4f像传递结构将该物面成像在CCD(charge coupled device)上,成像透镜焦距为2.7 m, CCD光敏面积8.8 mm×6.6 mm,像素尺寸11.5 μm×27 μm, A/D转换为14 bits,足以分辨残余斑纹引起的光束不均匀性。为避免放大器泵浦不均匀性的影响,放大器置于L1透镜的频谱面上。

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 $\sigma_{\text{RMS}}$ 表示:

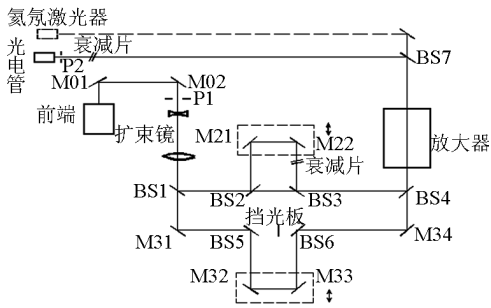
$$\sigma_{\text{RMS}} = \frac{1}{I} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2 / (N - 1)} \times 100 \% \quad (1)$$

式(1)中,  $\bar{I} = \sum_{i=1}^N I_i / N$  为平均光强;  $N$  为计算区域内包括的像素数。

### 2.2 脉冲整形

靶物理要求纳秒量级脉宽的整形脉冲。利用脉冲堆积,探索直接采用窄脉宽激光进行脉冲整形。为获得尽可能窄的整形脉冲,可采用三脉冲堆积方法,通过调节脉冲间隔和幅度,获得不同形状整形脉冲。实验中,设计获取10 ns脉宽的平顶整形脉冲,并进行传输放大实验。实验布局如图2所示,其中BS和M分别表示分束片和全反镜,利用光电管GD51(上升时间0.35 ns)测量整形脉冲。采用扩束镜降低光束发散,以保证三束光脉冲在传输放大过程中的高度一致性。

激光系统由振荡器和多台放大器组成,由于饱和效应,激光在放大器中放大传输时,其脉冲形状



BS—分束片;P—小孔;M—全反镜

图2 脉冲整形实验布局

Fig. 2 The layout of pulse shaping

会发生改变,情况比较复杂。氯化氙激光介质为四能级系统,由 Frantz - Nodvik 模型<sup>[8]</sup>,可给出输出放大器光子流时间变化与入射光子流间有如下依赖关系,其中  $L, g_0, \sigma$  分别为激光介质长度、放大器小信号增益和增益介质的受激截面。由此可对氯化氙激光进行脉冲整形计算分析。

$$I(L, t) =$$

$$\frac{I_0(t - L/c)}{1 - \{1 - \exp[-g_0 L]\} \exp[-\sigma \int_{-\infty}^{t-L/c} I_0(t') dt']]} \quad (2)$$

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 部分相干种子源

##### 3.1.1 ASE 源

利用 ASE 获得部分相干种子源是一种简便直接的方法,中国原子能研究院就采用该方法构建了系统前端<sup>[9]</sup>。所以,首先采用 ASE 方法进行部分相干源实验研究。实验中,将内腔窄脉宽 XeCl 激光器谐振腔的输出镜失调,得到了双程放大 ASE 源,在物孔后用 4f 像传递结构进行物面光束参数测量。实验获得了能量、均匀性随物孔直径和物孔与输出镜窗口间距的变化关系,如图 3 所示。由图 3 可见,部分相干源能量可达到数微焦,光束不均匀性也可达到 2% 以下,比较理想。但实验中发现,光束传输时仍保持放电区长方形的特征,且水平与垂直方向的发散角差别较大,并且由于这种短腔激光器(腔长 38 cm)存在许多空间模式,光束在频谱面形成了数个分立部分,这种状况非常不利于光束的后续传输放大和均匀性保持。

