

文章编号 1004-924X(2011)02-0397-10

# 平滑化窄脉冲高功率准分子激光放大技术

赵学庆,刘晶儒,易爱平,薛全喜,华恒祺,钱航,郑国鑫,  
胡云,张永生,黄珂,黄超,于力  
(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家实验室,陕西 西安 710024)

**摘要:**对于高功率准分子激光,光学角多路和诱导空间非相干(EFISI)光束平滑是高功率准分子激光压缩脉宽、提高功率密度和实现靶面均匀辐照的有效途径,其应用涉及前端至靶前的各个环节,主要体现为平滑化窄脉冲激光的传输放大问题。首先介绍了基于散射法开展的部分相干源前端技术及脉冲整形的初步研究结果,利用直接法和反射率耦合方法,研究了5台激光放大器增益特性。然后,讨论了窄脉宽激光放大时的自发辐射放大(ASE)控制技术,最后,介绍了窄脉冲激光放大实验系统。实验获得了预期的实验结果,输出能量为5~6 J,激光脉宽约10 ns,聚焦光斑约 $\Phi 300 \mu\text{m}$ 。单路系统实验结果表明,系统放大链和光学设计合理,基本满足角多路MOPA系统的技术验证要求,为系统工程设计奠定基础。

**关键词:**准分子激光;高功率激光;激光放大;光束平滑

**中图分类号:** TN248.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0397

## Amplification of high power short pulse excimer laser with beam smoothing

ZHAO Xue-qing, LIU Jing-ru, YI Ai-ping, XUE Quan-xi, HUA Heng-qi, QIAN Hang,  
ZHENG Guo-xin, HU Yun, ZHANG Yong-sheng, HUANG Ke, HUANG Chao, YU Li

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

**Abstract:** The combination of optical angular multiplexing and Echelon Free Induced Spatial Incoherence (EFISI) is a best choice for the pulse compression and beam smoothing in a high power excimer laser system, which relates to the transportation and amplification of smoothed narrow laser pulse mainly. In this paper, the construction of a partial coherence oscillator by scattering method was described and primary results for pulse shaping were provided. Then, the gain characteristics for five laser amplifiers by single-pass amplifications and simulations of different output couplings were discussed, and measures to control over Amplification Spontaneous Emission (ASE) in the short laser pulse amplification was described. Finally, the Main Oscillation Power Amplifier (MOPA) chain of a single-beam XeCl laser and primary results were introduced. Obtained results show that the final output energy is 5~6 J with a pulsewidth around 10 ns and the focal spot is around 300  $\mu\text{m}$  in the diameter. These results indicate that the laser chain and optical design are reasonable, which can be used as

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKL110904)

a good guide for the specific design of full scale angular multiplexed laser MOPA system.

**Key words:** excimer laser; high power laser; laser amplification; beam smoothing

## 1 引言

紫外准分子激光采用气体介质,具有波长短、增益高、频带宽和可重复频率运行等特点,不仅可定标放大到高能,而且与靶材耦合效率高,较易获得均匀的靶面辐照,能够大幅抑制各种非线性过程,从而使其成为高能密度物理和聚变能源研究的重要器件,受到美、日、英、俄等国的高度重视<sup>[1-5]</sup>。经过 30 多年的发展,高功率准分子激光不但由单台器件发展为颇具规模的激光器系统,而且经历了由长脉冲到短脉冲、由光束形态不可控到可控、由单次工作到可靠重频运行的 3 次技术突破。不仅实现数千焦耳的能量定标放大输出,而且获得良好的靶面辐照均匀性,实现了长寿命重频可靠稳定运行<sup>[6-10]</sup>。近十余年来,美国海军实验室在高功率准分子激光研究方面处于世界领先地位,研制的 NIKE 装置展现了良好的光束控制能力,靶面辐照不均匀性优于 1%<sup>[2, 11]</sup>;所研制的 ELECTRA 装置实现了 1~5 Hz 的重频运行,在 300 J/1 Hz、250 J/5 Hz 和 700 J/1 Hz 输出条件下,连续运行发次分别为 10 000 发、7 700 发和 400 发,电插头效率达 7.4%<sup>[12-13]</sup>。这些成果促使美国启动了准分子激光能源驱动器研究规划<sup>[14]</sup>,计划在 2022 年建立聚变实验装置(FTF, 5 Hz/0.5 MJ),2031 年建立聚变电厂原型装置,高功率准分子激光步入新的发展阶段。

西北核技术研究所对高功率准分子激光的研究已有二十多年的历史,在 20 世纪 90 年代分别成功研制了十焦耳级和百焦耳级电子束泵浦准分子激光器<sup>[15-16]</sup>,2004 年通过与俄罗斯大电流所的合作,建立了由三台放电泵浦激光器、两台电子束泵浦激光器组成的窄带、长脉冲氯化氙准分子激光 MOPA 系统<sup>[17-19]</sup>,其末放光束口径为  $\Phi 38$  cm,输出能量为 250 J,输出脉宽为 200 ns,线宽为  $1 \text{ cm}^{-1}$ ,靶上功率密度为  $10^{11} \text{ W/cm}^2$ 。为深入开展激光等离子体物理和材料性能实验研究,拟在长脉冲准分子激光系统的基础上,采用光学角多路技术压缩脉宽,采用诱导空间非相干(Echelon Free Induced Spatial Incoherence,