##### 3.1.2 散射源

以前的实验研究表明,聚四氟乙烯是理想的散射材料<sup>[10]</sup>。采用聚四氟散射体,进行部分相干源实

验研究。在收集透镜焦距为 20 cm 时,实验获得了能量、均匀性随物孔直径的变化,如图 4 所示,典型光束光强分布如图 5 所示。散射源能量为百纳焦量级,光束均匀性随物孔直径变化不大,不均匀因子在 1.5% ~ 1.8% 之间。光束形状完全取决于物孔,且在传输中不发生变化。光束发散角由散射体上的光斑大小和收集透镜与散射体的间距决定,实验设计值为 5 mrad,实测结果为 5.2 mrad,并且与物孔大小无关。

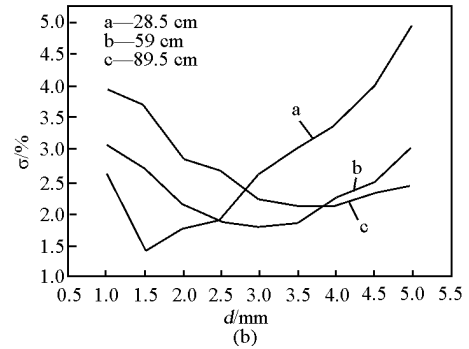
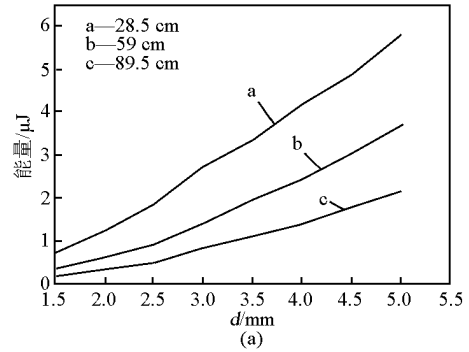


图3 物面光束参数随物孔直径及物孔与窗口间距变化

Fig. 3 laser parameters on object plane vs object diameter and distance between object and window

##### 3.1.3 放大实验

散射源的光束均匀性和发散性很理想,但能量很低,能否满足后续正常放大要求是实验关心的问题,为此进行了放大验证实验。实验中,为尽量避免 ASE 的影响,采用离轴放大方式,入射光束与放大器光轴夹角为  $0.9^\circ$ 。取物孔直径为 3 mm,实验得到放大能量为百余倍,达到十几微焦,放大激光脉宽为 6.5 ns,不均匀因子为 2.05%,放大后的激光脉冲波形和光束强度分布分别如图 6 和图 7 所示。能量得到有效放大,脉冲波形和均匀性均得到较好的保持,证明了该散射源的实用性。所测不均匀性偏大,主要是由于叠加 ASE 背景所致。

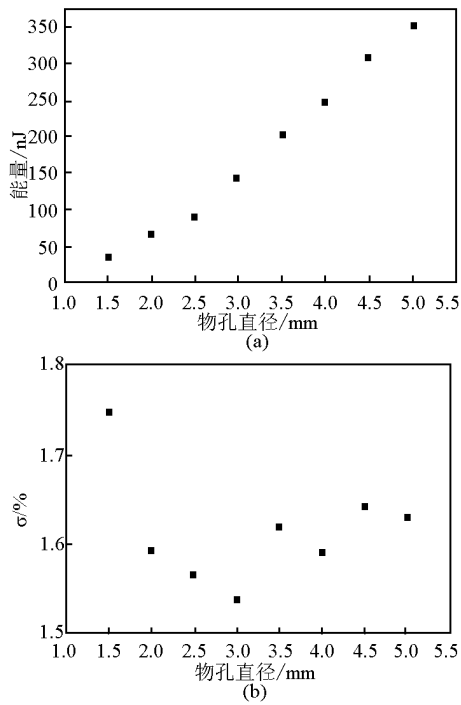


图4 散射源光束参数随物孔直径变化  
Fig. 4 Laser parameters of scattering source vs object diameter