EFISI)技术改善靶面辐照均匀性,建成能量为 100 J、脉宽在 10 ns 左右的一套窄脉宽高功率准分子激光系统,使聚焦功率密度达到  $10^{12} \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 。

本文将围绕窄脉冲角多路 MOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)系统研制,对关键技术研究 and 单路 MOPA 实验进展进行介绍。

## 2 实验系统概述

实验系统主要由前端激光器、放大器、同步触发、光路准直、参数测量与数据采集和靶室等部分组成,如图 1 所示。

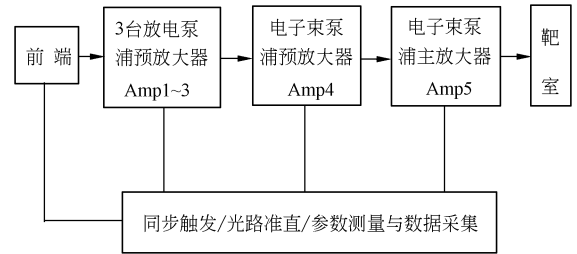


图 1 单路 MOPA 实验系统组成

Fig. 1 Block of single-pass MOPA system

前端激光器采用一台商用窄脉宽氯化氙准分子激光器,输出能量为 8 mJ,激光脉宽为 7 ns,光束尺寸为  $6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。利用该激光源构建的部分相干源,产生 MOPA 系统所需的种子光。

系统使用 5 台激光放大器,包括 3 台放电泵浦预放大器(Amp1~3)、电子束泵浦预放大器(Amp4)和电子束泵浦主放大器(Amp5),增益脉宽均在 200 ns 以上。Amp1~3 均采用双放电回路设计,以实现大口径长脉宽均匀体放电,Amp1 采用紫外预电离和半导体断路器导通间隙,激活尺寸为  $3.8 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ ,振荡器输出能量 0.5 J;Amp2 和 Amp3 均采用 X 射线预电离和形成线储能结构,激活尺寸分别为  $4.5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$  和  $7 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ ,振荡器输出能量分别为 1.5 J 和 10 J。电子束泵浦预放大器 Amp4 采用真空绝缘模块化 Marx 发生器结构,激光气室为圆柱型( $\Phi 25 \text{ cm} \times 210 \text{ cm}$ ),电子束对

称四向泵浦,二极管电压为 480 kV,电流为 70 kA,振荡器输出能量为 100 J;电子束泵浦主放大器 Amp5 脉冲功率源为两台并联的模块化直线变压器,采用六向 18 个二极管泵浦激光气体,圆柱型激光腔体尺寸为  $\Phi 38 \text{ cm} \times 250 \text{ cm}$ ,二极管电压为 500 kV,总电流为 300 kA,振荡器输出能量为 550 J。

同步触发系统采用低压与高压相结合的触发方式,由控制计算机 PC 启动低压同步发生器,产生 6 路 500 V 信号触发前端和 5 台放大器。前端激光器和 Amp1,直接利用低压触发信号即可实现低抖动运行,对其他激光放大器,由于所用气体开关多,单靠低压触发难以满足要求,采用低压触发和高压触发相结合的方式,由数十千伏高压脉冲触发放大器各自的主开关实现系统同步。

采用一台波长为 325 nm 的氩镉激光器作为系统准直光源,通过自动准直闭环控制模块实现准直光源与主激光的高精度耦合。对放大器输出激光参数,利用反射镜取样实现放大链输出能量和脉冲波形的在线测量;采用分压器和微分环进行各放大器放电电压、电流等电学参数测量,并用 Labview 软件实现信号的集成采集、显示和处理。靶室为球形,材料为不锈钢,壁厚为 30 mm,内径为  $\Phi 1200 \text{ mm}$ ,工作真空度为  $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

### 3 关键技术研究

#### 3.1 前端技术

对高功率激光 MOPA 系统,前端种子光参数对输出光束性能具有决定性的影响,或者说需要根据物理实验的要求灵活控制种子光的光束形态。由于准分子激光为宽带气体激光,非线性相移小,不存在倍频限制,特别适合在前端对系统光束形态进行控制<sup>[20]</sup>,对光束进行空间整形和时间整形。基于像传递的 EFISI 光束平滑技术是实现靶面理想辐照的有效途径,需要按其技术要求引入部分空间非相干性(通常数十倍衍射极限),构建均匀性好的部分相干种子源<sup>[20-22]</sup>;基于脉冲堆积方法,原则上可堆积获得靶面理想的光束脉冲形状<sup>[23-24]</sup>。

##### 3.1.1 部分相干种子源

光束通过散射材料,可以使原有模式重新分配,是获得良好光束均匀性和引入部分相干性简

单有效的方法,实验光路如图 2 所示。利用窄脉宽 XeCl 准分子激光器辐照散射材料,散射光经透镜收集对物孔照明,获得理想物面,通过成像方法用 CCD 对物面光强分布进行测量。

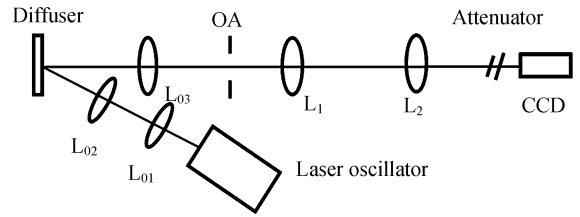


图 2 部分相干散射源实验布局

Fig. 2 Layout of partial coherence scattering source

选用聚四氟乙烯为散射材料,实验获得的能量、均匀性随物孔直径的变化如图 3、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。光束空间相干性由散射体上的光斑大小和收集透镜与散射体

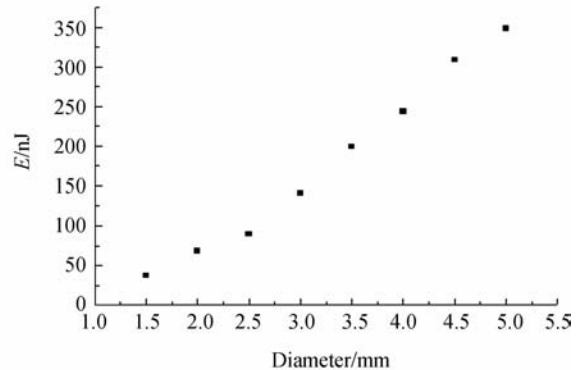


图 3 散射源光强随物孔直径变化

Fig. 3 Energy of scattering source vs OA diameter

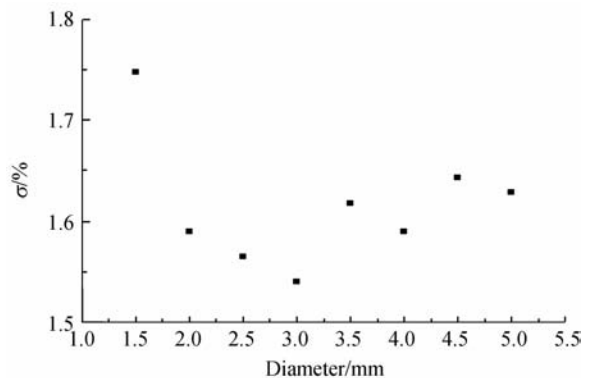


图 4 散射源均匀性随物孔直径变化

Fig. 4 Uniformity of scattering source vs OA diameter

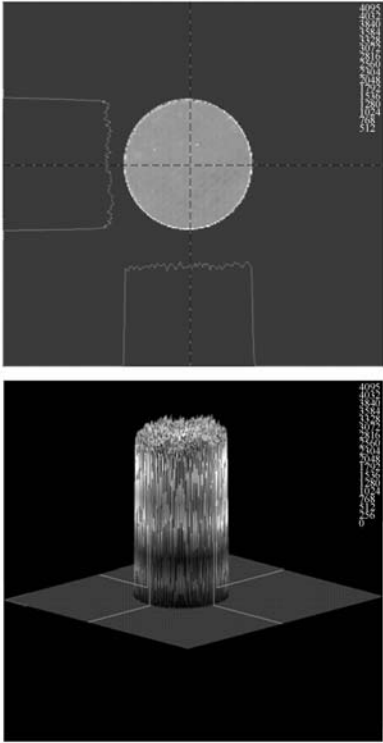


图 5 散射源光强空间分布

Fig. 5 Intensity distribution of scattering source

的间距决定,实验测得光束发散角为 5.5 mrad,并且与物孔大小无关;而光束均匀性取决于散射材料。这种参数可控的部分相干种子源可以满足系统对前端种子光的技术要求。

### 3.1.2 脉冲整形研究

准分子激光相干性较差,光束叠加不会导致产生干涉调制,脉冲堆积是进行脉冲整形的有效技术途径。利用窄脉宽前端激光器,进行了脉冲堆积的原理性实验研究,通过脉冲堆积以获得平顶整形激光脉冲。利用三束脉宽为 7 ns 的激光脉冲,通过调节子束幅度和间隔,获得了脉宽为 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 6 所示,该波形为 10 次累加结果,从而初步证明了脉冲堆积方法具有任意形状脉冲整形能力,可以通过更短脉宽的基准光和光纤分束传输叠加实现复杂形状的脉冲整形。

考虑到放大器工作状态对注入脉冲的影响,利用 Frantz-Nodvik 模型<sup>[25]</sup>,以 Amp1 放大器为例对脉冲整形的正问题和逆问题<sup>[26]</sup>进行了计算研究。图 7 是对脉冲整形逆问题的计算典型结果,可见若输出脉冲为超高斯脉冲形状,输入脉冲前沿幅值较后沿低,且与注入光强密切相关。因