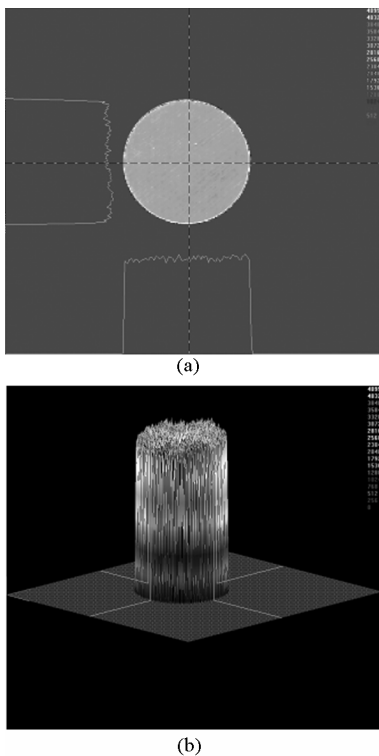


图5 散射源光强空间分布  
Fig. 5 The intensity distribution of scattering source

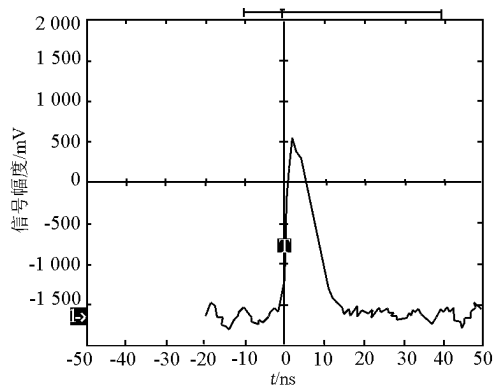
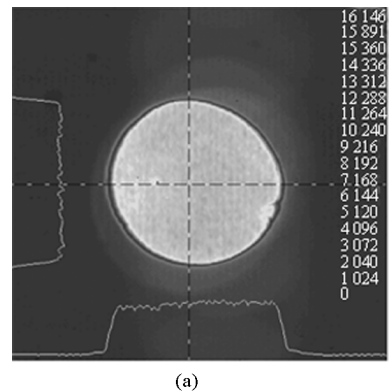
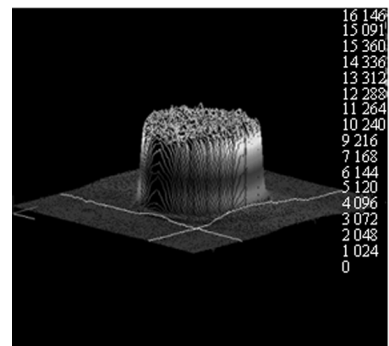


图6 放大后的激光波形

Fig. 6 Amplified laser waveform



(a)



(b)

图7 放大后的光束强度分布

Fig. 7 The spatial profile of output laser beam

### 3.2 脉冲整形

#### 3.2.1 平顶整形脉冲的获取

基于窄脉宽准分子激光源,利用三束光脉冲堆积进行获取平顶整形脉冲实验研究。首先根据实测前端激光波形进行计算拟合,确定光脉冲间隔。实测前端激光波形如图8所示,脉冲宽度为5.2 ns,前沿比后沿略陡,由此拟合得到脉宽为10.24 ns的平顶脉冲,如图9所示。实验中,根据计算结果布局光路,用快响应光电管GD51在放大器后测量脉冲

叠加波形。通过微调脉冲间隔和幅值,得到脉宽为 9.19 ~ 11 ns,平顶宽度为 4.3 ~ 5.6 ns 的平顶脉冲,典型结果如图 10 所示,该波形为 10 次累加结果。