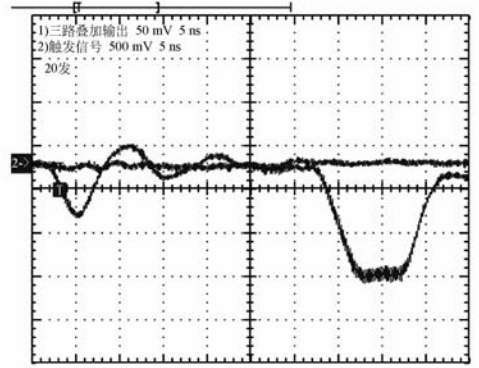
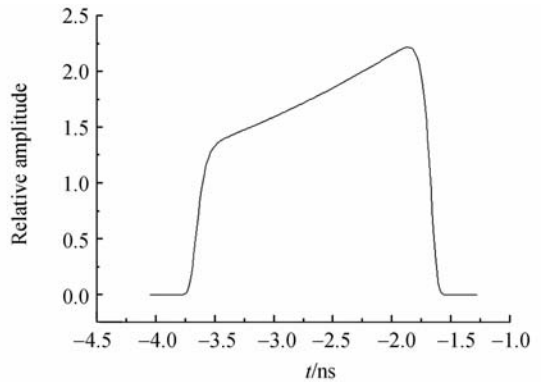
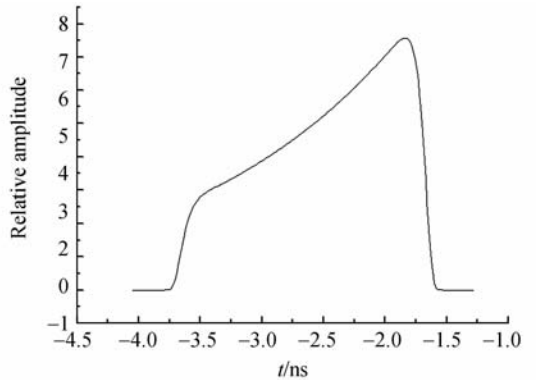


图 6 平顶整形脉冲

Fig. 6 Shaping pulse with top hat



(a)  $I_{out} = I_s$



(b)  $I_{out} = 2I_s$

图 7 超高斯脉冲整形典型计算结果

Fig. 7 Typical calculated results of super Gauss pulse shaping

此,激光系统的脉冲整形应结合放大器的工作情况具体设计。

### 3.2 激光放大器增益特性

放大器的增益水平是放大器放大能力的表征,决定着系统能量的输出水平,是进行 MOPA 系统放大链设计的重要技术参数。采用两种方法

对放大器增益进行测量,一是基于放大器进行测量,即把信号光注入放大器进行单程放大,通过放大前后能量的对比可得到放大器增益,可称为直接放大法;二是基于振荡器进行测量,通过测量不同输出耦合的输出能量,根据 G. M. Schindler 建立的计算模型<sup>[27]</sup>,计算得到介质的内参数,称为反射率耦合法。前者方法比较直接,通过控制信号光的注入时间,容易获得放大器增益的时间变化特性;后者不能给出增益随时间的变化,但通过拟合计算,可同时给出小信号增益系数、吸收损耗和饱和光强 3 个重要参量。

对于角多路 MOPA 系统设计,放大器增益的时间特性决定着光束路数的选取。利用直接放大法,测量获得了 5 台放大器增益的时间特性,实验中注入光强为 250~2 300 W/cm<sup>2</sup>。主放大器在 MOPA 系统的作用至关重要,不仅利用直接测量法获得了净增益随时间的变化曲线,还通过反射率耦合法对小信号增益、非饱和吸收和饱和光强进行拟合计算,由图 8 可得主放大器增益下

降至最大值的 90%和 80%时,增益时间窗口宽度分别为 197.8 ns 和 253.2 ns。通过对反射率耦合法测量结果的拟合计算(如图 9 所示),得到该放大器的小信号增益系数  $g_0=0.0288\text{ cm}^{-1}$ ,非饱和吸收  $\alpha=0.0064\text{ cm}^{-1}$ ,饱和光强  $I_s=0.719\text{ MW/cm}^2$ ,由此计算的净增益与直接法测量结果基本一致。

### 3.3 电光削波开关与 ASE 控制

准分子激光属于高增益、非存储介质,放大自发辐射(ASE)比较严重。对系统前面的小口径放电预放,具有较低的时空占空比,其 ASE 本底经后续放大器放大,将严重影响系统的对比度。利用电光开关削波是一种直接有效的方法,为此利用前端激光器开展了电光开关削波实验研究,如图 10 所示。利用高性能光电管和光学衰减片相结合的方法测量开关对比度,其中光电管采用滨淞公司生产的 RU1193 型,上升时间 270 ps。

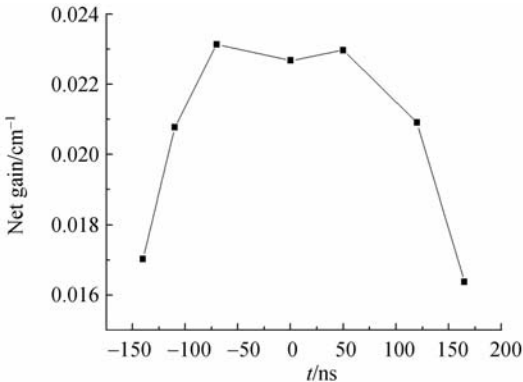


图 8 Amp 5 增益随时间变化

Fig. 8 Time dependence of gain of Amp 5

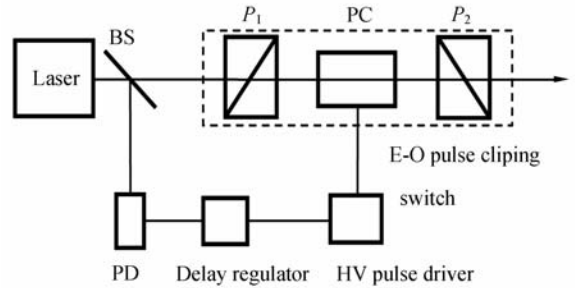


图 10 电光削波开关结构示意图

Fig. 10 Scheme of E-O clipping switch

开关对比度和能量传输效率是开关性能的两个重要表征参数,开关对比度定义为其开启和关闭时透过信号幅值之比;能量传输效率定义为开关检偏器后与起偏器前能量之比。放大信号对比度定义为完整信号幅值与 ASE 本底幅值之比。