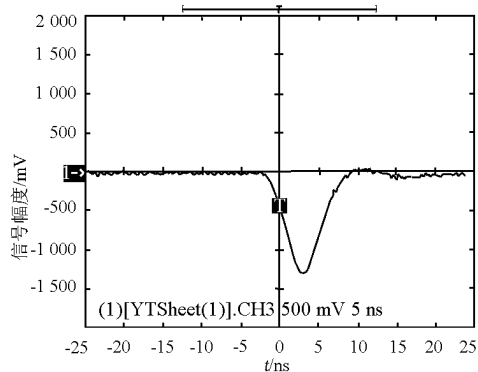


图 8 前端典型激光波形

Fig. 8 Typical laser waveform of front end

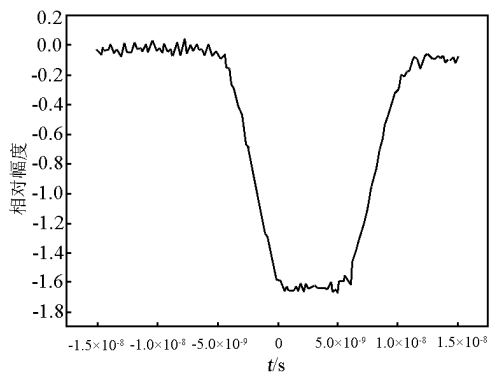


图 9 计算得到的平顶激光脉冲

Fig. 9 Calculated top-hat laser pulse

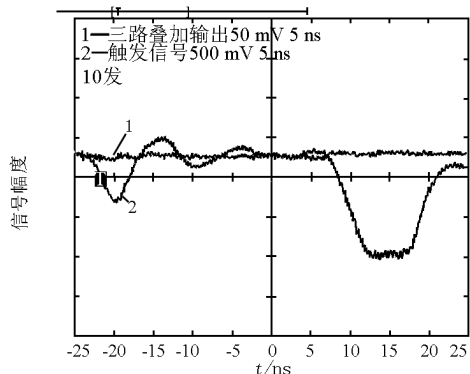


图 10 实验获得的平顶整形脉冲

Fig. 10 Measured top-hat laser pulse

### 3.2.2 平顶整形脉冲的放大

XeCl 激光介质为非存储性的,其能量提取和放大特性通常用稳态理论描述<sup>[11,12]</sup>,那么整形脉冲放大后能否得到维持呢?为此,利用平顶整形脉冲进

行了放大实验,这时入射光总能量为 30  $\mu\text{J}$ ,相当于入射光强 5.37  $\text{kW}/\text{cm}^2$ ,约为 0.01 Is,实验测得的放大波形如图 11 所示。可见,平顶脉冲的形状并未得到保持,表明增益饱和引起了波形的畸变。对上述实验条件,利用 F-N 模型进行了放大计算,计算得到的激光波形如图 12 所示,可见与实验吻合较好。

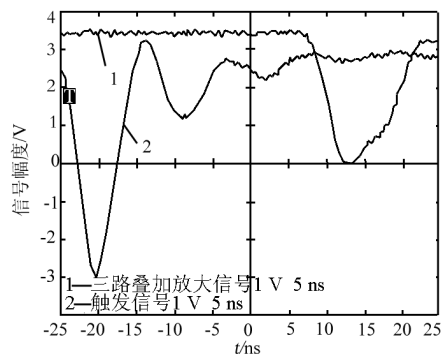


图 11 测到的平顶脉冲放大波形

Fig. 11 Recorded amplified top-hat laser pulse

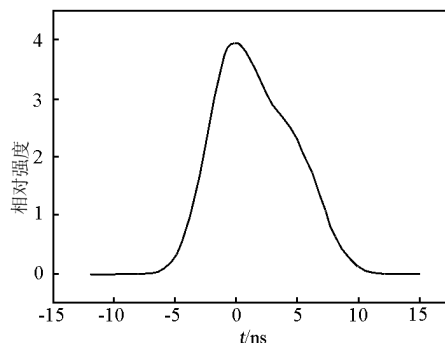


图 12 计算的平顶脉冲放大波形

Fig. 12 Calculated amplified top-hat laser pulse

### 3.3 分析与讨论

通过窄脉冲 EFISI 前端技术研究,可知由散射法构建的部分相干源比较理想,虽然比 ASE 源的能量小一个量级以上,但它破坏了入射激光原有模式,有利于激光的后续放大与传输,并且具有更好更稳定的均匀性。