基于 BBO 晶体研制了电光削波开关,脉冲电源脉宽为 6 ns。对前端激光器削波,在最佳工作条件下,测得削波输出脉宽约 4 ns,开关对比度为 931 倍。将百纳焦左右种子光注入放大器 Amp1 中,对三程放大输出光束进行了电光削波,受到光束发散性的影响,对比度下降至 574 倍。开关开启与关闭时记录的典型波形如图 11 所示。开关正常工作时,放大信号幅值为 6.42 V,开关关闭并去掉其前 198.48 倍的光学衰减,测量得到 ASE 本底幅值为 44.6 mV,则信

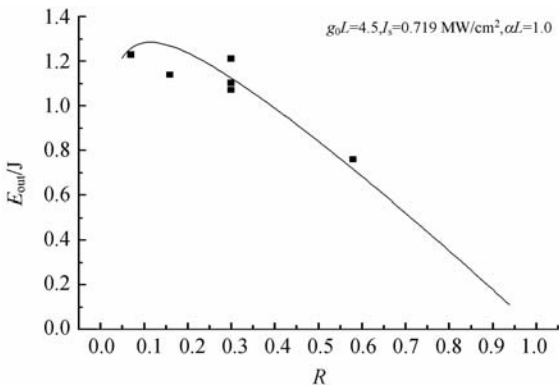
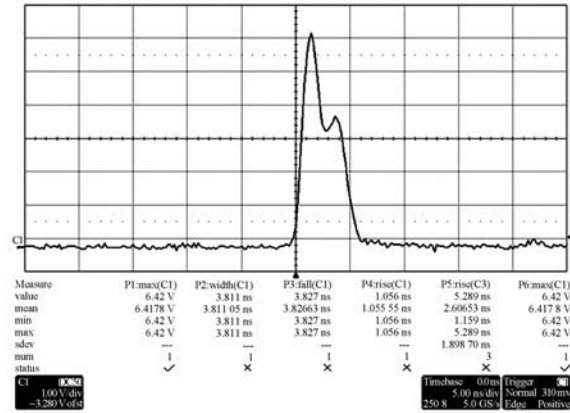
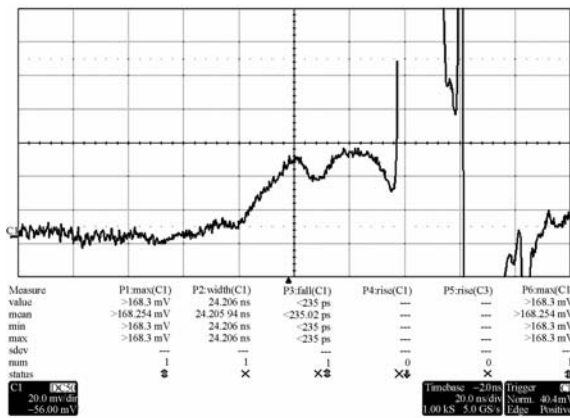


图 9 Amp 5 增益耦合法测量结果

Fig. 9 Measured results of Amp 5 gain by output coupling



(a) 开关开启  
(a) Switch on



(b) 开关关闭  
(b) Switch off

图 11 Amp 1 典型输出波形

Fig. 11 Typical laser pulse from Amp 1

号峰值对比度为  $6.42 \times 198.48 / 44.6 = 28570$  倍, 而不经削波的 Amp1 输出信号对比度仅约 46 倍。

## 4 单路窄脉冲像传递和放大实验

### 4.1 系统像传递光路设计

在高功率激光系统中, 与列阵透镜<sup>[29]</sup>、随机相位板<sup>[30]</sup>等靶前光束平滑方式不同, EFISI 光束平滑技术是在前端控制光束, 其本质是前端理想物面经 MOPA 放大链到靶面的高保真像传递, 平滑化 MOPA 系统的光路设计需要把像传递与放大器口径匹配有机结合在一起<sup>[20]</sup>。为实现高保真像传递, 放大器需要置于傅里叶频谱面上, 以避

免泵浦不均匀性对靶面(最终像面)光束空间分布的影响, 在像传递光路设计中必须考虑物面和频谱面的像传递过程。因此, 需要根据角多路 MOPA 系统要求, 进行单路系统像传递光路设计, 同时满足放大链能量提取和 EFISI 光束平滑技术要求。

根据放大器增益时间窗口, 计划研制的 100 J/10 ns XeCl 准分子激光系统采用 18 路光束提取放大器能量。利用稳态理论对放大器进行了能量提取计算, 结合光束平滑像传递要求, 在放大器光学填充计算的基础上进行了单路 MOPA 系统实验光路设计, 如图 12 所示。部分相干源输出光束进入 Amp1 三程放大器进行放大, 经电光开关削波, 送入 Amp2 双程放大器, 输出光束经 Amp3 单程放大后, 进入两台电子束放大器放大。电子束预放大器 Amp4 和主放大器 Amp5 均为双程放大器, 后腔镜曲率半径分别为 10 m 和 17.5 m。系统采用严格的像传递光路, 即通过放大器间的球面光学元件将前端理想物面严格传递到靶面, 图中标出了系统光路中物面与频谱面的像传递情况。

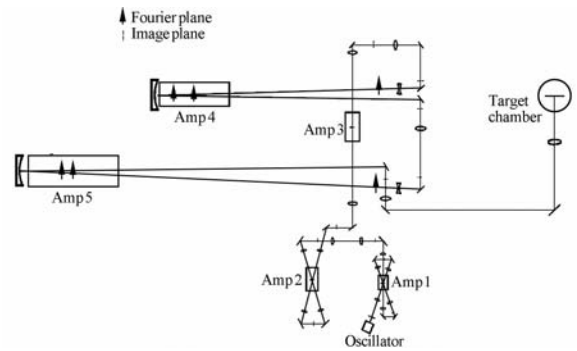


图 12 单路 MOPA 实验光学布局

Fig. 12 Optical layout of single-pass MOPA laser system

### 4.2 放电泵浦放大器放大实验

部分相干种子源的主要技术参数为: 能量约为 100 nJ 左右, 脉宽 7 ns, 物面光束直径  $\Phi 3$  mm, 电光削波驱动源电压脉宽 6 ns。进行了前端至 Amp3 的系统联调实验, 3 台放电泵浦预放大器均获得了较理想的脉冲波形, 如图 13 所示, 波形干净规则, 表明电光削波开关对 ASE 控制效果良好; 能量放大情况详见表 1, 百纳焦种子光经 3 台放电泵浦预放大器放大, 能量达到数十毫焦,

足以用来驱动电子束预放大器。实验中,为模拟未来光束编码对能量的影响,在 Amp 1 和 Amp 2 后分别加入了 3 倍和 6 倍的衰减片。

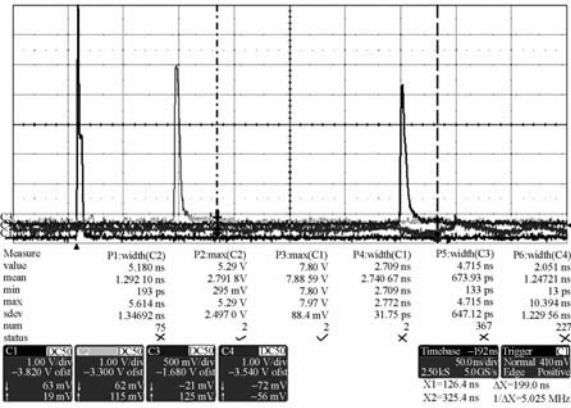


图 13 Amp 1~3(自左至右)激光放大波形

Fig. 13 Laser waveform from Amp 1~3(left to right)

表 1 Amp 1-Amp 3 激光放大结果

Tab. 1 Laser output from Amp1~3

	Amp 1	Amp 2	Amp 3
注入能量/mJ	0.000 1	0.4~0.6	3.6~8.2
输出能量/mJ	2.7~4.0	20~45	50~120
输出脉宽/ns	~4	4.5~6.5	4.2~5.7

### 4.3 电子束泵浦放大器放大实验

考虑到编码对能量的损耗,为简化实验环节,考察电子束放大器的放大能力,去掉 Amp2 与 Amp3 间的光学衰减片,Amp2 输出光束直接进入电子束放大器进行放大。前端与 Amp1 放大器工作状态与前面相同,电光削波驱动源电压脉宽为 10 ns。电子束预放 Amp4 注入能量约为 10

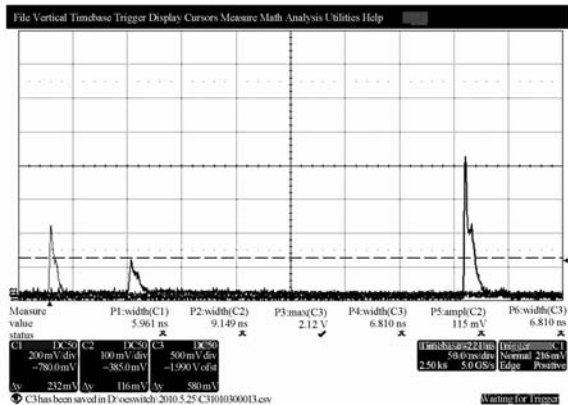


图 14 Amp 1,2,4(自左至右)激光放大波形

Fig. 14 Laser waveform from Amp 1,2,4(left to right)