这种 EFISI 前端还有源参数可控的特点,具有很大的灵活性。对激光系统的空间相干性,可通过散射体上光斑大小和收集透镜焦距进行调节;物孔对应着平顶光束空间分布,对靶面所需其他光强分布,可望通过选择物面光束透过率分布函数实现。对于前端理想光强分布在靶面的再现,一方面要保证放大环节的高保真像传递,另一方面要特别注意

ASE 的控制。

脉冲堆积是获得所需整形脉冲的有效方法,原则上通过调整脉冲间隔、幅度和脉冲数量,可获得任意形状的脉冲波形。准分子激光的脉冲放大同样会受到饱和效应的影响,可用 F - N 模型进行预测。为获得靶面所需的脉冲形状,可结合各放大器的注入光强和增益水平,由 F - N 模型依次反推,最后得到前端对应的整形脉冲形状。

## 4 结语

利用窄脉宽准分子激光器,对前端光束时空形态进行了控制技术研究,获得了能量、均匀性和空间相干性都满足要求的部分相干源,利用激光脉冲堆积获得了约 10 ns 的平顶整形脉冲,进行了放大实验,并结合实验结果对激光系统输出的光束形态控制进行了分析,将对高功率准分子激光 MOPA 系统前端设计具有借鉴作用。

## 参考文献

[1] Rosocha L A, Hanlon J A, McLeod J, et al. Aurora multikilojoule KrF laser system prototype for inertial confinement fusion[J]. Fusion Technology, 1987, 11:497 - 531

[2] Myers M, Sethian J D, Giulian J L, et al. Repetitively pulsed, high energy KrF lasers for inertial fusion energy[J]. Nuclear Fusion, 2004, 44:247 - 253

[3] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1999:274 - 311

[4] Lehmberg R H, Goldhar J. Use of incoherence to produce smooth and controllable irradiation profiles with KrF fision lasers[J]. Fusion Technology, 1987, 11:532 - 541

[5] Obenschain S P, Bondner S E, Colombant D, et al. The Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments [J]. Phys Plasmas, 1996, 3(5):2098 - 2107

[6] 王双义,吕志伟,林殿阳,等. KrF 激光的脉冲整形研究[J]. 强激光与粒子束,2005,17(11):1669 - 1673

[7] Lehmberg R H, Obenschain S P. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets [J]. Optics Comm, 1983,46(1):27 - 31

[8] Frantz L M, Nodvik J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. J Appl Phys,1963,34:2346 - 2349

[9] 向益淮,单玉生,龚 堃,等. 高功率 KrF 准分子激光光束平滑实验技术研究[J]. 原子能科学与技术,2003, 37(2):101 - 105

[10] 赵学庆,谢永杰,袁 孝,等. 部分相干源实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3):408 - 410

[11] Rice J K, Tisone G C, Patterson E L. Oscillator performance and energy extraction from a KrF laser pumped by a high - intensity relativistic electron beam[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1980, 16:1315 - 1326

[12] Hunter A M, Hunter R O. Bidirectional amplification with non-saturable absorption and amplified spontaneous emission [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1981, 17:1879 - 1887

# The shape control over the front-end of excimer laser beam

Zhao Xueqing, Xue Quanxi, Zheng Guoxin, Huang Ke,

Xiao Weiwei, Yi Aiping, Liu Jingru

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] In high power excimer laser system, the shape of output laser beam from whole system is mainly determined by the front-end of laser beam, and is closely correlated to the requirement of target physics. The experimental development of the front-end laser beam shape control based on a short pulse excimer laser is described. A partial coherence scattering source satisfying requirement of system construction has been developed, and the top-hat laser shaping pulse by three pulses stacking has been obtained. Also, analysis on above methods combining experimental results is given.

[Key words] excimer laser; beam smoothing; uniformity; pulse shaping; high power