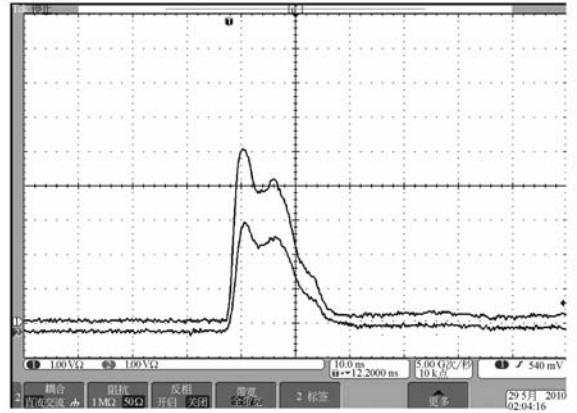


图 15 Amp 5 激光放大波形

Fig. 15 Laser waveform from Amp 5

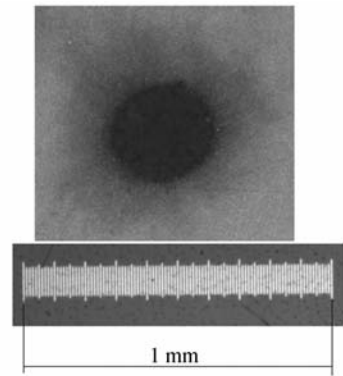


图 16 聚焦光斑图像

Fig. 16 Laser focal pattern

mJ,激光脉宽 7 ns,注入光强约为 0.02  $I_s$ ,放大输出能量为 1.0~1.3 J,放大后激光脉宽没有变化,实验测量的激光波形如图 14 所示。对于电子束主放 Amp5,注入光强约为 0.4  $I_s$ ,输出能量 5~6 J,激光脉宽为 8.0~9.7 ns,略有展宽,如图 15 所示。聚焦透镜焦距选用 1.75 m,用紫外感光干板记录了系统聚焦光斑,如图 16 所示,利用 100 倍显微镜测得直径为  $\Phi 307 \mu\text{m}$ 。

以上实验结果表明,实现了放大器有效能量提取,成功进行了系统 ASE 抑制,获得了比较理想的像传递效果,说明系统放大链和像传递光路设计是合理的。

## 5 结论

本文开展了平滑化窄脉冲高功率准分子激光系统放大技术研究,根据 EFISI 光束平滑技术要求,进行了前端技术研究,获得光束不均匀性小于

2%、能量约百纳焦、空间相干性可控的前端种子光,基于脉冲堆积研究了脉冲整形方法;测量了激光放大器的增益特性,研制了紫外波段电光削波开关,利用该开关进行了有效的 ASE 控制;在单路 MOPA 系统实验中,获得了输出能量 5~6 J、激光脉宽约 10 ns、聚焦光斑约  $\Phi 300 \mu\text{m}$  的系统

输出实验结果。

总之,高功率准分子激光系统属于比较复杂的系统工程,本文通过单元技术和单路 MOPA 系统实验研究,初步获得了预期的实验结果,对系统有了比较全面的深入的认识,为后续工作的开展奠定了良好基础。

## 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(5):497-531.
- [2] OBENSCHAIN S P, BONDER S E, COLOMBANT D G, *et al.*. The Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments [J]. *Phys. Plasmas*, 1996, 3(5):2098-2107.
- [3] OWADANO Y, OKUDA I, MATSUMOTO Y. Overview of Super-ASHURA KrF Laser Program [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44: 91-96.
- [4] HIRST G J, DIVALL E J, EDWARDS C B, *et al.*. Progress toward ultrahigh intensities with the Titania krypton fluoride laser system[C]. *CLEO'97*, 1997:523.
- [5] ZVORYKIN V D, LEBO I G. Laser and target experiments on KrF GARPUN laser installation at FI-AN[J]. *Laser and Particle Beams*, 1999, 17(1): 69-88.
- [6] TURNER T P, JONES J E, CZUCHLEWSKI S J, *et al.*. Configuration and performance of the Los Alamos Aurora KrF/ICF laser system[J]. *SPIE*, 1990, 1225:23-33.
- [7] SETHIAN J D, PAWLEY C J, OBENSCHAIN S P, *et al.*. The Nike electron-beam-pumped KrF laser amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(2):221-228.
- [8] LEHECKA T, LEHMBERG R H, DENIZ A V, *et al.*. Production of high energy, uniform focal profiles with the Nike laser[J]. *Optics Communications*, 1995, 117(6):485-491.
- [9] SETHIAN J D, MATTHEW C M, GIULIANI J L, *et al.*. Electron beam pumped krypton fluoride lasers for fusion energy[J]. *IEEE*, 2004, 92(7): 1043-1056.
- [10] WOLFORD M F, MYERS M C, GIULIANI J L, *et al.*. Electra: repetitively pulsed 700 J, 100 ns electron beam pumped KrF laser[J]. *SPIE*, 2006, 6101:61011M1-10.
- [11] OBENSCHAIN S P, PAWLEY C J, GERBER K, *et al.*. Uniform target acceleration and imprinting studies with the Nike KrF lasers[J]. *Lasers and Electro-Optics*, 1997, *CLEO'97*:351-352.
- [12] BURNS P M, MYERS M, SETHIAN J D, *et al.*. Development of a continuous multi-thousand shot electron beam pumped KrF rep-rate laser for fusion energy[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 52(3):445-453.
- [13] WOLFORD M F, MYERS M C, GIULIANI J L, *et al.*. Electra-repetitively pulsed 700-J 100-ns electron beam pumped KrF laser[C]. *SPIE*, 2006, 6101:61011M1-10.
- [14] OBENSCHAIN S P, SETHIAN J D, SCHIMTT A J. A laser based fusion test facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 56(2):594-603.
- [15] 刘晶儒, 袁孝, 甘雨刚, 等. 电子束泵浦百焦耳级准分子激光实验研究[J]. *光学学报*, 1996, 16(1):1-6.
- [15] LIU J R, YUAN X, GAN Y G, *et al.*. Experimental study on a 100 J level excimer laser pumped by electron beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(1):1-6. (in Chinese)
- [16] 刘晶儒, 赵学庆, 易爱平, 等. 高功率准分子激光技术及应用研究进展[C]. 昆明:第五届全国准分子激光学术研讨会文集, 2006:141-150.
- [16] LIU J R, ZHAO X Q, YI A P, *et al.*. Progress of high power excimer laser technology and application[C]. *Kunming, The 5th National Workshop on Excimer Laser*, 2006:141-150. (in Chinese)
- [17] LOSEV V F, KOVALCHUK B M, TARASEN-

- KO V F, *et al.*. Wide-aperture excimer laser system[J]. *Quantum Electronics*, 2006, 36(1): 33-38.
- [18] LIU J R, ZHAO X Q, YI A P, *et al.*. Experimental study on a long-pulse excimer laser system [J]. *SPIE*, 2005, 5627: 242-246.
- [19] ZHAO X Q, LIU J R, YI A P, *et al.*. The diagnostics of plasmas produced by a high power excimer laser system [J]. *SPIE*, 2007, 6346: 6346301-7.
- [20] LEHMBERG R H, GOLDFAR J. Use of incoherence to produce smooth and controllable irradiation profiles with KrF fusion lasers [J]. *Fusion Technology*, 1987, 11(5): 532-541.
- [21] DENIZ A V, OBENSCHAIN. A KrF oscillator system with uniform profiles [J]. *Optics Communication*, 1994, 106: 113-122.
- [22] 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.
- ZHAO X Q, XIE Y J, YUAN X, *et al.*. Experimental study on partial coherence source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3): 408-410. (in Chinese)
- [23] 王春, 陈绍和, 许发明, 等. ICF 固体激光驱动器前级系统中的脉冲整形 [J]. *量子电子学报*, 2000, 17(6): 479-492.
- WANG CH, CHEN SH H, XU F M, *et al.*. Pulse shaping in front-end system of solid state laser driver for ICF [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2000, 17(6): 479-492. (in Chinese)
- [24] 王双义, 吕志伟, 林殿阳, 等. KrF 激光脉冲整形研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(11): 1669-1673.
- WANG SH Y, LU ZH W, LIN D Y, *et al.*. KrF laser pulse shaping by pulse stacking [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(11): 1669-1673. (in Chinese)
- [25] FRANTZ L M, NODVIK J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. *J. Appl. Phys*, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [26] 吕百达, 张彬. 高功率激光放大器中的光传输理论 [J]. *激光技术*, 1997, 21(5): 288-292.
- LU B D, ZHANG B. Theory of the high power laser propagation through amplifiers [J]. *Laser Technology*, 1997, 21(5): 288-292. (in Chinese)
- [27] SCHINDER G M. Optimum output efficiency of homogeneously broadened lasers with constant loss [J]. *IEEE J of Quantum Electronics*, 1980, 16(5): 546-549.
- [28] 邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊, 等. 用阵列透镜实现大焦斑面的均匀照明 [J]. *中国激光*, 1985, 12(5): 257-260.
- DENG X M, LIANG X C, CHEN Z Z, *et al.*. Uniform illumination of large focal targets using a lens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1985, 12(5): 257-260. (in Chinese)
- [29] KATO Y, MIMA K, MIYANAGA M, *et al.*. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma instability suppression [J]. *Physics Review Letter*, 1984, 53(11): 1057-1060.

#### 作者简介:

**赵学庆**(1966—),男,河北阜城人,研究员级高级工程师,1989年于哈尔滨工业大学获学士学位,2005年于国防科技大学获硕士学位,主要从事高功率激光及其应用方面的研究。E-mail: zqx.hb@163.com

**刘晶儒**(1945—),女,辽宁沈阳人,研究员,博士生导师,1967年毕业于哈尔滨工业大学,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: liujingru2k3@vip.sina.com

易爱平(1969—),男,江西东乡人,硕士,副研究员,1991年于厦门大学获学士学位,2002年于国防科技大学获硕士学位,现主要从事激光技术及应用、脉冲功率技术等方面的研究。E-mail: aiping0707007@hotmail.com

薛全喜(1980—),男,山东日照人,助理研究员,2004年于兰州大学获得学士学位,2007年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高功率激光技术和激光等离子体物理方面的研究。E-mail: quanxixue@163.com

华恒祺(1980—),男,江苏无锡人,助理研究员,2002年于浙江大学获得学士学位,2006年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光测量和光路自动准直方面的研究。E-mail: dan-nisqi@sina.com

## ● 下期预告

# 采用标准轴承的光电经纬仪轴系误差修正

冯栋彦<sup>1,2</sup>,高云国<sup>1</sup>,张文豹<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了满足小型跟踪架低成本、短周期和高互换性的要求,提出了采用标准轴承轴系代替现有研磨轴系的轴系改造方法。分析了采用标准轴承后的轴系误差源,根据跟踪架的使用多为远距离探测跟踪等特点,给出变轴线晃动为轴线平移的消差方法。设计了水平轴系实验模型,采用 p5 级深沟球轴承进行实验测量,并用傅里叶谐波分析方法对数据进行了分析。实验结果表明:水平轴左右轴承安装时,轴承内圈径向跳动最大方向安装在同一方向时轴系晃动最大误差为  $2.430''$ ;轴承内圈径向跳动最大方向安装在相差时轴系晃动最大误差为  $6.126''$ 。轴承内圈径向跳动最大方向安装在同一方向,使跳动误差同步同周期变化可以较大减少轴系晃动,验证了消差方法的可行性。采用高精度等级的轴承并采用本消差方法可以满足一般中小型跟踪架的精度要求。